



**Politechnika
Śląska**

Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki

mgr inż. Dariusz ZIELIŃSKI

Wykorzystanie algorytmu genetycznego do doboru elementów ochronnika
interfejsu komunikacyjnego w urządzeniach przytorowych

ROZPRAWA DOKTORSKA

PROMOTOR

dr hab. inż. Damiana Grzechca, prof. Pol. Śl.

OPIEKUN PRZEMYSŁOWY

mgr inż. Marek Górnioczek

GLIWICE 2023

Spis treści

Wstęp.....	6
1. Wprowadzenie.....	14
1.1. Budowa systemu sterowania ruchem kolejowym.....	14
1.2. Okablowanie stosowane w aplikacjach kolejowych.....	16
1.3. Interfejs komunikacyjny urządzeń przytorowych.....	21
2. Model przewodu komunikacyjnego stosowanego w kolejnictwie.....	31
2.1. Budowa przewodów	31
2.2. Model odcinka przewodu komunikacyjno-zasilającego	35
2.3. Przyspieszone starzenie przewodów	37
2.4. Opis analityczny degradacji parametrów przewodów	44
2.5. Wpływ starzenia na charakterystykę częstotliwościową przewodu	51
2.5.1. Charakterystyka amplitudowa i opóźnienie grupowe	54
2.5.2. Zmiana impedancji wejściowej i wyjściowej linii transmisyjnej.....	56
2.6. Podsumowanie	59
3. Dobór elementów ochronnika z wykorzystaniem algorytmu genetycznego	61
3.1. Model ochronnika przeciwprzepięciowego interfejsu komunikacyjnego	62
3.2. Parametry krytyczne komponentów	64
3.2.1. Iskrownik	65
3.2.2. Transile	66
3.2.3. Rezystory	67
3.2.4. Kondensator.....	68
3.3. Kodowanie problemu.....	69
3.3.1. Binarny wektor wejściowy	71
3.3.2. Zestawienie parametrów granicznych komponentów	72
3.4. Testowy sygnał udarowy	74
3.5. Funkcja celu.....	76
3.6. Parametry wewnętrzne algorytmu genetycznego	81
3.7. Dobór konfiguracji algorytmu genetycznego	83
3.8. Omówienie wyników	84
3.8.1. Napięcie udarowe 6kV – wariant 1	87

3.8.2.	Napięcie udarowe 650V – wariant 2	91
3.8.3.	Napięcie udarowe 1kV, 2kV i 4kV	92
3.8.4.	Napięcie udarowe 10kV	97
3.9.	Podsumowanie	100
4.	Wpływ starzenia przewodu na dobór elementów ochronnika	102
5.	Wdrożenie	107
6.	Podsumowanie	109
7.	Dodatek	112
7.1.	Wykresy pozostałych funkcji aproksymujących	112
7.2.	Wykresy charakterystyk amplitudowych i opóźnienia grupowego.....	119
7.3.	Wyniki symulacji otrzymanej konfiguracji ochronnika dla narażeń pośrednich	121
	Bibliografia.....	125
	Spis rysunków	136
	Spis tabel	138

Wstęp

Ochronniki przeciwprzepięciowe są integralną częścią przewodowych instalacji przemysłowych. Wykorzystuje się je do ochrony interfejsów zasilających oraz komunikacyjnych, jest to podyktowane koniecznością spełnienia normy przemysłowej PN-EN 61000-4 [1] definiującej wymagania odporności na napięcia udarowe. Szczególnym przypadkiem zastosowania ochronników przeciwprzepięciowych jest przemysł kolejowy. Wymagania dla urządzeń stosowanych na kolei definiuje norma PN-EN 50121-4 [2], zharmonizowana z dyrektywą europejską 2014/30/EU dotyczącą kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń. Wartości narażeń przedstawione w owej normie wyznaczają jedynie minimalną odporność, jaką musi się charakteryzować urządzenie. Jednak ze względu na ciężkie warunki pracy urządzeń w obszarach kolejowych:

- a) obecność wysokich napięć (25kV AC [3]),
- b) przepływ bardzo wysokich prądów rzędu 4000A [4] podczas przyspieszania pociągów,
- c) oddziaływanie dziesiątek tysięcy amper podczas wyładowań atmosferycznych [5] bezpośrednio w szynę.

Istnieje konieczność projektowania oraz weryfikacji ochronników na znacznie większe narażenia niż te zawarte w normie PN-EN 50121-4 [2]. Znajduje to odzwierciedlenie w aktualizowanych wymaganiach klientów, którzy coraz częściej definiują własne minimalne odporności aparatury kolejowej na napięcia udarowe przewyższające te zdefiniowane w normie PN-EN 50121-4 [2]. Celem rozprawy jest opracowanie metody doboru elementów ochronnika interfejsu komunikacyjnego, co prowadzić powinno do poprawy niezawodności działania aparatury oraz zmniejszenia liczby usterek pojawiających się wskutek działania przepięć. Tego typu wyzwania najczęściej pojawiają się w rejonach o szczególnie dużym narażeniu na wyładowania atmosferyczne np. Malezja [11].

Naturalnym etapem wdrażania nowych urządzeń lub modernizacji istniejących jest konieczność przeprowadzenia symulacji najbardziej wymagających testów [6], by minimalizować prawdopodobieństwo niepowodzenia w procesie certyfikacji. Szczegóły tego procesu opisane są w normie PN-EN 50129-1 [7]. Zakres kryteriów, jakie należy

spełnić, jest wielowymiarowy począwszy od struktury organizacyjnej zespołu, po wymagania programistyczne, kończąc na szerokim spektrum wymagań środowiskowych, których częścią są badania dotyczące kompatybilności elektromagnetycznej obejmujące napięcia udarowe. Narażenie to, ze względu na wysoki poziom energii, jaki należy rozproszyć by uniknąć uszkodzenia urządzenia, zostało wykorzystane w tej pracy w celu opracowania autorskiej metody zwiększania odporności urządzeń przytorowych.

Spośród urządzeń stosowanych w przemyśle kolejowym szczególną grupę stanowią urządzenia przytorowe, które są bezpośrednio narażone na wyżej wymienione zagrożenia, tj. wysokie napięcia oraz prądy, ekspozycja na skutki wyładowań atmosferycznych. Dużą część urządzeń przytorowych stanowią obwody detekcji niezajętości, czyli aparatura pozwalająca wypracować bezpieczny („pewny”) stan odcinka torowego zwanego sekcją. Informacja ta jest wykorzystywana do sterowania ruchem pojazdów szynowych oraz wyzwalaniem pozostałych urządzeń przytorowych (np. napędy rogatkowe, sygnalizatory świetlne, napędy zwrotnicowe itd.).

Najprężniej rozwijającą się grupą systemów detekcji niezajętości są systemy oparte na czujnikach kół [8], które wypierają już przestarzałe obwody torowe. Systemy liczników osi są lepsze od obwodów torowych pod wieloma względami, jednak najważniejszym z nich jest zwiększona odporność na zakłócenia elektromagnetyczne. Ponieważ obwód torowy wykorzystuje szyny, jako elementy obwodu elektrycznego do badania impedancji pomiędzy nimi (pojawienie się pociągu skutkuje małą impedancją pomiędzy szynami), wobec czego wszelkie prądy powrotne, pochodzące z przekształtników napięcia na pojazdach szynowych, są w stanie zakłócić działanie obwodu torowego. Ponadto impedancja pomiędzy szynami może być zaniżona w stanie bez pociągu poprzez lokalne podtopienia lub zanieczyszczenie torowiska substancjami chemicznymi o dużej konduktywności (kopalnie węgla, siarki, rud metali itd.), co negatywnie wpływa na zaufanie do działania tego typu urządzeń. Dodatkowo obwód torowy wyposażony jest jedynie w wyjście przekątnikowe, wobec czego nie może przysyłać informacji diagnostycznych, takich jak: wewnętrzne poziomy napięć referencyjnych, temperatura wewnątrz urządzenia, status urządzenia itd.

Czujnik koła montowany jest bezpośrednio na szynie, więc jego ekspozycja na niekorzystne warunki środowiskowe jest duża. Nowoczesne rozwiązania czujników kół wykorzystują cyfrowe interfejsy komunikacyjne do wymiany informacji z jednostką centralną. Daje to wiele korzyści: wysoki stopień bezpieczeństwa przesyłanych informacji (dane zabezpieczane są na wielu poziomach: stemple czasowe, sumy kontrolne,

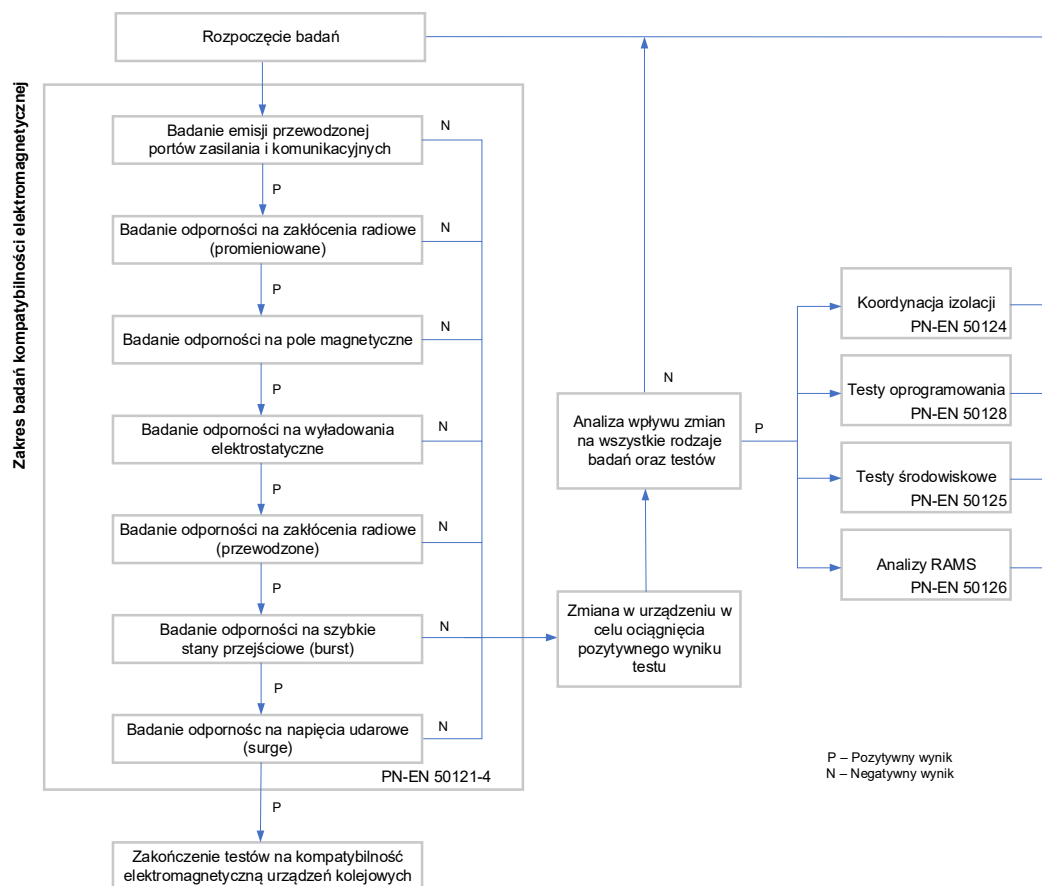
potwierdzenia odebrania danych itd.). Ponadto umożliwiają tworzenie systemów obejmujących rozległe obszary poprzez rozdzielenie linii zasilających i komunikacyjnych.

Należy również zaznaczyć, iż zgodnie z normą PN-EN 50129 [9] czujniki koła powinny spełniać najwyższy możliwy poziom bezpieczeństwa SIL-4 (Safety Integrity Level 4), ponieważ ich usterka ma bezpośredni wpływ na ludzkie zdrowie lub życie. Sam ochronnik interfejsu komunikacyjnego nie chroni więc tylko modułu komunikacyjnego, ale także moduły odpowiedzialne za detekcję liczby osi przejeżdżających pojazdów, a ta informacja jest krytyczna z punktu widzenia bezpieczeństwa działania systemu detekcji niezajętości, ponieważ to na jej podstawie podejmowana jest decyzja o możliwości wyprawienia pociągu na dany odcinek toru (sekcję).

Głównym celem pracy jest opracowanie metody doboru elementów ochronnika, która zwiększy odporność na napięcia udarowe cyfrowego interfejsu komunikacyjnego CAN (Controller Area Network) wykorzystywanego do transmisji danych pomiędzy urządzeniami przytorowymi (np. czujnikami koła), a jednostką centralną, ponieważ jest on najbardziej eksponowanym na narażenia elektromagnetyczne interfejsem. Długie linie transmisyjne (do 3,5km), możliwość indukowania się napięć z przyległych systemów, sprzężenia pojemnościowe z innymi systemami, wysokie ryzyko uszkodzenia lub degradacji okablowania niekorzystnie wpływają na warunki pracy i pogarszają dostępność systemu detekcji niezajętości. Konieczne jest więc zapewnienie odpowiedniego stopnia ochrony interfejsu komunikacyjnego celem zapobieżenia ewentualnym uszkodzeniom, które mogłyby spowodować niedostępność systemu sterowania ruchem kolejowym. Nieodzowną częścią tego systemu jest okablowanie, które spełnia w nim bardzo ważną rolę. Jednakże w literaturze obecnie brak jest opracowań poruszających zagadnienie samego modelu czteroprzewodowego przewodu zasilającego – komunikacyjnego wykorzystywanego w kolejnictwie. Jego zaprojektowanie jest konieczne z dwóch powodów. Po pierwsze jest integralną częścią systemu i jego wpływ na dobór elementów ochronnika pozostaje niewyjaśniony. Druga kwestia dotyczy charakterystycznych warunków pracy, kiedy to ów przewód wystawiony na wiele niekorzystnych czynników, może ulec uszkodzeniu zewnętrznego izolatora lub degradacji starzeniowej, a więc procesom, które dopiero po dłuższym okresie mogą doprowadzić do braku dostępności systemu sterowania ruchem kolejowym.

Ponadto sam proces dopuszczenia urządzeń na rynek kolejowy jest bardzo czasochłonny, skomplikowany i kosztowny. Składają się na niego wieloetapowe analizy oraz testy w wyspecjalizowanych laboratoriach na terenie całej Europy, skłania to ku

konieczności podjęcia się bardzo dobrego przygotowania przed rozpoczęciem takiego przedsięwzięcia. Na rys. 1 przedstawiono uogólniony przebieg badań z zakresu kompatybilności elektromagnetycznej, jakim poddawane są urządzenia przytorowe oraz możliwy wpływ na pozostałe testy certyfikacyjne.



Rys. 1. Uogólniony przebieg badań na kompatybilność elektromagnetyczną urządzeń kolejowych według normy PN EN 50121-4 [2] oraz wpływ na pozostałe testy certyfikacyjne na podstawie normy PN-EN 50129 [7].

Badania odporności na napięcia udarowe oraz wyładowania elektrostatyczne są jedynymi testami, które mają charakter destruktywny oraz ich wpływ nie może być zmitygowany przy pomocy zmian w oprogramowaniu, wobec czego są to testy krytyczne z punktu widzenia projektów, ponieważ wymagają zmian w strukturze wyrobu. Autor wybrał napięcia udarowe ze względu na uwarunkowania środowiska kolejowego (wpływ wyładowań atmosferycznych, sprzężenia pojemnościowe pomiędzy elementami infrastruktury itd.). Wyładowania elektrostatyczne natomiast charakteryzuje głównie wpływ

serwisu na działanie urządzenia, w przemyśle kolejowym jest on nieznaczący, ze względu na okoliczności pracy (przeгляд tylko raz na rok lub na skutek awarii).

Ponadto należy dodać, iż każde badanie dotyczące kompatybilności elektromagnetycznej składa się z kilku lub kilkunastu przypadków testowych, w zależności od liczby portów wejścia-wyjścia. Niepowodzenie w jakimkolwiek teście, skutkujące zmianą wyrobu, powoduje konieczność powtórzenia wszystkich poprzednich testów. To natomiast znacząco wydłuża czas potrzebny na realizację projektu oraz podnosi jego koszty.

W stosunku do urządzeń kolejowych wymaga się, by ich cykl życia wynosił co najmniej 25 lat (preferowane 40 lat). W przypadku rozwiązań elektronicznych stanowi to duże wyzwanie, ponieważ większość komponentów elektronicznych oferowana jest na rynku jedynie przez kilkanaście lat lub krócej. Istnieje zatem uzasadniona potrzeba optymalizacji procesu doboru elementów modułów ochronnych zarówno w trakcie ich projektowania, jak i podczas ich sprzedaży, z uwagi na ograniczenia dostępności komponentów elektronicznych.

Artykuł [10] udowadnia ważność problemu w aplikacjach kolejowych i wskazuje drogę analiz, a także wskazuje możliwe podłączenie ochronnika. Przy czym proponowane jest podłączenie ochronników do szyn, tym samym zmniejszając impedancję pomiędzy urządzeniem przytorowym a szyną, która stanowi naturalny element systemu zasilania pociągów, powoduje to zwiększenie wpływu zakłóceń w chronionych interfejsach (zasilania i komunikacyjnym). Kolejnym opracowaniem omawiającym zastosowania ochronników przeciwprzepięciowych jest [11], jednakże nie porusza ono kwestii doboru komponentów ochronnika, a raczej udowadnia konieczność stosowania zabezpieczeń przeciwprzepięciowych w aplikacjach kolejowych. Dobór elementów ochronnika przeciwprzepięciowego [12]–[14] jest więc zagadnieniem nietrywialnym i w świetle ww. problemów pożądanym, co powoduje, że zasadnym jest opracowanie dedykowanego podejścia, które uwzględni specyfikę wymagań branży kolejowej. W związku z tym Autor pracy postawił sobie następujący cel pracy:

Opracowanie metody doboru elementów ochronnika przeciwprzepięciowego cyfrowego interfejsu komunikacyjnego (magistrala CAN) z wykorzystaniem algorytmu genetycznego dla urządzeń przytorowych (np. czujnik koła) na zgodność z normą PN-EN 50121-4 [2] pod kątem narażeń napięciami udarowymi.

Mając na uwadze cel pracy, postawiono następujące tezy:

1. Dobór elementów ochronnika interfejsu komunikacyjnego za pomocą algorytmu genetycznego prowadzi do zwiększenia odporności urządzenia przytorowego (czujnik koła) na narażenia napięciami udarowymi zdefiniowanymi w normie PN-EN 50121-4 [2].
2. Wykorzystanie procesu sztucznego postarzania przewodu komunikacyjno-zasilającego umożliwia wyznaczenie funkcji degradacji parametrów odcinka jednostkowego kabla z uwzględnieniem napięć udarowych zgodnych z normą PN-EN 50121-4 [2].

Rozprawa doktorska została opracowana w następujący sposób. W pierwszej części zaproponowano model odcinka jednostkowego przewodu wykorzystywanego do łączenia urządzeń przytorowych w systemach detekcji niezajętości, by jak najlepiej odzwierciedlić warunki pracy interfejsów komunikacyjnych czujników koła. W tym celu zaprezentowano trzy najczęściej wykorzystywane typy przewodów w aplikacjach kolejowych. Następnie przy pomocy badań zweryfikowano wpływ naruszenia zewnętrznego izolatora na parametry odcinka jednostkowego owego przewodu. Na podstawie zmiany parametrów odcinka wskazano nieoczywistą usterkę, mającą wpływ na działanie systemu.

Drugi etap pracy dotyczy doboru komponentów w istniejącym ochronniku z wykorzystaniem algorytmu genetycznego w celu osiągnięcia zamierzonej odporności na narażenia napięciami udarowymi zgodnymi z normą PN-EN 50121-4 [2]. By precyzyjnie zbadać zachowanie ochronnika przeciwprzepięciowego interfejsu komunikacyjnego podczas narażenia, wykorzystano model przewodu opracowany w części pierwszej pracy, ponieważ jest on integralną częścią systemu.

Na potrzeby powyższego zadania zintegrowano ze sobą oprogramowanie Matlab (wersja R2021a) umożliwiające obliczenia naukowe oraz inżynierskie, a także program LTspice (wersja XVII 07.02.2019) – przeprowadzający symulacje analogowych obwodów elektronicznych. Tym samym stworzono środowisko umożliwiające wykorzystanie algorytmu genetycznego do doboru komponentów wchodzących w skład ochronnika przeciwprzepięciowego magistrali CAN. Bardzo ważnym etapem tej części było zaprojektowanie funkcji celu, która pozwala na ocenę danej konfiguracji (specyfikacji) ochronnika, poprzez analizę wszystkich krytycznych parametrów zaproponowanych komponentów (mocy średniej, mocy chwilowej, napięcia maksymalnego, prądu maksymalnego), a elementy zbioru wartości funkcji opisują czy wszystkie kluczowe

wartości nie są przekroczone, a tym samym, czy żaden element nie zostanie uszkodzony podczas narażania napięciem udarowym. Ponadto analizy poszczególnych parametrów krytycznych takich, jak (mocy średniej, mocy chwilowej, napięcia maksymalnego, prądu maksymalnego) przedstawiają informacje na temat marginesów z jakimi pracują wskazane elementy, co znacznie poszerza zakres wiedzy projektującego. Porównując zaproponowane podejście z badaniem na zgodność z normą PN-EN 50121-4 [2], które daje jedynie odpowiedź: o przejściu testu lub o uszkodzeniu ochronnika napięciem udarowym stwierdzić można, że proponowane rozwiązanie jest nie tylko bardziej uniwersalne, ale również daje zapas bezpieczeństwa i powinno przyczyniać się do spełnienia wyżej wymienionej normy w minimalnej liczbie prób laboratoryjnych.

Dogłębna analiza elementów ochronnika ułatwia znacznie proces doboru zamienników w dobie ograniczonej podaży komponentów na rynku elektronicznym w wyniku zawirowań gospodarczych na przestrzeni lat 2020 – 2022. Zmiany w specyfikacji ochronnika najczęściej implikowały konieczność ponownego badania, co wiązało się z opóźnieniami oraz kosztami w dostarczeniu produktu na rynek.

W rozdziale pierwszym zostaną przedstawione podstawowe informacje na temat systemów zarządzania ruchem kolejowym. Omówione będą czynniki wpływające negatywnie na infrastrukturę systemów Sterowania Ruchem Kolejowym (SRK), w której skład wchodzi okablowanie oraz interfejsy komunikacyjne urządzeń przytorowych.

Rozdział drugi rozpoczyna się prezentacją najczęściej wykorzystywanych typów kabli w systemach SRK. W dalszej części przedstawiony jest model jednostkowego odcinka kabla zasilająco-komunikacyjnego, który zostanie wykorzystany w trakcie eksperymentu mającego na celu zasymulowanie degradacji zewnętrznego izolatora kabla. Opracowane wyniki posłużą do wyselekcjonowania funkcji opisującej zmiany degradacyjne modelu jednostkowego kabla. Funkcja aproksymująca zostanie wykorzystana między innymi, do doboru metody weryfikacji stanu okablowania na obiektach.

Rozdział trzeci zaczyna się prezentacją topologii ochronnika przeciwprzepięciowego. Następnie zebrane są informacje dotyczące kluczowych parametrów wykorzystanych komponentów. Specyfikacja tych komponentów została wyrażona w postaci binarnego wektora wejściowego. Przedstawiono dobór przypadku testowego. Opisana została metodologia projektowania funkcji celu oraz szczegółowy opis wyznaczenia współczynnika kary. Funkcja celu jest użyta do weryfikacji jakości doboru elementów ochronnika przez algorytm genetyczny (GA). Ustęp zawiera również prezentacje wyników oraz analizę przypadków pośrednich narażeń.

Rozdział czwarty przedstawia studium wpływu degradacji okablowania z wykorzystaniem funkcji degradującej (rozd. drugi) na parametry pracy elementów ochronników przeciwprzepięciowych urządzeń przytorowych.

Rozdział piąty opisuje aspekty wdrożeniowe opracowanej metody i w konsekwencji wyniki działania tej metody oraz ich korzyści dla zwiększania niezawodności urządzeń produkowanych przez firmę ALSTOM ZWUS.

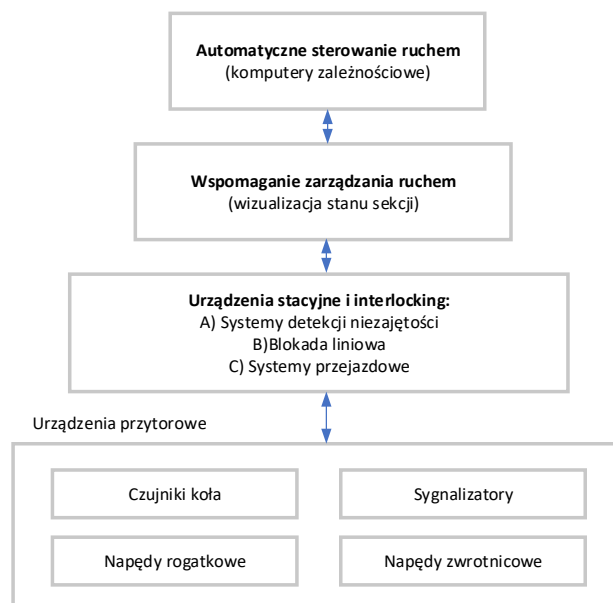
Rozdział szósty stanowi zestawienie najważniejszych wniosków i osiągnięć zaprezentowanych w niniejszej rozprawie.

1. Wprowadzenie

1.1. Budowa systemu sterowania ruchem kolejowym

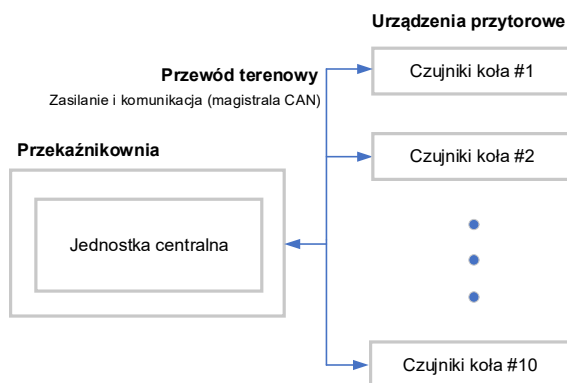
To właśnie kolej, w ostatnich latach, notuje wzrost zainteresowania inwestorów [15], ponieważ pozwala w sposób bezpieczny i szybki, transportować wszelkiego rodzaju towary oraz ludzi, przekłada się to na rosnące wymagania społeczeństwa w stosunku do transportu kolejowego w zakresie punktualności oraz jego dostępności [16]–[18], w dalszej mierze oczekiwania te znajdują swoje odzwierciedlenie w minimalizowaniu usterek i ograniczaniu niedostępności systemu sterowania ruchem kolejowym.

Struktura systemu sterowania ruchem kolejowym została przedstawiona na rys. 2, u jej podstawy wykorzystywane są właśnie urządzenia przytorowe, takie jak czujniki koła, sygnalizatory (semafony), napędy rogatkowe oraz napędy zwrotnicowe. Należy mieć świadomość, iż systemy zarządzania ruchem kolejowym, mogą dotyczyć pojedynczych małych stacji, automatycznych przejazdów kolejowych [19], jak i znacznie większych obszarów, jak np. całe szlaki (np. Centralna Magistrala Kolejowa o długości 223km). Duże obszary podzielone są na mniejsze grupy podlegające pod Lokalne Centra Sterowania (LCS), które współpracują ze sobą tworząc całą sieć połączeń i umożliwiając bezpieczne i efektywne prowadzenie ruchu kolejowego z wykorzystaniem dostępnej infrastruktury.



Rys. 2. Struktura systemów zarządzania ruchem kolejowym [20].

Wszystkie powyższe urządzenia przeszły daleką ewolucję od czasu ekspansji kolei, obecnie większość z nich wykorzystuje do swojego działania przewód wyposażony w dwie pary żył: pierwsza umożliwia zasilanie urządzenia, druga służy do wymiany danych z systemem nadrzędnym. W systemach detekcji niezajętości najczęściej wykorzystuje się magistralę CAN, do której można podłączyć do 10 urządzeń (czujników kół). Typową architekturę podłączenia czujników koła przedstawiono na rys. 3. Często wykorzystywanym przewodem, do tego typu połączeń, jest $2 \times 2 \times 1,3\text{mm}^2$ ze skręconymi w parach przewodami. Jest to rozwiązanie bardzo elastyczne (duża liczba urządzeń na pętli) i ekonomiczne (wymagany jest tylko jeden przewód do zasilania oraz komunikacji).



Rys. 3. Uproszczona struktura podłączenia czujników koła do jednostki centralnej.

Magistrala CAN wykorzystywana jest do przesyłania informacji kluczowych dla działania systemu, takich jak np. liczba zliczonych osi przez czujnik koła, rozkaz zapalania odpowiedniego światła na semaforze, a także do raportowania stanu urządzenia (praca poprawna lub awaria). Informacje te są przetwarzane przez systemy nadrzędne i na ich podstawie podejmowane są decyzje, np. przez dyżurnego ruchu o możliwości wyprawienia pociągu na szlak lub przez komputery zależnościowe, które wypracowują odpowiednie dyspozycje, ruch prowadzony jest w pełni automatycznie na podstawie założonych reguł, pod nadzorem operatorów.

Okablowanie strukturalne systemu zarządzania ruchem kolejowym jest jednym z najważniejszych jego elementów [18], [19], dodatkowo należy zauważyć, iż ingerencje lub naprawy tych instalacji wiążą się z dużymi kosztami spowodowanymi pracami budowlanymi na dużym obszarze [20]. Wymagają specjalistycznego sprzętu do transportowania, rozwijania oraz konfekcji przewodów. Wszystko to sprawia, iż przewody wymieniane są jedynie w ostateczności, a sam proces łączy się ze znacznymi ograniczeniami lub całkowitym zaprzestaniem ruchu pociągów na danym obszarze. Jest to sytuacja, której wszyscy operatorzy kolejowi unikają za wszelką cenę.

1.2. Okablowanie stosowane w aplikacjach kolejowych

Okablowanie w przemyśle kolejowym stanowi trzon systemów zarządzania ruchem kolejowym, których zadaniem jest przesyłanie informacji w sposób bezpieczny oraz pewny. Jednocześnie przewody te wystawione są na szereg bardzo niesprzyjających warunków środowiskowych, mających wpływ na działanie systemu zarządzania ruchem kolejowym. Degradujący wpływ na okablowanie strukturalne wynika z:

- narażeń mechanicznych [15] zarówno podczas przejazdów pociągów (wibracje, udary mechaniczne), jak podczas prac utrzymaniowych szlaków kolejowych, takich jak: szlifowanie szyn, podbijanie podkładów itd. (bezpośrednie oddziaływanie – możliwość przecięcia lub znacznego naruszenia zewnętrznej izolacji),
- oddziaływania wody (długotrwała lub okresowa praca pod wodą – np. w obszarze Niderlandów) oraz substancji, które są w niej rozpuszczone [21], a których występowanie zależy od lokalizacji oraz charakteru danego odcinka torowego (kopalnie soli, węgla lub zakłady chemiczne tworzą bardzo agresywne środowiska w najbliższym obszarze),

- promieniowania słonecznego, którego częścią jest promieniowanie ultrafioletowe (UV), mające destruktywny wpływ na wiele tworzyw sztucznych [22], szczególnie w regionach o dużym nasłonecznieniu, np. Indie,
- działalności gryzoni oraz osób postronnych prowadzących czynności na bezpośrednią szkodę właściciela infrastruktury,
- długiego czasu eksploatacji - preferowany przez klientów to powyżej 25 lat [23],
- wystawiania izolacji przewodów na przebicia w wyniku wyładowań atmosferycznych [24]–[26],
- pracy w szerokim zakresie temperatur [27] (np. region syberyjski wymaga zakresu temperatur pracy od -50°C do 70°C).

Na infrastrukturę kolejową negatywnie wpływają również zmiany klimatu [28]–[30], które potęgują występowanie tak ekstremalnym zjawisk, jak powodzie, huragany, gwałtowne burze itd. Niestety intensyfikują one okresowe braki w dostępności systemu zarządzania ruchem kolejowym. W rezultacie kable te ulegają degradacji, z których najczęściej obserwowanym jest uszkodzenie zewnętrznego izolatora, dlatego zasadnym jest określenie ilościowe wpływu degradacji izolatora na parametry odcinka linii kablowej.

Ponadto zagadnieniem, którego nie można pominąć podczas projektowania urządzeń na rynki kolejowe, są zaburzenia elektromagnetyczne, które stanowią wyzwanie stawiane przed inżynierami. Sposobem ich minimalizacji, podobnie jak w innych dziedzinach gospodarki, są kable ekranowane, które charakteryzują się zwiększoną odpornością na zewnętrzne zakłócenia [32]–[35]. Należy jednak nadmienić, iż sposób podłączenia ekranu ma kluczowe znaczenie, by w pełni wykorzystać jego potencjał [36], [31]. Niestaranność lub, co gorsza, brak odpowiedniej wiedzy może skutkować efektami odwrotnymi do zamierzonych. Jednoczesne podłączenie ekranów do uziemień w kilku punktach instalacji kolejowej stanowi realne zagrożenie dla poprawności działania systemu [37], [38]. W takim przypadku tworzy się połączenia wyrównawcze pomiędzy takimi punktami, w związku z tym przez ekrany płynie prąd, który może sam z siebie być przyczyną zakłóceń lub nawet doprowadzić do uszkodzenia samego ekranowania, które nie jest zaprojektowane do przewodzenia prądów o długim czasie trwania. Ponadto tworzy to zagrożenie dla instalatorów odpowiedzialnych za rutynowe przeglądy, ponieważ mało kto spodziewa się, iż na uziemionym przewodzie, na drugim końcu linii, może się pojawić napięcie stanowiące zagrożenie dla życia i zdrowia [39]. Wynika to ze specyfiki środowiska kolejowego, w którym to długie odcinki linii komunikacyjnych są narażone na oddziaływanie wysokich

napięć (sprzężenia przez pole elektryczne lub pojemności pasożytnicze [40]–[42]) oraz dużych prądów rzędu kilku tysięcy Amperów [43] (sprzężenia indukcyjne oraz pasożytnicze). Dlatego nawet niewielka różnica w impedancji uziemień lokalnych i niezerowa impedancja okablowania powoduje niepożądane skutki w działaniu ekranowania i wprowadza dodatkowe zaburzenia, zamiast je eliminować. W konsekwencji może to doprowadzić do ograniczenia funkcjonowania systemu zarządzania ruchem kolejowym. Oczywiście dąży się do osiągnięcia jak najmniejszej wartości impedancji uziomów, jednak najczęściej wymaga to specjalnych konstrukcji, będących integralną częścią nowo powstałych inwestycji [44]. Niestety takie podejście nie jest możliwe w przypadku modernizowanych obiektów.

Dodatkowo, by zminimalizować wpływ szkodliwych czynników zewnętrznych na okablowanie, stosuje się przewody ze skręconymi żyłami [45], [46]. Ich główną zaletą jest znaczne zmniejszenie wpływu zewnętrznego pola elektrycznego. Dlatego nie sposób pominąć okablowania strukturalnego podczas projektowania lub wdrażania modułów ochronników interfejsów komunikacyjnych urządzeń sterowania ruchem kolejowym. Wobec czego istnieje uzasadniona potrzeba stworzenia modelu odcinka jednostkowego kabla wykorzystywanego przy połączeniach urządzeń przytorowych.

Z pośród wymienionych w normie PN-EN 50121-4 [2] najbardziej destruktywnym zaburzeniem przewodnym są narażenia napięciami udarowymi (ang.: surge), ponieważ w przeciwieństwie do szybkich stanów przejściowych (ang.: fast transients) oraz zaburzeń radiowych, napięcia udarowe niosą o wiele większą energię, co oznacza, że mogą nie tylko zaburzyć działanie urządzenia, ale również spowodować jego uszkodzenie. Z tego powodu projektowanie ochronników na wysokie napięcia udarowe dla urządzeń kolejowych ma szczególne znaczenie.

Ponadto zasadna jest analiza negatywnego wpływu czynników na przewód wykorzystywany w aplikacjach kolejowych oraz jego implikacji na działanie całego systemu (rys. 2). Wspomniane wcześniej zagrożenia środowiska kolejowego (narażenia mechaniczne, oddziaływanie wody itd.) silnie oddziałują na okablowanie strukturalnie systemów detekcji niezajętości doprowadzając do naruszenia zewnętrznego izolatora. Z tego powodu konieczna jest analiza zmian parametrów elektrycznych jednostkowego modelu przewodu, by móc ocenić jej ewentualny wpływ na działanie całego systemu.

Większość badań zwraca uwagę na diagnostykę uszkodzeń „katastroficznych” - przerwy lub zwarcia [47]–[51] w przewodach. Różne metody badań terenowych wymieniono w [52], jednak są one niesatysfakcjonujące z punktu widzenia autora, ponieważ nie mają one

zastosowania w realiach kolejowych. Natomiast znacznie mniej badań prezentuje zmiany parametrów elektrycznych przewodów, które powodują zmianę [53] charakterystyk impedancyjnych [54] często pojawiającą się w realnych aplikacjach [55].

Niestety analizy tego typu uszkodzeń pojawiają się rzadko, a jeszcze rzadziej sposoby ich testowania [56]. Jednak z punktu widzenia utrzymaniowego (ang.: predictive maintenance), analizy przyczyn możliwych usterek modelu okablowania i jego wpływu na działanie systemu, są ważne, ponieważ pozwalają zaplanować ewentualne scenariusze napraw i przygotować się na wdrożenie środków zaradczych, a tym samym zapobiegać niezwykle kosztownym usterek, których naprawa mogłaby potrwać długo. Ograniczając tym samym możliwości wykorzystania linii kolejowej. Innym istotnym aspektem omawianego zagadnienia jest metoda oceny stanu „obecnego” instalacji wykonywana przy okazji okresowych przeglądów. W artykułach [57], [58] autorzy analizują punktowe usterki, to znaczy zagięciach lub uszkodzeniach zewnętrznego izolatora tylko w jednym wybranym miejscu, wobec czego analiza uszkodzenia pojawiającego się na dłuższym odcinku przewodów jest niepełna.

Stwierdzić więc można, że degradacja zewnętrznej powłoki przewodów komunikacyjnych systemów detekcji niezajętości, może być efektem upływu czasu (starzenie) lub/i uszkodzenia mechanicznego. Bardzo zbliżone rozważania poruszane są w [59], [60], jednak dotyczą one przewodów zasilających a nie komunikacyjnych, więc koncentrują się na starzeniu pod wpływem obciążenia (przepływ prądu) oraz wzrostu temperatury pracy przewodu, które nie mają miejsca w przypadku przewodów komunikacyjnych oraz odbiorników o nieznacznym poborze mocy, jak czujniki koła (pobór mocy na poziomie 6W: ELS-96 lub 15W: ELS-95). Natomiast w sygnałach komunikacyjnych zupełnie inne parametry odgrywają rolę, ponieważ do wymiany danych wykorzystuje się znacznie szersze pasmo częstotliwościowe, aniżeli w przypadku przewodów zasilających, z tego powodu w rozprawie zostanie przedstawiona analiza zmian parametrów modelu jednostkowego odcinka kabla zasilająco-komunikacyjnego. W przypadku sieci komunikacyjnych zjawiska fizyczne zachodzące wewnątrz przewodów podczas pracy i ich wpływ na pozostały czas życia okablowania nie są w pełni zrozumiałe [59]. Poprawność działania transmisji zależy więc od stanu okablowania, dlatego postępująca degradacja fizyczna przewodów ma wpływ na przesyłane sygnały z tego powodu znajomość modelu oraz jego parametrów ma kluczowe znaczenie dla poznania wpływu tego zjawiska.

W pracy [61] autorzy prezentują zagadnienie odporności promieniowanej, z wykorzystaniem jednej pary skręconych przewodów, w zastosowaniach kolejowych wykorzystuje się natomiast dwie pary skręconych przewodów, a ponadto jak wspomniano wcześniej na kolei nie podłącza się ekranu z dwóch stron. Natomiast w [62] można odnaleźć schemat zastępczy z nieekranowaną, pojedynczą parą przewodów, co nie ma zastosowania w infrastrukturze kolejowej.

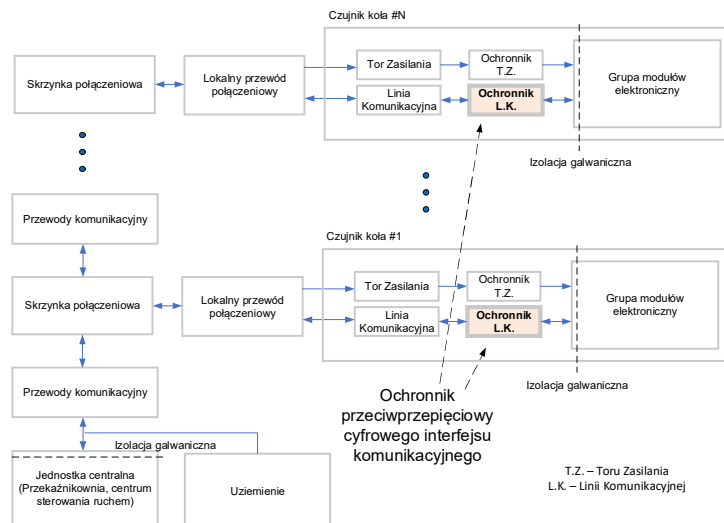
Uszkodzenie zewnętrznego izolatora będące wynikiem oddziaływań niekorzystnych warunków obecnych w środowisku kolejowym jest trudno diagnozowalne, ponieważ jego destruktywny wpływ jest rozciągnięty w czasie. Dostępne są opracowania omawiające degradację parametrów przewodu w określonym czasie ([55], [63]), niestety przedstawiają one tylko właściwości związane z izolacją, które są istotne dla wysokiego i średniego napięcia, natomiast mają marginalne znaczenie w przypadku urządzeń zasilanych maksymalnym napięciem 70V DC (urządzenia przytorowe). Brak jest opisu zmian parametrów jednostkowych przewodów mogących mieć wpływ na linie transmisyjne. Właśnie ze względu na długofalowość zjawiska oraz możliwe niejednoznaczne przyczyny, a także skutki, taki problem jest stosunkowo trudno diagnozowalny. Niestety takie uszkodzenia nie od razu objawiają się błędami transmisji lub jej całkowitym zanikiem. Dodatkowo problem ten może zostać zamaskowany przez czasowe utraty transmisji, które z dużym prawdopodobieństwem doprowadzą do mylnych wniosków dotyczących stanu pozostałych elementów infrastruktury np. urządzeń przytorowych.

Z tego powodu pożądana jest metoda umożliwiająca ocenę stopnia degradacji zewnętrznego izolatora, w celu zapobiegnięcia możliwym usterkom w przyszłości, a tym samym ograniczeniem czasu, w którym wystąpi brak dostępności systemu zarządzania ruchem kolejowym.

Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej należy stwierdzić, iż obecnie brak jest satysfakcjonującego modelu jednostkowego przewodu wykorzystywanego w przemyśle kolejowym, wobec czego w świetle przeprowadzonych rozważań istnieje uzasadniona potrzeba jego opracowania. Z praktycznego punktu widzenia model jest niezbędny do symulacji i dalszej weryfikacji sprzętu w określonych scenariuszach testowych, ponieważ, jak wskazano wcześniej, jest on integralną częścią systemu zarządzania ruchem kolejowym.

1.3. Interfejs komunikacyjny urządzeń przytorowych

Ze względu na wymagające warunki środowiskowe przemysłu kolejowego (wysokie napięcia i prądy [64], [65] oraz bliskość wyładowań atmosferycznych [25], [66], [67]) konieczne jest projektowanie możliwie odpornych urządzeń przytorowych. Typowy schemat połączeń urządzeń systemu detekcji niezajętości z izolowanymi interfejsami został przedstawiony na rys. 4.



Rys. 4. Topologia połączenia urządzeń przytorowych oraz urządzeń wewnętrznych w systemie detekcji niezajętości.

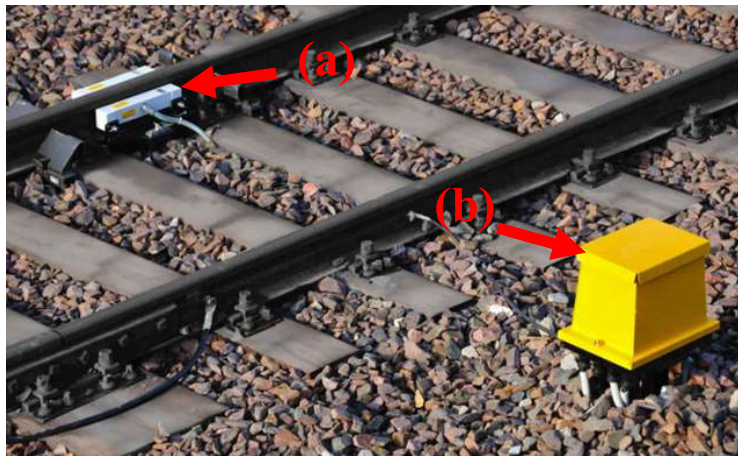
W skład systemu detekcji niezajętości wchodzi następujące elementy:

- jednostka centralna (np. szafa SOL-3) – odpowiedzialna za przetwarzanie informacji od urządzeń przytorowych oraz propagowanie informacji do systemów nadrzędnych. Jednostka centralna zlokalizowana jest najczęściej w przekąźnikowiu (czyli pomieszczeniu zawierającym nadrzędne elementy systemów sterowania ruchem kolejowym), kontenerach lub szafach przytorowych. Ze względu na topologię systemu w najbliższym obszarze jednostki centralnej znajduje się główne uziemienie systemu,
- przewody komunikacyjne ułożone w duktach betonowych lub w gruncie, równoległe do szlaków kolejowych, służących do zasilania i przesyłania informacji pomiędzy elementami systemu,

- c) skrzynki połączeniowe (np. EDS-9) umożliwiają połączenie pomiędzy przewodem terenowym a przewodami o zwiększonej elastyczności bezpośrednio połączonymi z urządzeniami przytorowymi,
- d) lokalny przewód przyłączeniowy (np. EVP-2) o małych promieniach gięcia, umożliwia doprowadzenie zasilania oraz toru komunikacyjnego do urządzenia przytorowego. W skład przewodu wchodzi złącze wyposażone w moduł ochronnika, którego dobór elementów zostanie poruszony w dalszych rozdziałach,
- e) czujniki koła (np. ELS-95 rys. 5 lub ELS-96 rys. 6) wchodzi w skład grupy urządzeń przytorowych rys. 2. Montowany jest bezpośrednio na szynach.

Zaznaczyć należy, że topologia systemu liczników osi jest stała (rys. 4). Wynika to ze standaryzacji (stały koncept ułatwia projektowanie nowych stacji) oraz certyfikacji konkretnych implementacji czujników koła. By zapewnić maksymalną niezawodność w działaniu jednostki centralnej oraz urządzeń przytorowych (czujników koła), są one w pełni odizolowane galwanicznie od siebie (zarówno zasilanie oraz interfejs komunikacyjny). Zapewnia to minimalizację wpływu zewnętrznych zakłóceń na działanie urządzeń, poprzez zwiększenie impedancji dla zakłóceń zewnętrznych.

Na rys. 5 oraz rys. 6 przedstawiono przykładowe instalacje czujników koła:



Rys. 5. Czujnik koła ELS-95 urządzenie przytorowe
(a) głowice detekcyjne (b) elektronika przytorowa
(Fot. ALSTOM ZWUS)



Rys. 6. Czujnik koła ELS-96 (urządzenie przytorowe),
głowica zintegrowana: detekcja oraz elektronika w jednej obudowie.
(Fot. ALSTOM ZWUS)

ELS-96 jest nowszym urządzeniem, posiadającym kompaktową budowę, charakteryzuje się wysoką odpornością na wibracje, bardzo wysokim poziomem odporności na zaburzenia promieniowane oraz zaawansowanym systemem diagnostyki wewnętrznej. Wszystkie interfejsy czujnika koła ELS-96 są odizolowane galwanicznie od środowiska zewnętrznego (zasilanie i transmisja). Dodatkowo każdy interfejs posiada dedykowany ochronnik przeciwzakłóceńowy umożliwiający poprawną pracę w aplikacjach kolejowych. W odróżnieniu od jednostki centralnej, w tym wypadku, dostępna przestrzeń dla implementacji ochronników jest mocno ograniczona [68], przez to wymagane jest zastosowanie autorskich rozwiązań dopasowanych do potrzeb. Urządzenia przytorowe (czujniki koła) są również najbardziej narażone na wszelkiego rodzaju oddziaływania środowiskowe, takie jak temperatury, wilgotność, promieniowanie UV oraz narażenia EMC. W związku z powyższym, zaprojektowanie modułu ochronnika zoptymalizowanego pod kątem wymagań, ma kluczowe znaczenie dla poprawności działania systemu.

Ochronnik przeciwprzebiegowy cyfrowego interfejsu komunikacyjnego jest jednym z kluczowych modułów urządzeń przytorowych chroniących elektronikę wewnętrzną przed destruktywnym wpływem napięć udarowych. Ochronnik jest integralną częścią cyfrowych modułów komunikacyjnych, które pracują na dużo niższych napięciach niż moduły zasilania (typowe zasilanie urządzeń przytorowych: 70V DC, natomiast interfejs komunikacyjny CAN: 2,5Vpp), wobec czego na elementach ochronnika interfejsu komunikacyjnego musi się rozproszyć dużo większa energia niż w przypadku ochronnika interfejsu zasilającego, by zapewnić ochronę wrażliwym elementom jak moduł magistrali CAN. Należy pamiętać,

iż dla średniej wielkości stacji liczba urządzeń przytorowych sięga dziesiątek, np. Chorzów Batory, Biała Podlaska, Warszawa Wawer. Dla działania każdej z tych stacji wymagane jest około 40 szt. czujników koła. W przypadku dużych stacji, jak Warszawa Zachodnia lub Gdynia Port, liczba tych urządzeń oscyluje w granicach 200 szt.

Głowica czujnika koła jest droższa (około 5 razy) od przewodu przyłączeniowego, a wymiana głowicy zajmuje około 30 minut. Natomiast na wymianę przewodu przyłączeniowego serwis potrzebuje około 5 minut, dlatego preferowane jest ewentualne uszkodzenie tego drugiego elementu. Do analizy zaistniałego defektu można wykorzystać metodę zaproponowaną w [69], ponieważ umożliwia weryfikację usterek nieliniowych układów analogowych na podstawie ograniczonej liczby pomiarów. Natomiast metoda zaprezentowana w [70] umożliwia wskazanie przyczyny usterki na podstawie odpowiedzi układu na sygnał wejściowy.

Sposobem na ograniczenie strat wynikających z przepływu wysokich prądów (w szczególności problem ten dotyczy pociągów poruszających się z wysokimi prędkościami [71]) jest zastosowanie zasilania trakcji o wysokim napięciu do 25kV [72], [73]. Jednakże, tak wysokie napięcie generuje duże pole elektryczne [74], które w sposób znaczący oddziałuje na poprowadzone okablowanie równoległe do linii kolejowych. By minimalizować wpływ tego pola, stosuje się przewody o skręconych żyłach, jednak przy tak dużych długościach przewodów sięgających kilometrów, nie sposób uniknąć indukowania napięć, które są w stanie uszkodzić elementy systemu zarządzania ruchem kolejowym. Ponadto podczas prowadzenia ruchu pojazdów szynowych, w szczególności podczas przyspieszania pociągów, pojawiają się zaburzenia wynikające z przepływu bardzo dużych prądów, w wyniku działania samych przetwornic (zaburzenia powstające na skutek działania kluczy przełączających) zasilających silniki napędowe [75]. Podobne anomalie związane z szybkimi stanami nieustalonymi [76] może również wytwarzać wyposażenie pociągów np. klimatyzatory.

Dodatkowym czynnikiem wpływającym niekorzystnie na działanie systemów sterowania ruchem kolejowym, które ze względu na swój charakter obejmują stosunkowo duże obszary, są narażenia na wyładowania atmosferyczne [77]–[80].

Czujniki koła są podstawowym elementem systemu zarządzania ruchem kolejowym, wobec czego odporność tego urządzenia na wszelkiego rodzaju zaburzenia elektromagnetyczne powinna być maksymalnie wysoka. Ma to na celu zapewnienie nieprzerwanego działania systemu nawet w niekorzystnych warunkach. Przedstawiona filozofia wplata się w ogólnoswiatowe trendy mające na celu zwiększanie odporności

urządzeń elektronicznych na zaburzenia wysokoenergetyczne [81], co pozwala zwiększyć ich dostępność oraz zminimalizować prawdopodobieństwo uszkodzeń. Biorąc pod uwagę problemy związane z obecnością wysokich napięć i możliwościami wyładowań atmosferycznych, na które urządzenia przytorowe muszą być odporne, istotnym staje się zaprojektowanie niezawodnego ochronnika interfejsu komunikacyjnego [84]–[86]. Zastosowanie ochronników jest więc konieczne, by chronić wrażliwe układy elektroniczne urządzeń przytorowych ze względu na obecność wspomnianych zagrożeń występujących w środowisku kolejowym. Unifikację minimalnych wymagań, jakie powinny spełniać czujniki koła, przedstawiają normy kolejowe np. PN-EN 50121-4 [2].

Należy jednak pamiętać, iż norma ta definiuje minimum odporności, natomiast w wielu wypadkach klienci na całym świecie, na podstawie własnych doświadczeń, tworzą dedykowane wymagania, które najczęściej przewyższają te wynikające ze standardów [82]. Oczywiście ma to na celu dostosowanie produktu do lokalnych warunków, które mogą z gołą odbiegać od tych przedstawionych w normach. Ponadto stosowanie nowych rodzajów pojazdów z coraz większą ilością wyposażenia (rośnie liczba przekształtników mocy) oraz zwiększanie dopuszczalnych prędkości na liniach, również powoduje wzrost zaburzeń, mogących negatywnie wpływać na działanie urządzeń przytorowych.

Destruktywny wpływ wyładowań atmosferycznych na urządzenia przytorowe jest opisywany w literaturze [83]. W tym artykule również naświetlono wpływ tego typu usterek na działanie infrastruktury kolejowej. Zagadnienie odporności urządzeń przytorowych pojawia się również w [84], gdzie możemy znaleźć informację, iż za niesatysfakcjonującym poziomem ochrony przeciwprzepięciowej idzie znaczący wzrost kosztów utrzymania systemu, do których możemy zaliczyć zarówno częste wymiany urządzeń przytorowych, jak i brak dostępności szlaków kolejowych, które one obsługują.

Na obszarze całego globu, częstotliwość wyładowań może mieć skrajnie różne wartości, w zależności od regionu, a przecież kolej jest jednym z podstawowych środków transportu. W związku z powyższym istnieje uzasadniona konieczność projektowania urządzeń sterowania ruchem kolejowym odpornych na niekorzystne warunki pracy. W szczególności na napięcia udarowe, ponieważ ze względu na ich niszczący charakter stanowią duże zagrożenie dla urządzeń. By minimalizować skutki ich działań, konieczne jest intencjonalne zaprojektowanie ochronników tak, by uszkodzeniu ulegały komponenty, których wymiana jest prosta, szybka i uzasadniona z finansowego punktu widzenia.

Ze względu na popularność oraz uniwersalność wykorzystano topologię magistrali z implementacją standardu CAN [85]. Ten magistralny system połączeń jest chętnie wykorzystywany przez projektantów systemów, ponieważ posiada szereg zalet:

- a) dane przesyłane są za pomocą sygnału różnicowego, co zwiększa odporność na zakłócenia zewnętrzne,
- b) umożliwia dwukierunkową wymianę informacji, pomiędzy węzłami systemu, dzięki czemu możemy wysyłać rozkazy kalibracji zdalnie lub nawet aktualizować oprogramowanie bez potrzeby zbliżania się do urządzenia (nie naraża się pracownika na zagrożenia występujące w terenie i dodatkowe koszty związane z zabezpieczeniem odcinka torów kolejowych, po których mogą się poruszać pociągi),
- c) ogranicza długość okablowania z wykorzystaniem magistrali do jednego przewodu można podłączyć nawet 10 urządzeń,
- d) zmniejsza liczbę ochronników przeciwprzepięciowych w pomieszczeniach SRK, w porównaniu do topologii punkt-punkt, która wymaga osobnego ochronnika dla każdego urządzenia.

Wszystko to sprawia, iż magistrala CAN jest często wykorzystywana w systemach zarządzania ruchem kolejowym. Jednak do poprawnego działania i zwiększenia niezawodności wymaga skutecznej ochrony przeciwprzepięciowej w postaci modułów ochronników [86], [87]. Moduł magistrali CAN [88], pomimo przemysłowego charakteru, bez dodatkowej ochrony nie jest w stanie sprostać wymaganiom aplikacji kolejowych zaprezentowanych w tab. 1, ponieważ bez ochronników ulega uszkodzeniu w skutek niemożliwości rozproszenia energii dostarczonej przez zaburzenia w postaci napięć udarowych.

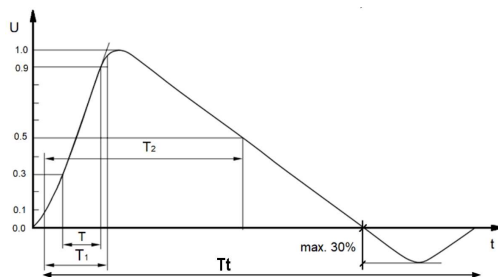
Tab. 1. Zestawienie wymagań na napięcia udarowe dla urządzeń przytorowych na podstawie normy PN-EN 50121-4 [2].

Rodzaj testu	Warunki testów	
Napięcie udarowe	[1]	1,2/50 μ s \pm 2kV Źródło w konfiguracji otwartej, napięcie testowe pomiędzy liniami a potencjałem odniesienia.
	[2]	1,2/50 μ s \pm 1kV* \pm 2kV** Źródło w konfiguracji otwartej, napięcie testowe przyłożone pomiędzy liniami interfejsu.

*Wartość prezentowana w normie PN-EN 50121-4 [2].

**Wartość pojawiająca się w wymaganiach przetargowych [89].

Pierwszy przypadek testowy [1] (tab. 1) weryfikuje poprawność zaprojektowania urządzenia pod kątem izolacji galwanicznej owego urządzenia. Drugi przypadek testowy [2] jest znacznie bardziej wymagający, ponieważ opisuje rozpraszanie dużej energii na komponentach wewnątrz urządzenia. Norma mówi o narażeniu napięciem udarowym $\pm 1\text{kV}$, jednak coraz częściej pojawia się w wymaganiach przetargowych wartość $\pm 2\text{kV}$ [89]. Natomiast w rejonach o szczególnie dużym narażeniu na ekspozycję napięciami udarowymi oczekiwania sięgają $\pm 6\text{kV}$. Ten przypadek testowy został wybrany jako reprezentatywny i będzie wykorzystany do badań w dalszej części pracy. Przebieg napięcia udarowego został zaprezentowany na rys. 7. Odporność portów wejścia wyjścia należy sprawdzić napięciem testowym o napięciu co najmniej 1kV ($1,2/50\mu\text{s}$) dla konfiguracji żyła-żyła (tryb różnicowy).



Rys. 7. Przebieg napięcia udarowego $1,2/50\ \mu\text{s}$.

Więcej szczegółowych informacji możemy odnaleźć w normie [1] PN-EN 61000-4, która dostarcza bardziej precyzyjnych danych i jest normą bazową, wobec czego ów test jest wykorzystany w innych sektorach przemysłu (np. motoryzacja, energia odnawialna, automatyka przemysłowa itp.).

Ochronnik w urządzeniu przytorowym, ze względu na restrykcje przestrzenne, posiada ograniczoną liczbę komponentów. W najlepszym przypadku ochronnik przeciwprzepięciowy powinien rozproszyć każde narażenie, jednak z fizycznego punktu widzenia nie jest to możliwe, wobec czego preferowana jest budowa modułowa, tak by w razie uszkodzenia była możliwa wymiana tańszej części, a zasadnicze urządzenie przytorowe (droższe i nienaprawialne) pozostało nienaruszone. Z punktu widzenia utrzymaniowego ma to ogromne znaczenie, ponieważ w przypadku wymiany tańszego modułu nie ma konieczności kalibracji i konfiguracji urządzenia przytorowego. Przez co sama operacja wymiany modułu może odbyć się relatywnie szybko i sprawnie, a ponadto znacznie obniżamy koszty samego utrzymania systemu zarządzania ruchem kolejowym właśnie ze względu na wymianę tańszego modułu, a nie całego urządzenia.

Zagadnienie ochrony przeciwprzepięciowej pojawia się w literaturze najczęściej w kontekście linii zasilających wysokiego napięcia [90]–[93]. Pojawiają się również analizy dla linii niskonapięciowych [94], jednak pomiędzy liniami komunikacyjnymi a zasilającym występują duże różnice:

- a) linie zasilające pracują z dużo wyższymi napięciami (do 110kV) niż linie komunikacyjne (w przypadku magistrali CAN amplituda sięga 2,5Vpp),
- b) ze względu na swój charakter linie zasilania na swoich końcach posiadają stosunkowo odporne elementy infrastruktury o wysokich mocach (transformatory, prądnice, silniki, przetwornice wysokich mocy), natomiast w przypadku linii komunikacyjnych moduły odpowiedzialne za warstwę fizyczną pracują ze znacznie niższymi mocami (CAN: 0,35W w trybie nadawania [88]).

Dlatego trudno jest zaadoptować rozwiązania dotyczące linii zasilających do zastosowań w interfejsach komunikacyjnych, ponieważ poziomy sygnałów użytecznych są na zupełnie innych poziomach, a odbiorniki tych linii różnią się pod wieloma względami. Ochronniki linii komunikacyjnych są bardziej wymagające, ponieważ muszą przejąć znaczną część zaburzenia oraz same ochronniki nie mogą wprowadzać niepożądanych skutków w parametry sygnałów [95]. Sygnały cyfrowe wymagają przenoszenia wyższych częstotliwości do poprawnego działania, w przeciwieństwie do linii zasilających operujących na częstotliwościach od $16\frac{2}{3}$ Hz (Szwajcaria, Austria, Niemcy, Norwegia) do 60Hz (Stany Zjednoczone, Kanada, Japonia, Korea Południowa) [96].

Natomiast w przypadku ochrony linii komunikacyjnych dostępna ilość publikacji jest znacznie ograniczona. W opracowaniu [97] autorzy rozważają różne aplikacje testowe, jednak bez weryfikacji parametrów krytycznych (maksymalnych napięć i prądów, mocy chwilowych i średnich) ochraniających urządzeń elektronicznych. W związku z czym brak jest informacji o parametrach, z jakimi pracują poszczególne komponenty, co może skutkować ich nadmiarowością lub pracą na granicy możliwości. Natomiast opracowanie [98] wskazuje na konieczność stosowania ochronników przeciwprzepięciowych w radiokomunikacji, jednak autorzy nie przedstawiają sposobu doboru kluczowych dla modułu ochronnego komponentów. Praca [99] przedstawia analizę problemu ochrony przeciwprzepięciowej dla stacji przekaźnikowych. Niestety nie zostają poruszone kwestie

doboru konkretnych elementów, a jedynie zaproponowana zostaje topologia podłączenia ochronników.

Praca [100] wskazuje na konieczność symulowania ochronników już na etapie projektowania, jednak kwestie selekcji komponentów pozostawione są inżynierowi, który musi się podjąć dalszej analizy wykorzystanych komponentów, tak by zaprojektowany układ spełniał oczekiwania. Skutkuje to mozolną weryfikacją poszczególnych propozycji projektowych, do momentu zbliżenia się do założeń. Niewątpliwą wartością dodaną tego artykułu jest propozycja wykorzystania wielostopniowego ochronnika, tak by każda kolejna grupa była odpowiedzialna za ograniczanie przepięć tylko w ograniczonych zakresach amplitud wejściowych. Podobne podejście zaprezentowane jest w [101], gdzie autorzy wykorzystują do ochrony interfejsu iskrownik, warystor oraz diodę typu transil. W opracowaniu tym przedstawiono również algorytm projektowania ochronnika, jednak nie uwzględnia on kluczowych parametrów poszczególnych komponentów takich jak: maksymalne napięcia, chwilowe dopuszczalne moce czy maksymalne prądy. Ciekawe podejście zostało przedstawione w [102], gdzie opracowujący prezentują sposób rozwiązania problemu poprzez zaprojektowanie wielowarstwowego elementu zabezpieczającego powszechnie stosowane urządzenia telekomunikacyjne. Niestety przedstawiony poziom ochrony dla rynku kolejowego powinien być na wyższym poziomie.

Wartościowym artykułem jest również [103], gdzie można znaleźć wiele cennych wskazówek dotyczących projektowania ochronników przeciwprzepięciowych w przemyśle lotniczym. Są tam opisane charakterystyki poszczególnych grup komponentów, najczęściej wykorzystywanych w ochronnikach: iskrowników, kondensatorów, rezystorów, transili etc. Niestety autorzy nie udostępniają szczegółowych informacji w kwestii doboru komponentów, a wskazówki te są bardzo ważne i pozwalają adoptować prezentowane rozwiązania dla indywidualnych potrzeb, ponieważ ochronniki przeciwprzepięciowe są wykorzystywane w różnych gałęziach gospodarki [104]–[106] pozwalając na prawidłowe działanie wielu typów urządzeń. Docelowa metoda powinna charakteryzować się elastycznością w doborze elementów oraz kryteriów ich oceniania, wynika to ze zróżnicowanych wymagań i ograniczeń, jakie dotyczą ochronników.

Modelowanie ochronników [107], [108] oraz samego zjawiska [109], pozwala na dokładne zbadanie zachowania ochronnika przeciwprzepięciowego oraz jego analizę. Z tego powodu ważne jest opracowanie metody projektowania modułu ochronnika z wykorzystaniem standardów kolejowych w typowej topologii połączeń. Wykorzystanie metod sztucznej inteligencji do poprawy parametrów obwodów jest zupełnie nową strategią

w kontekście omawianego problemu inżynierskiego, jednak jest to zgodne z ogólnymi trendami pojawiającymi się obecnie w literaturze [110]–[113], dotyczącymi wykorzystania algorytmów do zadań projektowych lub analizy defektów układów [114]–[117]. Algorytm genetyczny jest obecnie powszechnie używany do rozwiązywania problemów optymalizacyjnych. W pracy [118] GA jest wykorzystywany do optymalizacji lokalizacji elementów i routingu. W artykule [119] opisano zmniejszanie napięcia szczytowego w autonomicznym systemie nawigacyjnym, w celu poprawy odporności urządzenia na zakłócenia, co znacznie zwiększa bezpieczeństwo pasażerów. Ponadto w opracowaniu [120] znajduje się przykład wykorzystania GA do celów analizy termicznej, co poprawia odporność modułu na warunki środowiskowe.

2. Model przewodu komunikacyjnego stosowanego w kolejnictwie

Prawidłowa komunikacja pomiędzy elementami systemu zarządzania ruchem kolejowym jest niezbędna do jego poprawnego działania (rozdz. 1.1). Podstawowym medium wykorzystywanym do tego celu są kable, które mogą jednocześnie zasilać urządzenia przytorowe, jak i zapewniać możliwość wymiany danych. By dokładnie analizować ten aspekt, konieczne jest opracowanie modelu przewodu wykorzystywanego w przemyśle kolejowym. Zaproponowany model zostanie, w dalszej części tego opracowania, wykorzystany również podczas symulacji narażeń ochronnika przeciwprzepięciowego cyfrowego interfejsu komunikacyjnego.

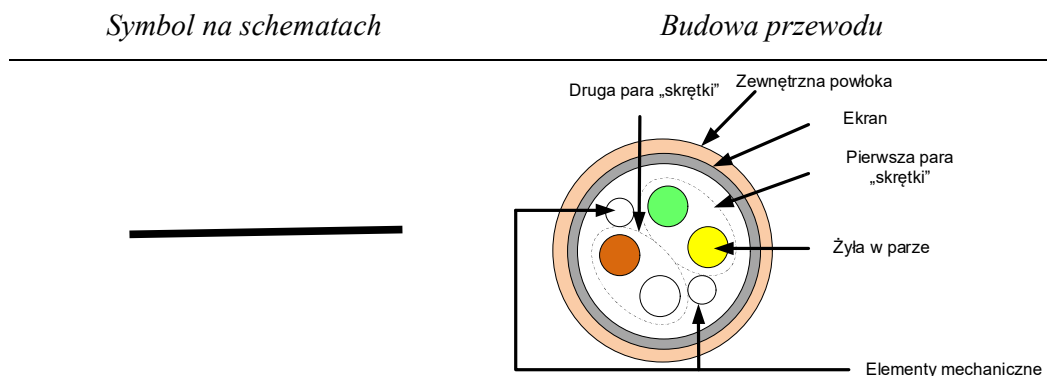
Z uwagi na długi okres wykorzystywania infrastruktury kablowej w przemyśle kolejowym istotne jest wyznaczenie wpływu starzenia na parametry elektryczne modelu odcinka jednostkowego. Na tej podstawie można wskazać, w jaki sposób zmieniają się parametry modelu zastępczego i jaki mają one wpływ na jakość transmisji. Ponadto, możliwe jest wyznaczenie funkcji starzeniowej dla poszczególnych elementów modelu elektrycznego takiego kabla.

2.1. Budowa przewodów

Przewody stosowane w kolejnictwie to najczęściej skrętka typu 2 x 2, która wykorzystywana jest w następującej konfiguracji:

- a) maksymalna odległość z wykorzystaniem transmisji CAN to 3,5km,
- b) zasilanie i transmisja danych pomiędzy urządzeniami może być realizowana z wykorzystaniem jednego przewodu,
- c) znaczący wpływ czynników środowiskowych na degradację parametrów okablowania strukturalnego.

Powyższe narażenia zostały szczegółowo opisane w rozdz. 1.2 i sprowadzają się do naruszenia (degradacji) zewnętrznego izolatora. Wobec tego, omawiane zagadnienie wymaga indywidualnego podejścia w kwestii zastosowania tego typu przewodu w aplikacjach kolejowych. Uproszczona budowa przewodu została przedstawiona na rys. 8:



Rys. 8. Schematyczna budowa przewodu powszechnie wykorzystywanego w systemach zarządzania ruchem kolejowym.

Przewód zasilająco-komunikacyjny składa się z:

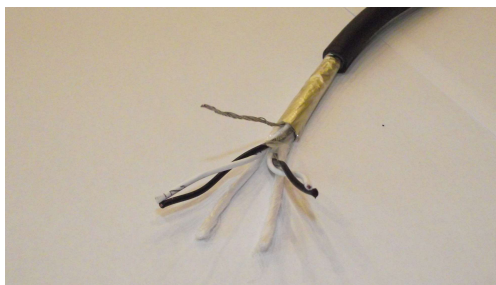
- 1) dwóch par skręconych żył dla zasilania oraz transmisji danych,
- 2) ekranu minimalizującego wpływ zewnętrznych zaburzeń występujących w aplikacjach kolejowych (rozdz. 1.2),
- 3) elementów mechanicznych (tzw. „pilotów”) mających na celu zwiększenie odporności mechanicznej,
- 4) zewnętrznego izolatora chroniącego wewnętrzne części przewodu przed zgubnym wpływem środowiska.

Niestety bywają sytuacje, kiedy nie ma możliwości zweryfikowania dokładnie rodzaju zastosowanego przewodu, ponieważ Inwestor życzy sobie wykorzystania tego już istniejącego na obiekcie, a do którego brakuje dokumentacji technicznej. W takich wypadkach inżynier aplikacyjny na podstawie podstawowych parametrów, takich jak: przekroje, budowa, liczba żył oraz ewentualnych pomiarów podejmuje decyzję o możliwości ich wykorzystania. Tego typu wybory obarczone są pewnym ryzykiem, dlatego konieczne jest opracowanie modelu przewodu, który odpowiadałby realnym

parametrom środowiska kolejowego oraz aby przy wykorzystaniu symulacji komputerowych można było zaakceptować lub odrzucić użycie danego przewodu.

Na potrzeby niniejszego opracowania wybrano trzy najczęściej wykorzystywane typy przewodów stosowane w systemach SRK bazujących na czujnikach koła:

- 1) Typ 1 RE-2Y(ST)Y $2 \times 2 \times 0,75\text{mm}^2$ (rys. 9) rekomendowany dla średnich odległości pomiędzy urządzeniami



Rys. 9. Widok ogólny przewodu Typ 1 RE-2Y(ST)Y $2 \times 2 \times 0,75\text{mm}^2$.

Fotografia własna.

Przewód posiada zwartą budowę, wyposażony jest w elementy wzmacniające konstrukcję wewnętrzną tzn. piloty, dwa „piloty” wykonane są z tworzywa, sam ekran wykonany jest z folii i posiada galwaniczne połączenie z metalowym pilotem.

- 2) Typ 2 RE-2Y(ST)Y $2 \times 2 \times 1,3\text{mm}^2$ (rys. 10) wykorzystywany na długich dystansach



Rys. 10. Widok ogólny przewodu Typ 2 RE-2Y(ST)Y $2 \times 2 \times 1,3\text{mm}^2$.

Fotografia własna.

Ten typ przewodu posiada budowę zbliżoną do typu 1 z tą różnicą, iż elementy mechaniczne mające na celu polepszenie właściwości fizycznych (piloty), zostały inaczej zaprojektowane, tzn. elementy z tworzywa współpracują dodatkową 5 żyłą (koloru pomarańczowego na rys. 10), jej zadaniem jest zwiększenie odporności mechanicznej na rozciąganie.

3) Typ 3 CY $2 \times 2 \times 1,0\text{mm}^2$ (rys. 11) dedykowany do połączeń lokalnych



Rys. 11. Widok ogólny przewodu Typ 3 CY $2 \times 2 \times 1,0\text{mm}^2$.

Fotografia własna.

Budowa trzeciego typu przewodu odbiega od poprzednich. Jest on pozbawiony dedykowanych wzmocnień mechanicznych. Ekran jest wykonany z gęstej metalowej plecionki. Ze względu na to struktura charakteryzuje się luźnym ułożeniem poszczególnych elementów. Wybrane parametry elektryczne zaprezentowanych przewodów zostały przedstawione w tab. 2.

Tab. 2. Podstawowe parametry elektryczne przewodów.

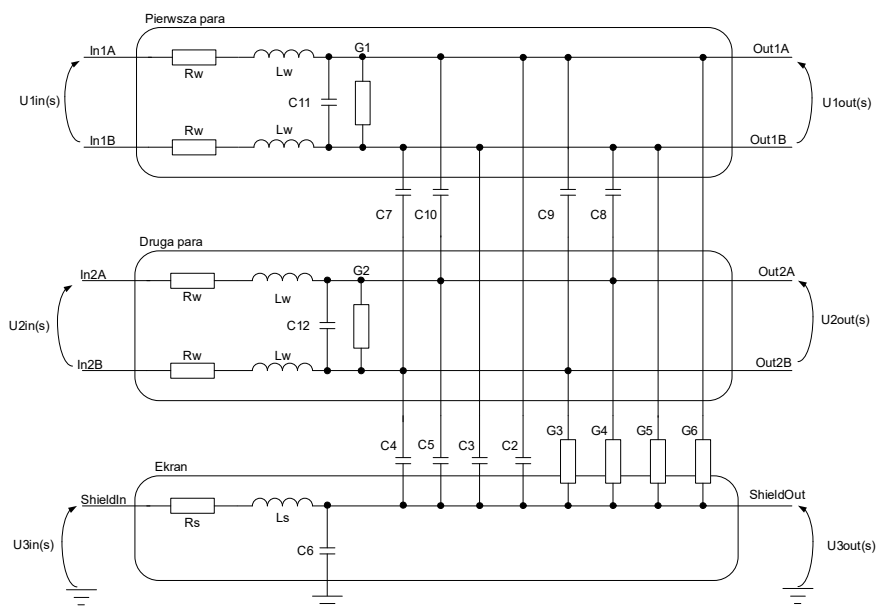
Parametr	Rodzaj Przewodu	CT1	CT2	CT3
		RE-2Y(ST)Y	RE-2Y(ST)Y	CY
		$2 \times 2 \times 0,75\text{mm}^2$	$2 \times 2 \times 1,3\text{mm}^2$	$2 \times 2 \times 1,0\text{mm}^2$
Rezystancja [Ω/km]		52	28,4	-
Pojemność [nF/km]		60	75	0,135
Indukcyjność [mH/km]		0,7	0,7	-
Rezystancja izolacji [$\text{G}\Omega/\text{km}$]		5,0	5,0	0,1

Brak wszystkich parametrów elementów infrastruktury przemysłowych w notach katalogowych niestety nie jest odosobnionym przypadkiem [121]. Ponadto w sytuacji modernizacji infrastruktury na obiekcie korzysta się z dostępnego zaplecza kablowego, najczęściej o bliżej nieokreślonych parametrach.

2.2. Model odcinka przewodu komunikacyjno-zasilającego

Brak satysfakcjonującego modelu odcinka jednostkowego przewodu wykorzystywanego w aplikacjach kolejowych, wymusił opracowanie schematu we własnym zakresie. Jako podstawę do opracowania własnego modelu posłużył model przedstawiony w [62], który wzbogacono o drugą parę przewodów oraz dodano parametry związane z jednostronnym podłączeniem ekranowania. Na rys. 12 przedstawiono model przewodu umożliwiającego zasilanie oraz komunikacje w systemach SRK. Parametry wyróżniające go to dwie niezależnie skręcone pary przewodów dla zasilania oraz transmisji, zwiokrotnione pojemności między żyłami oraz pojemności pomiędzy żyłami a ekranem. Dodano również pojemność pomiędzy ekranem oraz otaczającym środowiskiem [122].

Na potrzeby modelu wykonano pomiary umożliwiające wyznaczenie poszczególnych parametrów przewodów. Jako reprezentatywną długość przewodu wybrano odcinek 10m, był to kompromis pomiędzy ograniczeniami fizycznymi m.in. sztywność, która utrudnia powtarzalne ułożenie odcinków w dostępnej przestrzeni podczas pomiarów, a minimalizowaniem wpływu błędów podczas pomiarów zanieczyszczonych przewodów. Ponadto w aspekcie dalszych badań 10m zostało przyjęte jako minimalna odległość pomiędzy punktem oddziaływania zaburzenia (np. uderzenia pioruna). Dodatkowo typowa odległość pomiędzy punktem przyłączenia, a urządzeniem przytorowym w infrastrukturze wynosi około 10m. Stąd też Autor postanowił połączyć powyższe zagadnienia i przyjąć 10m segment.



Rys. 12. Model elementarnego odcinka 4 żyłowego przewodu (2x 2 żyły skręcone).

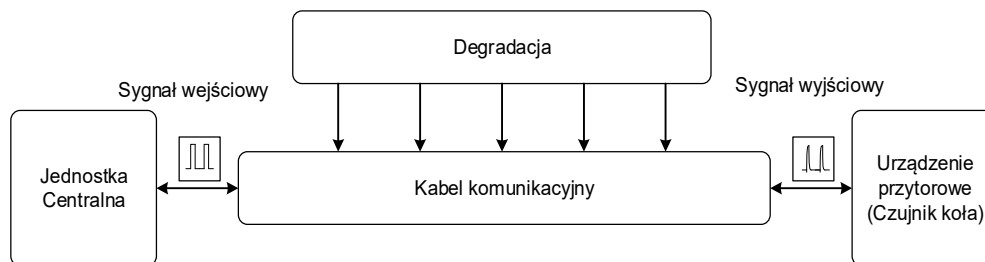
Szczegółowy opis elementów zaprezentowanych na rys. 12:

- R_W — rezystancja jednostkowa przewodu [$m\Omega/m$],
- L_W — indukcyjność przewodu [$\mu H/m$],
- C_{11}, C_{12} — pojemność między żyłami tej samej pary [pF/m],
- C_7, C_8, C_9, C_{10} — pojemność między różnymi żyłami [nF/m],
- C_2, C_3, C_4, C_5 — pojemność między przewodem a ekranem [nF/m],
- C_6 — pojemność między ekranem a potencjałem odniesienia [pF/m],
- G_1, G_2 — przewodność między żyłami w parze [mS/m],
- G_3, G_4, G_5, G_6 — przewodność między przewodem a ekranem [mS/m],
- R_S — rezystancja ekranu [$m\Omega/m$],
- L_S — indukcyjność ekranu [$\mu H/m$].

Każda para żył posiada wejścia i wyjścia, opisane jako $In1A/Out1A$ i $In1B/Out1B$ w pierwszej parze oraz $In2A/Out2A$ i $In2B/Out2B$ w drugiej parze. $ShieldIn/ShieldOut$ to wejście/wyjście ekranu.

2.3. Przyspieszone starzenie przewodów

W przypadku procedur przemysłowych badanie odporności obiektów odbywa się poprzez poddanie ich ekstremalnym warunkom środowiskowym przez określony czas [123]. W niniejszej pracy wybrano wpływ roztworu solnego wody [124], ponieważ ma ona istotny wpływ na parametry kabli sygnalizacyjnych w zastosowaniach kolejowych. Jest to najgorszy scenariusz, ponieważ kabel jest zwykle zakopany pod ziemią i może być otoczony wodą jednocześnie będąc narażonym na uszkodzenia mechaniczne. Ogólny zarys problemu przedstawiono na rys. 13. Przedstawiono na nim: źródło zakłóceń (degradacja), schemat przewodu i interfejs urządzenia przytorowego.



Rys. 13. Schemat ogólny wpływu czynników środowiskowych na działanie urządzeń przytorowych.

Wpływ ten można zaobserwować w przypadku uszkodzenia zewnętrznego izolatora w dowolnym punkcie przewodu. Zjawisko to może mieć długotrwały charakter, pogarszając parametry linii transmisyjnej przez długi okres, co w konsekwencji może doprowadzić do całkowitego zaniku komunikacji. Natomiast wstępne symptomy mogą być omyłkowo zinterpretowane jako dysfunkcja działania urządzeń, a nie problem z infrastrukturą kablową. W związku z tym zaproponowano eksperyment, którego celem jest estymacja wartości parametrów jednostkowego modelu przewodu w funkcji czasu degradacji. Poniżej przedstawiono założenia oraz przebieg badań.

1) Założenia:

a) obiekty testowe:

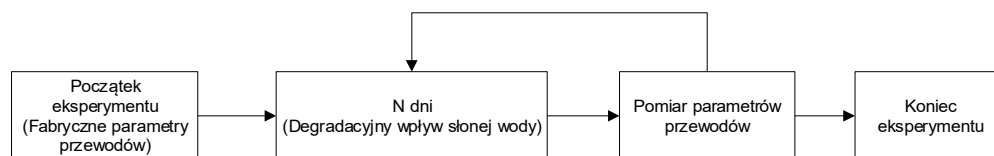
- Kabel typ 1 (dalej oznaczany jako CT1): RE-2Y(ST)Y 2 × 2 × 0,75mm²,
- Kabel typ 2 (dalej oznaczany jako CT2): RE-2Y(ST)Y 2 × 2 × 1,3mm²,
- Kabel typ 3 (dalej oznaczany jako CT3): CY 2 × 2 × 1,0mm².

b) w/w kable umieszczono w roztworze wody i soli o stężeniu wagowym 3%.

2) Przebieg eksperymentu.

Kable poddano oddziaływaniu roztworu soli przez 28 dni, w okresie tym w następujących dniach wykonano pomiary 1., 2., 5., 7., 14., 21. oraz 28. dniu badań.

Schemat eksperymentu przedstawiono na rys. 14.



Rys. 14. Schemat eksperymentu symulującego uszkodzenie zewnętrznego izolatora.

Pomiary wykonano przy pomocy przyrządu pomiarowego Wayne Kerr 6500 (zaprezentowany na rys. 15), który jest wyspecjalizowanym multifunkcyjnym urządzeniem pomiarowym [125].



Rys. 15. Fotografia stanowiska pomiarowego do badania parametrów przewodów komunikacyjnych podczas badań wstępnych. Do połączenia obiektów badanych do przyrządu pomiarowego wykorzystano adapter 1EVA40100 [114].

Fotografia własna.

Deklarowane dokładności pomiarowe przez producenta ww. przyrządu zebrano w tab. 3.

Tab. 3. Zestawienie dokładności pomiarowych miernika Wayne Kerr 6500 [125].

Rodzaj pomiaru	Dokładność
Rezystancja/Reaktancja	$\pm 0,05\%$
Konduktancja/Susceptancja	$\pm 0,05\%$
Pojemność	$\pm 0,05\%$
Induktancja	$\pm 0,05\%$

Wykonano pomiary następujących parametrów:

- R_W - rezystancja przewodu: mierzona między dwoma końcami przewodu,
- L_W - indukcyjność przewodu: mierzona między dwoma końcami przewodu,
- R_S - rezystancja ekranu: mierzona między dwoma końcami ekranu,
- L_S - indukcyjność ekranu: mierzona między dwoma końcami ekranu,
- C_{11} - pojemność mierzona między przewodami pierwszej pary na jednym końcu,
- C_{12} - pojemność mierzona między przewodami drugiej pary na jednym końcu,
- $C_{23} = C_2 + C_3, (C_2 = C_3)$ - pojemność mierzona między pierwszą parą a ekranem na jednym końcu,
- $C_{45} = C_4 + C_5, (C_4 = C_5)$ - pojemność mierzona między drugą parą a ekranem na jednym końcu,
- $C_{710} = C_7 + C_8 + C_9 + C_{10}, (C_7 = C_8 = C_9 = C_{10})$ - pojemność mierzona między pierwszą a drugą parą (przewody w parach zwarte) na jednym końcu.

Ze względu na wartości przewodności G_1, G_2, G_3, G_4, G_5 oraz G_6 poniżej $0,1 \mu S/km$ (Tab. 2) parametry te pominięto w procesie pomiarowym.

Poniżej przedstawiono wybrane wyniki (CT1: tab. 4, CT2: tab. 5 oraz CT3: tab. 6) kabli o długości 10m dla modelu pokazanego na rys. 12.

Do porównania zmian wartości parametrów wykorzystano następujące miary statystyczne:

- błąd względny:

$$\delta = \frac{x - x_0}{x_0} * 100\%, \quad (1)$$

gdzie x_0 — wartość parametru (np. R_w – rezystancja przewodu) przed eksperymentem degradacji, a x — wartość parametru po 28 dniach degradacji.

- odchylenie standardowe:

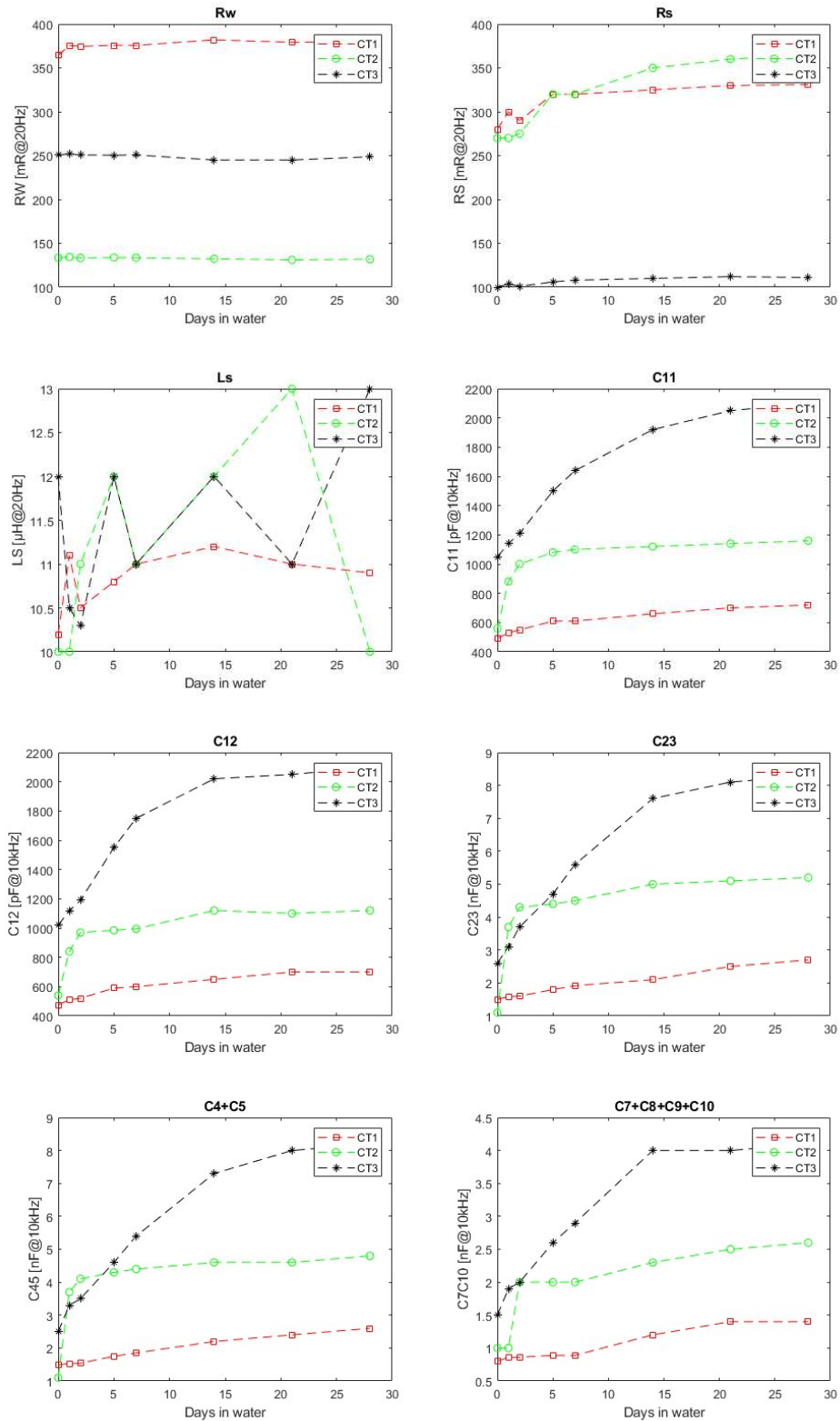
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (2)$$

gdzie x_i — wartość parametru (np. R_w – rezystancja przewodu), a \bar{x} — średnia arytmetyczna zmierzonych parametrów.

Tab. 4. Wyniki pomiarów CTI ($n = 0$ oznacza nominalne parametry kabla).

Dzień testu [n]	R_w [mΩ] (20 Hz)	L_w [μH] (10 kHz)	R_s [mΩ] (20 Hz)	L_s [μH] (20 Hz)	C_{11} [pF] (10 kHz)	C_{12} [pF] (10 kHz)	C_{23} [nF] (10 kHz)	C_{45} [nF] (10 kHz)	C_{710} [nF] (10 kHz)
0	364,25	14,5	280	10,2	490	475	1,50	1,49	0,80
1	375,75	14,4	300	11,1	530	510	1,58	1,53	0,86
2	374,50	14,6	290	10,5	550	520	1,60	1,54	0,86
5	375,75	14,7	320	10,8	610	590	1,80	1,75	0,89
7	375,75	14,5	320	11,0	610	600	1,92	1,85	0,89
14	382,00	14,8	325	11,2	660	650	2,10	2,20	1,20
21	379,25	14,5	330	11,0	700	700	2,50	2,40	1,40
28	379,50	14,6	331	10,9	720	700	2,70	2,60	1,40
δ_1 (%)	4,2	0,7	18,2	6,9	46,9	47,4	80,0	74,5	75,0
σ_1 (-)	4,99	0,12	18,15	0,31	76,72	80,89	0,41	0,40	0,24

Powyższe pomiary oraz pomiary dla pozostałych rodzajów kabli przedstawiono w formie graficznej na rys. 16.



Rys. 16. Zestawienie graficzne wyników pomiarów dla 3 rodzajów kabli stosowanych w przemyśle kolejowym.

Analizując wyniki pomiarów można zauważyć, iż największe zmiany (δ_1) dotyczyły zwiększenia parametrów pojemnościowych (tab. 4) (C_{11} wzrost o 46,9%, C_{12} wzrost o 47,4%, C_{23} wzrost o 80,0%, C_{45} wzrost o 74,5%, a C_{710} wzrost o 75,0%), co jest spowodowane wnikaniami roztworu w pustą przestrzeń w strukturze przewodu, co z kolei wpływało na przenikalność dielektryczną, tej przestrzeni. Roztwór natomiast znikomo wpływa na parametry R_w , L_w i L_s co potwierdza wartość odchylenia standardowego (σ_1), które przyjmuje wartości: $R_w^{\sigma_1} = 4,99$, $L_w^{\sigma_1} = 0,12$ i $L_s^{\sigma_1} = 0,31$. Wzrost parametru R_s o 18,2% spowodowany był budową mechaniczną ekranu, gdyż składa się on z aluminiowej powłoki oraz drutu stalowego, które uległy korozji pod wpływem działania roztworu solnego.

Tab. 5. Wyniki pomiarów CT2 ($n = 0$ oznacza nominalne parametry kabla).

Dzień testu [n]	R_w [m Ω] (20 Hz)	L_w [μ H] (10 kHz)	R_s [m Ω] (20 Hz)	L_s , [μ H] (20 Hz)	C_{11} [pF] (10 kHz)	C_{12} , [pF] (10 kHz)	C_{23} [nF] (10 kHz)	C_{45} [nF] (10 kHz)	C_{710} [nF] (10 kHz)
0	133,50	11,5	270	10,0	560	540	1,10	1,10	1,00
1	134,25	11,5	270	10,0	880	840	3,70	3,70	1,00
2	133,25	11,6	275	11,0	1000	970	4,28	4,07	2,02
5	133,75	11,3	320	12,0	1080	985	4,40	4,35	2,04
7	133,50	11,4	320	11,0	1100	995	4,50	4,40	2,05
14	132,25	11,6	350	12,0	1120	1120	5,00	4,55	2,30
21	131,00	11,5	360	13,0	1140	1100	5,10	4,63	2,50
28	131,75	11,6	365	10,0	1160	1120	5,20	4,78	2,60
δ_2 (%)	-1,3	0,9	35,2	0,0	107,1	107,4	372,7	334,5	160,0
σ_2 (-)	1,05	0,10	37,81	1,05	188,35	181,50	1,25	1,12	0,58

Na podstawie wyników pomiarów (tab. 5), również można zaobserwować największe zmiany (δ_2) parametrów pojemnościowych (C_{11} wzrost o 107,1%, C_{12} wzrost o 107,4%, C_{23} wzrost o 372,7%, C_{45} wzrost o 334,5%, a C_{710} wzrost o 160%). Ekran ma podobną budowę mechaniczną jak przewód CT1, więc można również zaobserwować degradację tego elementu (wzrost R_s o 35,2%). W tym przypadku wartość odchylenia standardowego (σ_2) potwierdza brak zmiany w tendencji parametrów R_w , L_w , i L_s ($R_w^{\sigma_2} = -1,3$, $L_w^{\sigma_2} = 0,9$ i $L_s^{\sigma_2} = 0,0$).

Tab. 6. Wyniki pomiarów CT3 ($n = 0$ oznacza nominalne parametry kabla).

Dzień testu [n]	R_w [m Ω] (20 Hz)	L_w [μ H] (10 kHz)	R_s [m Ω] (20 Hz)	L_s [μ H] (20 Hz)	C_{11} [pF] (10 kHz)	C_{12} [pF] (10 kHz)	C_{23} [nF] (10 kHz)	C_{45} [nF] (10 kHz)	C_{710} [nF] (10 kHz)
0	250,75	9,6	100	12,0	1050	1020	2,60	2,46	1,51
1	252,00	11,3	104	10,5	1140	1120	3,13	3,26	1,85
2	250,75	9,8	101	10,3	1210	1190	3,65	3,50	2,04
5	250,50	10,0	106	12,0	1500	1550	4,70	4,60	2,60
7	250,75	10,8	108	11,0	1640	1750	5,60	5,40	2,90
14	245,00	10,1	110	12,0	1920	2020	7,60	7,30	4,00
21	245,00	10,0	112	11,0	2050	2050	8,10	8,00	4,00
28	248,75	10,2	111	13,0	2100	2100	8,30	8,20	4,10
δ_3 (%)	-0,8%	6,3%	11,0%	8,3%	100,0%	105,9%	219,2%	233,3%	171,5%
σ_3 (-)	2,73	0,56	4,16	0,68	361,48	396,97	2,00	1,94	0,93

W przypadku pomiaru przewodu CT3 (tab. 6) zmiana parametrów pojemnościowych (δ_3) również była najbardziej znacząca (C_{11} wzrost o 100,0%, C_{12} wzrost o 105,9%, C_{23} wzrost o 219,2%, C_{45} wzrost o 233,3%, a C_{710} wzrost o 171,5%). Natomiast zmiana parametru R_s (wzrost o 11,0%) jest mniejsza niż w pozostałych typach przewodów (CT1 R_s : +18,2%, CT2 R_s : +35,2). Jest to spowodowane odrębną konstrukcją mechaniczną ekranowania. W poprzednich przypadkach była to folia wzmacniana przewodami, w CT3 mamy do czynienia z plecionką stalową.

Parametry R_w , L_w i L_s w trakcie eksperymentu charakteryzowały się niewielkimi zmianami, co potwierdza odchylenie standardowe (σ_3) wynoszące: $R_w^{\sigma_1} = 4,99$, $R_w^{\sigma_2} = 1,05$, $R_w^{\sigma_3} = 4,99$, $L_w^{\sigma_1} = 0,12$, $L_w^{\sigma_2} = 0,10$ oraz $L_w^{\sigma_3} = 2,73$. Wypełnienie pustych przestrzeni w kablu nie wpływa znacząco na jego indukcyjność (zmiana parametru L_s wynosi odpowiednio: $L_s^{\sigma_1} = 6,95$, $L_s^{\sigma_2} = 0,0\%$ oraz $L_s^{\sigma_3} = 11,0\%$), ponieważ woda jest diamagnetykiem. Roztwór solny praktycznie nie wpływa również na rezystancję miedzianych przewodów sygnałowych, które posiadają szczelną izolację żył.

2.4. Opis analityczny degradacji parametrów przewodów

W rozdziale tym opracowane zostaną funkcje aproksymujące degradację wybranych parametrów analizowanych kabli. W tym celu przeanalizowano jakość aproksymacji za pomocą różnych funkcji zestawionych poniżej:

a) logarytmiczna:

$$f_1(t) = a \cdot \log(t + 1) + b, \quad (3)$$

b) wielomianowa drugiego rzędu:

$$f_2(t) = at^2 + bt + c, \quad (4)$$

c) wykładnicza typ 1:

$$f_3(t) = a + b(1 - e^{-t/\tau}), \quad (5)$$

d) wielomianowa trzeciego rzędu:

$$f_4(t) = at^3 + bt^2 + ct + d, \quad (6)$$

e) wykładnicza typ 2:

$$f_5(t) = ae^{-\left(\frac{t-b}{c}\right)^c}, \quad (7)$$

f) wykładnicza typ 3:

$$f_6(t) = ae^{bt}, \quad (8)$$

g) wykładnicza typ 4:

$$f_7(t) = ae^{bt} + ce^{dt}, \quad (9)$$

gdzie t – oznacza liczbę dni przez jakie oddziałowuje degradacja.

Celem najlepszego odwzorowania zmian degradacyjnych jest znalezienie współczynników wyżej wymienionych funkcji, np. a i b dla funkcji wykładniczej $f_6(t) = ae^{bt}$ (8). Funkcje aproksymujące, tzn. współczynniki założonych funkcji, wyznaczano na podstawie pomiarów w tab. 6, czego efektem są wartości przedstawione w tab. 7, tab. 8 i tab. 9 odpowiednio dla przewodu CT1, CT2 oraz CT3.

Tab. 7. Zestawienie współczynników funkcji aproksymujących dla parametrów przewodu CT1.

Wiersz (A) rodzaj funkcji aproksymującej, wiersz (B) współczynniki funkcji aproksymującej $f_n(t)$, kolumna (B) parametry przewodów.

(A)▶	$f_1(t)$		$f_2(t)$			$f_3(t)$			$f_4(t)$				$f_5(t)$			$f_6(t)$		$f_7(t)$			
(B)▶ ▼	a	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	d	a	b	c	a	b	a	b	c	d
R_w	3,776	368,8	-3,546	6,075	378,9	364,5	13,73	1,214	2,051	-5,976	3,955	379,8	381,6	18,56	106	372,5	0,0009	375,3	0,0005	-11,02	-19,82
R_s	15,39	283,5	-12,14	24,34	322,6	281,8	48,08	0,2343	9,553	-23,46	14,47	326,6	335	20,11	52,5	297,6	0,0047	325,3	0,0006	-43,91	0,271
L_s	0,1783	10,511	-0,248	0,325	11,051	10,021	0,728	18,12	0,0933	-0,358	0,229	11,09	11,16	16,05	68,05	10,71	0,0013	11,911	-0,003	-1,449	-0,11
C₁₁	68,39	482	-32,33	100,3	637	502,2	221,9	0,1062	21,21	-57,47	78,39	645,9	716	25,04	43,86	540,5	0,0115	603,6	0,0065	-112,2	-0,32
C₁₂	71,79	460,1	-39,24	108,9	627,5	479,6	233,7	0,1089	12,81	-54,42	95,7	632,8	705,3	23,46	39,23	522,3	0,0123	665,3	0,0022	-187,3	-0,13
C₂₃	0,3488	1,316	-0,036	0,465	1,995	1,518	1,659	0,0168	0,0159	-0,055	0,449	2,001	2,919	42,76	53,18	1,583	0,020	1,771	0,0153	-0,2725	-0,16
C₄₅	0,3407	1,288	-0,077	0,479	1,987	1,461	1,821	0,0152	-0,003	-0,072	0,482	1,986	2,61	32,4	42,86	1,557	0,0196	5094	-0,013	-5092	-0,013
C₇₁₀	0,19	0,6853	-0,029	0,267	1,064	0,7868	1,663	0,0182	-0,101	0,0902	0,372	1,021	1,451	32,93	41,8	0,827	0,021	1,5e+04	-0,008	-1,5e+04	-0,008

Tab. 8. Zestawienie współczynników funkcji aproksymujących dla parametrów przewodu CT2.

Wiersz (A) rodzaj funkcji aproksymującej, wiersz (B) współczynniki funkcji aproksymującej $f_n(t)$, kolumna (B) parametry przewodów.

(A)▶	$f_1(t)$		$f_2(t)$			$f_3(t)$			$f_4(t)$				$f_5(t)$			$f_6(t)$		$f_7(t)$			
(B)▶ ▼	a	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	d	a	b	c	a	b	a	b	c	d
R_w	-0,751	134,3	0,234	-1,155	132,7	133,5	-0,642	83,44	0,796	-0,709	-1,978	133,1	1,4e+13	-7,01e+04	1,3e+04	133,9	-0,0007	1,018e-15	1,246	134	-0,0009
R_s	32,92	255,2	-20,17	51,45	333,9	262,5	106,9	0,1184	7,432	-28,98	43,77	337	367,8	22,49	40,19	283,5	0,0106	398,8	-0,0023	-135,8	-0,094
L_s	0,478	10,24	-1,27	1,211	12,241	9,813	1,828	0,4236	-0,533	-0,637	1,761	12,011	12,551	14,74	30,82	10,851	0,0025	-4,6e+05	-0,0409	4,6e+05	-0,040
C₁₁	149,6	727,6	-135,3	230,6	1123	564,3	559,2	0,7773	158,3	-322,8	67,06	1189	1218	18,85	29,49	890,6	0,011	1075	0,0027	-514,4	-0,941
C₁₂	147,5	685,4	-125,3	228,2	1068	545,7	524,3	0,7764	113,2	-259,5	111,2	1116	1173	19,38	29,49	840,7	0,012	985,2	0,0052	-446,7	-1,159
C₂₃	0,965	2,373	-0,807	1,46	4,869	1,121	3,716	1,092	0,862	-1,83	0,568	5,229	5,509	19,57	25	3,449	0,017	4,348	0,0070	-3,249	-1,58
C₄₅	0,8219	2,426	-0,731	1,234	4,591	1,114	3,41	1,306	0,9486	-1,855	0,2539	4,985	5,068	18,95	25,82	3,365	0,01539	4,229	0,0045	-3,127	-1,699
C₇₁₀	0,4817	1,032	-0,306	0,7228	2,194	0,9977	1,476	0,2333	0,2785	-0,636	0,4351	2,311	2,636	22,081	26,62	1,521	0,022	1,985	0,010	-1,086	-0,535

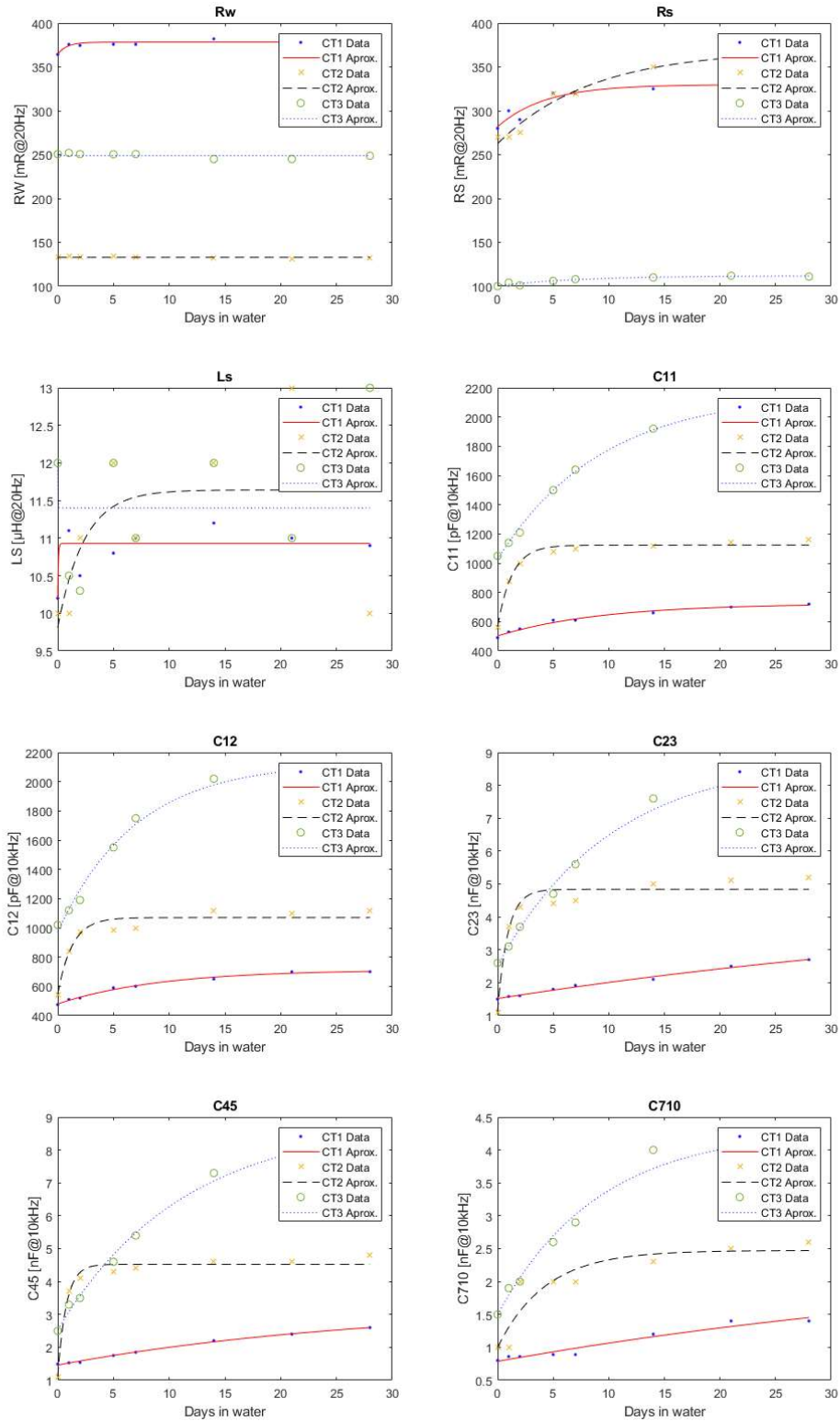
Tab. 9. Zestawienie współczynników funkcji aproksymujących dla parametrów przewodu CT3.

Wiersz (A) rodzaj funkcji aproksymującej, wiersz (B) współczynniki funkcji aproksymującej $f_n(t)$, kolumna (B) parametry przewodów.

(A)▶	$f_1(t)$		$f_2(t)$			$f_3(t)$			$f_4(t)$				$f_5(t)$			$f_6(t)$		$f_7(t)$			
(B)▶ ▼	a	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	d	a	b	c	a	b	a	b	c	d
R_w	-1,651	252,2	1,984	-3,287	247,4	250,7	-1,757	171,5	2,311	-0,752	-5,673	248,4	3,1e+25	-1,4e+05	1,9e+04	251	-0,0007	0,00396	0,2716	251,9	-0,0016
R_s	3,622	99,79	-2,614	5,815	108,8	100,4	11,491	0,1363	0,4996	-3,206	5,299	109	112,1	21,111	65,41	102,8	0,0035	131,9	-0,004	-31,34	-0,059
L_s	0,308	10,91	0,2934	0,2931	11,221	12	-0,6	33,2	0,4265	-0,212	-0,147	11,41	2,4e+42	4,4e+04	4607	11	0,0042	1,07e-15	1,245	11,171	0,0010
C₁₁	346,4	934,1	-197,6	533,8	1749	1026	1139	0,1073	59,25	-267,8	472,6	1774	2132	22,79	28,15	1256	0,021	2598	-0,005	-1566	-0,081
C₁₂	366,6	920,5	-260,6	585,5	1828	971,5	1161	0,1438	110,6	-391,7	471,2	1874	2184	21,071	25,41	1279	0,021	2650	-0,007	-1669	-0,1023
C₂₃	1,892	1,956	-1,076	2,932	6,404	2,514	6,36	0,09797	0,114	-1,211	2,814	6,452	8,614	22,42	21,87	3,847	0,031	-3,2e+05	-0,032	3,2e+05	-0,032
C₄₅	1,845	1,931	-0,968	2,822	6,197	2,534	6,345	0,08921	0,0634	-1,044	2,756	6,224	8,434	22,97	22,47	3,752	0,031	9,6e+04	-0,030	-9,6e+4	-0,030
C₇₁₀	0,860	1,281	-0,549	1,359	3,356	1,495	2,818	0,1111	0,07389	-0,637	1,283	3,387	4,295	21,64	22,62	2,133	0,027	-1,0e+05	-0,034	1,0e+05	-0,034

Powyższe dane zostały wykorzystane do stworzenia wykresów funkcji aproksymującej i zobrazowania jakości aproksymacji. Jednak można już wyciągnąć wniosek, iż pewne wartości współczynników funkcji aproksymujących (liczby bardzo małe 1,07e-15 lub liczby stosunkowo duże 3,2e+05) świadczą o braku dopasowania funkcji lub jej członu. W dalszej części przedstawiono przebiegi poszczególnych funkcji aproksymujących oraz wartości pomiarów kabli poddanych przyspieszonemu starzeniu w wyniku oddziaływania solnego roztworu.

Do wyboru funkcji aproksymującej wybrano parametr R^2 będący współczynnikiem determinacji, który jest statystyczną miarą tego, jak dobrze funkcja aproksymująca opisuje rzeczywiste dane. Na rys. 17 przedstawiono funkcje $f_3(t)$ - pretendenta na najlepsze dopasowanie degradacji parametrów kabli. Pozostałe wykresy funkcji zaprezentowano w Dodatku rozdz. 7.1.



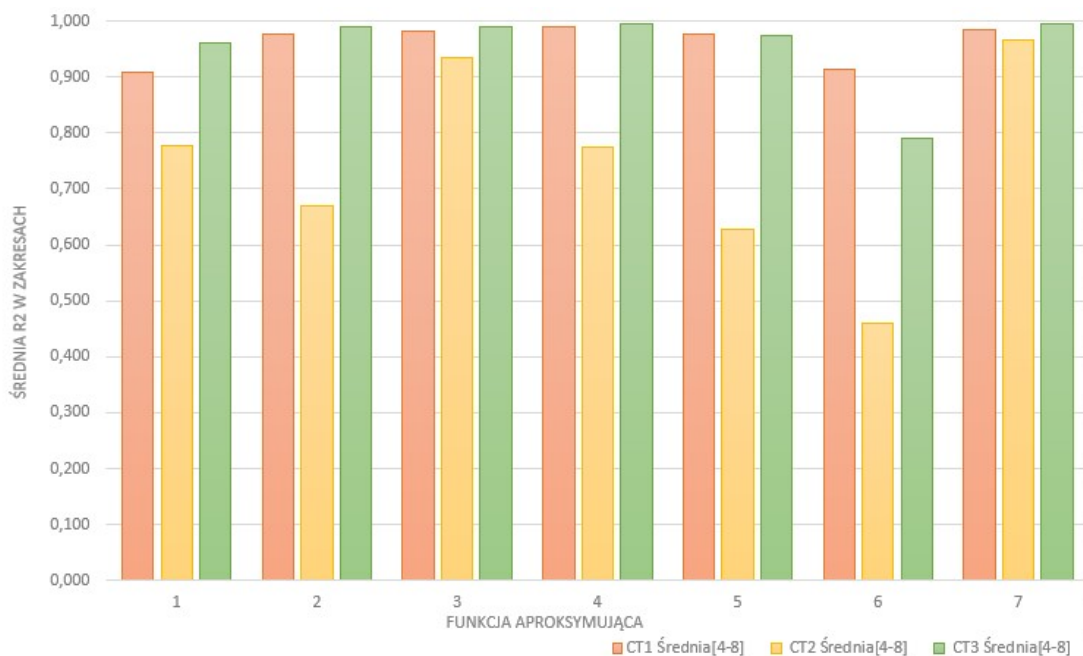
Rys. 17. Wykresy funkcji $f_3(t)$ aproksymującej degradację przewodów oraz wyniki pomiarów.

Dodatkowo parametry przewodów podzielono na dwie grupy. Pierwsza zawierała parametry o nieznacznej zmianie (wartość odchylenia poniżej 40% - tab. 4, tab. 5 i tab. 6), takie jak R_w , L_w , R_s , and L_s . Ta grupa zostanie pominięta w dalszej części analizy. Druga grupa natomiast, składająca się z parametrów przewodów o znacznej zmianie (wartość odchylenia powyżej 40%), obejmująca C_{11} , C_{12} , C_{23} , C_{45} , i C_{710} zostanie poddana dalszej analizie. Wartości współczynnika R^2 dla wybranych parametrów kabli przedstawiono w tab. 10.

Tab. 10. Wartości R^2 aproksymacji funkcji dla CT1, CT2 i CT3.

Typ przewodu	Funkcja aproksymująca	C_{11}	C_{12}	C_{23}	C_{45}	C_{710}	Średnia
		[pF] 10 kHz	[pF] 10 kHz	[nF] 10 kHz	[nF] 10 kHz	[nF] 10 kHz	
		4	5	6	7	8	[4-8]
CT1	$f_1(t)$	0,989	0,981	0,884	0,899	0,795	0,909
	$f_2(t)$	0,967	0,982	0,991	0,997	0,948	0,977
	$f_3(t)$	0,983	0,990	0,991	0,997	0,946	0,981
	$f_4(t)$	0,985	0,988	0,991	0,997	0,990	0,990
	$f_5(t)$	0,959	0,975	0,990	0,997	0,957	0,976
	$f_6(t)$	0,867	0,852	0,974	0,958	0,921	0,914
	$f_7(t)$	0,994	0,990	0,992	0,997	0,946	0,984
CT2	$f_1(t)$	0,786	0,822	0,747	0,666	0,870	0,776
	$f_2(t)$	0,671	0,723	0,625	0,539	0,796	0,671
	$f_3(t)$	0,988	0,936	0,956	0,981	0,863	0,934
	$f_4(t)$	0,834	0,813	0,736	0,703	0,850	0,775
	$f_5(t)$	0,629	0,690	0,575	0,489	0,760	0,628
	$f_6(t)$	0,420	0,485	0,405	0,327	0,624	0,460
	$f_7(t)$	1,000	0,978	0,994	0,998	0,894	0,966
CT3	$f_1(t)$	0,973	0,964	0,962	0,961	0,956	0,961
	$f_2(t)$	0,994	0,979	0,997	0,997	0,989	0,990
	$f_3(t)$	0,998	0,991	0,994	0,994	0,984	0,991
	$f_4(t)$	0,999	0,995	0,997	0,997	0,990	0,995
	$f_5(t)$	0,981	0,955	0,982	0,985	0,975	0,974
	$f_6(t)$	0,830	0,749	0,806	0,826	0,777	0,790
	$f_7(t)$	0,999	0,993	0,997	0,997	0,989	0,994

Lepsza jakość przybliżenia oznacza, że $R^2 \rightarrow 1$, jednak na podstawie wyników przedstawionych w tab. 10, trudno jest określić optymalne rozwiązanie, dlatego wizualizacja na rys. 18 stanowi bardziej intuicyjne podejście.



Rys. 18. Zobrazowanie wartości R^2 dla poszczególnych funkcji aproksymujących.

Na podstawie rys. 18 możemy wybrać 3 kandydatów: $f_3(t)$, $f_4(t)$ oraz $f_7(t)$, ponieważ ich wartości są najbliższe wartości równej 1. Biorąc pod uwagę wartości parametru R^2 , funkcja $f_4(t)$ posiada satysfakcjonujące odwzorowanie wartości, ale nie jest monotoniczna i nie ma ograniczonej wartości, gdy $t \rightarrow +\infty$. Podobne wnioski dotyczą $f_7(t)$, gdyż również nie ma ona granicy w $+\infty$. Ponadto dla funkcji $f_7(t)$ widać wyraźnie, iż zaburzone pomiary (rys. 43 podpunkt f) parametr L_s skutkują brakiem odpowiedniego dopasowania aproksymowanych wartości. Podsumowując, $f_4(t)$ oraz $f_7(t)$ zostały odrzucone ze względu na wyżej wymienione wady. Wobec czego najlepsze przybliżenie parametrów degradacji daje funkcja $f_3(t)$. Co szczególnie istotne, zgodnie z postulatem, ma ograniczenie w $+\infty$, ponieważ przyrost pojemności musi być ograniczony w długim okresie, ze względu na skończoną pustą przestrzeń przewodzie, do której może przeniknąć roztwór solny:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} (a + b(1 - e^{-t/\tau})) = a + b, \tau > 0. \quad (10)$$

Dlatego do opisu parametrów degradacji wybrano funkcję $f_3(t)$. Szczegółowe parametry $f_3(t)$ z uwzględnieniem wzoru (10) przedstawiono w tab. 11.

Tab. 11. Wartości współczynników $f_3(t)$ dla poszczególnych typów przewodów.

Parametr	CT1	CT2	CT3
C_{11} [pF@10 kHz] poj. pom. żyłami 1 pary	a = 502,2	a = 564,3	a = 1026
	b = 221,9	b = 559,2	b = 1139
	$\tau_{11} = 9,416$	$\tau_{21} = 1,287$	$\tau_{31} = 9,320$
C_{12} [pF@10 kHz] poj. pom. żyłami 2 pary	a = 479,6	a = 545,7	a = 971,5
	b = 233,7	b = 524,3	b = 1161
	$\tau_{12} = 9,183$	$\tau_{22} = 1,288$	$\tau_{32} = 6,993$
C_{23} [nF@10 kHz] poj. pom. 1 parą a ekranem	a = 1,518	a = 1,121	a = 2,534
	b = 1,659	b = 3,716	b = 6,360
	$\tau_{13} = 59,347$	$\tau_{23} = 0,916$	$\tau_{33} = 10,207$
C_{45} [nF@10 kHz] poj. pom. 2 parą a ekranem	a = 1,460	a = 1,114	a = 2,514
	b = 1,821	b = 3,41	b = 6,345
	$\tau_{14} = 28,377$	$\tau_{24} = 0,766$	$\tau_{34} = 11,210$
C_{710} [nF@10 kHz] poj. pom. parami	a = 0,7868	a = 0,9977	a = 1,495
	b = 1,663	b = 1,476	b = 2,818
	$\tau_{15} = 54,705$	$\tau_{25} = 4,286$	$\tau_{35} = 9,001$

Na podstawie danych przedstawionych tab. 11 można wyciągnąć następujące wnioski:

- a – parametr określa pojemność przed próbą degradacji (CN),
- b – parametr określa zmianę pojemności podczas testu degradacji (ΔC),
- a + b = (CN + ΔC) — definiuje oczekiwaną wartość końcową po procesie degradacji,
- τ_{nm} – parametr określa liczbę dni, których pojemność wzrosła o 63,2%, gdzie n definiuje typ kabla, a m odpowiada kolejnym parametrom kabla (np. C_{710}).

Inne wartości τ dla każdego typu kabla i analogicznych parametrów ($\tau_{1n} \neq \tau_{2n} \neq \tau_{3n}$, $n = 1, 2, 3$) spowodowane są różną budową mechaniczną przewodów CT1, CT2 i CT3. Można również zaobserwować prawidłowości dotyczące zbliżonych wartości analogicznych parametrów w obrębie jednego kabla ($\tau_{11} \approx \tau_{12}$, $\tau_{21} \approx \tau_{22}$, $\tau_{31} \approx \tau_{32}$ itd.). Niestety występuje

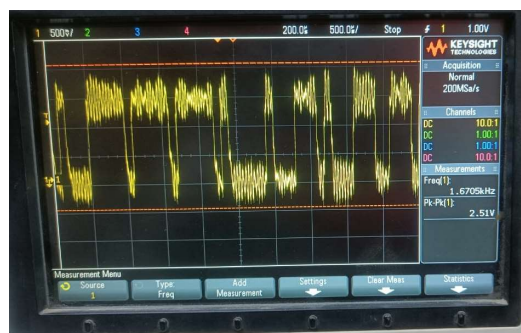
anomalia dotycząca rozbieżności τ_{13} i τ_{14} ($\tau_{13} \neq \tau_{14}$), może ona być spowodowana wpływami tlenków na końcach przewodów, które tworzą dodatkową impedancję między badanym obiektem a sondami miernika i niewielki błąd pomiarowy zaburzył wartości funkcji aproksymujących.

Konstrukcja przewodu ma wpływ na parametry jego modelu starzeniowego, co jest szczególnie widoczne w różnicach pomiędzy przewodem CT3 a przewodami CT1 i CT2 (pojemności C_{11} i C_{12} są około dwukrotnie większe dla CT3). Budowa kabla ma również wpływ na prędkość wypełniania wodą pustych przestrzeni w przewodzie, co ze względu na znacznie większą od powietrza przepuszczalność elektryczną, powoduje wzrost wszystkich pojemności pasożytniczych. Rolę odgrywa również konstrukcja ekranu oraz średnica przewodów sygnałowych i izolacji zewnętrznej (zwiększenie średnicy kabla oraz zwiększenie średnicy żył przy zachowaniu tej samej liczby żył zwiększa pustą przestrzeń wewnątrz kabla). W przypadku kabla CT1 (rys. 9) ekran w postaci folii metalowej i folii plastikowej dość ciasno owija kable sygnałowe, co skutkuje wydłużonym czasem degradacji (τ_{13} , τ_{14} , i τ_{15}), a tym samym odpowiada to długiemu okresowi wypełniania pustych przestrzeni w kablu roztworem. Pomimo odmiennej budowy, kabel CT3 (rys. 11) również wykazuje w pewnym zakresie podobne stałe czasowe do CT1 ($\tau_{11} \approx \tau_{13}$, $\tau_{12} \approx \tau_{32}$). Wobec czego można domniemywać, iż kable o zwartej budowie wymagają dłuższego czasu do penetracji roztworem soli. Roztwór najszybciej penetruje przewód CT2 (rys. 10) ($\tau_{21} < \tau_{11}$, τ_{31} , $\tau_{22} < \tau_{12}$, τ_{32} itd.), co prawdopodobnie wynika z jego największej średnicy zewnętrznej (luźne ułożenie elementów w środku), a co za tym idzie, ma najwięcej pustych przestrzeni wokół żył odpowiedzialnych za propagowanie sygnałów komunikacyjnych (luźna struktura).

2.5. Wpływ starzenia na charakterystykę częstotliwościową przewodu

Kabel jako medium komunikacyjne powinien zachować charakterystyki częstotliwościowe tak, aby umożliwić poprawną transmisję. Z tego względu przeprowadzona zostanie analiza wpływu starzenia na parametry częstotliwościowe jednostkowego odcinka kabla wykorzystywanego w systemach SRK. Zgodnie z informacjami zaprezentowanymi w rozdziale 2.4, zostanie do tego wykorzystana funkcja aproksymująca $f_3(t)$ na podstawie wzoru (5) celem określenia parametrów sygnału, tj. szerokości pasma przenoszenia oraz opóźnienia grupowego, które rzutują na prawidłowość transmisji CAN.

Należy jednak dodać, iż do wymiany danych pomiędzy urządzeniami przytorowymi (czujniki koła) a jednostką centralną wykorzystuje się prędkość 10kb/s. Dodatkowo magistrała CAN posiada możliwości konfiguracyjne, zwiększające jego odporności na zaburzenia elektromagnetyczne (wielokrotne próbkowanie sygnału wejściowego [126], ograniczanie zboczy sygnałów wyjściowych [88]) ponadto cechą charakterystyczną jest szeroka tolerancja dla napięć wejściowych sygnałów logicznych ($CAN_{Dominant}: 0,9V \div 5,0V$, $CAN_{Recessive}: -1,0V \div +0,5V$ [88]). Przykład zaburzeń niskoenergetycznych zarejestrowanych na magistrali CAN przedstawiono na rys. 19.

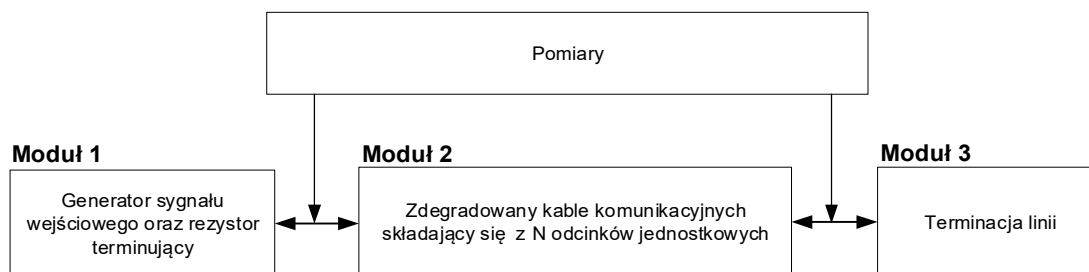


Rys. 19. Przykład rejestracji zaburzeń na działającej magistrali CAN w terenie.
(Fot. Własna)

Przebieg przedstawiony na powyższym rysunku jest mocno zniekształcony (tętnienia na poziomie 1,0V, przy amplitudzie sygnału użytecznego 2,5V), pomimo tego stan magistrali pozwalał wymieniać dane pomiędzy urządzeniami systemów SRK. Widać stąd, że zakłócenia nie są przeszkodą w transmisji, jednak inne parametry, np. opóźnienie i impedancje, powinny mieścić się w granicach standardu opisanego w [127], dlatego w dalszej części pracy rozważono zmiany występujące w charakterystykach impedancyjnych, a przede wszystkim opóźnieniu grupowym sygnałów, co ma kluczowe znaczenie dla zachowania poprawnej transmisji.

Aproksymację parametrów modelu jednostkowego odcinka przewodu wykorzystano do analizy parametrów sygnałowych. Parametry sygnału wyznaczono dla konkretnych czasów przyspieszonego starzenia, tj.: dla dni ze zbioru $\{0, 5T, 15T, 25T, 50T\}$, gdzie T określa parametry przewodu przed wpływem degradacji, 5T opisuje parametry przewodów po 5 dniach sztucznej degradacji, a 15T odpowiada 15 dniom przyspieszonej sztucznej degradacji itd. Powyższe badanie zostało przeprowadzone z wykorzystaniem programu LTspice. Zgodnie z założeniami przedstawionymi w rozdziale 2.2 kabel dalekosiężny składał się z dziesięciometrowych odcinków jednostkowych, gdzie każdy odcinek odwzoruje

parametry skupione rezystancje, pojemności, indukcyjności itd. Ideę analizy przedstawiono na rys. 20.



Rys. 20. Schemat testu badającego wpływ degradacji na zmiany parametrów przewodu komunikacyjnego stosowanego w systemach sterowania ruchem kolejowym.

Moduł 1 składa się ze źródła sygnału (V_{IN}) oraz terminacji linii, czyli rezystora 120Ω . Moduł 2 składa się z $N = 250$ elementarnych odcinków linii długiej (przedstawionych na rys. 12) symulując tym samym 2,5km kabla przytorowego. Przedstawiona konfiguracja jest przybliżeniem rzeczywistych warunków pracy, w których grupa urządzeń przytorowych (czujników koła) znajduje się ok. 2,5km od przekaźnikowni, w której zainstalowana jest jednostka centralna, więc do podłączenia urządzeń przytorowych pozostaje 1km przewodu. Zaimplementowany protokół transmisyjny opiera się na wymianie telegramów master (jednostka centralna) – slave (czujniki koła), jednak by spełnić wymagania protokołu CAN najbliższy czujniki musi w czasie $100\mu s$ [127] odpowiedzieć na weryfikację obecności urządzeń przytorowych przez jednostkę centralną. Moduł trzeci składa się z zakończenia linii: rezystora 120Ω (V_{OUT}).

W dalszej części tego rozdziału zostaną przedstawione poszczególne parametry linii, mające na celu zdefiniowanie różnic pomiędzy przewodem o nominalnych parametrach a takim, na który oddziałuje już degradacja. Pozwoli to ocenić możliwy wpływ degradacji na parametry sygnału, a tym samym na działanie całego systemu detekcji niezajętości.

2.5.1. Charakterystyka amplitudowa i opóźnienie grupowe

Symulacje oraz analizy przeprowadzono dla następujących charakterystyk:

a) amplitudowej (logarytmicznej):

$$K_L(\omega) = 20 \log \frac{V_{OUT}(\omega)}{V_{IN}(\omega)} \text{ [dB]}, \quad (11)$$

gdzie $V_{OUT}(\omega)$ — napięcie wyjściowe w dziedzinie częstotliwości, a $V_{IN}(\omega)$ — napięcie wejściowe,

b) opóźnienie grupowe:

$$\tau_\phi = -\frac{d\phi}{d\omega}, \quad (12)$$

gdzie $\phi(\omega)$ — reprezentuje przesunięcie fazowe.

Symulacje przeprowadzono dla następujących okresów: 0T, 5T i 50T. Parametry charakterystyczne determinujące degradację dla wszystkich rodzajów przewodów o długości 2,5km, składających się z 250 elementarnych odcinków, zawarto w tab. 12. W celu oceny zmiany analizowanych parametrów wykorzystano błąd względny δ opisany wzorem (1).

Tab. 12. *Wpływ degradacji zewnętrznego izolatora na parametry częstotliwościowe przewodów (długość $l = 2,5\text{km}$, co odpowiada 250 jednostkowym odcinkom 10m).*

Typ przewodu		CT1					
Okres czasu, T		0	5	15	25	50	δ_{CT1}
Częstotliwość graniczna -3 [dB] (kHz)		14,26	12,85	11,58	10,44	9,40	-34,08%
Opóźnienie grupowe [μs] (1kHz)		39,25	43,68	49,15	53,46	58,56	+49,20%
Typ przewodu		CT2					
Okres czasu, T		0	5	15	25	50	δ_{CT2}
Częstotliwość graniczna -3 [dB] (kHz)		17,4	8,51	8,45	8,42	8,39	-51,78%
Opóźnienie grupowe [μs] (1kHz)		29,15	51,31	52,50	52,60	52,61	+80,48%
Typ przewodu		CT3					

Okres czasu, T	0	5	15	25	50	δ_{CT3}
Częstotliwość graniczna -3 [dB] (kHz)	10,33	6,96	5,38	4,95	4,79	-53,63%
Opóźnienie grupowe [μ s] (1kHz)	47,29	74,62	96,34	102,04	104,34	+120,64%

Na podstawie powyższej tabeli można stwierdzić, iż największą zmianę częstotliwości granicznej o tłumieniu -3dB po czasie 50T można było zaobserwować dla przewodu CT3 (spadek o 53,63%), a podobny wynik odnotowano dla CT2 (spadek o 51,78%). Najmniejszy spadek częstotliwości granicznej odnotowano dla przewodu CT1 (spadek o 34,08%), częstotliwość graniczna po degradacji jest zbliżona do częstotliwości nośnej sygnału komunikacyjnego 10kb/s (10kHz), lecz ze względu na niemonotoniczny kształt charakterystyki częstotliwościowej i właściwości magistrali CAN (rozdz. 2.5) możliwe jest jedynie określenie charakteru oraz prędkości trendu zmian, jaki można zaobserwować pod wpływem zaproponowanego eksperymentu. Najszybciej degradującym się przewodem jest CT2 już po 5T częstotliwość graniczna spada o 51,31%.

Jednak znacznie ciekawszy wniosek można wyciągnąć z wyników pomiarów opóźnienia grupowego spowodowanego degradacją zewnętrznego izolatora. Wykazano że, po odpowiednio długim czasie, analizowana usterka uniemożliwi transmisję, ponieważ czas opóźnienia przekroczył maksymalną dozwoloną wartość określoną dla transmisji CAN, która wynosi 100 μ s [127] (wyniki dotyczą kabli o długości 2,5km). Nawet jeśli system jest zaprojektowany zgodnie z wymaganymi marginesami opóźnienia, np. 20%, degradacja spowoduje, że przewód CT1 nie nadaje się do użytku po 25T, przewód CT2 nie nadaje się do użytku po 5T, a przewód CT3 jest bezużyteczny po około 1T przy założeniu, iż uszkodzenie występuje co 10m i jest to najgorszy przypadek.

Szczegółowy przebieg charakterystyk kabli dla odcinków czasu: 0, 5 i 50 T przedstawiono w rozdz. 7.2 na rys. 44 (kabel CT1), rys. 45 (kabel CT2) oraz rys. 46 (kabel CT3).

2.5.2. Zmiana impedancji wejściowej i wyjściowej linii transmisyjnej

Następne rozważono zmianę impedancji linii komunikacyjnej, pod wpływem degradacji zewnętrznego izolatora w celu określenia aktualnego stanu technicznego kabla zasilająco-komunikacyjnego dla urządzeń przytorowych będącego w użyciu. Wyznaczono impedancję wejściową:

$$Z_{IN}(\omega) = \frac{V_{IN}(\omega)}{I_{IN}(\omega)}, \quad (13)$$

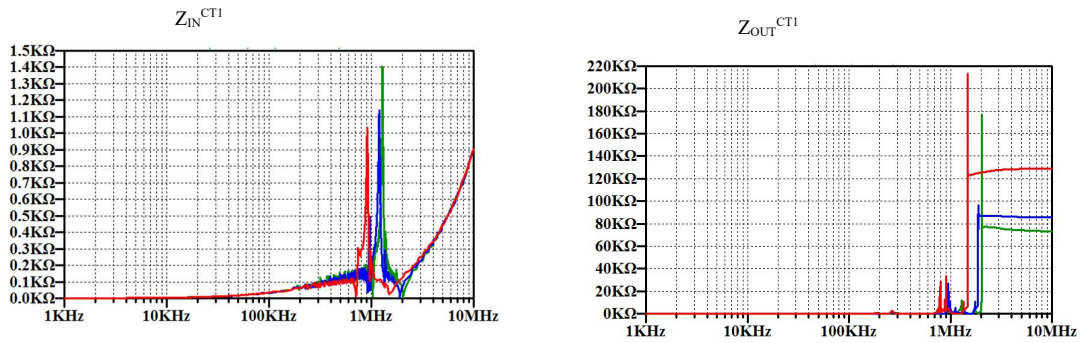
gdzie $V_{IN}(\omega)$ – napięcie na wejściu linii transmisyjnej, a $I_{IN}(\omega)$ – prąd na wejściu linii transmisyjnej i impedancję wyjściową:

$$Z_{OUT}(\omega) = \frac{V_{OUT}(\omega)}{I_{OUT}(\omega)}, \quad (14)$$

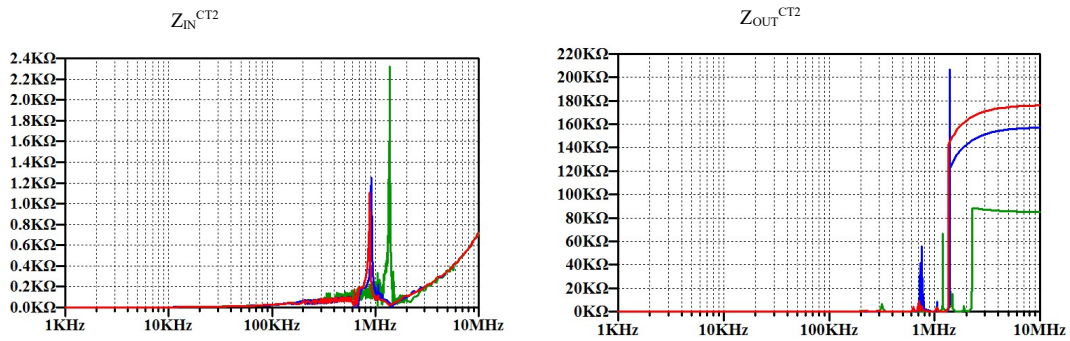
gdzie $V_{OUT}(\omega)$ – napięcie na wyjściu linii transmisyjnej, a $I_{OUT}(\omega)$ – prąd na wyjściu linii transmisyjnej.

Charakterystyki impedancji wejściowej $Z_{IN}(\omega)$ oraz wyjściowej $Z_{OUT}(\omega)$ dla trzech typów przewodów, które zostały poddane symulacji degradacji zewnętrznego izolatora przedstawiono na rys. 21. Kolor zielony przedstawia charakterystykę przewodu o parametrach nominalnych, kolor niebieski odpowiada degradacji przewodu w okresie 5T. Natomiast kolor czerwony obrazuje charakterystykę dla okresu 50T.

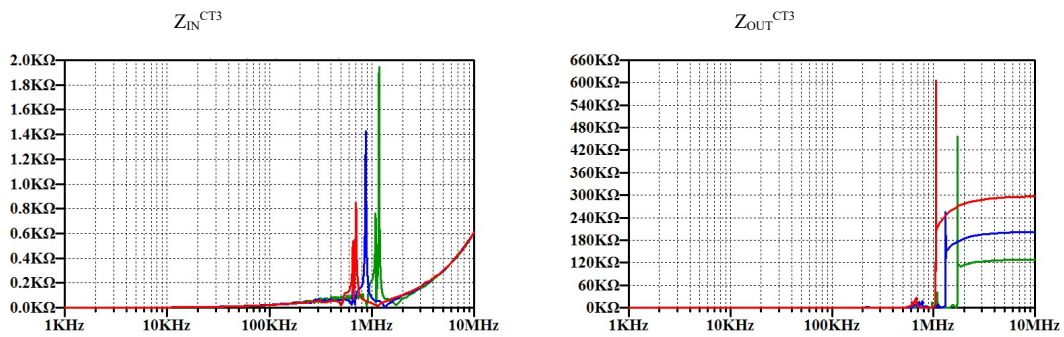
(a) Przewód CT1:



(b) Przewód CT2:



(c) Przewód CT3:



Rys. 21. Impedancja wejściowa przewodu CT1 (a), przewodu CT2 (b) i przewodu CT3 (c) (okres degradacji: zielony-0 T, niebieski-5 T, i czerwony-50 T).

Ocenę stanu kabla przeprowadzono w oparciu o następujące parametry:

- f_{Zin}^P — częstotliwość, dla której impedancja wejściowa (Z_{IN}) ma maksymalną wartość,
- $Z_{IN}^P(f_{Zin}^P)$ — wartość impedancji wejściowej dla częstotliwości opisanej powyżej f_{Zin}^P ,
- f_{Zout}^P — częstotliwość, dla której impedancja wyjściowa (Z_{OUT}) ma maksymalną wartość,
- $Z_{OUT}^P(10MHz)$ – impedancja wyjściowa dla częstotliwości 10MHz.

Szczegółowe wyniki dla powyższych punktów charakterystycznych $Z_{IN}(\omega)$ oraz $Z_{OUT}(\omega)$ dla trzech typów przewodów, a także ich zmiany względne (δ), przedstawiono w tab. 13.

Tab. 13. Wpływ degradacji zewnętrznego izolatora na parametry impedancyjne przewodów (długość $l = 2,5km$, co odpowiada 250 jednostkowym odcinkom 10m).

Typ przewodu		CT1				
Okres czasu, T	0	5	15	25	50	δ_{CT1}
f_{Zin}^P (kHz)	1283	1191	1077	956,75	1027	-19,95%
$Z_{IN}^P(f_{Zin}^P)$ (k Ω)	1,406	1,140	0,9290	1,239	0,9082	-5,40%
f_{Zout}^P , [MHz]	2,036	1,875	1,704	1,607	1,485	-27,06%
Z_{OUT}^P , [k Ω]	73,27	85,63	103,26	112,10	129,04	+76,12%
Typ przewodu		CT2				
Okres czasu, T	0	5	15	25	50	δ_{CT2}
f_{Zin}^P (kHz)	1378	916,50	878,56	877,34	877,34	-36,36%
$Z_{IN}^P(f_{Zin}^P)$ (k Ω)	2,321	1,229	1,223	1,129	1,129	-51,36%
f_{Zout}^P , [MHz]	2,268	1,393	1,385	1,379	1,37	-39,59%
Z_{OUT}^P , [k Ω]	85,05	157,13	174,55	176,10	176,10	+107,1%
Typ przewodu		CT3				
Okres czasu, T	0	5	15	25	50	δ_{CT3}
f_{Zin}^P (kHz)	1177	873,60	744,95	712,13	700,86	-40,45%
$Z_{IN}^P(f_{Zin}^P)$ (k Ω)	1,970	1,424	1,029	930,93	872,53	-55,71%
f_{Zout}^P , [MHz]	1,734	1,327	1,129	1,081	1,059	-38,93%
Z_{OUT}^P , [k Ω]	128,52	202,07	267,03	287,59	296,31	+130,5%

Degradacja zewnętrznego izolatora, a tym samym napływ roztworu solnego przesuwają f_{zin}^P w kierunku niższych częstotliwości (zwiększenie pojemności pomiędzy poszczególnymi elementami przewodu) dla wszystkich typów przewodów, ale największy wpływ można zauważyć w przypadku CT3, ponieważ f_{zin}^P maleje o 40,45%, podczas gdy dla CT1 zmniejsza się o 19,95%, a dla CT2 maleje o 36,36%, co wprost wynika z budowy przewodu.

Dla charakterystyki $Z_{OUT}(\omega)$ zmiany są analogiczne do tych obserwowanych dla $Z_{IN}(\omega)$, w obu przypadkach przebieg funkcji jest złożony, jednak w ocenie Autora lepszym wyborem dla weryfikacji stanu degradacji przewodu będzie impedancja wejściowa $Z_{IN}(\omega)$, ponieważ taki pomiar jest bardziej przystępny, jeśli chodzi o warunki terenowe (brak konieczności dostępu do końca linii, pomiar może być wykonany bezpośrednio z pomieszczenia SRK).

Przeprowadzone badania wskazują, iż do weryfikacji stanu degradacji okablowania należy wykorzystać impedancję wejściową oraz całkowite opóźnienie grupowe, a także ich zmiany w czasie. Główną zaletą tej metody jest to, że nie jest wymagana rekonfiguracja aktualnie używanej infrastruktury, terminacja linii jest obecna – rezystor 120Ω , moduł magistrali CAN w stanie oczekiwania przyjmuje stan wysokiej impedancji na wejściach. W związku z czym nie ma potrzeby odłączania urządzeń przytorowych lub dodawania dedykowanych zakończeń na końcu linii transmisyjnej.

2.6. Podsumowanie

W rozdziale tym opracowano model jednostkowego odcinka przewodu oraz przeprowadzono eksperyment dla najbardziej typowego przypadku uszkodzenia zewnętrznego izolatora, poprzez który do wewnątrz przedostaje się woda. Wprowadzono procedurę sztucznego przyspieszonego starzenia przewodu, co w konsekwencji umożliwiło wyznaczenie trendu zmian parametrów kabla wykorzystywanego w przemyśle kolejowym do połączeń pomiędzy urządzeniami systemów SRK.

Stwierdzić należy znikomy wpływ roztworu soli na parametry rezystancyjne, z wyjątkiem rezystancji ekranu R_s , który ze względu na swoją budowę fizyczną (folia aluminiowa lub plecionka) silnie się degradowa. Prowadzi to do dość istotnego wniosku, że połączenie ekranu z uziemieniem należy odpowiednio zabezpieczać, a w przypadku oddziaływania agresywnych warunków środowiskowych, narażony fragment należy obciążać. W związku z czym konieczne jest stosowanie odpowiednich zapasów okablowania w punktach krytycznych instalacji.

Największy wpływ roztworu soli można zaobserwować dla pojemności pomiędzy elementami okablowania. Opisane zmiany punktów charakterystycznych impedancji wejściowej mogą zostać wykorzystane w celu stworzenia nowych testów diagnostycznych dla istniejących instalacji. Przedstawione wnioski mogą być wykorzystane, także w procesie predykcijnego utrzymania ruchu, w celu zwiększenia niezawodności działania systemu, a nie tylko usuwania bieżących usterek. Ma to szczególne znaczenie w przypadkach, kiedy dostęp do samej infrastruktury jest znacznie ograniczony, np. jeśli dana linia kolejowa należy do infrastruktury krytycznej, np. w aspekcie militarnym, gospodarczym lub politycznym (główne magistrale kolejowe, linie kolejowe wykorzystywane do złożonych procesów przemysłowych np. obsługujące elektrownie) lub gdy dotyczy to linii kolejowych znajdujących się na obiektach z ograniczoną możliwością dostępu (tunele, wiadukty, zamknięte ośrodki przemysłowe o znaczeniu strategicznym itd.).

Przewód typu skrętka jest uniwersalnym medium komunikacyjnym dla innych sektorów przemysłu, np. chemicznego, energetycznego, górnictwa itp., gdzie urządzenia zlokalizowane w różnych częściach zakładu muszą wymieniać informacje, by nieprzerwanie prowadzić proces zgodnie z zaprojektowanym procesem, jednocześnie będąc wystawionym na bardzo agresywne warunki środowiskowe. Z tego powodu opis modelu degradacji zewnętrznego izolatora ma duże znaczenie praktyczne.

Ponadto model odcinka jednostkowego linii komunikacyjnej i dane uzyskane w tym rozdziale, zostaną wykorzystane w celu zbudowania pełnego modelu ochronnika przeciwprzepięciowego dla magistrali CAN wykorzystywanej w systemach SRK, co zostanie opisane w kolejnym rozdziale.

3. Dobór elementów ochronnika z wykorzystaniem algorytmu genetycznego

W rozdziale tym przedstawiona zostanie autorska metoda GACSOP („Genetic Algorithm Component Selection for Overvoltage Protection”), która umożliwia dobór elementów ochronnika interfejsu komunikacyjnego na napięcia udarowe.

Trudność przy projektowaniu ochronników polega na wzajemnym wpływie poszczególnych elementów, np. zmniejszenie napięcia zadziałania diody transil (np. D4 - rys. 22.) znacząco wpływa na wzrost prądu płynącego przez rezystory (GR9 oraz GR10 - rys. 22.).

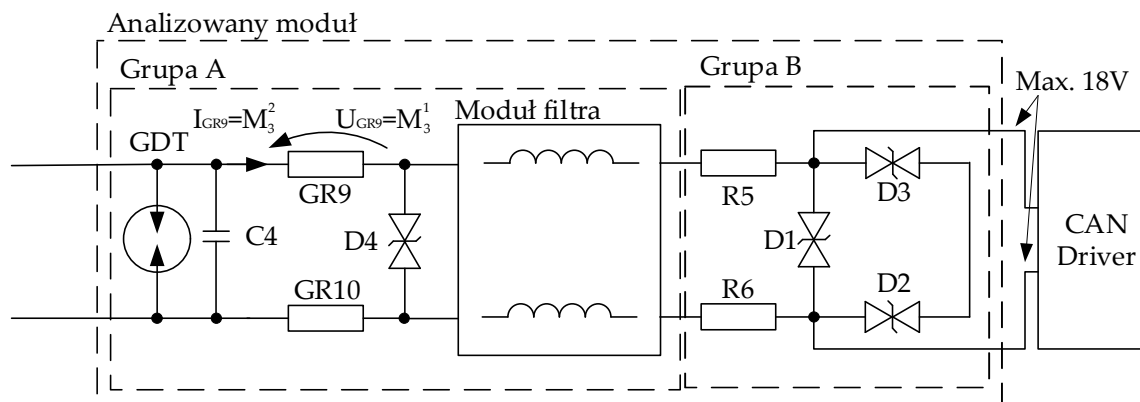
Założenia wstępne:

- a) schemat ideowy ochronnika nie może ulec zmianie,
- b) konstrukcja ogranicza liczbę i rozmiar komponentów w dostępnej przestrzeni urządzenia (czujnik koła) – brak możliwości zmian form obudów głowicy zintegrowanej oraz kabla przyłączeniowego (rys. 6),
- c) elementy ochronnika muszą zawierać się w zbiorze komponentów, który może być modyfikowany w zależności od dostępności ich na rynku, oparty wyłącznie na istotnych parametrach związanych z rozpraszaniem energii.

W dalszej części tego rozdziału zaprezentowano opis oraz wykorzystanie omawianej metody GACSOP celem zwiększenia dostępności systemów SRK.

3.1. Model ochronnika przeciwprzepięciowego interfejsu komunikacyjnego

Topologię modułu ochronnika przeciwprzepięciowego rozważanego w pracy przedstawiono na rys. 22.



Rys. 22. Topologia ochronnika przeciwprzepięciowego cyfrowego interfejsu komunikacyjnego CAN urządzenia przytorowego.

By zapewnić maksymalny stopień ochrony został on zaprojektowany w oparciu o zabezpieczanie stopniowe, to znaczy poszczególne grupy elementów odpowiadają za przejmowanie energii z określonej grupy napięć. Pierwszym stopniem ochrony jest iskrownik (GDT), którego zadaniem jest ograniczenie wpływu napięć o największych amplitudach rzędu kilkuset i kilku tysięcy Voltów. Następnie zlokalizowane są grupy odpowiedzialne za dalsze stopniowanie ochrony:

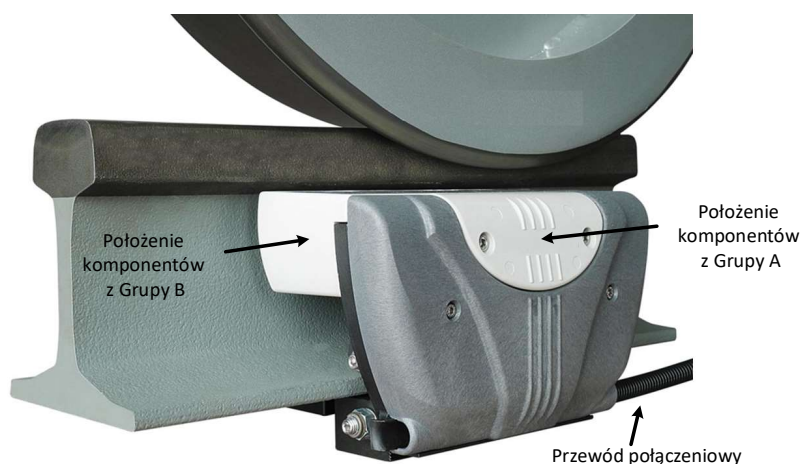
- GR9, GR10 i D4 - napięcia pośrednie, pomiędzy zakresem GDT a ochroną bezpośrednią,
- R5, R6, D3, D2 i D1- ochrona bezpośrednia, gdzie poszczególne napięcia nie mogą przekroczyć dozwolonych napięć pracy dla danego modułu magistrali CAN.

Kondensator C4 przedstawionym na rys. 22 ogranicza prędkość narastania impulsów napięciowych w celu poprawy warunków pracy iskrownika, tzn. szybsze narastanie napięcia wejściowego oznacza wolniejsze zadziałanie iskrownika [128].

Zaznaczone na rys. 22 grupy (A, B) odpowiadają lokalizacji poszczególnych komponentów w strukturze urządzenia, tzn. grupa A znajdująca się w części bezpośrednio związanej z przewodem przyłączeniowym (rys. 23), może być wymieniana niezależnie od

głównej części urządzenia, natomiast grupa B znajduje się w zasadniczym urządzeniu przytorowym (głowicy zintegrowanej), gdzie znaleźć można elementy aktywne, odpowiedzialne za działanie czujnika koła. Wymiana głowicy zintegrowanej (łącznie z elementami grupy B) wiąże się z wysokimi kosztami oraz koniecznością zaangażowania personelu na dłuższy czas i dlatego należy minimalizować tego typu działania. W związku z powyższym w przedstawionej metodzie, zostanie zaproponowany współczynnik zarządzania ryzykiem uszkodzenia komponentów w poszczególnych grupach.

Dodatkowo na schemacie widoczny jest również filtr indukcyjny, którego parametry zostały ujęte w symulacjach, jednak jego głównym zadaniem jest eliminacja zaburzeń przewodzonych, założono że jego parametry pozostaną stałe w procesie doboru elementów. Umieszczenie poszczególnych grup komponentów zostało przedstawione na rys. 23.



Rys. 23. Urządzenie przytorowe typu czujnik koła. Lokalizacja poszczególnych grup komponentów ochrony przeciwprzepięciowej cyfrowego interfejsu komunikacyjnego CAN. (Fot. ALSTOM ZWUS)

Urządzenie przytorowe montowane jest bezpośrednio na szynach kolejowych, w międzytorzu. Ponadto nie ma możliwości zbliżenia się do urządzenia bezpośrednio podczas przejazdu lub obecności pociągu, np. celem pomiaru lub oględzin. Zarówno głowica, jak i kabel przyłączeniowy, by zminimalizować wpływ czynników środowiskowych (wilgoć, agresywne gazy, napływ wody itd.), wypełnione są mieszanką specjalnie opracowanych zalew, które praktycznie uniemożliwiają weryfikację uszkodzeń komponentów wewnętrznych. Oczywiście można do tego celu wykorzystać maszyny CNC lub inne umożliwiające precyzyjne mechaniczne oddzielenie elementów elektronicznych od

zalewy, jednak jest to proces żmudny, drogi i nie dający pewności, iż elementy elektroniczne, ze względu na swój kształt, nie zostaną uszkodzone podczas tego procesu.

Ponadto, ze względu na optymalizację zarządzania komponentami i topologię (rys. 22) przyjęto, że diody D2 oraz D3 będą miały taką samą specyfikację, pozwoli to zmniejszyć liczbę przypadków testowych i zoptymalizować łańcuch dostaw. Analogiczne założenia zastosowano w przypadku elementów rezystancyjnych, tj.: $GR9 = GR10$ i $R5 = R6$.

Dodatkowo wprowadzono ograniczenie na maksymalną sumę rezystancji w ochronniku:

$$R_{\Sigma R} = (GR9 + GR10 + R5 + R6) \leq 18 \Omega, \quad (15)$$

ze względu wewnętrzne wymagania projektowe, ponieważ większa wartość mogłaby spowodować zakłócenia w transmisji na dużych odległościach.

W celu optymalizacji dostępnego miejsca w przypadku wszystkich komponentów, z wyjątkiem C4, wykorzystano obudowy przystosowane do montażu powierzchniowego. Wyjątek podyktowany jest brakiem na rynku kondensatorów do montażu powierzchniowego z możliwością pracy z napięciami powyżej 3kV i odpornością na udary mechaniczne.

3.2. Parametry krytyczne komponentów

W poniższym rozdziale zostaną opisane komponenty wykorzystane w budowie ochronnika wraz z analizą parametrów krytycznych, które zostaną wykorzystane w procedurze doboru elementów E tak, aby wskazane parametry M umożliwiły wyznaczenie funkcji celu, oceniającej rozwiązania dla wektorów wejściowych wygenerowanych przy pomocy proponowanej metody. Zaznaczyć należy, że elementy E są zbiorem wszystkich rozważanych komponentów badanego układu:

$$E \in \{R, C, D\}, \quad (16)$$

Przy czym R to zbiór rozważanych rezystorów, C to zbiór rozważanych kondensatorów, a D zbiór rozważanych diod. Dla elementów E wykonywana jest symulacja, wynikiem której są wartości newralgicznych parametrów M , do którego należą:

$$M \in \{M_1^1, M_1^2, \dots, M_k^i, \dots, M_{N_e}^{N_p}\}, \quad (17)$$

gdzie:

$i \in (1, 2, \dots, N_p)$ – indeks analizowanego parametru,

N_p - liczba analizowany parametrów ($N_p \in \mathbb{N}$),

$k \in (1, 2, \dots, N_p)$ – indeks analizowanego elementu,

N_e - liczba analizowany komponentów ($N_e \in \mathbb{N}$).

Natomiast element M_k^i należy do zbioru parametrów pracy elementów:

$$M_k^i \in \{U_{max}, I_{max}, P_{mean}, P_{max}, \}, \quad (18)$$

czyli napięcie maksymalne ($M_k^1 = U_{max}$), prąd maksymalny ($M_k^2 = I_{max}$), średnią moc ($M_k^3 = P_{mean}$) oraz moc chwilową ($M_k^4 = P_{max}$) charakteryzującą dany element (k), np.: M_5^4 oznacza czwarty parametr dla komponentu piątego, czyli P_{max}^D (tab. 16).

3.2.1. Iskrownik

Iskrownik na rys. 22 oznaczony jako GDT (Gas Discharge Tube). Wykorzystano SG75 [128], czyli dwuelektrodowy iskrownik, ponieważ w tym wypadku nie mamy dostępnego potencjału uziemienia, do którego moglibyśmy podłączyć 3 elektrodę. Niestety cechą immanentną iskrowników jest to, że aby doszło do zapłonu (czasowego ograniczenia napięcia) napięcie musi przekroczyć w przypadku SG75 około 650V. Ponieważ mamy do czynienia z sygnałem symetrycznym, o relatywnie niskiej amplitudzie (do 2,5V_{pp}), nie ma możliwości podtrzymania zapłonu iskrownika przez sygnał użyteczny.

Producent poza parametrami zapłonu i potrzymania podaje jedynie maksymalny prąd na poziomie $I_{max}^{GDT} = 2\text{kA}$, która to wartość zostanie wykorzystana w dalszych analizach. Obudowa iskrownika została przedstawiona na rys. 24.



Rys. 24. Iskrownik SG75.

3.2.2. Transile

Zbiór diod wykorzystany w procedurze ma postać:

$$\mathbf{D} = \{D_1, D_2, D_3, D_4\}, \quad (19)$$

gdzie \mathbf{D} jest zbiorem rozważanych diod D_N , każda z diod może przyjmować wartości z następującego zbioru:

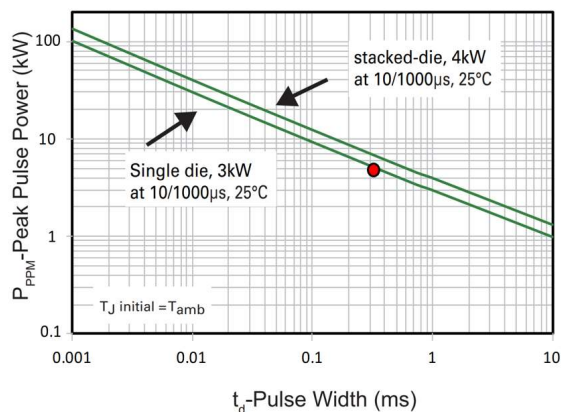
$$D_N = \{D_1, D_2, D_3, \dots, D_{ds}\}, \quad (20)$$

gdzie $N = 1, 2, 3, 4$ oraz $ds = 32$.

W badaniach zostaną wykorzystane trzydzieści dwie diody dwukierunkowe (zaprezentowane na stronie 2 w [129]): SMDJ5.0CA do SMDJ58CA.

Oznaczone na rys. 22 transile D1, D2, D3 oraz D4 to wyspecjalizowane diody zaprojektowane w celu zabezpieczenia elementów elektronicznych przed oddziaływaniem przepięć. Główną zaletą transili jest bardzo szybki czas reakcji na poziomie nie większym niż $t_r=1\text{ps}$ [129].

W notach katalogowych dostępne są charakterystyki mocy chwilowej impulsu [129], która posłużyła do wyznaczenia mocy maksymalnej na poziomie $P_{max}^D = 5\text{kW}$ (rys. 25), co wynika z założonego czasu trwania narażenia (omówiono w rozdz. 3.4) $T_t = 300\mu\text{s} = 0,3\text{ms}$ (rys. 7).



Rys. 25. Dobór maksymalnej mocy dla omawianych transili w korelacji z czasem narażenia.

Dodatkowym ograniczeniem są także maksymalne prądy I_{max}^D , jakie może przewodzić tego typu dioda przy danym narażeniu - informacje te możemy odnaleźć w notcie katalogowej producenta [129].

3.2.3. Rezystory

Zbiór rezystorów, który wykorzystano w badaniach można zapisać w postaci:

$$\mathbf{R} = \{R5, R6, GR9, GR10\}, \quad (21)$$

gdzie \mathbf{R} jest zbiorem rozważanych rezystancji.

Rezystory z grup GR9 i GR10 mogą przyjmować wartości z następującego zbioru:

$$GR_N \in \{n \cdot GR_1, n \cdot GR_2, n \cdot GR_3, \dots, n \cdot GR_i, \dots, n \cdot GR_{rs}\}, \quad (22)$$

gdzie $N = 9$ lub 10 , $rs = 16$, a $n \in \mathbb{N}$, $n > 0$, $n \leq 8$ - oznacza liczbę rezystorów w grupie GR_N . Przy czym element powyższego zbioru - GR_i może przyjmować poniższe wartości:

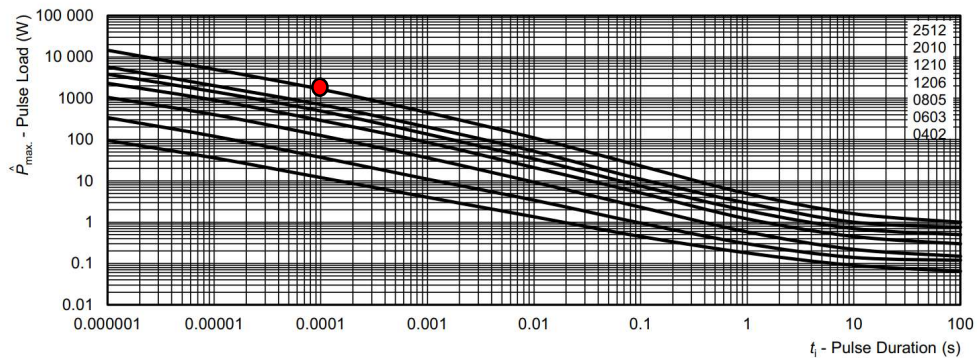
$$GR_i \in \{1; 1,2; 1,5; 1,8; 2,2; 2,7; 3,3; 3,9; 4,7; 5,1; 5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1\}[\Omega], \quad (23)$$

Zestaw dopuszczalnych wartości rezystancji dla R5 i R6 został ograniczony do zakresu:

$$R_i \in \{1; 1,2; 1,5; 1,8; 2,2; 2,7; 3,3; 3,9\}[\Omega], \quad (24)$$

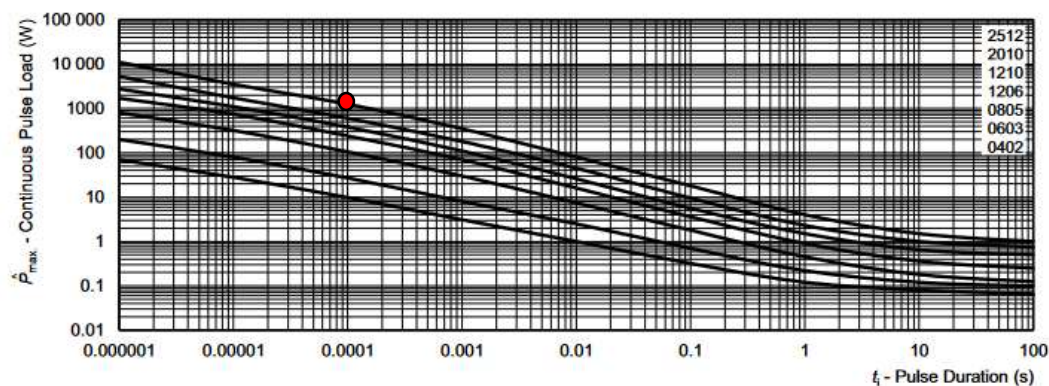
gdzie $i = 5$ lub 6 . Na potrzeby dalszego opracowania element tego zbioru zostanie oznaczony symbolem $R_{5,6}$.

Maksymalna moc chwilowa na podstawie charakterystyk dostarczonych przez producenta [130] wynosi $P_{max}^R = 5\text{kW}$. Czerwony marker na rys. 26 wskazuje maksymalny punkt mocy dla rezystora o rozmiarze obudowy 2512 i czasie trwania impulsu $T_t^R = 100\mu\text{s}$ (uzasadnienie przytoczonego czasu narażenia znajduje się w rozdz. 3.4).



Rys. 26. Charakterystyki dopuszczalnych mocy chwilowych rezystorów w funkcji czasu narażenia [130].

Natomiast dopuszczalna moc średnia P_{mean}^R , zgodnie z informacjami [130] dostarczonymi przez producenta, nie może przekroczyć 1kW (rys. 27) dla narażenia o czasie trwania $T_t^R = 100\mu s$.



Rys. 27. Charakterystyki dopuszczalnych mocy średnich rezystorów w funkcji czasu narażenia [130].

3.2.4. Kondensator

Zbiór rozważanych pojemności ma postać:

$$C = \{C_4\}, \quad (25)$$

gdzie C jest zbiorem rozważanych pojemności, dla obwodu ochronnika:

$$C_4 \in \{1,0; 2,2; 3,3; 4,7; 5,6; 6,8; 8,2; 10\} [nF], \quad (26)$$

Zbiór takich wartości pojemności został wybrany ze względu na dostępne miejsce i ograniczenia technologiczne (komponent musi się mieścić w prostopadłościanie o wymiarach 25mm x 25mm x 5mm). Maksymalne wymiary kondensatora są ograniczone wielkością modułu przyłączeniowego przewodu, tam gdzie znajdują się elementy z grupy A, większe kondensatory nie zmieszczą się w dostępnej przestrzeni kabla przyłączeniowego. Kondensator posiada jedno istotne ograniczenie opisane w karcie katalogowej, tj. maksymalne napięcie pracy określono jako 150% jego wartości nominalnej (tzn. 3kV [131], $U_{max}^C = 4,5kV$).

3.3. Kodowanie problemu

Do rozwiązania problemu selekcji specyfikacji ochronnika przeciwprzepięciowego cyfrowego interfejsu komunikacyjnego urządzenia przytorowego (czujnika koła), celem spełnienia wymagań kolejowych, Autor proponuje metodę opartą na algorytmie genetycznym. Dobór odpowiednich elementów obwodu ochronnego jest procesem czasochłonnym, ponieważ w przypadku obwodu przedstawionego na rys. 22 i zdefiniowanych zbiorach komponentów: D_N (20), GR_i (23), $R_{5,6}$ (24), C_4 (26) oraz ich parametrach dodatkowych (liczebność rezystorów w grupach GR_N) liczba wszystkich kombinacji przekracza 268 milionów (tab. 14).

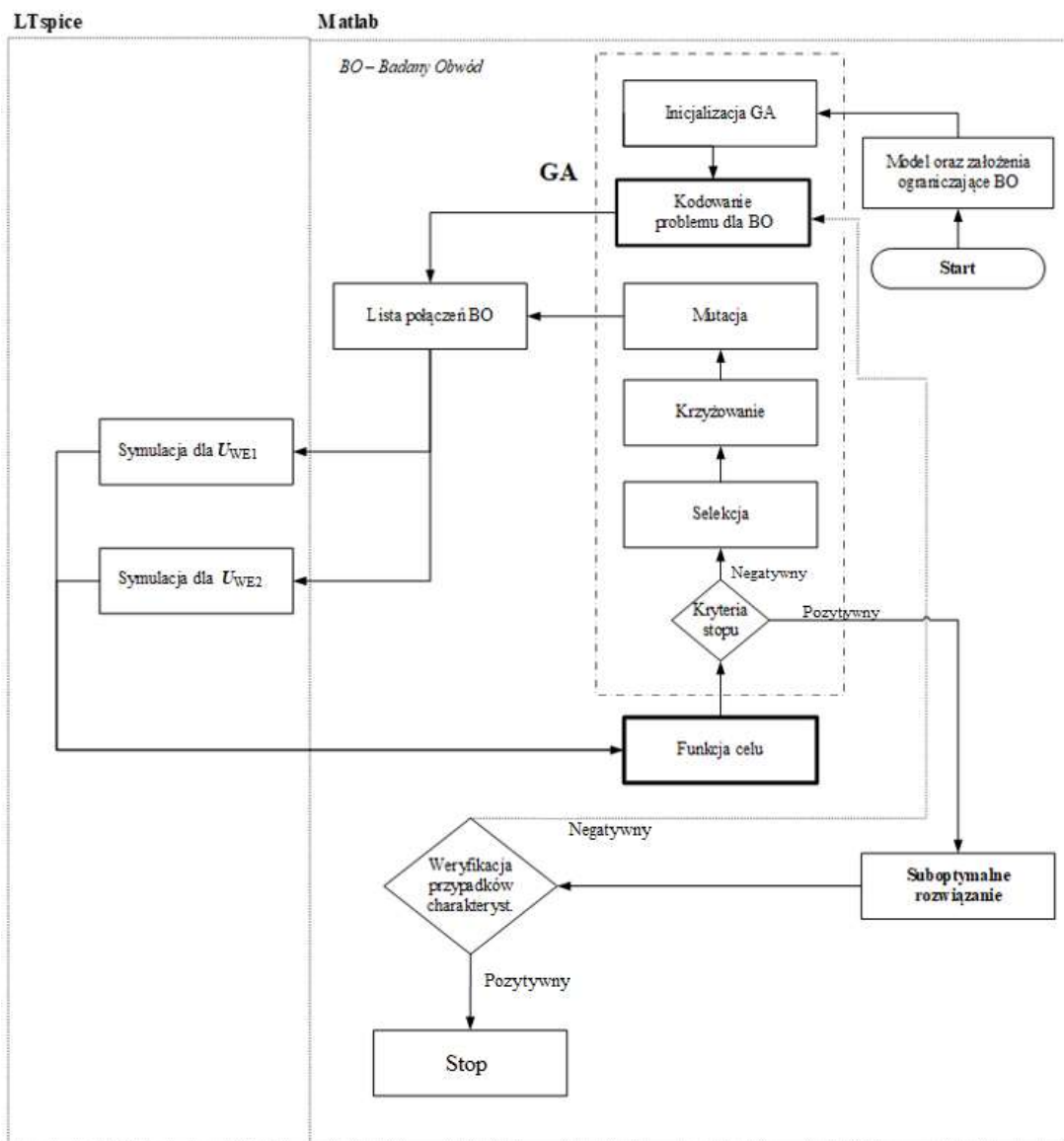
Tab. 14. Zestawienie liczebności predefiniowanego zbioru komponentów ochronnika przeciwprzepięciowego.

Grupa	Komponent	Liczebność predefiniowanego zbioru
A	C4	2^3
	GDT	2^0
	GR9	2^4
	GR10	
	D4	2^5
B	R5	2^3
	R6	
	D1	2^5
	D2	2^5
	D3	
Liczba rezystorów w grupie R9 i R10		2^3
Suma kombinacji		$2^{28} = 268\ 435\ 456$

Średnio analiza pojedynczego obwodu zajmuje około 50 sekund (potrzebne są dwie analizy na jedną iterację – dwa warianty napięć udarowych), a zatem przybliżony całkowity czas potrzebny na wyczerpujące przeszukiwanie przestrzeni dostępnych wektorów wejściowych wynosi:

$$\frac{2^{28} \cdot 2 \cdot 50}{3600 \cdot 24 \cdot 365} = 851 \text{ [lat]}, \quad (27)$$

co z oczywistych względów jest nieakceptowalne. Opracowana w ramach doktoratu procedura GACSOP („Genetic Algorithm Component Selection for Overvoltage Protection”) została przedstawiona na rys. 28.



Rys. 28. Narzędzia oraz uproszczony przebieg procedury GACSOP.

Następnie należy zakodować problem, przetworzyć do postaci umożliwiającej przeprowadzenie symulacji z uwzględnieniem wariantów testowych w celu weryfikacji przez funkcję celu, której wyniki zostaną wykorzystane przez algorytm genetyczny do stworzenia zbioru nowych potencjalnie lepiej dopasowanych rozwiązań problemu. Szczegółowy opis implementacji procedury GACSOP został zwarty w rozdz. 3.8.

3.3.1. Binarny wektor wejściowy

Binarny wektor wejściowy jest zakodowaną informacją rozważanego problemu, który będzie rozwiązywany z wykorzystaniem algorytmu genetycznego. Wektor ten zwany jest chromosomem X , którego postać można zapisać następująco:

$$\text{Chromosom} = X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_N], \quad (28)$$

gdzie chromosom składa się z bitów o łącznej długości $N = 28$, co wynika bezpośrednio z topologii układu ochronnika i pewnych uproszczeń zaprezentowanych w rozdz. 3.1. Strukturę chromosomu przedstawiono w tab. 15.

Tab. 15. *Struktura binarnego wektora wejściowego.*

Komponent/Grupa	Pozycja bitowa w wektorze wejściowym
Grupa R9 (GR9) Grupa R10 (GR10)	1:4
R5 i R6	5:7
D4	8:12
D1	13:17
D2 i D3	18:22
C4	23:25
Liczba rezystorów w grupie R9 i R10	26:28

Chromosom X składa się z:

- bity 1:4 - reprezentują rezystory R9 i R10, liczba binarna odpowiada kolejnej rezystancji w predefiniowanym zbiorze komponentów (rozdz. 3.2.3),
- bity 5:7 - reprezentujące rezystory R5 i R6 (rozdz. 3.2.3),
- bity 8:12 – odpowiadają dostępnej konfiguracji dla diody D4 (rozdz. 3.2.2),
- bity 13:17 - odpowiadają dostępnej konfiguracji dla diody D1 (rozdz. 3.2.2),
- bity 18:22 - odpowiadają dostępnej konfiguracji dla diod D2 i D3 (rozdz. 3.2.2),
- bity 23:25 - reprezentują możliwą konfigurację C4 opisaną w rozdz. 3.2.4,
- bity 26:28 – definiują liczbę rezystorów w grupie GR9 oraz GR10

co zapisać można następująco:

$$X = [GR_i, R_{5,6}, D_4, D_1, D_{2,3}, C_4, n_{GR}], \quad (29)$$

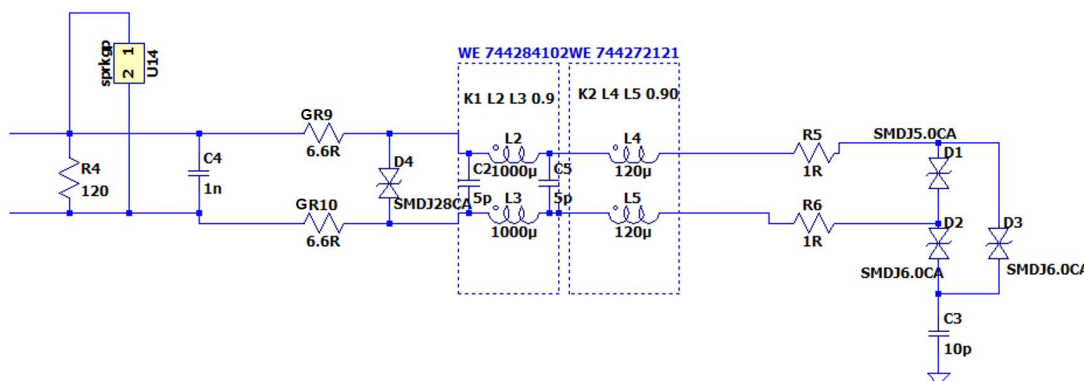
Opisany powyżej chromosom X koduje komponenty symulowanego ochronnika. Na rys. 29 przedstawiono rzutowanie chromosomu na poszczególne grupy komponentów oraz translację do postaci układowej z zastosowaniem konkretnych komponentów.

Chromosom:

$$X = \begin{bmatrix} GR_i, & R_{5,6}, & D_4, & D_1, & D_{2,3}, & C_4, & n_{GR} \\ (2,2\Omega) & (1,0\Omega) & (SMDJ28CA) & (SMDJ5.0CA) & (SMDJ6.0CA) & (1nF) & (3) \end{bmatrix}$$

$$X = [\quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad]$$

Postać układowa:



$$GR_9, GR_{10} = GR \cdot N_{GR} = 6,6\Omega$$

Rys. 29. Przykład translacji chromosomu do postaci graficznej pliku ASC opisującego elementy ochronnika.

Tak przygotowany binarny wektor wejściowy stanowi wejście do algorytmu genetycznego do poszukiwania rozwiązania omawianego problemu.

3.3.2. Zestawienie parametrów granicznych komponentów

Na podstawie powyższych założeń oraz not katalogowych przygotowano zestawienie granicznych wartości parametrów krytycznych poszczególnych komponentów (tab. 16), które zostaną wykorzystane w trakcie oceny rozwiązania problemu doboru elementów ochronnika przeciwprzepięciowego.

Tab. 16. Zestawienie parametrów symulacyjnych (M_k^i) oraz wartości granicznych (\hat{M}_k^i) komponentów wykorzystanych w ochronnikach przeciwprzepięciowym.

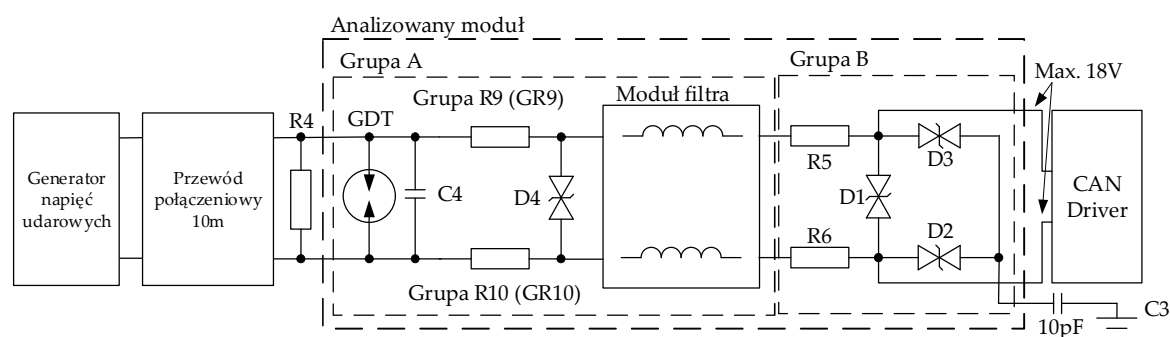
*) wartości dla pojedynczego komponentów, w przypadku implementacji większej ilości komponentów wartości te zostaną zmnożone.

Numer komp.	Komponent	U Napięcie [V] ($i = 1$)	I Prąd [A] ($i = 2$)	P_{mean} Moc średnia [kW] ($i = 3$)	P_{max} Moc chwilowa [kW] ($i = 4$)	Możliwe konfiguracje
		M_1^1	M_1^2	M_1^3	M_1^4	
1	C4	$\hat{M}_1^1 = U_{max}^c = 4500$	\hat{M}_1^2 – Brak danych	\hat{M}_1^3 – Brak danych	\hat{M}_1^4 – Brak danych	Opis w rozdz. 3.2.4
2	GDT	M_2^1	M_2^2	M_2^3	M_2^4	SG75
		\hat{M}_2^1 – Brak danych	$\hat{M}_2^2 = I_{max}^{GDT} = 2000$	\hat{M}_2^3 – Brak danych	\hat{M}_2^4 – Brak danych	
3	R9*	M_3^1	M_3^2	M_3^3	M_3^4	Opis w rozdz. 3.2.3
		$\hat{M}_3^1 = U_{max}^R = 500$ [130]	\hat{M}_3^2 – Brak danych	$\hat{M}_3^3 = P_{mean}^R = 1,0$	$\hat{M}_3^4 = P_{max}^R = 5,0$	
4	R10*	M_4^1	M_4^2	M_4^3	M_4^4	Opis w rozdz. 3.2.3
		$\hat{M}_4^1 = U_{max}^R = 500$ [130]	\hat{M}_4^2 – Brak danych	$\hat{M}_4^3 = P_{mean}^R = 1,0$	$\hat{M}_4^4 = P_{max}^R = 5,0$	
5	D4	M_5^1	M_5^2	M_5^3	M_5^4	Opis w rozdz. 3.2.2
		Na podstawie danych katalogowych rozdz. 3.2.2 $\hat{M}_5^1 = U_{max}^D$	Na podstawie danych katalogowych rozdz. 3.2.2 $\hat{M}_5^2 = I_{max}^D$	\hat{M}_5^3 – Brak danych	$\hat{M}_5^4 = P_{max}^D = 5,0$	
6	R5	M_6^1	M_6^2	M_6^3	M_6^4	Opis w rozdz. 3.2.3
		$\hat{M}_6^1 = U_{max}^R = 500$ [130]	\hat{M}_6^2 – Brak danych	$\hat{M}_6^3 = P_{mean}^R = 1,0$	$\hat{M}_6^4 = P_{max}^R = 5,0$	
7	R6	M_7^1	M_7^2	M_7^3	M_7^4	Opis w rozdz. 3.2.3.
		$\hat{M}_7^1 = U_{max}^R = 500$ [130]	\hat{M}_7^2 – Brak danych	$\hat{M}_7^3 = P_{mean}^R = 1,0$	$\hat{M}_7^4 = P_{max}^R = 5,0$	
8	D1	M_8^1	M_8^2	M_8^3	M_8^4	Opis w rozdz. 3.2.2
		$\hat{M}_8^1 = U_{max}^D = 18$ [132]	Na podstawie danych katalogowych rozdz. 3.2.2 $\hat{M}_8^2 = I_{max}^D$	\hat{M}_8^3 – Brak danych	$\hat{M}_8^4 = P_{max}^D = 5,0$	
9	D2	M_9^1	M_9^2	M_9^3	M_9^4	Opis w rozdz. 3.2.2
		$\hat{M}_9^1 = U_{max}^D = 18$ [132]	Na podstawie danych katalogowych rozdz. 3.2.2 $\hat{M}_9^2 = I_{max}^D$	\hat{M}_9^3 – Brak danych	$\hat{M}_9^4 = P_{max}^D = 5,0$	
10	D3	M_{10}^1	M_{10}^2	M_{10}^3	M_{10}^4	Opis w rozdz. 3.2.2
		$\hat{M}_{10}^1 = U_{max}^D = 18$ [132]	Na podstawie danych katalogowych rozdz. 3.2.2 $\hat{M}_{10}^2 = I_{max}^D$	\hat{M}_{10}^3 – Brak danych	$\hat{M}_{10}^4 = P_{max}^D = 5,0$	

Powyższa tabela zawiera warunki konieczne dla prawidłowego działania układu. Mogą być one zmodyfikowane lub rozbudowane w zależności od potrzeb, ale dla ochronnika będącego przedmiotem badań powyższe ograniczenia są wystarczające.

3.4. Testowy sygnał udarowy

Test definiujący odporność urządzenia na napięcia udarowe zgodnie z normą PN-EN 50121-4 [2] wyspecyfikowany jest w tabeli nr. 3 punkt 3.3, którego pobudzenie (sygnał wejściowy rys. 7) jest ustandaryzowane i posiada właściwe oszacowanie narażenia w zastosowaniach kolejowych oraz przemysłowych zgodnie z normą PN-EN 6100-4 [1]. Na rys. 30 przedstawiono środowisko testowe.

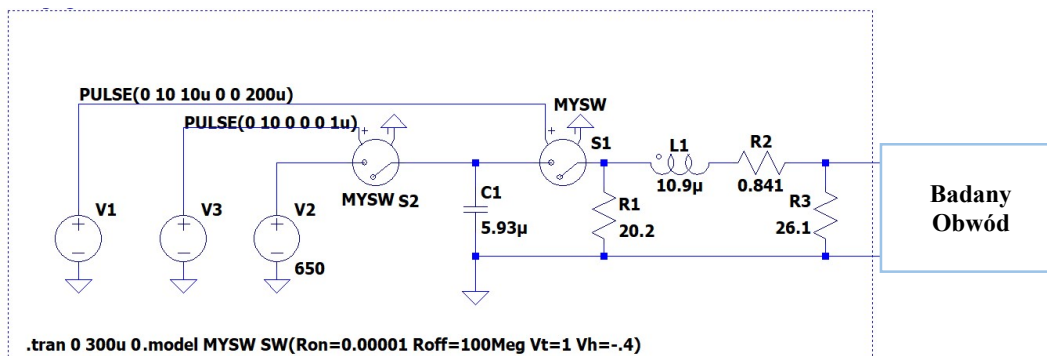


Rys. 30. Środowisko testowe wraz z badanym obwodem.

W skład środowiska testowego wchodzi:

- generator napięć udarowych,
- model przewodu transmisyjnego wykorzystywanego w urządzeniach przytorowych opracowany w rozdz. 2,
- rezystor terminujący $R4 = 120\Omega$, konieczny dla prawidłowego działania modułu magistrali CAN, ponieważ zapobiega on odbiciom sygnału na końcach linii [88],
- zaprezentowany wcześniej moduł ochronnika przeciwprzepięciowego (rys. 22),
- zaproksymowaną wartość pojemności ($C3 = 10\text{pF}$) całego urządzenia (przedstawionego na rys. 23) do potencjału odniesienia, na podstawie dotychczasowych badań, planowane jest wykorzystanie tej pojemności podczas badań izolacyjności urządzenia.

Sygnal testowy napięć udarowych został zaprojektowany zgodnie z normą PN-EN 50121-4 [2] i posiada odpowiedni kształt, amplitudę i czas trwania. Na rys. 31 przedstawiono implementację generatora napięć udarowych zgodnie z [133].



Rys. 31. Zaimplementowany w LTspice generator napięć udarowych [133].

W normie PN-EN 50121-4 [2] nie ma dokładnie określonego czasu ekspozycji (rys. 7), przedstawiono tylko częściowe informacje. Zdefiniowano czasy T1 i T2, czyli czasy, kiedy emitowana jest największa energia, bez podawania całkowitego czasu trwania narażenia. Zgodnie z tym podstawowy czas ekspozycji ustalono na podstawie doświadczeń laboratoryjnych na $150\mu\text{s}$, ale ze względu na obecność kondensatorów i elementów indukcyjnych (elementów magazynujących energię) całkowity czas narażenia (rys. 7, T_t) wydłużono (podwojono) do $300\mu\text{s}$, aby uwzględnić ewentualną reakcję ochronnika. Dłuższy czas narażenia odpowiada gorszemu scenariuszowi, ponieważ wraz ze wzrostem czasu ekspozycji maksymalne parametry (napięcia, prądy i rozpraszane moce) będą się zmniejszać, co oznacza większy margines bezpieczeństwa w rzeczywistym środowisku kolejowym. W przypadku rezystorów z grup GR9 oraz GR10 zrezygnowano z założonego czasu trwania narażenia ($300\mu\text{s}$) na rzecz $100\mu\text{s}$, ponieważ czas ten dla tych komponentów jest znacznie krótszy, niż wynika to z charakterystyki zaburzenia ze względu na topologię układu.

Ponadto klienci najczęściej wymagają wyższych poziomów narażeń w przetargach komercyjnych niż określone w ww. normach, ze względu na świadomość zagrożeń w realnych zastosowaniach kolejowych. Dlatego pożądane jest opracowanie metodologii doboru elementów ochronnika tak, aby umożliwić zaprojektowanie dedykowanego modułu zabezpieczającego dla czujników koła, z uwzględnieniem ograniczeń projektowych (dostępna przestrzeń, koszty, amplituda narażenia itp.). W związku z czym dalsza procedura będzie opisywana dla przyjętego narażenia na poziomie $U_{WE1} = 6\text{kV}$ (wymaganie

zaprojektowania ochronnika przeciwprzepięciowego). Norma kolejowa określona w PN-EN 50121-4 [2] jest więc przekroczona o 500%, co przekłada się na zwiększenie niezawodności urządzenia wyposażonego w tak zaprojektowany ochronnik.

Dodatkowo ze względu na wykorzystanie nieliniowych komponentów w ochronniku, w szczególności iskrownika, który odpowiada za rozproszenie znacznej ilości energii, dodano przypadek testowy obejmujący wariant, kiedy to iskrownik nie bierze udziału w ochronie przeciwprzepięciowej (napięcie na wejściu ochronnika $U_{WE2} = 650V$, co odpowiada napięciu zapłonu iskrownika). W związku z powyższym analiza zachowania ochronnika zostanie wzbogacona o element (przypadek testowy bez udziału iskrownika), który często jest podnoszony podczas analiz usterek urządzeń powracających z instalacji.

3.5. Funkcja celu

Funkcja celu f_{goal} jest najważniejszą częścią proponowanej metody i wymaga zarówno doświadczenia praktycznego, wyczucia inżynierskiego, jak i zrozumienia koncepcji działania algorytmu genetycznego. Proces projektowania funkcji celu był długotrwały, a poniżej zaprezentowane zostaną efekty tej pracy. W procesie optymalizacji funkcja celu jest minimalizowana, a teoretycznie najlepsze rozwiązanie układowe powinno wartość funkcji celu wyzerować. Najważniejszymi elementami funkcji celu są maksymalne napięcia, prądy oraz moce rozpraszane na poszczególnych elementach.

Ze względu wymagania dotyczące preferowanego miejsca uszkodzenia ochronnika w przypadku przepięcia ponadnormatywnego Autor proponuje wprowadzenie współczynnika β_k^i , gdzie i - badany parametr pracy np. napięcie maksymalne, k - weryfikowany komponent. Współczynnik β_k^i zarządza ryzykiem uszkodzenia komponentów w każdej z grup poprzez przeskalowanie dopuszczalnych parametrów pracy zadeklarowanych przez producenta elementu. Na potrzeby tego opracowania przyjęto dwie wartości $\beta_{Grupa B}^i = 50\%$ [91] (dla komponentów z grupy B małe ryzyko uszkodzenia) oraz $\beta_{Grupa A}^i = 110\%$ [91] (dla komponentów z grupy A - preferowane miejsce uszkodzenia).

Kolejnym wprowadzonym składnikiem funkcji celu jest współczynnik kary α , do jego wyznaczenia posłużono się tab. 17. Przedstawia ona zestawienie parametrów krytycznych dla poszczególnych komponentów.

Tab. 17. Zestawienie parametrów krytycznych dla wykorzystanych komponentów.

Grupa komponentów	Komponent	β_k^i	Parametry krytyczne (ograniczenia)				Liczba parametrów krytycznych
			U_{max}	I_{max}	P_{mean}	P_{max}	
A	C4	110%	✓				1
	GDT	110%		✓			1
	R9	110%	✓		✓	✓	3
	R10	110%	✓		✓	✓	3
	D4	110%		✓		✓	2
	R5	50%	✓		✓	✓	3
B	R6	50%	✓		✓	✓	3
	D1	50%	✓	✓		✓	3
	D2	50%	✓	✓		✓	3
	D3	50%	✓	✓		✓	3
	Maksymalna suma rezystancji (R9 + R10 + R5 + R6)						1
Suma (współczynnik kary: α):						26	

Na podstawie zestawienia zaprezentowanego w tab. 17 wyznaczono wartość parametru α (współczynnika kary) dla pojedynczego wariantu. Dla każdego komponentu ochronnika przypisano analizowane parametry krytyczne i po uwzględnieniu wszystkich założeń ich suma wynosi 26.

Funkcja celu służy do oceny rozwiązania, a dla ochronnika w swej głównej części sprawdza napięcia, prądy i moc rozpraszaną na elemencie M_k^i (tab. 16), porównuje uzyskane wartości z symulacji do wartości maksymalnych deklarowanych przez producenta (\widehat{M}_k^i , tab. 16). Na podstawie skumulowanej, jednej wartości, możliwa jest odpowiedź na pytanie, czy taka konfiguracja spełnia oczekiwania projektowe ($\frac{M_k^i}{\beta_k^i \cdot \widehat{M}_k^i} < 1$) lub czy może nastąpić

uszkodzenie, któregoś z elementu ochronnika ($\frac{M_k^i}{\beta_k^i \cdot \widehat{M}_k^i} \geq 1$). Na podstawie przedstawionych założeń autor zaprojektował następującą funkcję celu (f_{goal}):

Weryfikacji podlegają:

warianty testowe

parametry wszystkich komponentów w ochronniku

wszystkie parametry komponentu (np. D4)

jeden parametr komponentu
(np. U_{D4})

$$f_{goal} = \sum_{m=1}^{N_r} \left(\sum_{k=1}^{N_e} \left(\sum_{i=1}^{N_p} \left(\frac{M_k^i}{\beta_k^i \cdot \widehat{M}_k^i} \cdot \alpha' \right) \left\{ \begin{array}{l} \alpha' = N_r \cdot \alpha = 52: \frac{M_k^i}{\beta_k^i \cdot \widehat{M}_k^i} \geq 1 \\ \alpha' = 1: \frac{M_k^i}{\beta_k^i \cdot \widehat{M}_k^i} < 1 \end{array} \right. \right) + (l-1) \cdot \frac{N_r \cdot \alpha - 1}{j-1} + \gamma \left\{ \begin{array}{l} \gamma = N_r \cdot \alpha = 52: R_{\Sigma R} > 18 \\ \gamma = 0: R_{\Sigma R} \leq 18 \end{array} \right. \right) \quad (30)$$

Człon odpowiedzialny za minimalizowanie liczby rezystorów w GR9 i GR10

Człon weryfikujący sumę rezystancję ochronnika (15)

gdzie:

- M_k^i - jest obliczoną wartością (na podstawie symulacji) i-tego parametru dla komponentu k ($M_k^i \geq 0, M_k^i \in \mathbb{R}$), szczegółowe przypisanie parametrów przedstawiono w tab. 16,
- \widehat{M}_k^i - to maksymalna wartość i-tego parametru dla podzespołu k ($\widehat{M}_k^i > 0, \widehat{M}_k^i \in \mathbb{R}$) np. napięcia, mocy lub prądu określona w dokumentacji producenta (tab. 16) bez marginesów projektowych (β_k^i),
- β_k^i – jest współczynnikiem określającym marginesy parametrów krytycznych dla poszczególnych komponentów, służy do zarządzania ryzykiem uszkodzenia komponentów w zdefiniowanych grupach,
- N_p – liczba analizowanych parametrów dla pojedynczego komponentu ($N_p > 0, N_p \in \mathbb{N}$), np. dla R9: $N_p = 3$, czyli moc średnia, moc szczytowa i napięcie. $i = 1, \dots, N_p$, gdzie i jest kolejnym indeksem weryfikowanego parametru,
- N_e – liczba analizowanych komponentów ($N_e > 0, N_e \in \mathbb{N}$), przy czym $N_e = 10$ w przedstawionym na rys. 22. Wskaźnik k przyjmuje wartości $k = 1, 2, \dots, 10$,

- N_r – liczba analizowanych wariantów dla sygnałów wejściowych ($N_r > 0, N_r \in \mathbb{N}$), w prezentowanym wariantcie $N_r = 2$ (pierwszy wariant: narażenie powyżej napięcia zapłonu iskrownika - $U_{WE1} = 6kV$ i drugi wariant: napięcie udarowe poniżej napięcia zapłonu iskrownika $U_{WE2} = 650V$),
- α' – współczynnik kary, przyjmuje on wartości 1 lub $N_r \cdot \alpha$, jeżeli $M_k^i \leq \widehat{M}_k^i$ (brak przekroczenia zdefiniowanych parametrów krytycznych dla komponentów) to $\alpha = 1$, w przeciwnym wypadku $M_k^i > \widehat{M}_k^i$ (przekroczenie założonych marginesów) $\alpha = 26$,
- l – reprezentuje liczbę rezystorów w grupie R9 i R10 ($l > 1, l \leq 8, l \in \mathbb{N}$),
- j – określa maksymalną sugerowaną liczbę rezystorów w grupie R9 oraz R10 tak, by algorytm nie dążył do znacznego rozrostu liczby tych komponentów ($j > 1, j \in \mathbb{N}$). W tym przypadku przyjęto $j = 3$. Na tyle zaprosymowano ilość dostępnego miejsca, który nie będzie się wiązał ze znacznymi zmianami w całym układzie,
- γ – współczynnik kary degradujący wartość funkcji celu dla przypadków, kiedy rezystancja ochronnika przekracza założenia równania (15).

W związku z powyższym, rozwiązaniem problemu jest specyfikacja zdefiniowana przez binarny wektor wejściowy (3.3.1), dla którego f_{goal} przyjmuje najmniejszą wartość (na żadnym komponencie nie przekroczone wartości krytycznych zgodnie z przedstawionymi założeniami w tab. 16). Poniżej przedstawiono implementację w środowisku Matlab, tj. skryptu obliczającego wartość funkcji celu dla diody D4:

```
%Max value of parameters searching
D4_Parameters (Idx_Parameters_MaxVoltage) = max (D4_Voltage);
D4_Parameters (Idx_Parameters_MaxCurrent) = max (D4_Current);
D4_Parameters (Idx_Parameters_MaxTotalPower) = nansum (D4_Energy) / IntegrationTime;
D4_Parameters (Idx_Parameters_PeakPower) = max (D4_Power);

%Percentage of parameters calculation
if (D4_MaxVoltage > 0)
    D4_Parameters (Idx_Parameters_PerVoltage) =
D4_Parameters (Idx_Parameters_MaxVoltage) / D4_MaxVoltage;
else
    D4_Parameters (Idx_Parameters_PerVoltage) = 0;
end

if (D4_MaxCurrent > 0)
    D4_Parameters (Idx_Parameters_PerCurrent) =
D4_Parameters (Idx_Parameters_MaxCurrent) / D4_MaxCurrent;
else
    D4_Parameters (Idx_Parameters_PerCurrent) = 0;
end

if (D4_MaxTotalPower > 0)
    D4_Parameters (Idx_Parameters_PerTotalPower) =
D4_Parameters (Idx_Parameters_MaxTotalPower) / D4_MaxTotalPower;
else
    D4_Parameters (Idx_Parameters_PerTotalPower) = 0;
end

if (D4_MaxPeakPower > 0)
```

```

D4_Parameters(Idx_Parameters_PerPeakPower) =
D4_Parameters(Idx_Parameters_PeakPower)/D4_MaxPeakPower;
else
D4_Parameters(Idx_Parameters_PerPeakPower) = 0;
end

%Correction because of punishment factor
if(D4_Parameters(Idx_Parameters_PerVoltage) > 1)
D4_Parameters(Idx_Parameters_PerVoltage) =
D4_Parameters(Idx_Parameters_PerVoltage)*PunishmentFactor;
end

if(D4_Parameters(Idx_Parameters_PerCurrent) > 1)
D4_Parameters(Idx_Parameters_PerCurrent) =
D4_Parameters(Idx_Parameters_PerCurrent)*PunishmentFactor;
end

if(D4_Parameters(Idx_Parameters_PerTotalPower) > 1)
D4_Parameters(Idx_Parameters_PerTotalPower) =
D4_Parameters(Idx_Parameters_PerTotalPower)*PunishmentFactor;
end

if(D4_Parameters(Idx_Parameters_PerPeakPower) > 1)
D4_Parameters(Idx_Parameters_PerPeakPower) =
D4_Parameters(Idx_Parameters_PerPeakPower)*PunishmentFactor;
end

D4_SumGF = D4_Parameters(Idx_Parameters_PerVoltage) +
D4_Parameters(Idx_Parameters_PerCurrent) + D4_Parameters(Idx_Parameters_PerTotalPower) +
D4_Parameters(Idx_Parameters_PerPeakPower);
D4_Parameters(Idx_Parameters_GFPart) = D4_SumGF;
GoalFunctionA = GoalFunctionA + D4_SumGF;

```

Ze względu na predykcję ilości rezystorów w grupach GR9 oraz GR10 na poziomie oczekiwanym równym 3, szacunkowa wartość funkcji celu powinna się zawierać w granicach od 204 do niespełna 256. Wynika to z następujących zależności.

Przy przewidywaniu ilości rezystorów na poziomie 3, współczynnik kary dla tej grupy wynosi 51. Odpowiada za niego następujący człon równania (30):

$$(l - 1) \cdot \frac{N_r \cdot \alpha - 1}{j - 1} \quad (31)$$

Ponieważ zakładamy:

$$l = j = 3$$

Współczynnik otrzymuje postać:

$$N_r \cdot \alpha - 1 = 2 \cdot 26 - 1 = 51 \quad (32)$$

Posiadamy dwie grupy elementów z tym współczynnikiem (GR9 oraz GR10, $l > 1$), wobec czego minimalna wartość tego członu funkcji celu to 102 (dla trzech rezystorów w grupie w jednym przypadku testowym).

Do powyższej wartości należy dodać pozostałą część funkcji celu:

$$\sum_{k=1}^{N_e} \sum_{i=1}^{N_p} \left(\frac{M_k^i}{\beta_k^i \cdot \hat{M}_k^i} \cdot \alpha \right) \quad (33)$$

Przy czym człon:

$$\frac{M_k^i}{\beta_k^i \cdot \widehat{M}_k^i} \quad (34)$$

W przypadku spełnienia założeń i nieprzekroczenia wyznaczonych parametrów granicznych ($\alpha = 1$) przyjmuje wartości z zakresu:

$$\frac{M_k^i}{\beta_k^i \cdot \widehat{M}_k^i} \in (0,1) \quad (35)$$

Wobec czego suma częściowa spełnia poniższe (tab. 17 oraz równ. (30)):

$$\sum_{k=1}^{N_e} \sum_{i=1}^{N_p} \left(\frac{M_k^i}{\beta_k^i \cdot \widehat{M}_k^i} \cdot \alpha \right) \in (0,26) \quad (36)$$

Uwzględniając, dla jednego przypadku testowego współczynnik kary dla 3 rezystorów w grupie (wartość 102) oraz nieprzekraczania parametrów granicznych:

$$f_{goal\ 1} \in (102,128) \quad (37)$$

Ponieważ mamy dwa warianty testowe wartość oczekiwana funkcji celu mieści się w zakresie opisanym poniżej:

$$f_{goal} = f_{goal\ 1} + f_{goal\ 2} \in (204,256) \quad (38)$$

3.6. Parametry wewnętrzne algorytmu genetycznego

Algorytm genetyczny w środowisku Matlab posiada wiele opcji umożliwiających optymalizację jego pracy. Mnogość tych konfiguracji jest duża, nie jest to jednak tematem tego opracowania i z tego powodu tylko najważniejsze parametry zostaną zaprezentowane poniżej. Liczność populacji została ustalona na $Ppl=50$, na podstawie rozważań w [134]. Pozostałe wybrane opcje konfiguracyjne:

- *Selection* określa sposób, w jaki algorytm genetyczny wybiera rodziców do następnej iteracji. Domyślna opcja jest ustawiona na "selectionstochunif", czyli rodzice są wybierani losowo z rozkładem równomiernym,

- *Reproduction* opisuje, jak algorytm genetyczny tworzy kolejne pokolenie. "EliteCount" odpowiada liczbie najlepszych rodziców, którzy zostaną wykorzystani w następnym pokoleniu. Została ona ustawiona na 5% wielkości populacji,

- *Crossover options* określają tworzenie dziecka crossover z rodziców dla następnego pokolenia. Została ona ustawiona na: "crossoverscattered", która wykorzystuje losowy wektor binarny do połączenia dwóch osobników, w celu utworzenia dziecka dla następnych pokoleń,

- *Mutation* odpowiada za defekty chromosomów, ustawiono ją na: "mutationgaussian", która używa rozkładu gaussowskiego, aby dokonać niewielkiej zmiany wektora rodzica.

Kryteria stopu algorytmu genetycznego umożliwiające zdefiniowanie warunków po spełnieniu, których algorytm zaprzestanie poszukiwań rozwiązania zagadnienia, przedstawiono w tab. 18.

Tab. 18. Kryteria stopu zastosowane dla algorytmu genetycznego.

Opcja	Wartość	Opis
<i>Max Generations</i>	30	Określa maksymalną liczbę wygenerowanych populacji podczas wykonywania algorytmu.
<i>Max Time</i>	24×3600 [s]	Maksymalny czas (w sekundach) wykorzystany przez Matlab'a na wewnętrzne przetwarzanie danych (import danych, obliczanie funkcji celu, działanie GA, tworzenie listy połączeń do następnej symulacji).
<i>Function Tolerance</i>	0.001	Różnica pomiędzy obliczaniem funkcji celu dla kolejnych generacji, poniżej tego wartości <i>Stall Generations</i> zostaje inkrementowana. Wartość jest ustawiona na 0,1%.

<i>Max Stall Generations</i>	10	Minimalna liczba <i>Stall Generations</i> , która oznacza zaprzestanie dalszych poszukiwań rozwiązania ponieważ te aktualne nie wiele się pomiędzy sobą różnią. W tym przypadku 10 kolejnych obliczeń funkcji celu z różnicami mniejszymi niż 0,1% (<i>Function Tolerance</i> = 0,001) spowoduje zatrzymanie wykonywania algorytmu.
------------------------------	----	--

3.7. Dobór konfiguracji algorytmu genetycznego

Na potrzeby niniejszego podrozdziału zaprojektowano wersję funkcji celu przyjmującą wartości z zakresu (0,26), ze względu na optymalizację czasową i przeprowadzono eksperyment mający na celu zbadanie wpływu zmian podstawowych parametrów konfiguracyjnych algorytmu genetycznego na wyniki jego działa. Rezultaty badania przedstawiono w tab. 19.

Tab. 19. Porównanie wyników dla wybranych parametrów konfiguracyjnych algorytmu genetycznego.

Konfiguracja	Wielkość populacji	<i>Function Tolerance</i>	Czas	Wartość funkcji celu	Zmiana w stosunku do konfiguracji 1
1	50	0,001	10h 51m	4,061	0,00%
2	20	0,001	8h 51m	4,193	+3,25%
3	80	0,001	24h 34m	4,080	+0,47%
4	120	0,001	26h 10m	4,166	+2,59%
5	200	0,001	25h 50m	4,055	-0,15%
6	50	0,01	9h 40m	4,097	+0,89%
7	50	0,0001	24h 10m	3,982	-1,95%

Zwiększenie rozmiaru populacji do 200 osobników znacznie wydłużyło czas przetwarzania algorytmu (np. w stosunku do konfiguracji 1 o 14 godzin 59 minut), przy niewielkiej poprawie funkcji celu (-0,15%). Podobnie zmiana wielkości populacji na 120, zwiększyła nakład obliczeniowy (wydłużenie czasu procesowania algorytmu o 15 godzin 19 minut), a poziom dopasowania nawet się pogorszył o +2,59%, co oznacza mniejsze

marginesy pracy komponentów w ochronniku. Zmniejszenie wielkości populacji (konfiguracja 2), nieznacznie skraca czas przetwarzania danych, ale wpływ na funkcję celu jest największy, bo dopasowanie pogarsza się o +3,25%). Wyniki dla wielkości populacji 50 i 80 są podobne, więc ze względu na optymalizację uruchamiania algorytmu (krótszy czas przetwarzania jednej populacji) wybrano wariant z wielkością populacji równą 50.

3.8. Omówienie wyników

Metoda GACSOP została zaimplementowana w środowisku Matlab z wykorzystaniem symulatora obwodów elektronicznych LTspice. Autor oparł główną część swojej metody na algorytmie genetycznym (funkcja GA w module Global Optimization Toolbox) inicjalizowanym w sposób opisany w rozdz. 3.6 i 3.7. Algorytm składa się z następujących kroków:

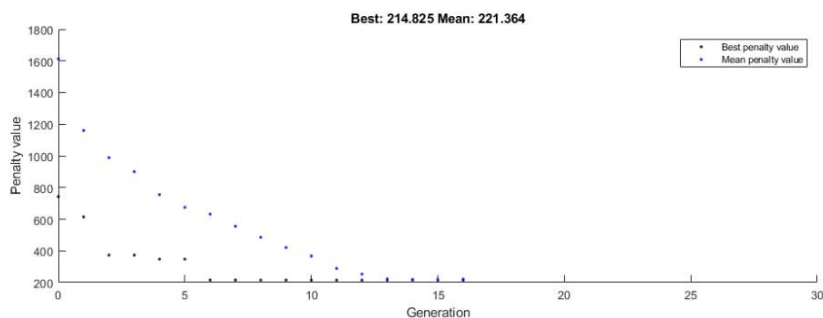
- 1) Model oraz założenia ograniczające BO (Badanego Obwodu).
 - a) Zainicjalizowanie stałych:
 - dostępnego zbioru komponentów w postaci tablic: D_N (20), GR_i (23), $R_{5,6}$ (24) oraz C_4 (26), a także ich parametrów granicznych,
 - przypisanie wartości współczynników wykorzystanych bezpośrednio w funkcji celu: β_k^i , α , j (opisy w rozdz. 3.5),
 - zdefiniowanie połączeń BO (rys. 30),
 - sparametryzowanie wariantów testowych ($U_{WE1} = 6kV$, $U_{WE} = 650V$).
- 2) Inicjalizacja GA:
 - a) zdefiniowanie parametrów konfiguracyjnych GA (rozdz.3.6),
 - b) wygenerowanie losowego binarnego wektora wejściowego,
- 3) Kodowania problemu BO obejmującego dekompozycję binarnego wektora wejściowego (rozdz. 3.3.1) do postaci indeksowej tablicy komponentów.
- 4) Lista połączeń BO:
 - a) zaktualizowanie bazowego pliku BO o przypadek testowy i komponenty zdekodowane w pkt. 3),
 - b) wykonanie symulacji pliku przygotowanego w pkt. a),
- 5) Wyznaczenie wartości funkcji celu:
 - a) import struktury danych opisującej napięcia i prądy w dziedzinie czasu opisujące BO,

- b) wyznaczenie parametrów pracy badanych komponentów (maksymalnego napięcia, maksymalnego prądu, maksymalnej mocy chwilowej oraz średniej, zaprezentowanych w tab. 16),
 - c) porównanie danych wynikowych z pkt. b) z dopuszczalnymi parametrami pracy komponentów oraz wyznaczenie współczynnika kary (α) dla sumy częściowej funkcji celu poszczególnych komponentów,
 - d) wyznaczenie wartości członu funkcji celu odpowiedzialnego za minimalizację liczby rezystorów w grupach GR9 oraz GR10,
 - e) uwzględnienie współczynnika kary w przypadku przekroczenia dopuszczalnej wartości zsumowanych rezystancji w BO (15),
 - f) wyznaczenie sumy cząstkowej funkcji celu ($f_{goal\ 1}$) dla napięcia wejściowego U_{WE} ,
 - g) wykonanie kroków od pkt. a) do pkt. f) celem wyznaczenia sumy cząstkowej funkcji celu ($f_{goal\ 2}$) dla napięcia wejściowego U_{WE} ,
 - h) wyznaczanie wartości funkcji celu ($f_{goal} = f_{goal\ 1} + f_{goal\ 2}$) na podstawie powyższych punktów.
- 6) Weryfikacja kryteriów stopu przedstawionych w tab. 18, w przypadku pozytywnego sprawdzenia warunków przejście do pkt. 8), w przeciwnym wypadku kontynuacja poszukiwań suboptymalnego rozwiązania i przejście do pkt. 7),
- 7) Selekcja najlepszy osobników, krzyżowanie oraz mutacja celem wypracowania nowego zbioru wektorów wejściowych i rozpoczęcie kolejnej iteracji od pkt. 3), do momentu spełnienia warunków w kryteriach stopu pkt. 6),
- 8) Weryfikacja parametrów pracy obwodu, w przypadku narażeń dla napięć wejściowych innych niż projektowe, z uwzględnieniem napięć charakterystycznych układów silnie nieliniowych. W przypadku pozytywnej weryfikacji - zakończenie działania algorytmu, przejście do pkt. 9). Natomiast wynik negatywny powyższego sprawdzenia implikuje konieczność aktualizacji funkcji celu o nowy przypadek testowy lub weryfikację założeń oraz rozpoczęcie działania algorytmu od pkt. 1),
- 9) Zakończenie działania algorytmu.

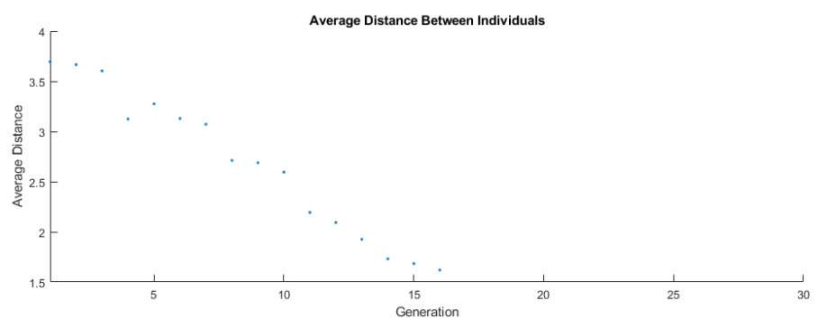
Z wykorzystaniem konfiguracji 1 (tab. 19) algorytm zakończył działanie z powodu braku oczekiwanego progresu w zmniejszaniu funkcji celu po przeanalizowaniu 851 przypadków w ciągu niespełna 21 godzin. Ze względu na występowanie elementów nieliniowych

w strukturze ochronnika zaproponowane suboptymalne rozwiązanie zostanie również symulacyjnie zweryfikowane pod kątem narażeń o mniejszych amplitudach ($U_{WE} = 1kV, 2kV, 4kV$).

Statystyki algorytmu genetycznego zostały przedstawiono poniżej na rys. 32.



(a)

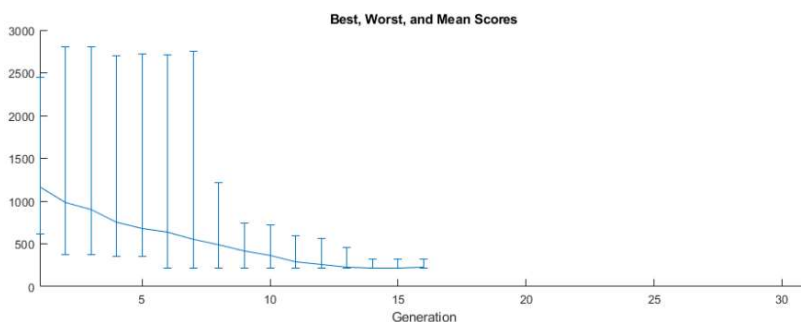


(b)

Rys. 32. Funkcja zbieżności algorytmu genetycznego (a) histogram wartości średniej oraz minimalne funkcji celu, (b) histogram średniej różnicy bitów w wektorze wejściowym.

Zgodnie z danymi zaprezentowanymi na rys. 32 wartość funkcji celu dla odnalezionego suboptymalnego rozwiązania wynosi 214,825, co jest zgodne z oczekiwaniami przedstawiony w równaniu (38). Na podstawie histogramu wartości funkcji celu można wnioskować, iż do piątej generacji nie udało się algorytmowi odnaleźć satysfakcjonującego rozwiązania (wartości funkcji celu bliskie 400, oznaczają rozwiązania z przekroczeniami parametrów granicznych). Dopiero po piątej generacji algorytm odnalazł suboptymalny wektor wejściowy, by rozwiązania spełniały założenia funkcji celu. Nasuwa się więc wniosek, iż analizowany problem posiada wiele lokalnych minimów i przeszukiwanie przestrzeni rozwiązań jest celowe, a dopiero dobór specyficznej kombinacji wartości elementów ochronnika pozwolił znaleźć rozwiązanie suboptymalne. Na rys. 33

przedstawiono histogram wartości osiąganych przez funkcję celu podczas działania algorytmu.



Rys. 33. Histogram wartości najgorszych, średnich oraz najlepszych funkcji celu.

Powyższy przebieg (rys. 33) potwierdza nietrywialny charakter problemu, ponieważ w pierwszych 5 populacjach (czas działania algorytmu około 9 godzin) nie udało się znaleźć rozwiązania spełniającego oczekiwane założenia projektowe. Dopiero 6 iteracja przyniosła spodziewany rezultat oraz w dalszej części nastąpiło dopracowanie rozwiązania.

3.8.1. Napięcie udarowe 6kV – wariant 1

W poniższym podrozdziale zaprezentowano wynik działania algorytmu dla napięcia wejściowego $U_{WE1} = 6kV$ (udział iskrownika w rozpraszaniu energii) oraz przeprowadzono analizę przebiegów czasowych dla poszczególnych komponentów. W tab. 20 przedstawiono suboptymalną propozycję specyfikacji dla narażenia $U_{WE1} = 6kV$ z wykorzystaniem metody GACSOP. Dla ułatwienia weryfikacji parametrów krytycznych elementów wprowadzono współczynnik $E\%$, opisany wzorem:

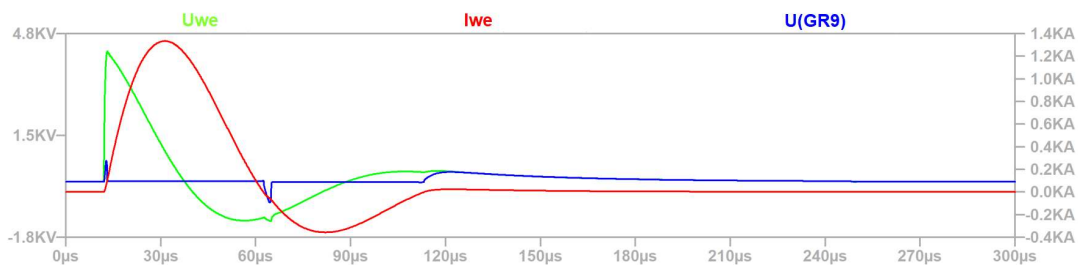
$$E_k^{i\%} = \frac{M_k^i}{\beta_k^i \cdot \hat{M}_k^i}, \quad (39)$$

gdzie i oznacza kolejny parametr $E\%$ ($U_{max}^{\%}, I_{max}^{\%}, P_{mean}^{\%}, P_{max}^{\%}$) k elementu ochronnika, parametry M_k^i, β_k^i oraz \hat{M}_k^i zostały omówione w rozdz. 3.5. Jeśli wartość współczynnika $E_k^{i\%}$ jest $< 100\%$, parametr pracy ($U_{max}, I_{max}, P_{mean}, P_{max}$) nie przekracza założonych wartości maksymalnych. Natomiast w przypadku, kiedy $E_k^{i\%} \geq 100\%$, parametr pracy przekracza dopuszczalną wartość (brak spełnienia założeń projektowych).

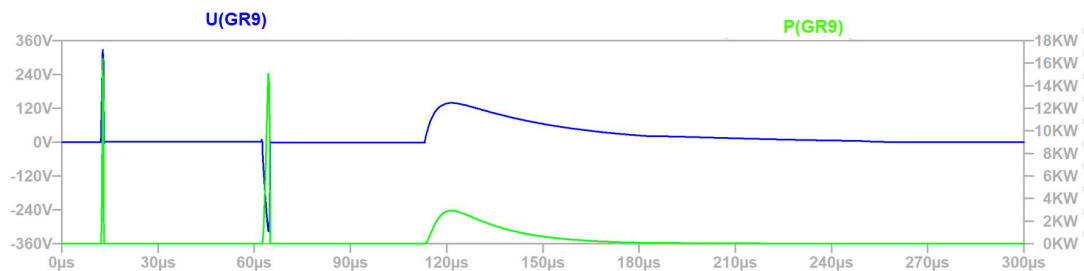
Tab. 20. Wynikowa specyfikacja ochronnika (narażenie $U_{WE1} = 6kV$).

Komponent	Sugerowana wartość	U_{max} [V]	I_{max} [A]	P_{mean} [W]	P_{max} [W]	$E^{\%}$			
						$U_{max}^{\%}$	$I_{max}^{\%}$	$P_{mean}^{\%}$	$P_{max}^{\%}$
C4	1nF	697,96	9,54	2,09	1 409,5	14,10%	0,00%	0,00%	0,00%
GDT	SG75	697,96	1 334,5	1 251	29 102	0,00%	60,6%	0,00%	0,00%
GR9	2.2R (x3)	329,44	49,92	198,52	16 444	0,00%	0,00%	6,68%	99,66%
GR10	2.2R (x3)	329,56	49,93	198,51	16 456	0,00%	0,00%	6,68%	99,74%
D4	SMDJ28CA	38,96	49,83	49,91	1 941,2	0,00%	13,7%	0,00%	35,30%
R5	1R	3,22	3,22	1,34	10,37	0,00%	0,00%	0,30%	0,41%
R6	1R	3,22	3,22	1,34	10,37	0,00%	0,00%	0,30%	0,41%
D1	SMDJ5.0CA	7,12	3,22	4,24	22,90	79,09%	0,39%	0,00%	0,92%
D2	SMDJ6.0CA	6,79	0,06	0,01	0,43	75,41%	0,01%	0,00%	0,02%
D3	SMDJ6.0CA	6,80	0,08	0,01	0,51	75,55%	0,01%	0,00%	0,02%
Liczba rezystorów w grupach R9 i R10:									3

Powyższe wyniki jednoznacznie wskazują, iż kluczowym elementem rozpraszającym energię w czasie narażenia jest iskrownik, ponieważ posiada możliwość rozproszenia największej mocy, a w prezentowanym wyniku (tab. 20) dla $U_{WE1} = 6kV$ wyznaczona moc średnia wynosi $P_{mean}^{GDT} = 1251W$. Zauważyć należy, że równie ważnymi komponentami są rezystory w grupie GR9 oraz GR10, gdyż suma mocy chwilowych przekracza nawet moc chwilową iskrownika (suma mocy chwilowych grup rezystorów $P_{max}^{GR9} + P_{max}^{GR10} = 32,9 kW$, moc chwilowa iskrownika $P_{max}^{GDT} = 29,1 kW$). Oznacza to, iż to one odpowiadają za rozpraszanie mocy do chwili zadziałania iskrownika. Przypuszczenia te potwierdza przebieg napięcia na tych grupach rezystorów (np. rys. 34).



(a)

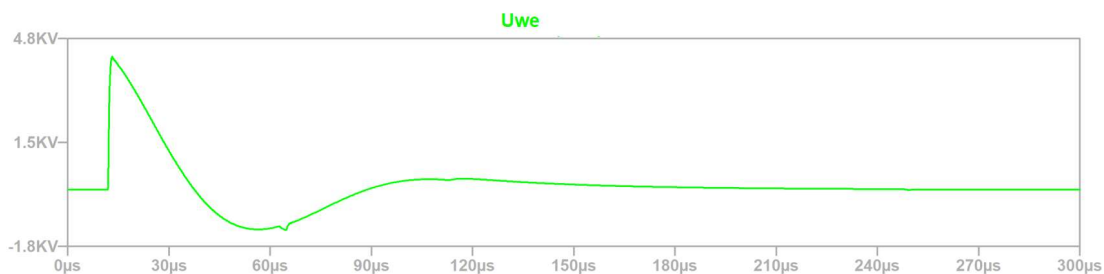


(b)

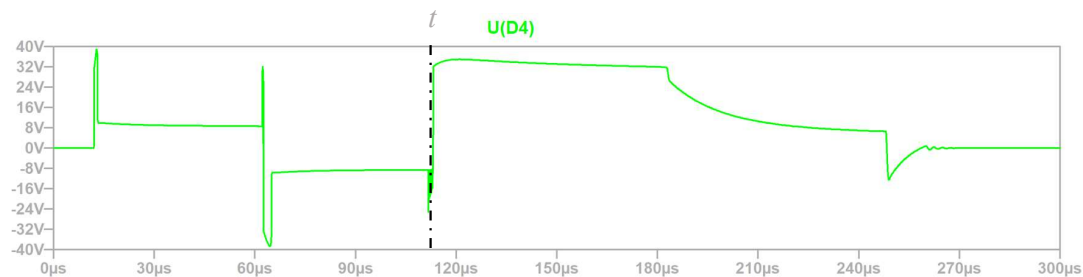
Rys. 34. Napięcia testowe (wejściowe) (a) przebieg napięcia oraz moc wydzielana na grupie rezystorów GR9 (b). Narażenie $U_{WE} = 6kV$.

Na podstawie informacji zaprezentowanych na rys. 34 można zauważyć, iż realne napięcie przyłożone do badanego ochronnika przeciwprzepięciowego, wraz z przewodem, jest niższe niż zakładany przypadek testowy (wynik symulacji $U_{max}^{C4} = 4,18kV$, zakładane napięcie udarowe $U_{WE} = 6kV$). Wynika to z faktu niezerowej impedancji generatora (rys. 31) zaburzenia [133]. Ponadto napięcie wejściowe dla ochronnika przeciwprzepięciowego jest również znacznie niższe i ograniczone do wartości napięcia zapłonu iskrownika (650V). Potwierdza to konieczność stosowania modelu przewodu podczas projektowania ochronników, ponieważ przy prądach sięgających ponad $I_{max}^{GDT} = 1,3kA$ (maksymalny prąd płynący przez iskrownik tab. 20), obecność niezerowej impedancji przewodu znacząco ogranicza prąd płynący przez iskrownik.

Na rys. 35 przedstawiono przebieg napięcia na diodzie D4, jak widać bierze ona czynny udział w rozpraszaniu energii do momentu zapłonu iskrownika (napięcie 650V). Warto również zauważyć, iż dioda odpowiada za końcowe rozpraszanie energii, kiedy iskrownik już nie pracuje, co widać od czasu t (rys. 35) równego 115 μs .



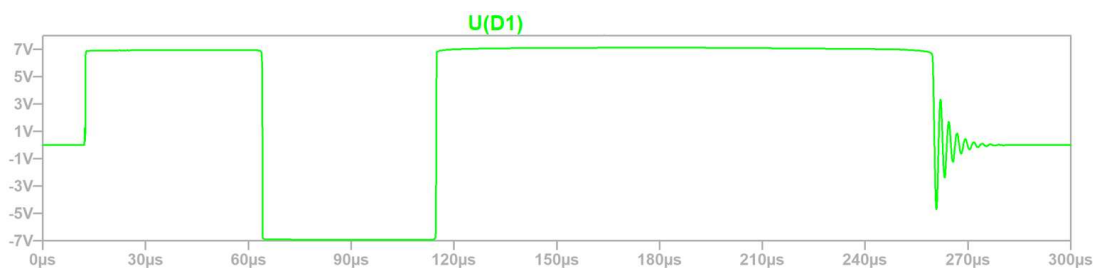
(a)



(b)

Rys. 35. Przebieg napięcia wejściowego (a) oraz napięcia $U_{D4}(t)$ na diodzie D4 (b).

Udział komponentów Grupy B (D1, D2, D3, R5 oraz R6) w rozpraszaniu mocy jest pomijalny, suma rozproszonej mocy wynosi jedynie $P_{mean}^{Grupa B} = 6,94W$, gdzie komponenty w Grupie A ($P_{mean}^{Grupa A}$) rozpraszają ponad 1700W. Tak duża dysproporcja pomiędzy mocą rozpraszaną w poszczególnych grupach wynika z faktu dużego marginesu napięcia dla diody D1 (wysoki stopień ochrony modułu CAN), które może wynosić jedynie $U_{max}^{D1} = 9V$ (tab. 16). Przebieg czasowy napięcia na diodzie D1 został zaprezentowany na rys. 36.



Rys. 36. Przebieg napięcia $U_{D1}(t)$ na diodzie D1.

Na podstawie przebiegu $U_{D1}(t)$ (rys. 36) można stwierdzić, iż napięcie to nie przekracza dopuszczalnego marginesu. Jednocześnie można zauważyć, iż dobrany czas analizy na poziomie 300µs pokrywa czas trwania narażenia wraz z odpowiedzią układu, ze względu na

obecność komponentów magazynujących energię (pojemności oraz indukcyjności). Uwidoczniony jest wpływ elementów indukcyjnych w torze ochronnika ze względu na występowanie drgań gasnących w końcowej fazie testu.

3.8.2. Napięcie udarowe 650V – wariant 2

Zgodnie z założeniami poniższych, podrozdział przedstawia analizę wariantu testowego $U_{WE2} = 650V$ (brak udziału iskrownika w rozpraszaniu energii). Wyniki analizy parametrów komponentów dla omawianego wariantu przedstawiono w tab. 21.

Tab. 21. Wynikowa specyfikacja ochronnika (narażenie $U_{WE2} = 650V$).

Komponent	Sugerowana wartość	U_{max} [V]	I_{max} [A]	P_{mean} [W]	P_{max} [W]	$E^{\%}$			
						$U_{max}^{\%}$	$I_{max}^{\%}$	$P_{mean}^{\%}$	$P_{max}^{\%}$
C4	1nF	469,71	0,49	0,43	26,17	9,49%	0,00%	0,00%	0,00%
GDT	SG75	469,71	0,00	0,00	0,03	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
GR9	2.2R (x3)	216,62	32,82	360,50	7 109,8	0,00%	0,00%	12,1%	43,09%
GR10	2.2R (x3)	216,60	32,82	360,50	7 108,7	0,00%	0,00%	12,1%	43,08%
D4	SMDJ28CA	36,50	31,89	74,98	1 163,9	0,00%	8,77%	0,00%	21,16%
R5	1R	3,40	3,40	1,80	11,58	0,00%	0,00%	0,40%	0,46%
R6	1R	3,40	3,40	1,80	11,58	0,00%	0,00%	0,40%	0,46%
D1	SMDJ5.0CA	7,12	3,40	5,00	24,23	79,14%	0,42%	0,00%	0,97%
D2	SMDJ6.0CA	4,38	0,02	0,00	0,03	48,71%	0,00%	0,00%	0,00%
D3	SMDJ6.0CA	5,70	0,02	0,00	0,08	63,37%	0,00%	0,00%	0,00%
Liczba rezystorów w grupach R9 i R10:									3

W tym przypadku głównymi elementami odpowiedzialnymi za rozpraszanie energii są komponenty GR9, R10 oraz D4. Suma rozproszonej przez te elementy mocy (796,41W) jest większa niż w przypadku dla napięcia wejściowego $U_{WE1} = 6kV$ (suma: 449W), co dowodzi słuszności analizy przypadku, kiedy to kluczowy element ochronnika posiada skrajnie nieliniową charakterystykę (np. w przypadku iskrownika), więc należy

zweryfikować sytuację, kiedy to ów element nie będzie zaangażowany w rozpraszanie energii. Ponadto wzrosła moc rozpraszana w Grupie B komponentów z 6,94W do 8,61W.

Powyższe wnioski potwierdzają konieczność wykonania analizy parametrów pracy komponentów ochronnika przeciwprzepięciowego dla pośrednich wartości napięcia wejściowego.

3.8.3. Napięcie udarowe 1kV, 2kV i 4kV

W podrozdziale tym przedstawiono analizę rozpraszania mocy konfiguracji ochronnika (tab. 20), który został zaprojektowany zgodnie z kryteriami przyjętymi w rozdz. 3.2 z wykorzystaniem funkcji celu (rozdz. 3.5). Wynikowa konfiguracja ochronnika (tab. 20) zostanie przeanalizowana dla napięć wejściowych z zakresu $U_{WE} \in (1kV, 2kV, 4kV)$.

A) Napięcie wejściowe $U_{WE3} = 4kV$,

Tab. 28 zawiera zestawienie parametrów pracy dla narażenia $U_{WE3} = 4kV$. Zestawienie zmian wybranych parametrów komponentów ochronnika przeciwprzepięciowego dla napięć wejściowego $U_{WE3} = 4kV$ względem napięcia $U_{WE} = 6kV$ zaprezentowano w tab. 22.

Tab. 22. Zestawienie zmian parametrów komponentów dla napięć wejściowego $U_{WE3} = 4kV$ w odniesieniu do $U_{WE1} = 6kV$ (metoda GACSOP).

Komponent	$E^{\%}$			
	$U_{max}^{\%}$	$I_{max}^{\%}$	$P_{mean}^{\%}$	$P_{max}^{\%}$
C4	-1,48%	-32,83%	-7,63%	-12,60%
GDT	-1,48%	-33,49%	-33,95%	-19,89%
GR9	-1,49%	-1,49%	-26,68%	-2,96%
GR10	-1,60%	-1,60%	-26,68%	-3,18%
D4	-0,28%	-1,60%	-30,53%	-1,88%
R5	-8,56%	-8,56%	-29,11%	-16,39%
R6	-8,60%	-8,60%	-29,11%	-16,46%
D1	-0,10%	-8,60%	-16,84%	-8,69%
D2	74,92%	0,00%	0,00%	0,01%
D3	75,29%	0,01%	0,00%	0,01%

Po zmniejszeniu narażenia z $U_{WE1} = 6kV$ na $U_{WE3} = 4kV$ (tab. 22) zmniejszyła się moc chwilowa rozpraszana przez iskrownik (-19,89%) i jego całkowita moc średnia spadała o 33,95%. Analogicznie zmieniła się moc średnia dla rezystorów z GR9 oraz GR10 spadek o 26,68%. Jednakże moc chwilowa dla GR9 spadła zaledwie o około 2,96%, co wynika z faktu, iż elementy te biorą czynny udział w rozpraszaniu mocy jedynie w okresach, kiedy iskrownik nie jest zaangażowany w rozpraszanie mocy, wobec czego będzie otrzymywać podobną moc szczytową dla napięć testowych powyżej napięcia zadziałania iskrownika.

B) Napięcie wejściowe $U_{WE4} = 2kV$,

Tab. 29 zawiera zestawienie parametrów pracy dla narażenia $U_{WE} = 2kV$. Zestawienie zmian wybranych parametrów komponentów ochronnika przeciwprzepięciowego dla napięcia wejściowego $U_{WE4} = 2kV$ względem napięcia $U_{WE1} = 6kV$ zaprezentowano w tab. 23.

Tab. 23 Zestawienie zmian parametrów komponentów dla napięć wejściowego $U_{WE4} = 2kV$ w odniesieniu do $U_{WE1} = 6kV$ (metoda GACSOP).

Komponent	$E\%$			
	$U_{max}^{\%}$	$I_{max}^{\%}$	$P_{mean}^{\%}$	$P_{max}^{\%}$
C4	-3,72%	-84,90%	-72,51%	-42,33%
GDT	-3,72%	-203,82%	-283,46%	-77,26%
GR9	-3,89%	-3,89%	24,77%	-7,94%
GR10	-3,91%	-3,91%	24,77%	-7,98%
D4	-0,70%	-4,18%	19,08%	-4,91%
R5	2,89%	2,89%	13,75%	5,69%
R6	2,91%	2,91%	13,75%	5,74%
D1	0,03%	2,89%	9,35%	2,92%
D2	-2,58%	-201,30%	-63,98%	-667,11%
D3	-0,93%	-158,53%	-64,36%	-160,94%

Dla amplitudy wejściowej $U_{WE4} = 2kV$ (tab. 23), moc chwilowa dla grupy GR9 oraz GR10 spadła o 7,94% w stosunku do narażenia pierwotnego $U_{WE1} = 6kV$. Moc średnia rozpraszana na tych rezystorach wzrosła o 24,77% oraz zwiększyła się moc rozpraszana na diodzie D4 o 19%. Podobny wzrost mocy średniej można zaobserwować dla komponentów z Grupy B, dla rezystorów (R5, R6) oraz diody D1, odpowiednio o +13,75% oraz +9,35%. Największa zmiana dotyczy mocy średniej (-283,5%) oraz chwilowej (-77,26%) rozpraszanej przez iskrownik.

C) Napięcie wejściowe $U_{WE5} = 1kV$.

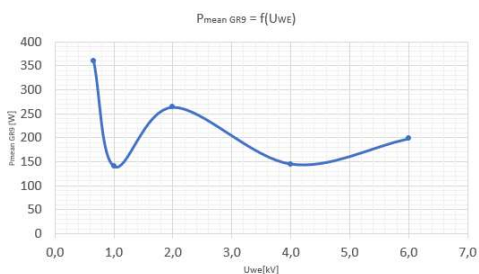
Tab. 30 zawiera zestawienie parametrów pracy dla narażenia $U_{WE5} = 1kV$. Zestawienie zmian parametrów komponentów ochronnika przeciwprzepięciowego dla napięć wejściowego $U_{WE5} = 1kV$ względem napięcia $U_{WE1} = 6kV$ zaprezentowano w tab. 24.

Tab. 24. Zestawienie zmian wybranych parametrów komponentów dla napięć wejściowego $U_{WE5} = 1kV$ w odniesieniu do $U_{WE1} = 6kV$ (metoda GACSOP).

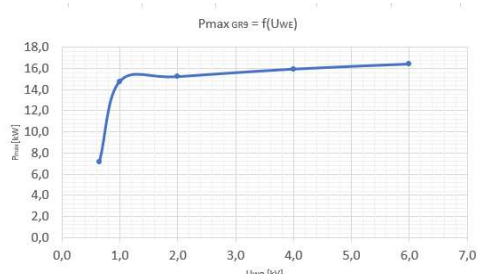
Komponent	Procentowy zakres zmian parametrów			
	$U_{max}^{\%}$	$I_{max}^{\%}$	$P_{mean}^{\%}$	$P_{max}^{\%}$
C4	-4,97%	-46,86%	-54,37%	-45,32%
GDT	-4,97%	-84,70%	-87,78%	-59,58%
GR9	-5,18%	-5,18%	-29,31%	-10,10%
GR10	-5,22%	-5,22%	-29,30%	-10,17%
D4	-1,10%	-6,29%	-36,27%	-7,32%
R5	-11,18%	-11,18%	-35,14%	-21,11%
R6	-11,18%	-11,18%	-35,14%	-21,12%
D1	-0,13%	-11,17%	-22,05%	-11,29%
D2	-17,09%	-69,12%	-69,40%	-89,11%
D3	-2,71%	-79,27%	-68,44%	-82,83%

Podobnie jak w przypadku wcześniejszych analiz widać nieliniowe zależności pomiędzy mocą rozpraszaną przez komponenty ochronnika, a amplitudą napięcia wejściowego U_{WE} . Pomimo tego, że napięcie udarowe spadło sześciokrotnie (z $U_{WE1} = 6kV$ do $U_{WE5} = 1kV$), moc średnia wydzielana na iskrowniku zmniejszyła się o 87,78%. Natomiast moc chwilowa dla rezystorów z grup GR9 oraz GR10 spadła o zaledwie 10%.

Zależność mocy średniej P_{mean} i chwilowej P_{max} dla grupy rezystorów GR9 w zależności od amplitudy narażenia napięciem udarowym została pokazana na rys. 37.



(a)

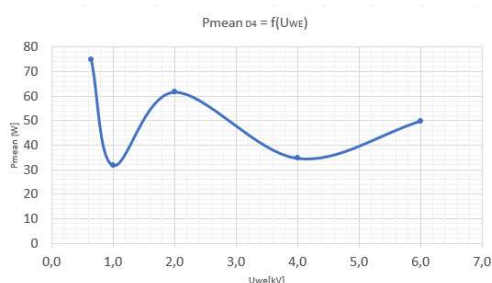


(b)

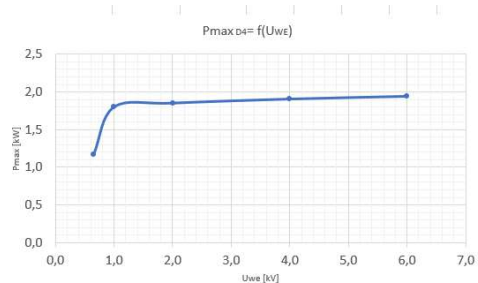
Rys. 37. Funkcja mocy średniej (a) oraz mocy chwilowej (b) dla GR9 w zależności od amplitudy napięcia testowego.

Zmiana mocy chwilowej P_{max}^{GR9} na grupie rezystorów GR9, rośnie wraz ze wzrostem amplitudy napięcia wejściowego, co przedstawiono na rys. 37 (b) i można stwierdzić, że jest monotoniczna, ale nieliniowa. W przypadku mocy średniej P_{mean}^{GR9} (rys. 37 (a)), funkcja nie jest monotoniczna w badanym zakresie, dlatego istnieje konieczność weryfikacji parametrów pracy rezystorów analizowanego ochronnika w tak krytycznym punkcie pracy, jakim jest napięcie wejściowe na poziomie progu zadziałania iskrownika, ponieważ może wystąpić przekroczenie mocy średniej dla tych komponentów w przypadku złego doboru elementów.

W dalszej części zostanie przeanalizowany rozkład mocy na diodzie D4 w funkcji napięcia wejściowego przedstawiony na rys. 38.



(a)

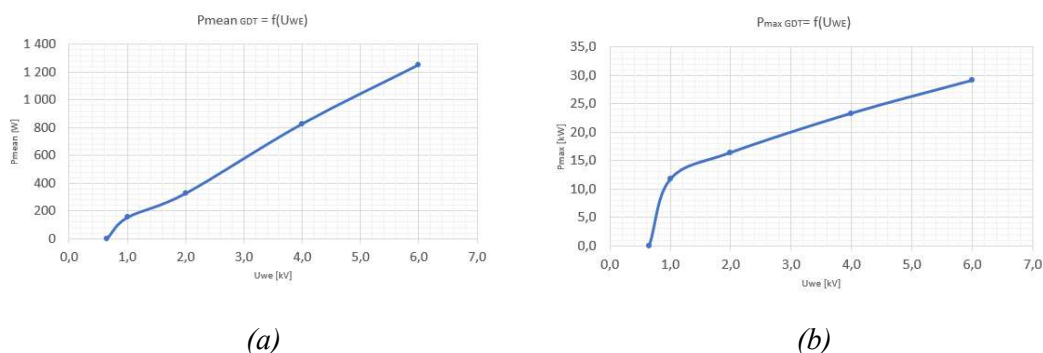


(b)

Rys. 38. Funkcja mocy średniej (a) oraz mocy chwilowej (b) dla D4 w zależności od amplitudy napięcia testowego.

Charakterystyki zmian mocy średniej P_{mean}^{GR9} i mocy chwilowej P_{max}^{GR9} dla komponentów GR9 (rys. 37) oraz D4 (rys. 38) są zbliżone, co pokrywa się z analizą przebiegów czasowych (rys. 34 i rys. 35). Wnioskując z przebiegu kształtu mocy chwilowej P_{max}^{D4} oraz średniej transila P_{mean}^{D4} D4, element ten nie powinien ulec uszkodzeniu bezpośredniemu w wyniku zwiększania amplitudy zaburzenia wejściowego.

Jako ostatni przeanalizowany zostanie iskrownik GDT, którego charakterystyki pokazano na rys. 39.



Rys. 39. Funkcja mocy średniej (a) oraz mocy chwilowej (b) dla GDT w zależności od amplitudy napięcia testowego.

Zauważalna jest liniowość rozpraszanej mocy średniej P_{mean}^{GDT} (rys. 39 (a)) dla zwiększającego się napięcia wejściowego, choć moc chwilowa P_{max}^{GDT} (rys. 39 (b)) nie posiada już tej cechy, ale wciąż jest to funkcja monotoniczna. Dodatkowo w przypadku mocy chwilowej P_{max}^{GDT} widoczny jest próg zadziałania iskrownika (około 650V), powyżej tego napięcia następuje wzrost rozpraszanej mocy.

3.8.4. Napięcie udarowe 10kV

W podrozdziale tym zaprezentowano hipotetyczną analizę zwiększania odporności na napięcia udarowe ochronnika przeciwprzepięciowego z wykorzystaniem badań zaprezentowanych w rozdz. 3.8.1, 3.8.2 oraz 3.8.3.

Zgodnie z wnioskami przedstawionymi w rozdz. 3.8 dotyczącymi występowania wielu lokalnych minimów, istnieje więc możliwość modyfikacji specyfikacji wynikowej (tab. 20) celem modyfikacji poszczególnych elementów. Na potrzeby niniejszego opracowania założmy, iż godzimy się na zwiększone zapotrzebowanie przestrzenne i zwiększamy liczbę rezystorów w grupach GR9 oraz GR10 do 4 (tab. 20). Jednakże, w tym wypadku

przekroczymy dopuszczalną sumę rezystancji w ochronniku (równanie (15)), więc konieczne jest wykorzystanie rezystorów 2Ω . Pozwoli to spełnić założenia projektowe.

Kolejnym komponentem, który wykazuje silny wzrost rozpraszanej energii jest iskrownik. Parametrem, który posiada ograniczenia w jego przypadku jest maksymalny prąd, którego wzrost na podstawie dotychczasowych badań został przedstawiony na rys. 40. Do zobrazowania posłużono się następującą zależnością:

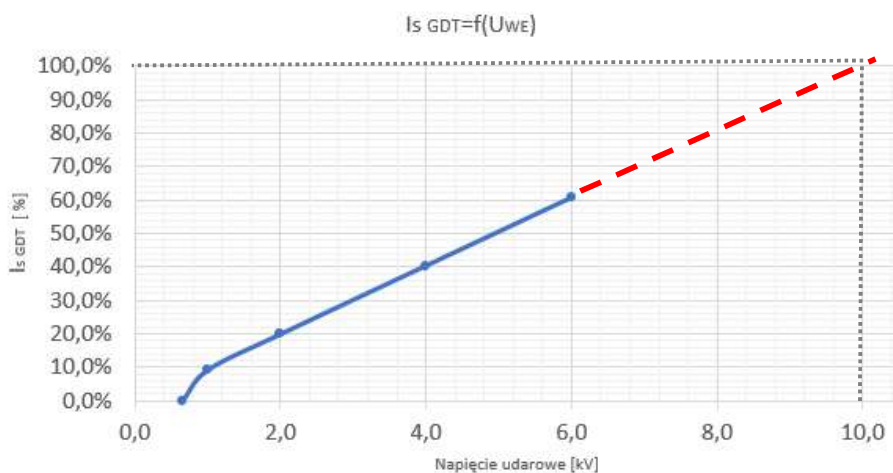
$$I_{S\ GDT} = \frac{I_{mx\ GDT}^k}{I_{mx'\ GDT}} \cdot 100\%, \quad (40)$$

gdzie:

- $I_{mx\ GDT}^k$ – maksymalny prąd na podstawie symulacji w przypadku narażenia napięciem wejściowym ze zbioru:

$$(U_{WE1} = 6kV, U_{WE2} = 650V, U_{WE3} = 4kV, U_{WE4} = 2kV, U_{WE5} = 1kV); \quad (41)$$

- $I_{mx'\ GDT}$ – maksymalny prąd według danych producenta.



Rys. 40. Funkcja stosunku prądu płynącego przez GDT do prądu maksymalnego w zależności od amplitudy napięcia testowego.

Przerywana linia czerwona stanowi ekstrapolację przewidywanych wartości.

Na podstawie aproksymacji przedstawionej na rys. 40 można określić przekroczenie marginesu dopuszczalnego prądu dla iskrownika przy napięciu wejściowym $U_{WE6} = 10kV$, dla założonej konfiguracji ochronnika.

Układ z czterema rezystorami poddano ww. narażeniu w celu oceny dopuszczalnych marginesów pracy komponentów ochronnika. Otrzymane wyniki zawarto w tab. 25.

Tab. 25. Zmodyfikowana specyfikacja komponentów ochronnika przeciwprzepięciowego dla narażenia $U_{WE6} = 10kV$.

Komponent	Sugerowana wartość	U_{max} [V]	I_{max} [A]	P_{mean} [W]	P_{max} [W]	$E^{\%}$			
						$U_{max}^{\%}$	$I_{max}^{\%}$	$P_{mean}^{\%}$	$P_{max}^{\%}$
C4	1nF	727,92	21,90	2,54	1 553,0	14,71%	0,00%	0,00%	0,00%
GDT	SG75	727,92	2 227,8	2 093	39 941	0,00%	101%	0,00%	0,00%
GR9	2R (x4)	343,78	57,30	528,45	19 697	0,00%	0,00%	13,3%	89,54%
GR10	2R (x4)	344,17	57,36	528,45	19 741	0,00%	0,00%	13,3%	89,74%
D4	SMDJ28CA	39,97	57,25	102,41	2 288,2	0,00%	15,7%	0,00%	41,60%
R5	1R	3,44	3,44	1,88	11,84	0,00%	0,00%	0,42%	0,47%
R6	1R	3,44	3,44	1,88	11,84	0,00%	0,00%	0,42%	0,47%
D1	SMDJ5.0CA	7,12	3,44	5,13	24,48	79,15%	0,42%	0,00%	0,98%
D2	SMDJ6.0CA	6,81	0,09	0,02	0,64	75,71%	0,01%	0,00%	0,03%
D3	SMDJ6.0CA	6,82	0,10	0,01	0,69	75,76%	0,01%	0,00%	0,03%
Liczba rezystorów w grupach R9 i R10:									4

Na podstawie powyższych wyników można wnioskować, iż elementem, który jest najbardziej narażony na uszkodzenie jest właśnie iskrownik, co wynika z przepływu zbyt dużego prądu (wyznaczony maksymalny prąd iskrownika został przekroczony o 1,26%). Pozostałe komponenty pracują poniżej marginesów, więc zagrożenie uszkodzenia pozostałych elementów jest niewielkie. Podsumowując, konfiguracja otrzymana dla napięcia wejściowego $U_{WE1} = 6kV$ na podstawie opracowanej procedury GACSOP po modyfikacji umożliwia rozproszenie energii dla narażenia $U_{WE6} = 10kV$.

3.9. Podsumowanie

W rozdziale tym zaprezentowano w szczególności metodę GACSOP doboru wartości elementów ochronnika przeciwprzepięciowego dla interfejsu komunikacyjnego w urządzeniach kolejowych opartą na algorytmie genetycznym. Omówiono koncepcję podziału elementów tego ochronnika na dwie grupy, tj. A i B, z których łatwo wymienne są jedynie elementy z grupy A. Szczegółowo omówiono autorską funkcję celu, która uwzględnia parametry i narażenia wynikające z wymagań normy PN-EN 50121-4 [2]. Zaproponowano wprowadzenie oraz wyznaczenie wartości współczynnika kary α , będącego nieodłączną częścią funkcji celu stosowanej do oceny rozwiązania wypracowanego przez algorytm genetyczny. Przedstawiono również drogę uzupełniania przypadków testowych oraz związaną z tym aktualizację postaci funkcji celu. Zdefiniowano reprezentanta dziedziny obejmującej możliwe konfiguracje komponentów w postaci wektora wejściowego (chromosomu), który dzięki rozwinięciu binarnemu pozwala wykorzystać możliwości algorytmu genetycznego.

Dodatkowo Autor zaproponował rozwiązanie dotyczące zarządzania ryzykiem uszkodzenia mniej znaczącej części urządzenia, poprzez wprowadzenie parametru β_k^i . W funkcji celu definiuje on marginesy parametrów krytycznych podczas narażenia dla konkretnej grupy komponentów, w odniesieniu do deklaracji producenta. Dzięki czemu istnieje możliwość minimalizacji kosztów w przypadku przekroczenia maksymalnych zakładanych narażeń.

Zaprezentowane podejście umożliwia również analizę parametrów krytycznych zaproponowanych komponentów w dziedzinie czasu, dzięki czemu istnieje możliwość weryfikacji pierwotnych założeń, a tym samym ewentualną ich modyfikację. Pozwala to w sposób elastyczny dostosowywać komponenty do warunków panujących na rynku elektroniki oraz minimalizować prawdopodobieństwo usterki urządzenia przytorowego.

Zaproponowana adaptacyjna procedura GACSOP umożliwia również spełnienie wymagań ponadnormatywnych poprzez korektę dziedziny komponentów lub modyfikację topologii badanego obwodu. Dodatkowo ze względu na możliwość określenia wartości parametrów krytycznych, dla większych napięć wejściowych, zaproponowana metoda daje możliwość zaprojektowania konfiguracji ochronnika dedykowanego dla określonych rynków, ponieważ optymalizując wybrane komponenty można zwiększyć zdolność absorpcji narażenia przez cały ochronnik, jednocześnie wykorzystując tą samą bazę komponentów

wspólnych, co ma duże znaczenie w kwestii optymalizacji procesów produkcyjnych oraz magazynowania części składowych ochronnika.

Należy również nadmienić, iż po zakończeniu doboru komponentów, należy zweryfikować wybrane przypadki testowe (najczęściej skrajne) celem wyznaczenia ograniczeń poszczególnych elementów ochronnych oraz przeprowadzić analizę ich wpływu na pozostałe elementy ochronnika. Weryfikacja ta ułatwia również wybór zamienników komponentów wybranych przez algorytm w trakcie życia produktu, kiedy to poszczególne komponenty mogą stać się niedostępne.

4. Wpływ starzenia przewodu na dobór elementów ochronnika

W rozdziale tym połączono opracowany model starzeniowy przewodu oraz konfigurację wynikową uzyskaną z metody GACSOP w celu wyznaczenia wpływu degradacji starzeniowej kabli na stopień ochronny przeciwprzepięciowej ochronnika interfejsu komunikacyjnego czujnika koła z wykorzystaniem normy PN-EN 50121-4 [2].

Konfiguracja ochronnika (rys. 22) wg specyfikacji (tab. 20) wykorzystano do symulacji narażenia napięciem udarowym $U_{WE1} = 6kV$ 1,2/50 μ s, poprzez zdegradowany przewód RE-2Y(ST)Y 2 \times 2 \times 0,75mm² (CT1), ponieważ ten typ przewodu wykorzystywany jest najczęściej do krótkodystansowego podłączania czujników koła. Parametry modelu przewodu zdegradowanego (rozdział 2.2) zostały wyznaczone na podstawie wyników zaprezentowanych w tab. 7 (wykorzystano funkcję starzeniową $f_3(t)$ (wzór (5)) zgodnie z analizami przedstawionymi w rozdziale 2.4). Zestawienie parametrów wejściowych dla symulacji przedstawiono w tab. 26.

Tab. 26. Porównanie parametrów kabla CT1 nominalnego oraz zdegradowanego.

Stan kabla	Rw [m Ω] (20 Hz)	Lw [μ H] (10 kHz)	Rs [m Ω] (20 Hz)	Ls, [μ H] (20 Hz)	C ₁₁ [pF] (10 kHz)	C ₁₂ , [pF] (10 kHz)	C ₂₃ [nF] (10 kHz)	C ₄₅ [nF] (10 kHz)	C ₇₁₀ [nF] (10 kHz)
Nominalny	364,25	14,50	280,00	10,20	490,00	475,00	1,50	1,49	0,80
Zdegradowany	378,23	14,50	329,88	10,75	724,10	713,30	3,18	3,28	2,45
δ_1 (%)	3,84%	0,00%	17,81%	5,38%	47,78%	50,17%	111,80%	120,27%	206,23%

Symulacja została poddana ocenie parametrów krytycznych z wykorzystaniem kryteriów oceny zaprezentowanych w rozdziale 3.3. Wyniki analizy parametrów zostały przedstawione w tab. 27.

Tab. 27. Porównanie parametrów pracy otrzymanej konfiguracji ochronnika w przypadku przewodu zdegradowanego i niezdegradowanego dla narażenia $U_{WE1} = 6kV$.

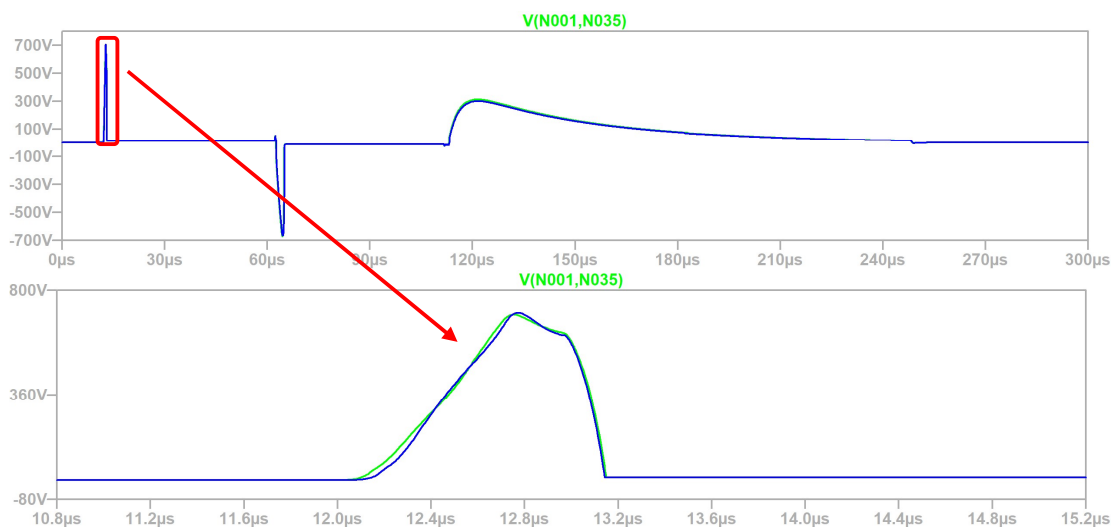
Przypadek testowy	Grupa komponentów	Komponent	Sugerowana wartość	Parametr				$E\%$			
				U_{max} [V]	I_{max} [A]	P_{mean} [W]	P_{max} [W]	$U_{max}^{\%}$	$I_{max}^{\%}$	$P_{mean}^{\%}$	$P_{max}^{\%}$
Przewód niezdegradowany	A	C4	1nF	697,96	9,54	2,09	1 409,5	14,10%	0,00%	0,00%	0,00%
		GDT	SG75	697,96	1 334,5	1 251	29 102	0,00%	60,6%	0,00%	0,00%
		GR9	2.2R (x3)	329,44	49,92	198,52	16 444	0,00%	0,00%	6,68%	99,66%
		GR10	2.2R (x3)	329,56	49,93	198,51	16 456	0,00%	0,00%	6,68%	99,74%
		D4	SMDJ28CA	38,96	49,83	49,91	1 941,2	0,00%	13,7%	0,00%	35,30%
	B	R5	1R	3,22	3,22	1,34	10,37	0,00%	0,00%	0,30%	0,41%
		R6	1R	3,22	3,22	1,34	10,37	0,00%	0,00%	0,30%	0,41%
		D1	SMDJ5.0CA	7,12	3,22	4,24	22,90	79,09%	0,39%	0,00%	0,92%
		D2	SMDJ6.0CA	6,79	0,06	0,01	0,43	75,41%	0,01%	0,00%	0,02%
		D3	SMDJ6.0CA	6,80	0,08	0,01	0,51	75,55%	0,01%	0,00%	0,02%
Przewód zdegradowany	A	C4	1nF	705,88	8,88	2,10	1426,64	14,26%	0,00%	0,00%	0,00%
		GDT	SG75	705,88	1326,87	1239,42	29081,59	0,00%	60,31%	0,00%	0,00%
		GR9	2.2R (x3)	333,38	50,51	186,82	16840,03	0,00%	0,00%	6,29%	102,06%
		GR10	2.2R (x3)	333,46	50,52	186,81	16847,91	0,00%	0,00%	6,29%	102,11%
		D4	SMDJ28CA	39,04	50,43	47,64	1968,67	0,00%	13,87%	0,00%	35,79%

Wpływ starzenia przewodu na dobór elementów ochronnika

Zmiana parametrów	B	R5	1R	3,20	3,20	1,31	10,25	0,00%	0,00%	0,29%	0,41%
		R6	1R	3,20	3,20	1,31	10,25	0,00%	0,00%	0,29%	0,41%
		D1	SMDJ5.0CA	7,12	3,20	4,18	22,77	79,08%	0,39%	0,00%	0,91%
		D2	SMDJ6.0CA	6,79	0,06	0,01	0,42	75,40%	0,01%	0,00%	0,02%
		D3	SMDJ6.0CA	6,79	0,07	0,01	0,46	75,47%	0,01%	0,00%	0,02%
		C4	1nF	+1,14%	-7,21%	+0,21%	+1,24%	+1,14%			
	A	GDT	SG75	+1,14%	-0,57%	-0,97%	-0,10%		-0,57%		
		GR9	2.2R (x3)	+1,21%	+1,21%	-5,90%	2,42%			-5,90%	+2,42%
		GR10	2.2R (x3)	+1,19%	+1,19%	-5,90%	2,40%			-5,90%	+2,40%
		D4	SMDJ28CA	+0,21%	+1,21%	-4,54%	1,42%		1,21%		+1,42%
	B	R5	1R	-0,59%	-0,59%	-2,54%	-1,17%			-2,54%	-1,17%
		R6	1R	-0,59%	-0,59%	-2,54%	-1,18%			-2,54%	-1,18%
		D1	SMDJ5.0CA	-0,01%	-0,58%	-1,45%	-0,59%	-0,01%	-0,58%		-0,59%
		D2	SMDJ6.0CA	-0,01%	-0,86%	-9,18%	-0,87%	-0,01%	-0,86%		-0,87%
D3		SMDJ6.0CA	-0,11%	-9,99%	-9,73%	-10,09%	-0,11%	-9,99%		-10,09%	

W obrębie komponentów z grupy A (rys. 22) wpływy starzenia na moc rozpraszaną na elementach rezystancyjnych sięga maksymalnie +2,42% (P_{max}^{GR9}). W grupie B natomiast zmiany względne wynoszą maksymalnie -10,09% (P_{max}^{D4}), jednak zmiana wartości bezwzględnej równa się jedynie 0,05W.

Następnie powyższe wartości zostały skonfrontowane z przebiegami czasowymi. Ponieważ różnice w parametrach pracy komponentów ochronnika pomiędzy przewodem zdegradowanym a nominalnym nie przekraczają 10,09% (tab. 27), jako przykład wybrano przebieg napięciowy komponentu o dużej amplitudzie, by możliwe dobrze zwizualizować różnice. W tym celu wykorzystano napięcie na wejściu ochronnika ($U_{GDT}(t)$ rys. 22) przedstawione na rys. 41.



Rys. 41. Przebieg napięcia na wejściu ochronnika ($U_{GDT}(t)$ - rys. 22) napięcie $U_{WE} = 6kV$, przewód zdegradowany (nominalnych – zielony, zdegradowany – niebieski).

Wartość napięcia dla przewodu zdegradowanego jest większa o +7,98V (zmiana +1,14%) od napięcia dla przewodu o nominalnych parametrach. Przebieg napięcia dla przewodu zdegradowanego posiada inny kształt (narastanie jest opóźnione, opadanie występuje wcześniej), jest to spowodowane wpływem zwiększonych pojemności pomiędzy elementami przewodu.

Najważniejszym wnioskiem wynikającym z powyższych analiz, jest praktyczny brak wpływu degradacji przewodu pod wpływem roztworu solnego na parametry krytyczne ochronnika przeciwprzepięciowego interfejsu CAN czujnika koła (tab. 27). Niewielkie wzrosty narażeń parametrów krytycznych, zdaniem Autora, można wytłumaczyć zwiększoną pojemnością elementów zdegradowanego przewodu pod wpływem roztworu solnego, ponieważ taki przewód posiada nieznacznie, ale zwiększoną, możliwość magazynowania energii.

Pomimo, że starzenie kabla nie ma wpływu na parametry krytyczne (napięcie maksymalne, prąd maksymalny, moc chwilową oraz średnią) elementów podczas

oddziaływania napięć udarowych, to należy pamiętać, iż degradacja ma istotny wpływ na transmisję CAN, co zostało przedstawione w rozdz. 2.5.

5. Wdrożenie

Celem tego doktoratu wdrożeniowego jest opracowanie nowej metody do rozwiązania problemów występujących w aktualnych instalacjach kolejowych. Realne problemy związane z degradacją okablowania strukturalnego systemów zarządzania ruchem kolejowym oraz zwiększanie odporności elektromagnetycznej interfejsu komunikacyjnego urządzenia przytorowego (czujnika koła) znalazły swoje rozwiązania w niniejszym opracowaniu.

Wpływ degradacji okablowania nie był dotychczas znany oraz rzucił nowe światło na możliwość występowania usterek na obiektach. Weryfikacja okresowego badania impedancji kabli komunikacyjnych została przedstawiona w Dziale Serwisu.

Metoda wykorzystująca algorytm genetyczny do doboru elementów ochronnika przeciwprzepięciowego, po wstępnej weryfikacji, została przedstawiona w konkursie „*Innovation Kiosk (IK)*”, którego celem jest wspieranie innowacyjnych pomysłów pozwalających zwiększać jakość urządzeń oraz podnosić zadowolenie klientów. Postulowany budżet w tym projekcie to 22 000 €, obejmuje on:

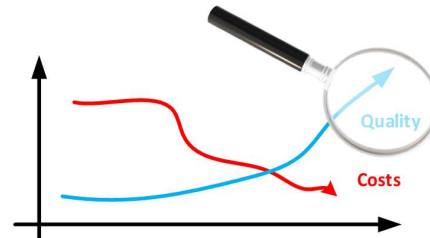
- a) czas pracy potrzebny na szczegółową weryfikację modelu oraz założeń na firmowym stanowisku do badań EMC (stanowisko dostępne od maja 2023),
- b) wyprodukowanie kabla przyłączeniowego (ochronnika przeciwprzepięciowego) według suboptymalnej specyfikacji,
- c) wykonanie badań w certyfikowanym laboratorium.

Slajd prezentujący wartość dodaną dla firmy z wdrożenia algorytmu genetycznego, na potrzeby doboru specyfikacji ochronnika przeciwprzepięciowego został zaprezentowany na rys. 42.

Expected benefits to involve artificial intelligence for business:

- 1) **Shortest design process.**
(Reducing time and cost in R&D)
- 2) **Minimum number of iteration during certification tests**
(Reducing time and cost)
- 3) **Manageable replacing components.**
(**Critical** in current situation on the market, new component can be verified by simulation)
- 4) **Increasing quality of the ALSTOM product**
(Laboratory testing give only information OK or NOK, new process deliver information about parameters margins)
- 5) **Flexible adapt for Customer needs.**
(After updating boundary new design could be presented in short time)

Present	Future
- Few iteration of EMC immunity test	- Reduce to 1-2 iteration (save time and cost)
- Verification based on research	- Verification of module based on simulation
- Limited knowledge about margin in electronic modules	- Extend knowledge about components margin



© ALSTOM SA, 2019. All rights reserved. Information contained in this document is indicative only. No representation or warranty is given or should be relied on that it is complete or correct or will apply to any particular project. This will depend on the technical and commercial circumstances. It is provided without liability and is subject to change without notice. Reproduction, use or disclosure to third parties, without express written authorization, is strictly prohibited.

ALSTOM 4

Rys. 42. Slajd z prezentacji przygotowanej na potrzeby IK prezentujący benefity wdrożenia algorytmu genetycznego do doboru specyfikacji ochronnika przeciwprzepięciowego.

Obecnie ze względu na zmianę właściciela firmy, trwa weryfikacja użycia podobnych rozwiązań w innych oddziałach firmy na całym świecie. Planowane zakończenie tego rozpoznania to trzeci kwartał 2023, w tym okresie zostanie podjęta decyzja o skorelowaniu wdrożenia zaproponowanego rozwiązania z datą zwolnienia zaktualizowanej dokumentacji urządzenia (analiza koordynacji izolacji, dowód bezpieczeństwa, badania certyfikacyjne itd.).

Ponadto przedstawione wyniki symulacji umożliwiają zaawansowaną weryfikację możliwych przyczyn usterek w uszkodzonych ochronnikach, które spływają od klientów celem wskazania przyczyny defektu.

6. Podsumowanie

W rozprawie zaproponowano dobór odpowiednich elementów ochronnika interfejsu komunikacyjnego urządzenia przytorowego za pomocą Autorskiej metody GACSOP („Genetic Algorithm Component Selection for Overvoltage Protection”). W pracy zaproponowano dedykowany model czterożyłowego kabla połączeniowego eksploatowanego w kolejnictwie, dla którego wykonano eksperyment oraz analizę zmian parametrów modelu w funkcji degradacji z wykorzystaniem roztworu wodnego soli. Efektem wykonanych doświadczeń oraz badań jest zgłoszenie koncepcji diagnostycznej do Działu Serwisu. Najważniejszym elementem pracy jest opracowanie metody GACSOP do doboru elementów ochronnika interfejsu komunikacyjnego, który oprócz specyfiki kodowania problemu, zawiera również autorski projekt funkcji celu. Weryfikacja zgodności z napięciami udarowymi według normy PN-EN 50121-4 [2] wymusiła wprowadzenie współczynnika kary oraz analizę napięć i prądów maksymalnych oraz mocy średniej i chwilowej, z zachowaniem odpowiednich marginesów parametrów pracy elementów ochronnika. Nie zmienia to faktu, że rozważono również przypadek teoretyczny z większą możliwością ingerencji w część sprzętową, a otrzymane rezultaty wskazują na zachowanie odpowiedniego zapasu mocy rozpraszanej na poszczególnych elementach. Dopełnieniem odpowiedniej specyfikacji projektowej jest szczegółowa analiza rozpraszanej mocy na poszczególnych elementach ochronnika z uwzględnieniem podziału na dwie grupy: A i B oraz analiza wpływu starzenia się przewodu na parametry pracy ochronnika. W związku z powyższym do oryginalnych osiągnięć zawartych w rozprawie zaliczyć należy:

- 1) model odcinka jednostkowego kabla i wyznaczenie parametrów w funkcji przyspieszonego starzenia pod wpływem roztworu wodnego soli,
- 2) wyznaczenie funkcji degradujących dla parametrów modelu zastępczego odcinka jednostkowego kabla, z których najlepsze odwzorowanie uzyskano dla funkcji w postaci: $f(t) = a + b(1 - e^{-t/\tau})$,
- 3) analizę wpływu degradacji przewodów na charakterystyki impedancyjne kabla,
- 4) opracowanie metody GACSOP, której funkcja celu może być modyfikowana pod wymagania klienta końcowego, np. poprzez podniesienie wymagań normy PN-EN 50121-4 [2], co prowadzi do zwiększenia odporności ochronnika przeciwprzepięciowego magistrali CAN,

- 5) opracowanie funkcji celu umożliwiającej parametryzację (β_k^i) zarządzania ryzykiem uszkodzenia elementów ochronnika przeciwprzepięciowego w celu wskazania elementów, których uszkodzenie jest akceptowalne (grupa A) dla napięć udarowych ponadnormatywnych i brak uszkodzeń w części zasadniczej urządzenia (grupa B elementów).

Przedstawiona ewaluacja zmian parametrów okablowania pod wpływem oddziaływania roztworu soli może być wykorzystywana w innych gałęziach gospodarki, w których istnieją podobne wymagania oraz równie trudne warunki eksploatacji (np. górnictwo oraz hutnictwo, którym również zazwyczaj towarzyszy kolej), więc analizy te mogą również zostać w nich wykorzystane lub zaadaptowane. Dodatkowo obecne trendy rozwoju, na przykładzie inicjatywy Przemysłu 4.0, intensyfikują konieczność implementacji rozległych sieci komunikacyjnych wymieniających informacje nie tylko krytyczne z punktu widzenia prowadzenia procesu, ale także umożliwiające ich optymalizację oraz planowanie akcji serwisowych mających na celu zapobieganie rozległym awariom i niepotrzebnym przestojom (predictive maintenance).

Jednym z wniosków niniejszej pracy jest wymaganie, by połączenie ekranu z uziemieniem odpowiednio zabezpieczać, a w przypadku oddziaływania agresywnych warunków środowiskowych, narażony fragment należy obciąć, a uziemienie ponownie podłączyć do niezdegradowanego odcinka ekranu. W związku z czym konieczne jest stosowanie odpowiednich zapasów okablowania w punktach krytycznych instalacji.

Zaprezentowany modułowy ochronnik przeciwprzepięciowy, również może zostać wykorzystany w innych dziedzinach przemysłu. Jego modułowa budowa, pozwala wraz z zarządzaniem ryzykiem, optymalizować koszty utrzymania oraz zmniejszać wydatki związane z wymianą urządzeń, które zostały dotknięte ponadnormatywnym narażeniem. Dodatkową korzyścią przedstawionej metody GACSOP jest weryfikacja parametrów, z jakimi pracują elementy ochronnika. Pozwala to na zaawansowaną analizę układu, dzięki czemu otrzymujemy dodatkowe narzędzia pozwalające weryfikować zamienniki i ułatwiające przeprowadzanie procesu ustalania przyczyny usterki, w przypadku uszkodzonych urządzeń. Ponadto przedstawiona metoda GACSOP może zostać łatwo uzupełniona o dodatkowe współczynniki opisujące, np. koszty dostępnych rodzin komponentów, co pozwala na dodatkową optymalizację finansową.

W związku z powyższym i na podstawie przedstawionych badań, stwierdzić można, że cel pracy pt. „opracowanie metody doboru elementów ochronnika przeciwprzepięciowego cyfrowego interfejsu komunikacyjnego (magistrala CAN), z wykorzystaniem algorytmu genetycznego dla urządzeń przytorowych (np. czujnik koła), na zgodność z normą PN-EN 50121-4 [2] pod kątem narażeń napięciami udarowymi” został osiągnięty, a tezy pracy:

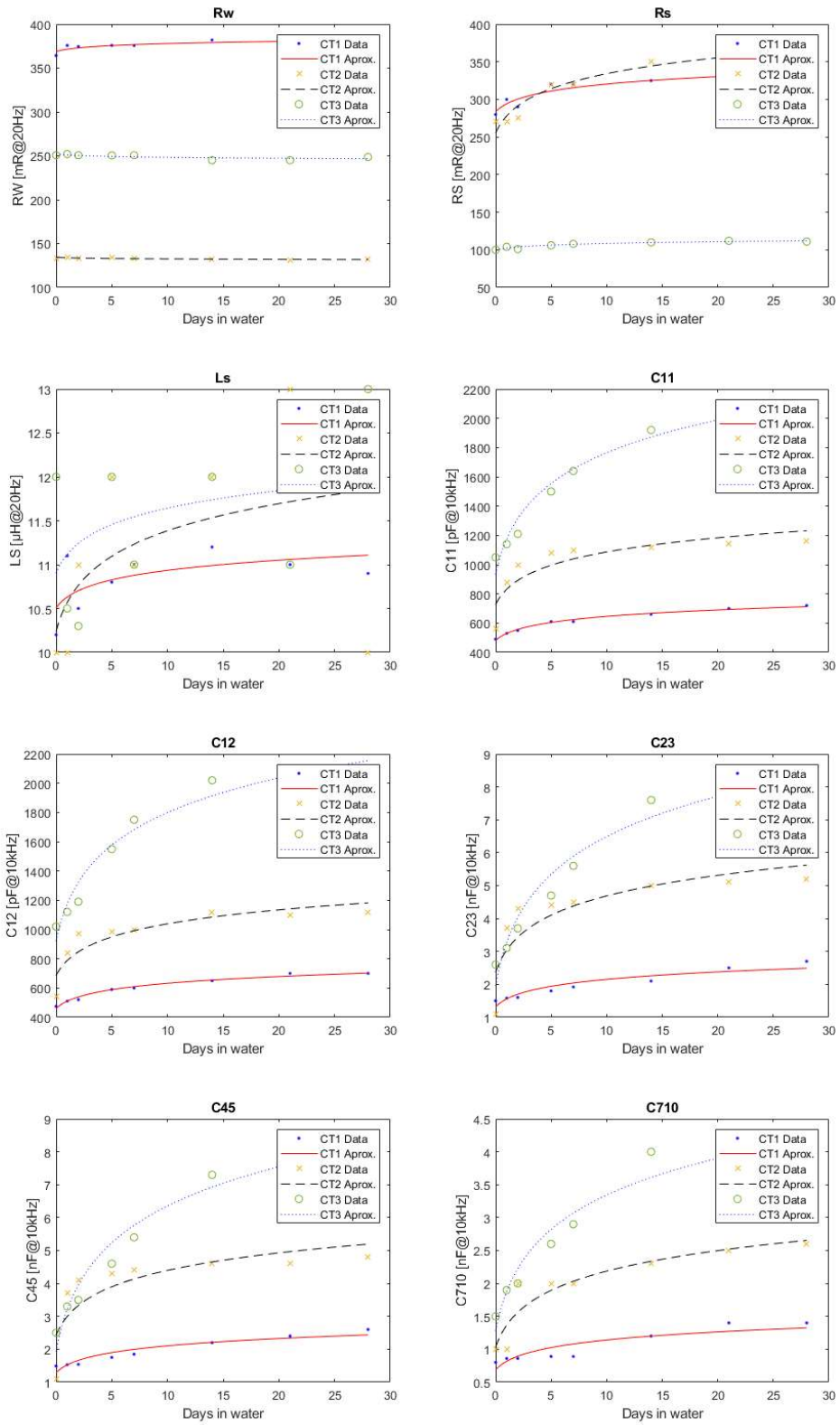
- dobór elementów ochronnika interfejsu komunikacyjnego za pomocą algorytmu genetycznego prowadzi do zwiększenia odporności urządzenia przytorowego (czujnik koła) na narażenia napięciami udarowymi zdefiniowanymi w normie PN-EN 50121-4 [2],

- wykorzystanie procesu sztucznego postarzenia przewodu komunikacyjno-zasilającego, umożliwia wyznaczenie funkcji degradacji parametrów odcinka jednostkowego kabla z uwzględnieniem napięć udarowych zgodnych z normą 50121-4 [2]),

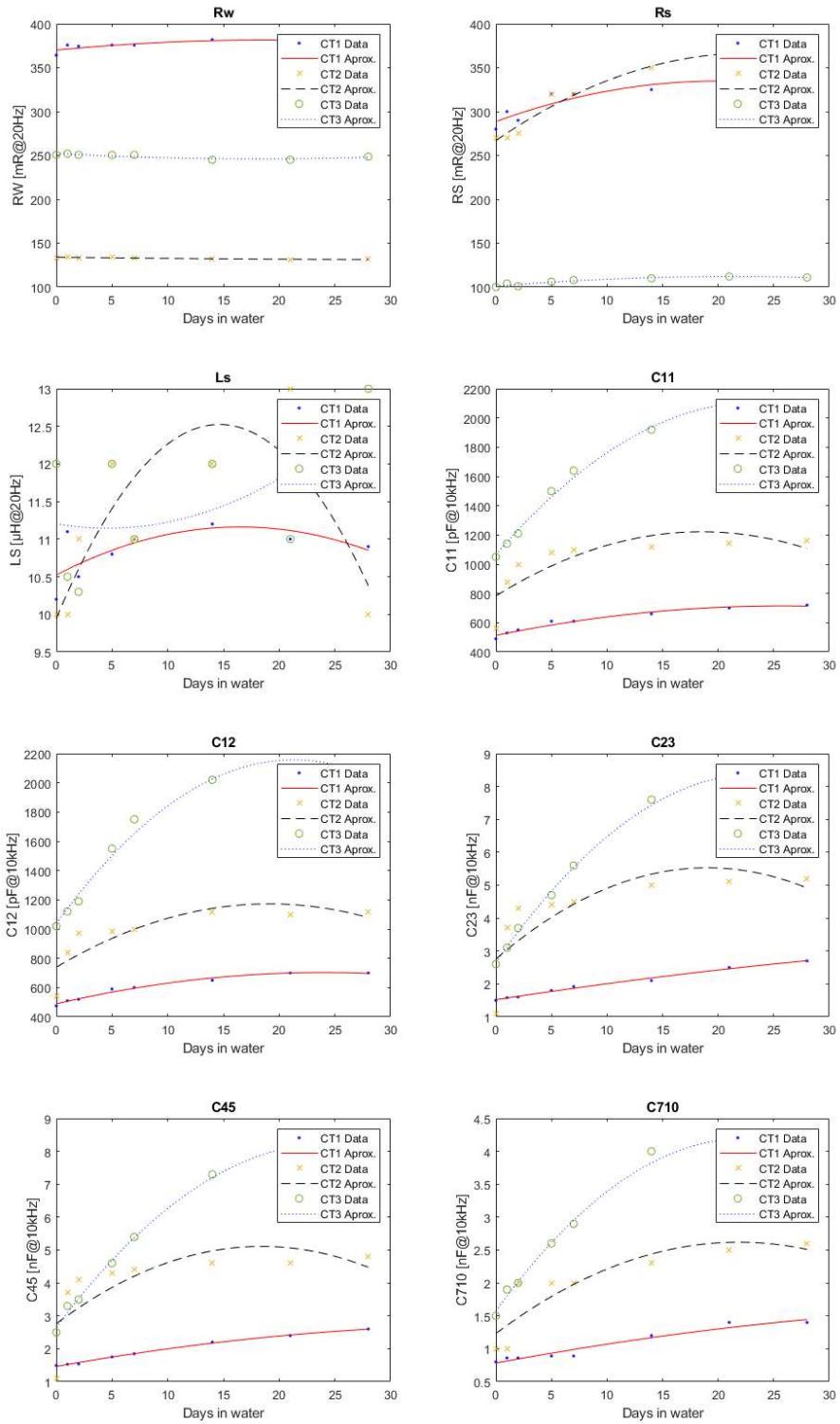
zostały udowodnione.

7. Dodatek

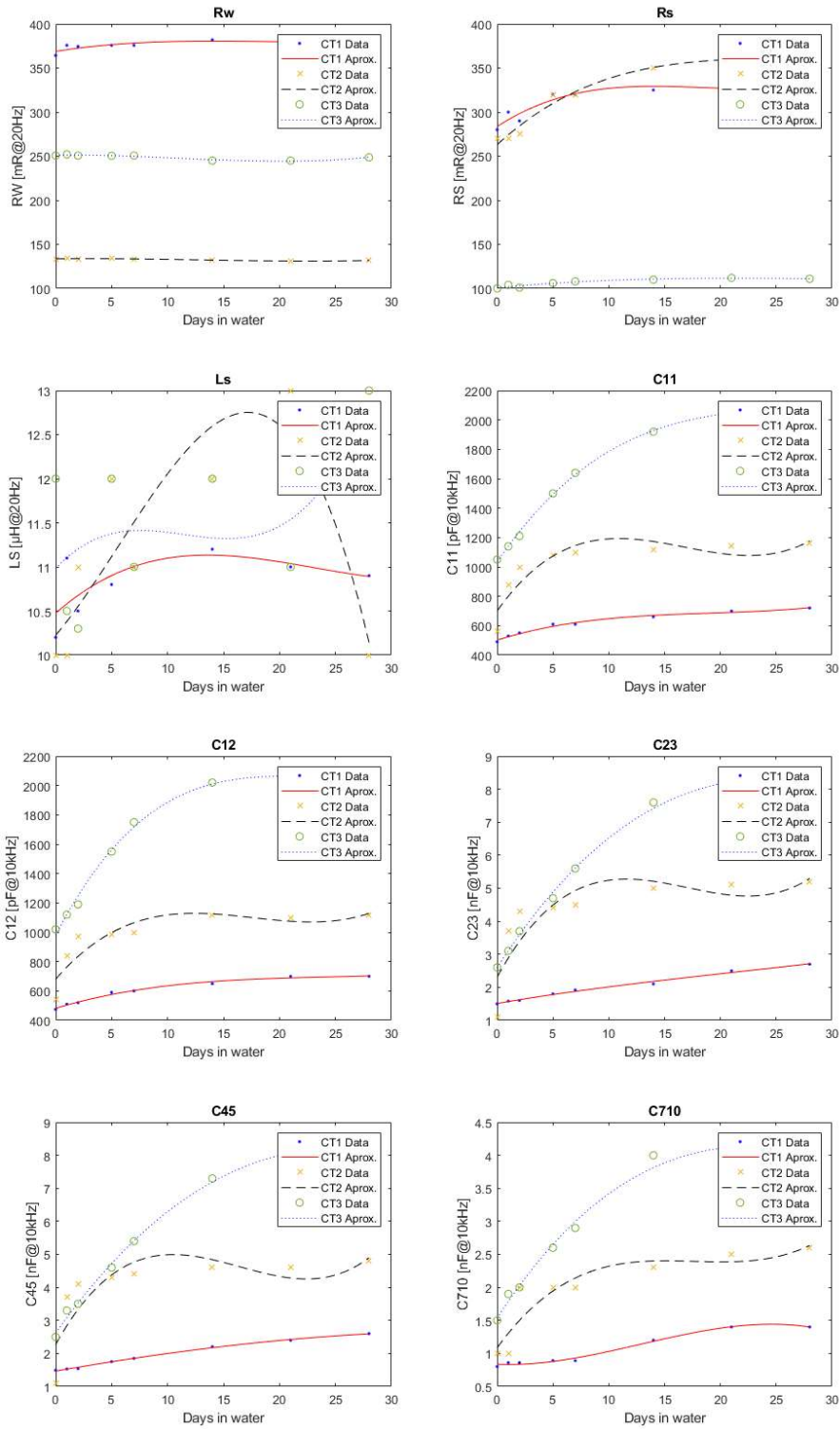
7.1. Wykresy pozostałych funkcji aproksymujących



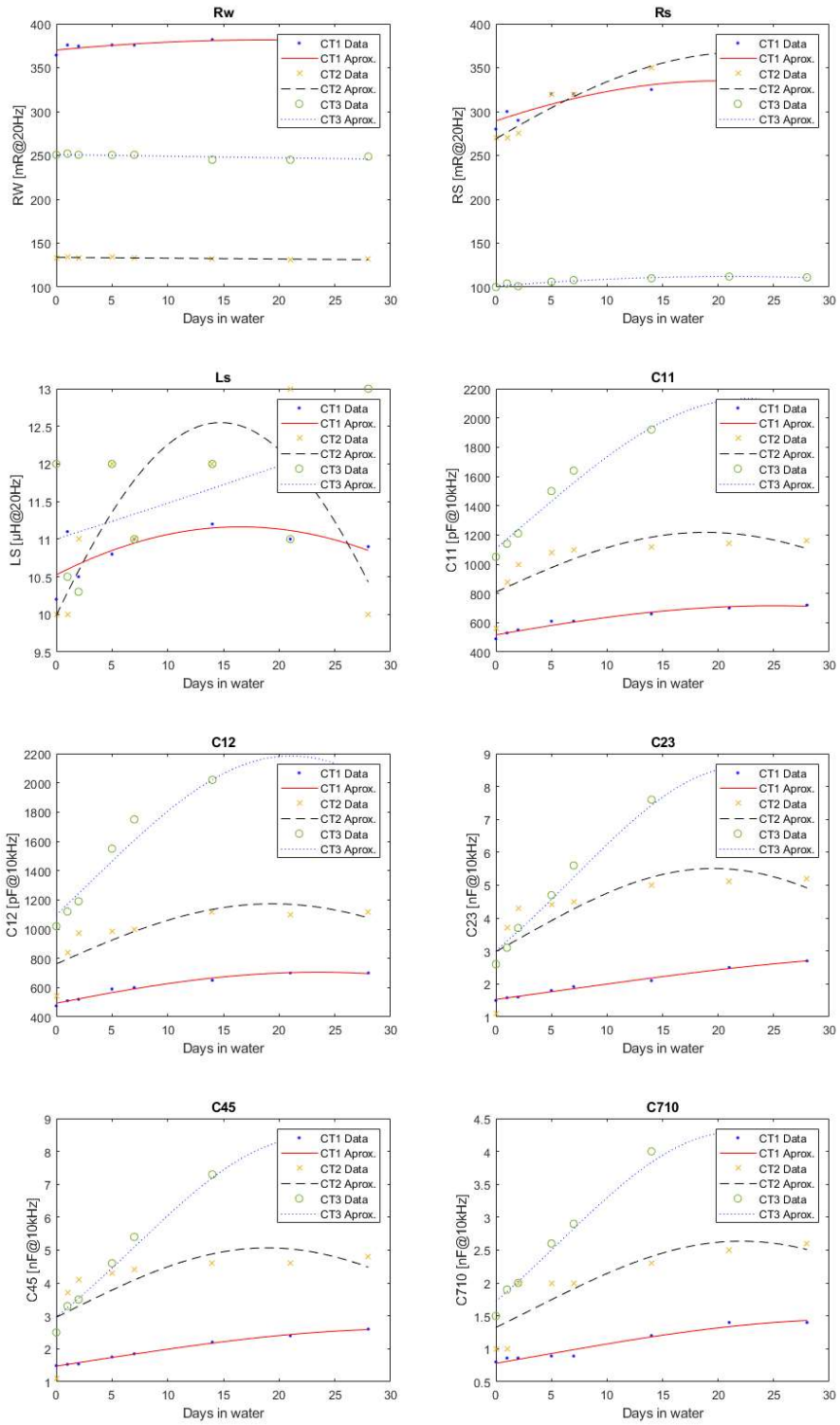
a) $f_1(t)$



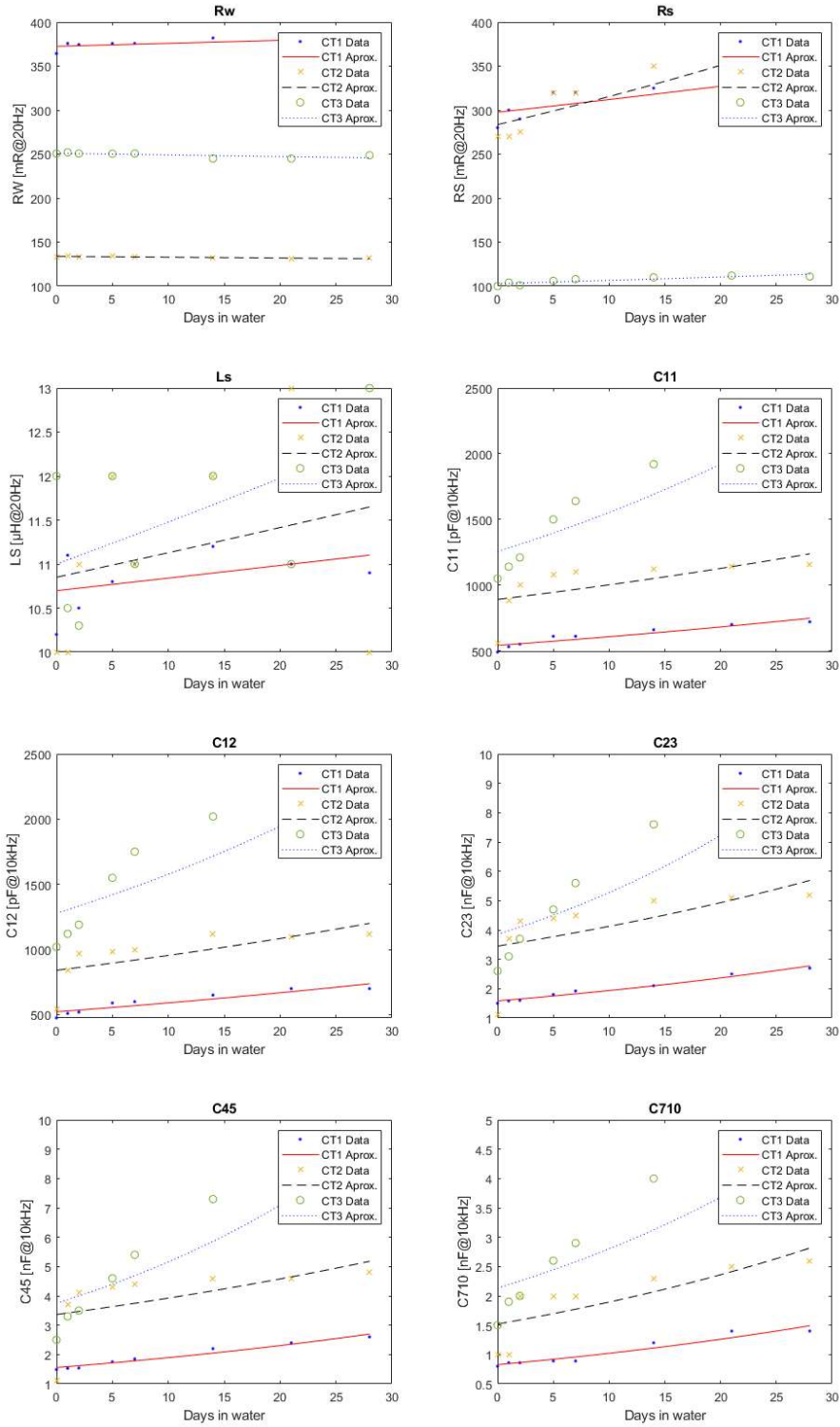
b) $f_2(t)$



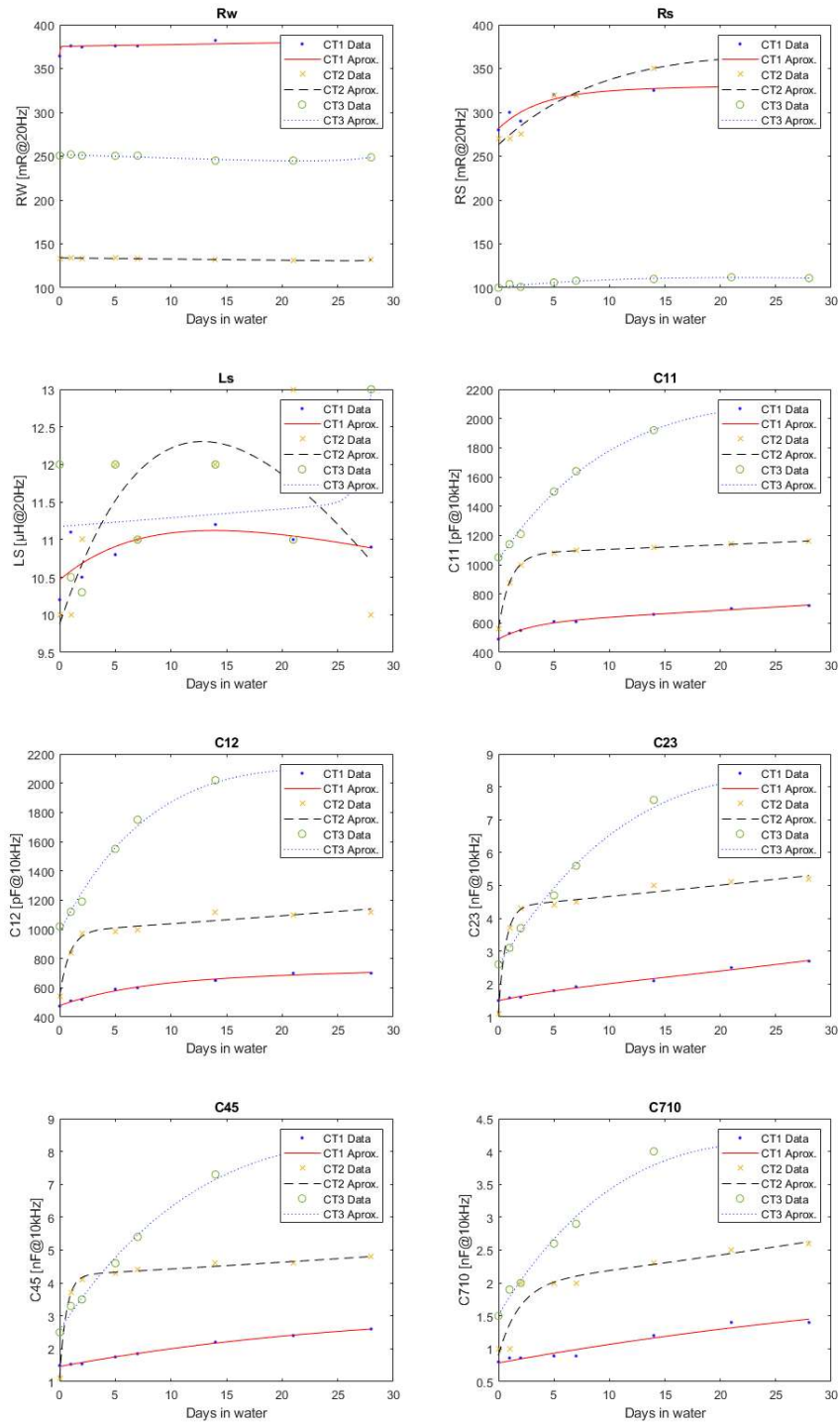
c) $f_4(t)$



d) $f_5(t)$



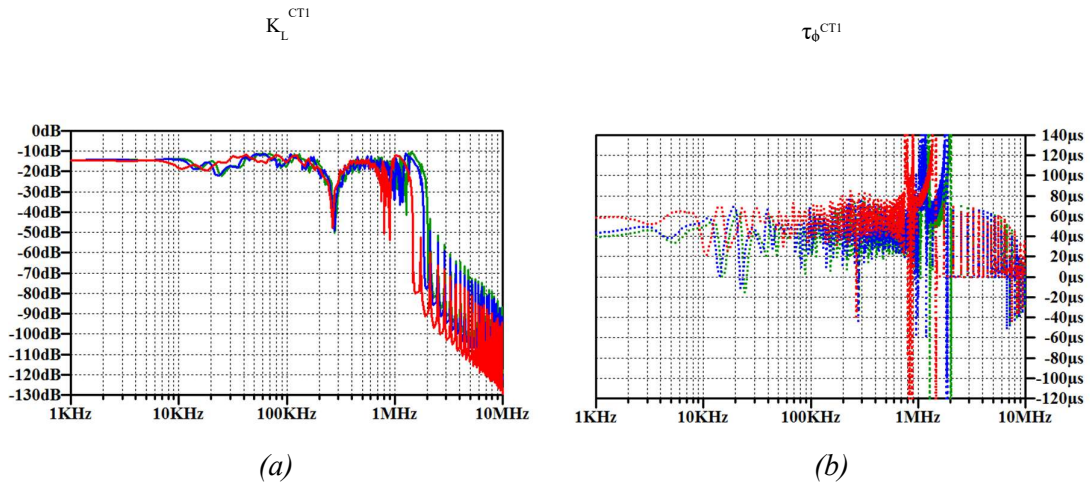
e) $f_6(t)$



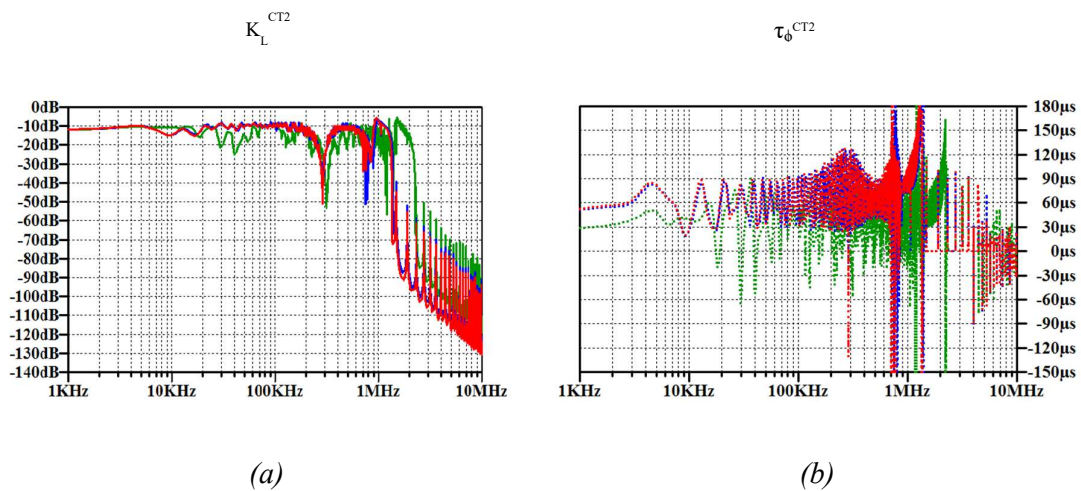
f) $f_7(t)$

Rys. 43. Wykresy pozostałych funkcji aproksymujących degradację przewodów oraz wyniki pomiarów.

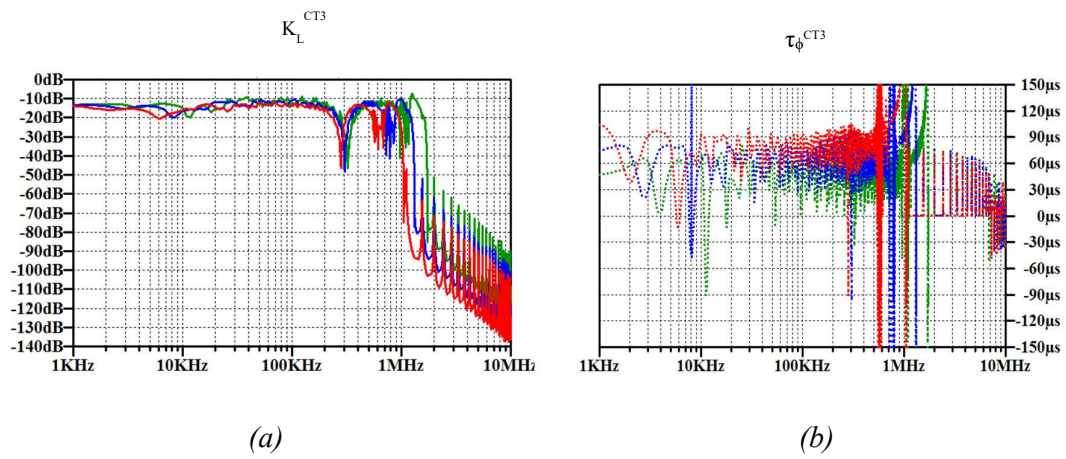
7.2. Wykresy charakterystyk amplitudowych i opóźnienia grupowego



Rys. 44. Charakterystyka częstotliwościowa (a) i opóźnienia grupowe (b) dla przewodu CT1 (zielony: 0T, niebieski: 5T i czerwony: 50T).



Rys. 45. Charakterystyka częstotliwościowa (a) i opóźnienie grupowe (b) dla przewodu CT2 (zielony: 0T, niebieski: 5T i czerwony: 50T).



Rys. 46. Charakterystyka częstotliwościowa (a) i opóźnienie grupowe (b) dla przewodu CT3 (zielony: 0T, niebieski: 5T i czerwony: 50T).

7.3. Wyniki symulacji otrzymanej konfiguracji ochronnika dla narażeń pośrednich

Tab. 28. Parametry pracy otrzymanej konfiguracji ochronnika metodą GACSOP ($U_{WE1} = 6kV$) dla narażenia $U_{WE3} = 4kV$.

Komponent	Sugerowana wartość	U_{max} [V]	I_{max} [A]	P_{mean} [W]	P_{max} [W]	$E^{\%}$			
						$U_{max}^{\%}$	$I_{max}^{\%}$	$P_{mean}^{\%}$	$P_{max}^{\%}$
C4	1nF	687,66	6,41	1,93	1 232,0	13,89%	0,00%	0,00%	0,00%
GDT	SG75	687,66	887,57	826,63	23 314	0,00%	40,3%	0,00%	0,00%
GR9	2.2R (x3)	324,53	49,17	145,55	15 957	0,00%	0,00%	4,90%	96,71%
GR10	2.2R (x3)	324,28	49,13	145,54	15 932	0,00%	0,00%	4,90%	96,56%
D4	SMDJ28CA	38,85	49,04	34,67	1 904,8	0,00%	13,4%	0,00%	34,63%
R5	1R	2,94	2,94	0,95	8,67	0,00%	0,00%	0,21%	0,35%
R6	1R	2,94	2,94	0,95	8,67	0,00%	0,00%	0,21%	0,35%
D1	SMDJ5.0CA	7,11	2,94	3,53	20,91	79,01%	0,36%	0,00%	0,84%
D2	SMDJ6.0CA	6,74	0,03	0,01	0,22	74,92%	0,00%	0,00%	0,01%
D3	SMDJ6.0CA	6,78	0,05	0,01	0,36	75,29%	0,01%	0,00%	0,01%
Liczba rezystorów w grupach R9 i R10:									3

Tab. 29. Parametry pracy otrzymanej konfiguracji ochronnika metodą GACSOP
 ($U_{WE1} = 6kV$) dla narażenia $U_{WE} = 2kV$.

Komponent	Sugerowana wartość	U_{max} [V]	I_{max} [A]	P_{mean} [W]	P_{max} [W]	$E\%$			
						$U_{max}^{\%}$	$I_{max}^{\%}$	$P_{mean}^{\%}$	$P_{max}^{\%}$
C4	1nF	672,93	5,16	1,21	990,35	13,59%	0,00%	0,00%	0,00%
GDT	SG75	672,93	439,24	326,37	16 417	0,00%	19,9%	0,00%	0,00%
GR9	2.2R (x3)	317,10	48,04	263,87	15 234	0,00%	0,00%	8,88%	92,33%
GR10	2.2R (x3)	317,15	48,05	263,87	15 240	0,00%	0,00%	8,88%	92,37%
D4	SMDJ28CA	38,68	47,83	61,67	1 850,3	0,00%	13,1%	0,00%	33,64%
R5	1R	3,32	3,32	1,55	11,00	0,00%	0,00%	0,35%	0,44%
R6	1R	3,32	3,32	1,55	11,01	0,00%	0,00%	0,35%	0,44%
D1	SMDJ5.0CA	7,12	3,31	4,68	23,59	79,12%	0,41%	0,00%	0,94%
D2	SMDJ6.0CA	6,62	0,02	0,01	0,06	73,52%	0,00%	0,00%	0,00%
D3	SMDJ6.0CA	6,74	0,03	0,01	0,20	74,85%	0,00%	0,00%	0,01%

Liczba rezystorów w grupach R9 i R10: 3

Tab. 30. Parametry pracy otrzymanej konfiguracji ochronnika metodą GACSOP
 ($U_{WE1} = 6kV$) dla narażenia $U_{WE} = 1kV$.

Komponent	Sugerowana wartość	U_{max} [V]	I_{max} [A]	P_{mean} [W]	P_{max} [W]	$E\%$			
						$U_{max}^{\%}$	$I_{max}^{\%}$	$P_{mean}^{\%}$	$P_{max}^{\%}$
C4	1nF	663,25	5,07	0,95	770,77	13,40%	0,00%	0,00%	0,00%
GDT	SG75	663,25	204,16	152,98	11 761	0,00%	9,28%	0,00%	0,00%
GR9	2.2R (x3)	312,36	47,33	140,34	14 783	0,00%	0,00%	4,73%	89,60%
GR10	2.2R (x3)	312,36	47,33	140,34	14 782	0,00%	0,00%	4,73%	89,59%
D4	SMDJ28CA	38,53	46,70	31,81	1 799,2	0,00%	12,8%	0,00%	32,71%
R5	1R	2,86	2,86	0,87	8,18	0,00%	0,00%	0,19%	0,33%
R6	1R	2,86	2,86	0,87	8,18	0,00%	0,00%	0,19%	0,33%
D1	SMDJ5.0CA	7,11	2,86	3,30	20,31	78,98%	0,35%	0,00%	0,81%
D2	SMDJ6.0CA	5,63	0,02	0,00	0,05	62,52%	0,00%	0,00%	0,00%
D3	SMDJ6.0CA	6,62	0,02	0,00	0,09	73,50%	0,00%	0,00%	0,00%
Liczba rezystorów w grupach R9 i R10:									3

Bibliografia

- [1] „PN-EN 61000-4-5:2014-10/A1:2018-01”. <https://sklep.pkn.pl/pn-en-61000-4-5-2014-10-a1-2018-01e.html> (dostęp 16 sierpień 2021).
- [2] „PN-EN 50121-4:2017-04”. <https://sklep.pkn.pl/pn-en-50121-4-2017-04p.html> (dostęp 16 sierpień 2021).
- [3] A. Zupan, A. T. Teklic, i B. Filipovic-Grcic, „Modeling of 25 kV electric railway system for power quality studies”, w *Eurocon 2013*, Zagreb, Croatia: IEEE, lip. 2013, s. 844–849. doi: 10.1109/EUROCON.2013.6625081.
- [4] „Standardy_Techniczne_TOM_IV_WCAG.pdf”. Dostęp: 5 luty 2023. [Online]. Dostępne na: https://www.plk-sa.pl/files/public/user_upload/pdf/Akty_prawne_i_przepisy/Standardy_tekniczne/S_tandardy_Techniczne_TOM_IV_WCAG.pdf
- [5] X. Yan *i in.*, „The realization of triggering lightning on DBS tower and characteristic analysis of lightning current waveform”, w *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Shanghai: IEEE, paź. 2014, s. 1014–1017. doi: 10.1109/ICLP.2014.6973272.
- [6] D. Grzechca, T. Golonek, i J. Rutkowski, „The Use of Simulated Annealing with Fuzzy Objective Function to Optimal Frequency Selection for Analog Circuit Diagnosis”, w *2007 14th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, Marrakech: IEEE, grudz. 2007, s. 899–902. doi: 10.1109/ICECS.2007.4511136.
- [7] „PN-EN 50129:2019-01 - wersja angielska”. <https://sklep.pkn.pl/pn-en-50129-2019-01e.html> (dostęp 18 marzec 2023).
- [8] D. Grzechca i A. Szczeponik, „Comparison of Filtering Methods for Enhanced Reliability of a Train Axle Counter System”, *Sensors*, t. 20, nr 10, Art. nr 10, sty. 2020, doi: 10.3390/s20102754.
- [9] „EN 50129:2003 - Railway applications - Communication, signalling and process - nlnfnorm.cz”, 14 kwiecień 2020. <https://www.nlnfnorm.cz/en/ehn/1687> (dostęp 14 kwiecień 2020).
- [10] H. Arai, H. Fujita, i Y. Ono, „Effect Evaluation of Lightning Protection Measures on Train Detectors for Level Crossing System”, w *34th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Rzeszow: IEEE, wrz. 2018, s. 1–7. doi: 10.1109/ICLP.2018.8503350.
- [11] G. Morita, S. Hirai, i K. Michishita, „Lightning Protection of Control Board Equipped with Electronic Equipment”, w *34th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Rzeszow: IEEE, wrz. 2018, s. 1–6. doi: 10.1109/ICLP.2018.8503413.
- [12] „Protection of Digital Telecom Exchanges Against Lightning Surges and Earth Faults”. <https://ieeexplore-ieee-org-12vdogrex08ec.han.polsl.pl/document/7103319/> (dostęp 15 sierpień 2021).

-
- [13] S. E. Grychkin i E. P. Stroganova, „Immunity Testing of Telecommunication Equipment Established in Industrial Zones and in Energy Facilities”, w *2019 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Russia: IEEE, lip. 2019, s. 1–4. doi: 10.1109/SYNCHROINFO.2019.8814174.
- [14] R. Zoro, R. R. Pakki, i R. Komar, „Lightning protection for electric railway in Indonesia telecommunication and signalling system”, w *2017 International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*, Bali: IEEE, paź. 2017, s. 476–478. doi: 10.1109/ICHVEPS.2017.8225893.
- [15] M. Hamadache, S. Dutta, O. Olaby, R. Ambur, E. Stewart, i R. Dixon, „On the Fault Detection and Diagnosis of Railway Switch and Crossing Systems: An Overview”, *Appl. Sci.*, t. 9, nr 23, Art. nr 23, lis. 2019, doi: 10.3390/app9235129.
- [16] H. Arai, „A Study on Lightning Protection Measures for Railway Signalling Systems”, *IEEJ Trans. Power Energy*, t. 132, nr 11, s. 881–884, 2012, doi: 10.1541/ieejpes.132.881.
- [17] N. S. Gorasia, „Railway communication systems”, w *5th IET Professional Development Course on Railway Electrification Infrastructure and Systems (REIS 2011)*, London, UK: IET, 2011, s. 154–176. doi: 10.1049/ic.2011.0185.
- [18] „Development of Railway Signaling System based on Network Technology”, 2 luty 2021. <https://ieeexplore-1ieee-1org-12vdogrnh0277.han.polsl.pl/document/1571335> (dostęp 2 luty 2021).
- [19] R. Pawelczyk i D. Grzechca, „Improvement of Functional Safety of the Level-Crossing Barrier Machine by a Noninvasive Angle-Detection Method”, *IEEE Des. Test*, t. 39, nr 5, s. 43–53, paź. 2022, doi: 10.1109/MDAT.2022.3156010.
- [20] „The Past, Present and Future of Railway Interlocking System”. <https://ieeexplore-1ieee-1org-12vdogrxh004d.han.polsl.pl/document/9231438/> (dostęp 19 marzec 2023).
- [21] A. Moncmanová, Red., *Environmental deterioration of materials*. w International series on advances in architecture, no. v. 21. Southampton, UK ; Boston, MA: WIT Press, 2007.
- [22] A. Hedir, O. Jbara, M. Moudoud, F. Slimani, S. Rondot, i F. Bellabas, „Behaviour of Cross-linked Polyethylene Used as High Voltage Power Cables Insulation Due to Environmental Constraints”, w *2018 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, Algiers: IEEE, paź. 2018, s. 1–4. doi: 10.1109/CISTEM.2018.8613596.
- [23] N. Weik i N. Niessen, „Performability Analysis of Railway Systems”, w *2018 International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*, Singapore: IEEE, grudz. 2018, s. 1–5. doi: 10.1109/ICIRT.2018.8641589.
- [24] H. Arai, Y. Ono, i H. Fujita, „The lightning risk evaluation for railway signalling systems based on observation of lightning overvoltages”, w *2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Vienna, Austria: IEEE, wrz. 2012, s. 1–5. doi: 10.1109/ICLP.2012.6344254.
- [25] H. Arai, Y. Hizawa, H. Fujita, i M. Aida, „Lightning overvoltage of rails and signalling cables in electrified/non-electrified section”, w *2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Estoril: IEEE, wrz. 2016, s. 1–6. doi: 10.1109/ICLP.2016.7791412.
- [26] X. Mi, B. Qin, L. Yang, Q. Liu, i L. Li, „Experimental analysis of lightning stroke on bridge cable”, w *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Shanghai, China: IEEE, paź. 2014, s. 595–599. doi: 10.1109/ICLP.2014.6973194.

- [27] S. Tagzirt, D. Bouguedad, A. Mekhaldi, i I. Fofana, „Multiscale Analysis of Naturally Weathered High-Voltage XLPE Cable Insulation in Two Extreme Environments”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, t. 29, nr 4, s. 1599–1607, sie. 2022, doi: 10.1109/TDEI.2022.3185566.
- [28] C. J. Baker, L. Chapman, A. Quinn, i K. Dobney, „Climate change and the railway industry: A review”, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, t. 224, nr 3, s. 519–528, mar. 2010, doi: 10.1243/09544062JMES1558.
- [29] Vereinte Nationen, Red., *Climate change impacts and adaptation for transport networks and nodes*. w United Nations publication. Geneva New York: United Nations, 2020.
- [30] E. J. Palin, I. Stipanovic Oslakovic, K. Gavin, i A. Quinn, „Implications of climate change for railway infrastructure”, *WIREs Clim. Change*, t. 12, nr 5, wrz. 2021, doi: 10.1002/wcc.728.
- [31] Y. Watanabe, T. Uchida, Y. Sasaki, N. Oka, i H. Ohashi, „Study on grounding condition of shield sheath in shielded twisted pair cable”, w *2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Tokyo*, maj 2014, s. 753–756.
- [32] Q. Chen, Q. Xiao, i J. Yan, „Test and Research of Digital Signal Cable for High-speed Railway”, w *2022 11th International Conference of Information and Communication Technology (ICTech)*, Wuhan, China: IEEE, luty 2022, s. 153–157. doi: 10.1109/ICTech55460.2022.00038.
- [33] R. Jobava *i in.*, „Development of simulation model for shielded twisted pair cables in EMC immunity problems”, w *Proceedings of Xth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory*, Lviv, Ukraine: IEEE, 2005, s. 84–89. doi: 10.1109/DIPED.2005.201590.
- [34] S. Caniggia i F. Maradei, „Interference in Shielded Foil Twisted Pair (SFTP) Cables Due to ESD”, w *2007 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Honolulu, HI, USA: IEEE, lip. 2007, s. 1–5. doi: 10.1109/ISEMC.2007.174.
- [35] „1143-2012 - IEEE Guide on Shielding Practice for Low Voltage Cables”, 2 luty 2021. <https://ieeexplore-1ieee-1org-12vdogrnh0277.han.polsl.pl/document/6471984> (dostęp 2 luty 2021).
- [36] C. Towle, „Cable Screens in Hazardous Areas”, *Meas. Control*, t. 46, s. 239–243, paź. 2013, doi: 10.1177/0020294013502912.
- [37] G. Ramos, A. F. Leal, M. A. Rios, i L. F. Roa, „Grounding Model in Multi-Train DC Traction Systems”, *IEEE Lat. Am. Trans.*, t. 12, nr 2, s. 169–175, mar. 2014, doi: 10.1109/TLA.2014.6749534.
- [38] Z. Zheng, G. Du, D. Zhang, W. Huang, X. Zhang, i Z. Zhu, „Comprehensive Control of Reflux Safety Parameters Based on Flexible Grounding Scheme in DC Railway Electrification System”, *IEEE Trans. Transp. Electrification*, t. 8, nr 3, s. 3127–3138, wrz. 2022, doi: 10.1109/TTE.2022.3154157.
- [39] R. Vijay, G. Prasad, Y. Huo, S. Sm, i P. Tv, „Measurement-based Condition Monitoring of Railway Signaling Cables”, w *2021 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm)*, Aachen, Germany: IEEE, paź. 2021, s. 33–38. doi: 10.1109/SmartGridComm51999.2021.9632301.
- [40] J. Paknahad, K. Sheshyekani, M. Hamzeh, i F. Rachidi, „Lightning induced currents on river-crossing buried cables”, w *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Shanghai, China: IEEE, paź. 2014, s. 581–584. doi: 10.1109/ICLP.2014.6973191.

-
- [41] B. Shen, T. Lu, J. Wang, i Z. Liu, „Influencing Factors of the Induced Voltage in Signal Cable of Electrified Railway”, w *2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Wuhan, China: IEEE, mar. 2009, s. 1–4. doi: 10.1109/APPEEC.2009.4918436.
- [42] J. Wang, H. Shao, Q. He, G. Lin, i Y. Zhang, „Measurement Analysis on Electric Power Parameters in Electrified Railway Traction Substations”, w *2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*, Paris: IEEE, lip. 2018, s. 1–2. doi: 10.1109/CPEM.2018.8500995.
- [43] T. Capuder, L. Lugaric, J. Brekalo-Strbic, i S. Krajcar, „Optimizing the train power system in Zagreb”, w *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Dearborn, MI: IEEE, wrz. 2009, s. 41–45. doi: 10.1109/VPPC.2009.5289872.
- [44] K. S. Lock, „Lightning protection, earthing and surge protection of base transmission stations”, w *2011 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning*, Chengdu, China: IEEE, lis. 2011, s. 436–440. doi: 10.1109/APL.2011.6110161.
- [45] Chen Juexiao, Gu Minjie, Luo Feng, i Sun Zechang, „EMC comparison of unshielded twisted pair and shielded twist pair in automotive CAN-bus”, w *2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Xi’an, China: IEEE, cze. 2009, s. 1063–1066. doi: 10.1109/IVS.2009.5164428.
- [46] M. Mardiguian i J. Raimbourg, „Shielded (STP) versus unshielded (UTP) twisted pairs: an EMC comparison”, w *2001 IEEE EMC International Symposium. Symposium Record. International Symposium on Electromagnetic Compatibility (Cat. No. 01CH37161)*, Montreal, Que., Canada: IEEE, 2001, s. 43–46. doi: 10.1109/ISEMC.2001.950524.
- [47] K. Lowczowski, Z. Nadolny, i B. Olejnik, „Analysis of Cable Screen Currents for Diagnostics Purposes”, *Energies*, t. 12, s. 1348, kwi. 2019, doi: 10.3390/en12071348.
- [48] M. Ziwei i W. Xueye, „A Portable Railway Signal Cable Fault Detector”, w *2020 5th International Conference on Information Science, Computer Technology and Transportation (ISCTT)*, Shenyang, China: IEEE, lis. 2020, s. 69–72. doi: 10.1109/ISCTT51595.2020.00021.
- [49] Min Yongzhi i Dang Jianwu, „A dual-side comparison method of online fault monitoring for railway signal cable”, w *2010 International Conference on Information, Networking and Automation (ICINA)*, Kunming, China: IEEE, paź. 2010, s. V1-486-V1-489. doi: 10.1109/ICINA.2010.5636512.
- [50] L. Hongwei, „Study on the fault detection of railway signaling cable based on wavelet and virtual instrument”, w *2011 IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks*, Xi’an, China: IEEE, maj 2011, s. 476–479. doi: 10.1109/ICCSN.2011.6014769.
- [51] Q. Shi i O. Kanoun, „Detection and location of single cable fault by impedance spectroscopy”, w *2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, Montevideo, Uruguay: IEEE, maj 2014, s. 595–599. doi: 10.1109/I2MTC.2014.6860813.
- [52] „IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above - Redline”, *IEEE Std 400-2012 Revis. IEEE Std 400-2001 - Redline*, s. 1–159, cze. 2012.
- [53] M. Tadeusiewicz i S. Hałgas, „A New Approach to Multiple Soft Fault Diagnosis of Analog BJT and CMOS Circuits”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, t. 64, nr 10, Art. nr 10, paź. 2015, doi: 10.1109/TIM.2015.2421712.

- [54] H. Manesh, J. Genoulaz, A. Kameni, F. Loete, L. Pichon, i O. Picon, „Experimental analysis and modelling of coaxial transmission lines with soft shield defects”, w *2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, Dresden, Germany: IEEE, sie. 2015, s. 1553–1558. doi: 10.1109/ISEMC.2015.7256406.
- [55] F. Weinan *i in.*, „Study on diagnostic method of aging 10kV XLPE cable”, w *2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, sie. 2016, s. 1–4. doi: 10.1109/CICED.2016.7576023.
- [56] P. Bilski i J. Wojciechowski, „Current research trends in diagnostics of analog systems”, w *2012 International Conference on Signals and Electronic Systems (ICSES)*, wrz. 2012, s. 1–11. doi: 10.1109/ICSES.2012.6382211.
- [57] S. Sallem, M. Olivas, i A. Peltier, „Soft Faults Detection and Localization on Power Cables by Reflectometry”, w *2022 7th International Conference on Frontiers of Signal Processing (ICFSP)*, Paris, France: IEEE, wrz. 2022, s. 204–207. doi: 10.1109/ICFSP55781.2022.9924823.
- [58] M. Kafal i W. B. Hassen, „On the Diagnosis of Incipient Faults in Transmission Lines Using a Projection Approach Based on Phase Patterns”, w *2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - Fall)*, Xiamen, China: IEEE, grudz. 2019, s. 1288–1294. doi: 10.1109/PIERS-Fall48861.2019.9021894.
- [59] I. Mladenovic i Ch. Weindl, „Artificial aging and diagnostic measurements on medium-voltage, paper-insulated, lead-covered cables”, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, t. 28, nr 1, Art. nr 1, sty. 2012, doi: 10.1109/MEI.2012.6130528.
- [60] A. K. Behera, C. E. Beck, i A. Alsammarae, „Cable aging phenomena under accelerated aging conditions”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, t. 43, nr 3, Art. nr 3, cze. 1996, doi: 10.1109/23.507241.
- [61] X. Gao, Z. Zhou, M. He, i Z. Du, „SPICE models of shielded twisted-wire pairs for radiated immunity analyses”, w *2017 IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing)*, Beijing, China: IEEE, paź. 2017, s. 1–5. doi: 10.1109/EMC-B.2017.8260470.
- [62] H. Ishikawa, I. Fukasaku, T. Sugiyama, H. Yonezawa, i M. Kaga, „Estimation of mode-conversion of differential copper cables using lumped circuit parameters”, w *2013 IEEE Electrical Design of Advanced Packaging Systems Symposium (EDAPS)*, Nara, Japan: IEEE, grudz. 2013, s. 150–153. doi: 10.1109/EDAPS.2013.6724411.
- [63] B. Pushpanathan, S. Grzybowski, i T. O. Bialek, „Identification of aged cable section in 12.5 kV URD system using EMTP simulation”, w *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, sty. 2012, s. 1–6. doi: 10.1109/ISGT.2012.6175725.
- [64] „CENELEC - EN 50124-1 - Railway applications - Insulation coordination - Part 1: Basic requirements - Clearances and creepage distances for all electrical and electronic equipment | Engineering360”, 10 luty 2021. <https://standards.globalspec.com/std/10200341/EN%2050124-1> (dostęp 10 luty 2021).
- [65] K. Suzuki, T. Koshizuka, i H. Hayashiya, „Study on inspection of high voltage cable in railway line”, lis. 2020, s. 1408–1412. doi: 10.23919/ICEMS50442.2020.9290967.
- [66] Y. Deng, Z. Lin, X. Cao, i Z. Yi, „Research on lightning-proof reactor for lightning protection to railway substation feeder side”, w *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Shanghai, China: IEEE, paź. 2014, s. 1169–1172. doi: 10.1109/ICLP.2014.6973305.

-
- [67] H. Arai, Y. Ono, K. Sugimoto, i Y. Hizawa, „Estimation of lightning overvoltages according to lightning conditions and effect on decreasing lightning hazards due to SPD for railway signalling systems”, w *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Shanghai, China: IEEE, paź. 2014, s. 857–862. doi: 10.1109/ICLP.2014.6973244.
- [68] „Interface between control-command signalling trackside and other subsystems (v.4 20-09-2018).pdf.pdf”. Dostęp: 13 czerwiec 2023. [Online]. Dostępne na: <https://www.era.europa.eu/system/files/2022-11/Interface%20between%20control-command%20signalling%20trackside%20and%20other%20subsystems%20%28v.4%2020-09-2018%29.pdf.pdf>
- [69] S. Halgas i M. Tadeusiewicz, „Multiple soft fault diagnosis of analogue electronic circuits”, w *2008 International Conference on Signals and Electronic Systems*, Krakow, Poland: IEEE, 2008, s. 533–536. doi: 10.1109/ICSES.2008.4673490.
- [70] P. Bilski, „Application of the Graph Clustering Algorithm to Analog Systems Diagnostics”, w *2007 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference IMTC 2007*, Warsaw, Poland: IEEE, maj 2007, s. 1–6. doi: 10.1109/IMTC.2007.379088.
- [71] T. Lee, Hongsik Cho, Seogwon Kim, i K. Kim, „Measurement and analysis of consumption energy for Korean high-speed trains”, w *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, Washington, DC, USA: IEEE, sty. 2012, s. 1–5. doi: 10.1109/ISGT.2012.6175629.
- [72] I. Perin, P. F. Nussey, U. M. Cella, T. V. Tran, i G. R. Walker, „Application of power electronics in improving power quality and supply efficiency of AC traction networks”, w *IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, cze. 2015, s. 1086–1094. doi: 10.1109/PEDS.2015.7203421.
- [73] M. Andrusca, M. Adam, A. Dragomir, i E. Lunca, „Innovative Integrated Solution for Monitoring and Protection of Power Supply System from Railway Infrastructure”, *Sensors*, t. 14, Art. nr 23, sty. 2021, Dostęp: 1 luty 2022. [Online]. Dostępne na: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/23/7858>
- [74] A. Nakahata-Medrado, J.-L. Schanen, J.-M. Guichon, P.-O. Jeannin, E. Batista, i G. Desportes, „Optimization of a Gate Distribution Layout to Compensate the Current Imbalance Generated by the 3D Geometry of a Railway Inverter”, *Energies*, t. 14, nr 7, Art. nr 7, sty. 2021, Dostęp: 1 luty 2022. [Online]. Dostępne na: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/7/1891>
- [75] Z. Tian, N. Zhao, S. Hillmansen, S. Su, i C. Wen, „Traction Power Substation Load Analysis with Various Train Operating Styles and Substation Fault Modes”, *Energies*, t. 13, nr 11, Art. nr 11, sty. 2020, Dostęp: 1 luty 2022. [Online]. Dostępne na: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/11/2788>
- [76] A. Wojcik, W. Winiecki, R. Lukaszewski, i P. Bilski, „Analysis of Transient State Signatures in Electrical Household Appliances”, w *2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, Metz, France: IEEE, wrz. 2019, s. 639–644. doi: 10.1109/IDAACS.2019.8924328.
- [77] M. Mzulwini i K. Awodele, „Application of PSB, PSAT and ATP Tools in Traction Surge Arrester Selections”, w *2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA)*, Bloemfontein, South Africa: IEEE, sty. 2019, s. 719–725. doi: 10.1109/RoboMech.2019.8704779.
- [78] R. Markowska i Z. Wróbel, „Selected Issues of Safe Operation of the Railway Traffic Control System in the Event of Exposition to Damage Caused by Lightning

- Discharges”, *Energies*, t. 14, nr 18, Art. nr 18, wrz. 2021, Dostęp: 4 styczeń 2022. [Online]. Dostępne na: <https://sciprofiles.com/publication/view/466796088e72fc31ed324c845f6b8d18>
- [79] A. H. S. Garmabaki, A. Thaduri, S. Famurewa, i U. Kumar, „Adapting Railway Maintenance to Climate Change”, *Sustainability*, t. 13, nr 24, Art. nr 24, sty. 2021, Dostęp: 4 styczeń 2022. [Online]. Dostępne na: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/24/13856>
- [80] Z. Wrobel, „Surge threats appear in railway devices feeding lines”, w *2018 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Rzeszów: IEEE, wrz. 2018, s. 1–5. doi: 10.1109/ICLP.2018.8503380.
- [81] C. Gomes i M. Z. Abidin Ab Kadir, „Challenges in the promotion of lightning protection know-how in developing world”, w *2010 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Cagliari: IEEE, wrz. 2010, s. 1–13. doi: 10.1109/ICLP.2010.7845824.
- [82] N. I. Ahmad, Z. Ali, M. Z. A. Ab. Kadir, M. Osman, N. H. Zaini, i M. H. Roslan, „Analysis of Lightning-Induced Voltages Effect with SPD Placement for Sustainable Operation in Hybrid Solar PV-Battery Energy Storage System”, *Sustainability*, t. 13, nr 12, Art. nr 12, sty. 2021, Dostęp: 4 styczeń 2022. [Online]. Dostępne na: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/12/6889>
- [83] L. Chun, „Lightning protection of China railway vehicle running safety monitor system - Internet of Things in lightning protection”, w *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Shanghai, China: IEEE, paź. 2014, s. 885–889. doi: 10.1109/ICLP.2014.6973249.
- [84] Z. Wróbel i A. S. Jagiełło, „The Risk of Lightning Losses in a Structure Equipped with RTC Devices According to the Standard EN 62305-2:2008”, *Energies*, t. 14, nr 6, Art. nr 6, sty. 2021, Dostęp: 4 styczeń 2022. [Online]. Dostępne na: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/6/1704>
- [85] P. Janu i R. Jalovecky, „Proposal of power supply monitoring unit with CANaerospace protocol”, w *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*, Bologna, Italy: IEEE, paź. 2010, s. 1–5. doi: 10.1109/ESARS.2010.5665208.
- [86] H. Arai, I. Watanabe, H. Motoyama, i S. Yokoyama, „Analytical study on lightning overvoltages of rail track and railway signalling equipment”, w *2010 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Cagliari, Italy: IEEE, wrz. 2010, s. 1–7. doi: 10.1109/ICLP.2010.7845852.
- [87] H. Arai, H. Matsubara, K. Miyajima, S. Yokoyama, i K. Sato, „Experimental Study on Surge Propagation Characteristics of Rail and Lightning Overvoltages on Level Crossing”, *IEEE Trans. Power Energy*, t. 123, nr 11, s. 1307–1312, 2003, doi: 10.1541/ieejpes.123.1307.
- [88] „PCA82C250 CAN Controller Interface Available online: <https://www.vishay.com/docs/28536/geninfo-cd-rfi-safcaps.pdf> (accessed on 10 October 2021)”. Dostęp: 12 wrzesień 2021. [Online]. Dostępne na: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCA82C250.pdf>
- [89] „Lista właściwych krajowych specyfikacji technicznych i dokumentów normalizacyjnych, których zastosowanie umożliwia spełnienie zasadniczych wymagań dotyczących interoperacyjności systemu kolei dla pojazdów kolejowych - Ministerstwo Infrastruktury - Portal Gov.pl”, *Ministerstwo Infrastruktury*. <https://www.gov.pl/web/infrastruktura/lista-wlasciwych-krajowych-specyfikacji-technicznych-i-dokumentow-normalizacyjnych-ktorych-zastosowanie-umozliwia->

-
- spełnienie-zasadniczych-wymagan-dotyczacych-interoperacyjnosci-systemu-kolei-dla-pojazdow-kolejowych (dostęp 7 kwiecień 2023).
- [90] S. Shi-ping i D. Qi-feng, „Study of lightning surge over-voltage at substation”, w *4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, Weihai, China: IEEE, lip. 2011, s. 1883–1886. doi: 10.1109/DRPT.2011.5994207.
- [91] D. Miller, R. Kennel, M. Reddig, i M. Schlenk, „Surge immunity test analysis for modern switching mode power supplies”, w *IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Austin, TX, USA: IEEE, paź. 2016, s. 1–6. doi: 10.1109/INTLEC.2016.7749027.
- [92] C. A. Nucci, F. Rachidi, M. V. Ianoz, i C. Mazzetti, „Lightning-induced voltages on overhead lines”, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, t. 35, nr 1, s. 75–86, luty 1993, doi: 10.1109/15.249398.
- [93] S. James, N. Kularatna, A. Steyn-Ross, i R. Kunemeyer, „Numerical simulation of surge protection circuits and experimental verification using a lightning surge simulator”, w *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Montreal, QC, Canada: IEEE, paź. 2012, s. 615–620. doi: 10.1109/IECON.2012.6388757.
- [94] G. L. Amicucci, F. Fiamingo, Z. Flisowski, G. B. L. Piparo, i C. Mazzetti, „Surge protective devices for low voltage systems: practical approach for the protection distance evaluation”, w *2007 IEEE Lausanne Power Tech*, Lausanne, Switzerland: IEEE, lip. 2007, s. 778–782. doi: 10.1109/PCT.2007.4538414.
- [95] D. Gies, „Lightning protection for wireless telecommunication transceiver facilities (WiTF)”, w *2017 IEEE Symposium on Product Compliance Engineering (SPCEB-Boston)*, Boston, MA: IEEE, lis. 2017, s. 1–6. doi: 10.1109/SPCEB.2017.8119348.
- [96] „Systemy zasilania linii kolejowych dużych prędkość... — Biblioteka Nauki”. <https://bibliotekanauki.pl/articles/252715> (dostęp 27 listopad 2022).
- [97] B. Subba Reddy i A. R. Verma, „Protection of Digital Telecom Exchanges Against Lightning Surges and Earth Faults”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, t. 51, nr 6, s. 5305–5311, lis. 2015, doi: 10.1109/TIA.2015.2430835.
- [98] C. Qinghua, Y. Lixia, i Y. Shu, „Ungrounded Lightning Surge Protection Device for Wireless Sensor Networks Node in the Wilderness”, w *2018 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC)*, Xuzhou: IEEE, lip. 2018, s. 1–3. doi: 10.1109/CSQRWC.2018.8455701.
- [99] H. Ito, K. Terashima, i S. Yun, „Two case studies on energy and protection level coordination of an SPD system”, w *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Shanghai, China: IEEE, paź. 2014, s. 1064–1069. doi: 10.1109/ICLP.2014.6973282.
- [100] C. A. McCreary i B. A. Lail, „Design of multiple stage avionics lightning protection for DC power input lines using a graphical user interface (GUI)”, w *2013 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Denver, CO, USA: IEEE, sie. 2013, s. 177–181. doi: 10.1109/ISEMC.2013.6670404.
- [101] „Overvoltage transient protection network design”, w *Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility*, New Delhi, India: IEEE, 1999, s. 439–442. doi: 10.1109/ICEMIC.1999.871678.
- [102] H. Satoh i Y. Shimoda, „Lightning surge protection semiconductor devices for subscriber telecommunication equipment”, w *Proceedings of International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Atlanta, GA, USA: IEEE, 1995, s. 242–247. doi: 10.1109/IEMC.1995.523555.

- [103] C. A. McCreary i B. A. Lail, „Hardening lightning protection for avionics on composite aircraft”, w *2013 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Denver, CO, USA: IEEE, sie. 2013, s. 171–176. doi: 10.1109/ISEMC.2013.6670403.
- [104] Hai Lin, C. Wang, i Wanglong Lei, „The design of overvoltage testing system for communication equipment in smart grid”, w *2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Xi’an, China: IEEE, paź. 2016, s. 1812–1816. doi: 10.1109/APPEEC.2016.7779802.
- [105] Qingheng Chen, Jinliang He, Wenjun Zhou, i Qi Su, „Overvoltage protection for computer serial communication”, w *PowerCon 2000. 2000 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No.00EX409)*, Perth, WA, Australia: IEEE, 2000, s. 959–964. doi: 10.1109/ICPST.2000.897150.
- [106] „An overview of British Telecom’s approach to the lightning protection of its network”. <https://ieeexplore-ieee-org-12vdogr110064.han.polsl.pl/document/181927/> (dostęp 26 marzec 2023).
- [107] M. K. Zadeh, H. Abniki, i A. A. S. Akmal, „The modeling of metal-oxide surge arrester applied to improve surge protection”, w *2009 2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System (PEITS)*, Shenzhen, China: IEEE, grudz. 2009, s. 238–243. doi: 10.1109/PEITS.2009.5407027.
- [108] J. Birkel i P. Zahlmann, „Surge protection for low voltage power supplies in case of direct lightning strikes - testing of complete systems”, w *2005 IEEE Russia Power Tech*, St. Petersburg, Russia: IEEE, cze. 2005, s. 1–7. doi: 10.1109/PTC.2005.4524816.
- [109] B. Wang, Z. Fu, i N. Yan, „Design of multi-component impulse current generator for practical lightning current simulation”, w *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Shanghai: IEEE, paź. 2014, s. 278–282. doi: 10.1109/ICLP.2014.6973136.
- [110] P. Guo, X. Wang, i Y. Han, „The enhanced genetic algorithms for the optimization design”, w *2010 3rd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics*, Yantai, China: IEEE, paź. 2010, s. 2990–2994. doi: 10.1109/BMEI.2010.5639829.
- [111] M. A. S. Barbosa i M. M. Gouvea, „Access Point Design with a Genetic Algorithm”, w *2012 Sixth International Conference on Genetic and Evolutionary Computing*, Kitakyushu, Japan: IEEE, sie. 2012, s. 119–123. doi: 10.1109/ICGEC.2012.39.
- [112] Y. Yang, M. Peng, H. Hong, i Y. Yuan, „Optimal Design of Grounding Grids Based on Genetic Algorithm”, w *2009 Third International Conference on Genetic and Evolutionary Computing*, Guilin, China: IEEE, paź. 2009, s. 129–132. doi: 10.1109/WGEC.2009.58.
- [113] G. Zhang, J. Lu, i Q. Xiang, „Application of Genetic Algorithm to Network Design Problem”, w *2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)*, Changsha, Hunan: IEEE, paź. 2008, s. 26–29. doi: 10.1109/ICICTA.2008.252.
- [114] D. Grzechca, T. Golonek, i J. Rutkowski, „Analog fault AC dictionary creation - the fuzzy set approach”, w *2006 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Island of Kos, Greece: IEEE, 2006, s. 4. doi: 10.1109/ISCAS.2006.1693940.
- [115] T. Golonek, D. Grzechca, i J. Rutkowski, „Optimization of PWL analog testing excitation by means of genetic algorithm”, w *2008 International Conference on*

-
- Signals and Electronic Systems*, Krakow, Poland: IEEE, 2008, s. 541–544. doi: 10.1109/ICSES.2008.4673492.
- [116] D. Grzechca, T. Golonek, i J. Rutkowski, „Simulated Annealing with Fuzzy Fitness Function for Test Frequencies Selection”, w *2007 IEEE International Fuzzy Systems Conference*, London, UK: IEEE, cze. 2007, s. 1–6. doi: 10.1109/FUZZY.2007.4295406.
- [117] D. Grzechca, „Simulated annealing with artificial neural network fitness function for ECG amplifier testing”, w *2011 20th European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD)*, Linkoping, Sweden: IEEE, sie. 2011, s. 49–52. doi: 10.1109/ECCTD.2011.6043396.
- [118] T. Badriyah, F. Setyorini, i N. Yuliawan, „The implementation of Genetic Algorithm and Routing Lee for PCB design optimization”, w *2016 International Conference on Informatics and Computing (ICIC)*, Mataram, Indonesia: IEEE, 2016, s. 148–153. doi: 10.1109/IAC.2016.7905706.
- [119] R. R. Gazizov, M. N. Kuharenko, i T. R. Gazizov, „Optimization of PCB bus loads with usage of genetic algorithms by criteria of peak voltage minimization”, w *2017 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, Omsk: IEEE, lis. 2017, s. 1–5. doi: 10.1109/Dynamics.2017.8239452.
- [120] F. S. Ismail i R. Yusof, „Thermal optimization formulation strategies for multi-constraints electronic devices placement on PCB”, w *TENCON 2009 - 2009 IEEE Region 10 Conference*, Singapore: IEEE, lis. 2009, s. 1–6. doi: 10.1109/TENCON.2009.5396251.
- [121] R. Nowicki, „On Combining Neuro-Fuzzy Architectures with the Rough Set Theory to Solve Classification Problems with Incomplete Data”, *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, t. 20, nr 9, s. 1239–1253, wrz. 2008, doi: 10.1109/TKDE.2008.64.
- [122] G. Lucca, „Per unit length parameters of a multiconductor line with earth return inside a tunnel”, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, t. 42, nr 1, s. 6–15, luty 2000, doi: 10.1109/15.831700.
- [123] R. Sleik, M. Glavanovics, S. Einspieler, A. Muetze, i K. Krischan, „Modular test system architecture for device, circuit and system level reliability testing”, w *2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Long Beach, CA, USA: IEEE, mar. 2016, s. 759–765. doi: 10.1109/APEC.2016.7467957.
- [124] D. Grzechca, D. Zieliński, i W. Filipowski, „What Is the Effect of Outer Jacket Degradation on the Communication Parameters? A Case Study of the Twisted Pair Cable Applied in the Railway Industry”, *Energies*, t. 14, nr 4, Art. nr 4, sty. 2021, Dostęp: 15 sierpień 2021. [Online]. Dostępne na: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/4/972>
- [125] „6500-b-series-user-manual-487.pdf”. Dostęp: 29 kwiecień 2023. [Online]. Dostępne na: <https://www.sefelec.fr/media/fr/produits/manuels/6500-b-series-user-manual-487.pdf>
- [126] „Robb - CAN Bit Timing Requirements.pdf”. Dostęp: 13 maj 2023. [Online]. Dostępne na: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN1798.pdf>
- [127] „Controller Area Network Physical Layer Requirements”, s. 15, 2008.
- [128] „Littelfuse_GDT_SG_Datasheet_pdf-319337.pdf”. https://pl.mouser.com/datasheet/2/240/Littelfuse_GDT_SG_Datasheet_pdf-319337.pdf (dostęp 16 wrzesień 2021).
- [129] „Littelfuse_TVS_Diode_SMDJ_Datasheet_pdf-475081.pdf”. https://pl.mouser.com/datasheet/2/240/Littelfuse_TVS_Diode_SMDJ_Datasheet_pdf-475081.pdf (dostęp 8 wrzesień 2021).

- [130] „Rcaife3.pdf”. <https://www.vishay.com/docs/20059/rcaife3.pdf> (dostęp 8 wrzesień 2021).
- [131] „HVCCZ5V4.7NF-3KV.pdf”. Dostęp: 25 maj 2023. [Online]. Dostępne na: https://jm.pl/gfx-base/s_1/orgs/18/HVCCZ5V4.7NF-3KV.pdf
- [132] „PCA82C250 CAN Controller Interface.”, 2011. <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCA82C250.pdf>
- [133] C. F. M. Carobbi i A. Bonci, „Elementary and ideal equivalent circuit model of the 1, 2/50-8/20 μ s combination wave generator”, *IEEE Electromagn. Compat. Mag.*, t. 2, nr 4, s. 51–57, 2013, Dostęp: 23 luty 2022. [Online]. Dostępne na: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6714698/>
- [134] M. O. Odetayo, „Optimal population size for genetic algorithms: an investigation”, w *IEEE Colloquium on Genetic Algorithms for Control Systems Engineering*, 1993, s. 2/1-2/4.

Spis rysunków

RYS. 1. UOGÓLNIONY PRZEBIEG BADAŃ NA KOMPATYBILNOŚĆ ELEKTROMAGNETYCZNĄ URZĄDZEŃ KOLEJOWYCH WEDŁUG NORMY PN EN 50121-4 [2] ORAZ WPŁYW NA POZOSTAŁE TESTY CERTYFIKACYJNE NA PODSTAWIE NORMY PN-EN 50129 [7].	9
RYS. 2. STRUKTURA SYSTEMÓW ZARZĄDZANIA RUCHEM KOLEJOWYM [20].	15
RYS. 3. UPROSZCZONA STRUKTURA PODŁĄCZENIA CZUJNIKÓW KOŁA DO JEDNOSTKI CENTRALNEJ.	15
RYS. 4. TOPOLOGIA POŁĄCZENIA URZĄDZEŃ PRZYTOROWYCH ORAZ URZĄDZEŃ WEWNĘTRZNYCH W SYSTEMIE DETEKCI NIEZAJĘTOŚCI.	21
RYS. 5. CZUJNIK KOŁA ELS-95 URZĄDZENIE PRZYTOROWE (A) GŁOWICE DETEKCYJNE (B) ELEKTRONIKA PRZYTOROWA (FOT. ALSTOM ZWUS)	22
RYS. 6. CZUJNIK KOŁA ELS-96 (URZĄDZENIE PRZYTOROWE), GŁOWICA ZINTEGROWANA: DETEKcja ORAZ ELEKTRONIKA W JEDNEJ OBUDOWIE. (FOT. ALSTOM ZWUS)	23
RYS. 7. PRZEBIEG NAPIĘCIA UDAROWEGO 1,2/50 μ S.	27
RYS. 8. SCHEMATYCZNA BUDOWA PRZEWODU POWSZECHNIE WYKORZYSTYWANEGO W SYSTEMACH ZARZĄDZANIA RUCHEM KOLEJOWYM.	32
RYS. 9. WIDOK OGÓLNY PRZEWODU TYP 1 RE-2Y(ST)Y 2 x 2 x 0,75MM ² . FOTOGRAFIA WŁASNA.	33
RYS. 10. WIDOK OGÓLNY PRZEWODU TYP 2 RE-2Y(ST)Y 2 x 2 x 1,3MM ² . FOTOGRAFIA WŁASNA.	33
RYS. 11. WIDOK OGÓLNY PRZEWODU TYP 3 CY 2 x 2 x 1,0MM ² . FOTOGRAFIA WŁASNA.	34
RYS. 12. MODEL ELEMENTARNEGO ODCINKA 4 ŻYŁOWEGO PRZEWODU (2X 2 ŻYŁY SKRĘCONE).	36
RYS. 13. SCHEMAT OGÓLNY WPŁYWU CZYNNIKÓW ŚRODOWISKOWYCH NA DZIAŁANIE URZĄDZEŃ PRZYTOROWYCH.	37
RYS. 14. SCHEMAT EKSPERYMENTU SYMULUJĄCEGO USZKODZENIE ZEWNĘTRZNEGO IZOLATORA.	38
RYS. 15. FOTOGRAFIA STANOWISKA POMIAROWEGO DO BADANIA PARAMETRÓW PRZEWODÓW KOMUNIKACYJNYCH PODCZAS BADAŃ WSTĘPNYCH. DO POŁĄCZENIA OBIEKTÓW BADANYCH DO PRZYRZĄDU POMIAROWEGO WYKORZYSTANO ADAPTER 1EVA40100 [114]. FOTOGRAFIA WŁASNA.	38
RYS. 16. ZESTAWIENIE GRAFICZNE WYNIKÓW POMIARÓW DLA 3 RODZAJÓW KABLI STOSOWANYCH W PRZEMYSŁE KOLEJOWYM.	41
RYS. 17. WYKRESY FUNKCJI f_{3t} APROKSZYMUJĄCEJ DEGRADACJĘ PRZEWODÓW ORAZ WYNIKI POMIARÓW.	47
RYS. 18. ZOBRAZOWANIE WARTOŚCI R^2 DLA POSZCZEGÓLNYCH FUNKCJI APROKSZYMUJĄCYCH.	49
RYS. 19. PRZYKŁAD REJESTRACJI ZABURZEŃ NA DZIAŁAJĄCEJ MAGISTRALI CAN W TERENIE.	52
RYS. 20. SCHEMAT TESTU BADAJĄCEGO WPŁYW DEGRADACJI NA ZMIANY PARAMETRÓW PRZEWODU KOMUNIKACYJNEGO STOSOWANEGO W SYSTEMACH STEROWANIA RUCHEM KOLEJOWYM.	53
RYS. 21. IMPEDANCJA WEJŚCIOWA PRZEWODU CT1 (A), PRZEWODU CT2 (B) I PRZEWODU CT3 (C) (OKRES DEGRADACJI: ZIELONY-0 T, NIEBIESKI-5 T, I CZERWONY-50 T).	57
RYS. 22. TOPOLOGIA OCHRONNIKA PRZECIWPZRZEPIĘCIOWEGO CYFROWEGO INTERFEJSU KOMUNIKACYJNEGO CAN URZĄDZENIA PRZYTOROWEGO.	62
RYS. 23. URZĄDZENIE PRZYTOROWE TYPU CZUJNIK KOŁA. LOKALIZACJA POSZCZEGÓLNYCH GRUP KOMPONENTÓW OCHRONY PRZECIWPZRZEPIĘCIOWEJ CYFROWEGO INTERFEJSU KOMUNIKACYJNEGO CAN.	63
RYS. 24. ISKROWNIK SG75.	65
RYS. 25. DOBÓR MAKSYMALNEJ MOCY DLA OMAWIANYCH TRANSILI W KORELACJI Z CZASEM NARAŻENIA.	66
RYS. 26. CHARAKTERYSTYKI DOPUSZCZALNYCH MOCY CHWILOWYCH REZYSTORÓW W FUNKCJI CZASU NARAŻENIA [130].	67
RYS. 27. CHARAKTERYSTYKI DOPUSZCZALNYCH MOCY ŚREDNICH REZYSTORÓW W FUNKCJI CZASU NARAŻENIA [130].	68

RYS. 28. NARZĘDZIA ORAZ UPROSZCZONY PRZEBIEG PROCEDURY GACSOP.	70
RYS. 29. PRZYKŁAD TRANSLACJI CHROMOSOMU DO POSTACI GRAFICZNEJ PLIKU ASC OPISUJĄCEGO ELEMENTY OCHRONNIKA.	72
RYS. 30. ŚRODOWISKO TESTOWE WRAZ Z BADANYM OBWODEM.	74
RYS. 31. ZAIMPLEMENTOWANY W LTSPICE GENERATOR NAPIĘĆ UDAROWYCH [133].	75
RYS. 32. FUNKCJA ZBIĘŻNOŚCI ALGORYTMU GENETYCZNEGO (A) HISTOGRAM WARTOŚCI ŚREDNIEJ ORAZ MINIMALNE FUNKCJI CELU, (B) HISTOGRAM ŚREDNIEJ RÓŻNY BITÓW W WEKTORZE WEJŚCIOWYM.	86
RYS. 33. HISTOGRAM WARTOŚCI NAJGORSZYCH, ŚREDNICH ORAZ NAJLEPSZYCH FUNKCJI CELU.	87
RYS. 34. NAPIĘCIE TESTOWE (WEJŚCIOWE) (A) PRZEBIEG NAPIĘCIA ORAZ MOC WYDZIELANA NA GRUPIE REZYSTORÓW GR9 (B). NARAŻENIE $U_{WE1} = 6KV$.	89
RYS. 35. PRZEBIEG NAPIĘCIA WEJŚCIOWEGO (A) ORAZ NAPIĘCIA $U_{D4}(T)$ NA DIODZIE D4 (B).	90
RYS. 36. PRZEBIEG NAPIĘCIA $U_{D1}(T)$ NA DIODZIE D1.	90
RYS. 37. FUNKCJA MOCY ŚREDNIEJ (A) ORAZ MOCY CHWILOWEJ (B) DLA GR9 W ZALEŻNOŚCI OD AMPLITUDY NAPIĘCIA TESTOWEGO.	96
RYS. 38. FUNKCJA MOCY ŚREDNIEJ (A) ORAZ MOCY CHWILOWEJ (B) DLA D4 W ZALEŻNOŚCI OD AMPLITUDY NAPIĘCIA TESTOWEGO.	96
RYS. 39. FUNKCJA MOCY ŚREDNIEJ (A) ORAZ MOCY CHWILOWEJ (B) DLA GDT W ZALEŻNOŚCI OD AMPLITUDY NAPIĘCIA TESTOWEGO.	97
RYS. 40. FUNKCJA STOSUNKU PRĄDU PŁYNĄCEGO PRZEZ GDT DO PRĄDU MAKSYMALNEGO	98
RYS. 41. PRZEBIEG NAPIĘCIA NA WEJŚCIU OCHRONNIKA ($U_{GDT}(T)$ - RYS. 22) NAPIĘCIE $U_{WE1} = 6KV$, PRZEWÓD ZDEGRADOWANY (NOMINALNYCH – ZIELONY, ZDEGRADOWANY – NIEBIESKI).	105
RYS. 42. SLAJD Z PREZENTACJI PRZYGOTOWANEJ NA POTRZEBY IK PREZENTUJĄCY BENEFITY WDROŻENIA ALGORYTMU GENETYCZNEGO DO DOBORU SPECYFIKACJI OCHRONNIKA PRZECIWPRIEPĘCIOWEGO.	108
RYS. 43. WYKRESY POZOSTAŁYCH FUNKCJI APROKSYMUJĄCYCH DEGRADACJĘ PRZEWODÓW ORAZ WYNIKI POMIARÓW.	118
RYS. 44. CHARAKTERYSTYKA CZĘSTOTLIWOŚCIOWA (A) I OPÓŹNIENIA GRUPOWE (B) DLA PRZEWODU CT1 (ZIELONY: 0T, NIEBIESKI: 5T I CZERWONY: 50T).	119
RYS. 45. CHARAKTERYSTYKA CZĘSTOTLIWOŚCIOWA (A) I OPÓŹNIENIE GRUPOWE (B) DLA PRZEWODU CT2 (ZIELONY: 0T, NIEBIESKI: 5T I CZERWONY: 50T).	119
RYS. 46. CHARAKTERYSTYKA CZĘSTOTLIWOŚCIOWA (A) I OPÓŹNIENIE GRUPOWE (B) DLA PRZEWODU CT3 (ZIELONY: 0T, NIEBIESKI: 5T I CZERWONY: 50T).	120

Spis tabel

TAB. 1. ZESTAWIENIE WYMAGAŃ NA NAPIĘCIA UDAROWE DLA URZĄDZEŃ PRZYTOROWYCH NA PODSTAWIE NORMY PN-EN 50121-4 [2].	26
TAB. 2. PODSTAWOWE PARAMETRY ELEKTRYCZNE PRZEWODÓW.	34
TAB. 3. ZESTAWIENIE DOKŁADNOŚCI POMIAROWYCH MIERNIKA WAYNE KERR 6500 [125].	39
TAB. 4. WYNIKI POMIARÓW CT1 (N = 0 OZNACZA NOMINALNE PARAMETRY KABLA).	40
TAB. 5. WYNIKI POMIARÓW CT2 (N = 0 OZNACZA NOMINALNE PARAMETRY KABLA).	42
TAB. 6. WYNIKI POMIARÓW CT3 (N = 0 OZNACZA NOMINALNE PARAMETRY KABLA).	43
TAB. 7. ZESTAWIENIE WSPÓŁCZYNNIKÓW FUNKCJI APROKSZYMUJĄCYCH DLA PARAMETRÓW PRZEWODU CT1.	45
TAB. 8. ZESTAWIENIE WSPÓŁCZYNNIKÓW FUNKCJI APROKSZYMUJĄCYCH DLA PARAMETRÓW PRZEWODU CT2.	45
TAB. 9. ZESTAWIENIE WSPÓŁCZYNNIKÓW FUNKCJI APROKSZYMUJĄCYCH DLA PARAMETRÓW PRZEWODU CT3.	46
TAB. 10. WARTOŚCI R^2 APROKSZYMACJI FUNKCJI DLA CT1, CT2 I CT3.	48
TAB. 11. WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKÓW f_3t DLA POSZCZEGÓLNYCH TYPÓW PRZEWODÓW.	50
TAB. 12. WPŁYW DEGRADACJI ZEWNĘTRZNEGO IZOLATORA NA PARAMETRY CZĘSTOTLIWOŚCIOWE PRZEWODÓW (DŁUGOŚĆ $L = 2,5\text{KM}$, CO ODPOWIADA 250 JEDNOSTKOWYM ODCINKOM 10M).	54
TAB. 13. WPŁYW DEGRADACJI ZEWNĘTRZNEGO IZOLATORA NA PARAMETRY IMPEDANCYJNE PRZEWODÓW (DŁUGOŚĆ $L = 2,5\text{KM}$, CO ODPOWIADA 250 JEDNOSTKOWYM ODCINKOM 10M).	58
TAB. 14. ZESTAWIENIE LICZEBNOŚCI PREDEFINIOWANEGO ZBIORU KOMPONENTÓW OCHRONNIKA PRZECIWPZRZEPIĘCIOWEGO.	69
TAB. 15. STRUKTURA BINARNEGO WEKTORA WEJŚCIOWEGO.	71
TAB. 16. ZESTAWIENIE PARAMETRÓW SYMULACYJNYCH (Mki) ORAZ WARTOŚCI GRANICZNYCH (Mki) KOMPONENTÓW WYKORZYSTANYCH W OCHRONNIKÓW PRZECIWPZRZEPIĘCIOWYM.	73
TAB. 17. ZESTAWIENIE PARAMETRÓW KRYTYCZNYCH DLA WYKORZYSTANYCH KOMPONENTÓW.	77
TAB. 18. KRYTERIA STOPU ZASTOSOWANE DLA ALGORYTMU GENETYCZNEGO.	82
TAB. 19. PORÓWNANIE WYNIKÓW DLA WYBRANYCH PARAMETRÓW KONFIGURACYJNYCH ALGORYTMU GENETYCZNEGO.	83
TAB. 20. WYNIKOWA SPECYFIKACJA OCHRONNIKA (NARAŻENIE $UWE1 = 6\text{kV}$).	88
TAB. 21. WYNIKOWA SPECYFIKACJA OCHRONNIKA (NARAŻENIE $UWE2 = 650\text{V}$).	91
TAB. 22. ZESTAWIENIE ZMIAN PARAMETRÓW KOMPONENTÓW DLA NAPIĘĆ WEJŚCIOWEGO $UWE3 = 4\text{kV}$ W ODNIESIENIU DO $UWE1 = 6\text{kV}$ (METODA GACSOP).	93
TAB. 23. ZESTAWIENIE ZMIAN PARAMETRÓW KOMPONENTÓW DLA NAPIĘĆ WEJŚCIOWEGO $UWE4 = 2\text{kV}$ W ODNIESIENIU DO $UWE1 = 6\text{kV}$ (METODA GACSOP).	94
TAB. 24. ZESTAWIENIE ZMIAN WYBRANYCH PARAMETRÓW KOMPONENTÓW DLA NAPIĘĆ WEJŚCIOWEGO $UWE5 = 1\text{kV}$ W ODNIESIENIU DO $UWE1 = 6\text{kV}$ (METODA GACSOP).	95
TAB. 25. ZMODYFIKOWANA SPECYFIKACJA KOMPONENTÓW OCHRONNIKA PRZECIWPZRZEPIĘCIOWEGO DLA NARAŻENIA $UWE6 = 10\text{kV}$.	99
TAB. 26. PORÓWNANIE PARAMETRÓW KABLA CT1 NOMINALNEGO ORAZ ZDEGRADOWANEGO.	102
TAB. 27. PORÓWNANIE PARAMETRÓW PRACY OTRZYMANEJ KONFIGURACJI OCHRONNIKA W PRZYPADKU PRZEWODU ZDEGRADOWANEGO I NIEZDEGRADOWANEGO DLA NARAŻENIA $UWE1 = 6\text{kV}$.	103
TAB. 28. PARAMETRY PRACY OTRZYMANEJ KONFIGURACJI OCHRONNIKA METODĄ GACSOP ($UWE1 = 6\text{kV}$) DLA NARAŻENIA $UWE3 = 4\text{kV}$.	121
TAB. 29. PARAMETRY PRACY OTRZYMANEJ KONFIGURACJI OCHRONNIKA METODĄ GACSOP ($UWE1 = 6\text{kV}$) DLA NARAŻENIA $UWE4 = 2\text{kV}$.	122

TAB. 30. PARAMETRY PRACY OTRZYMANEJ KONFIGURACJI OCHRONNIKA METODĄ GACSOP ($U_{WE1} = 6kV$)
DLA NARAŻENIA $U_{WE5} = 1kV$. 123