

**Politechnika Śląska**

**Wydział Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki  
Przemysłowej**

Dyscyplina: Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka

mgr inż. Krzysztof Kuliński

**WPŁYW CHARAKTERU DOZIEMIENIA ORAZ KONFIGURACJI  
KOPALNIANEJ SIECI ROZDZIELCZEJ NA SELEKTYWNOŚĆ  
DZIAŁANIA ZABEZPIECZEŃ ZIEMNOZWARCIOWYCH**

Rozprawa doktorska

przygotowana pod kierunkiem:

dr. hab. inż. Adama Heyduka, prof. PŚ

Gliwice, 2024



## Spis treści

<b>Spis treści</b> .....	<b>3</b>
<b>Podziękowania</b> .....	<b>5</b>
<b>Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń</b> .....	<b>6</b>
<b>1. Wprowadzenie do tematu</b> .....	<b>7</b>
1.1. Charakterystyka kopalń węgla kamiennego w Polsce .....	7
1.2. Wykorzystanie energii elektrycznej w kopalniach .....	7
1.3. Bezpieczeństwo pracy w kopalniach węgla kamiennego .....	10
1.4. Wypadkowość w polskim górnictwie .....	12
1.5. Uzasadnienie wyboru tematu rozprawy doktorskiej .....	16
1.6. Podsumowanie .....	17
<b>2. Cele i teza rozprawy doktorskiej</b> .....	<b>19</b>
2.1. Wstęp .....	19
2.2. Specyfikacja kopalnianej sieci rozdzielczej SN .....	19
2.3. Problemy wynikające z występowania zakłóceń ziemnozwarciowych .....	19
2.4. Teza pracy .....	20
2.5. Cele naukowe i użytkowe rozprawy doktorskiej .....	21
2.6. Podsumowanie rozdziału .....	22
<b>3. Specyfika kopalnianej sieci rozdzielczej średniego napięcia</b> .....	<b>23</b>
3.1. Sposoby pracy punktu neutralnego sieci SN .....	23
3.2. Model matematyczny linii kablowej .....	26
3.3. Metody wyznaczania składowej zerowej napięcia oraz prądu .....	31
3.4. Opis zabezpieczeń stosowanych w kopalnianych polach rozdzielczych SN .....	33
3.5. Kryterium $I_{0>}$ .....	38
3.6. Problemy wynikające ze stosowanych zabezpieczeń cyfrowych .....	39
3.7. Analiza poprawności działania przekładników Ferrantiego .....	40
<b>4. Metodyka prowadzonych badań</b> .....	<b>50</b>
4.1. Wybór programu symulacyjnego .....	50
4.2. Dobór modelu linii kablowej .....	52
4.3. Stosowane modele zwarcia doziemnego .....	56
4.4. Wybór przypadków do dalszej analizy .....	58
<b>5. Analiza przypadków zwarcí doziemnych w dwóch kopalniach - badanie wpływu charakteru doziemienia oraz konfiguracji sieci rozdzielczej</b> .....	<b>61</b>
5.1. Zakres prowadzonej analizy .....	61
5.2. KWK Zofiówka – przypadek nr 1: Zwarcie wysokorezystancyjne na 495 metrze linii kablowej w polu nr 22 rozdzielnicy RGD-2 .....	61
5.3. KWK Zofiówka – przypadek nr 2: Zwarcie metaliczne na 495 metrze linii kablowej w polu nr 22 rozdzielnicy RGD-2 .....	71
5.4. KWK Zofiówka – przypadek nr 3: Zwarcie wysokorezystancyjne na 200 metrze linii kablowej w polu nr 16 rozdzielnicy H-900 .....	76
5.5. KWK Marcel – przypadek nr 4: Zwarcie wysokoimpedancyjne na 725 metrze linii kablowej w polu nr 16 rozdzielnicy R-604 .....	80
5.6. KWK Marcel – przypadek nr 5: Zwarcie metaliczne na 725 metrze linii kablowej w polu nr 16 rozdzielnicy R-604 .....	84

5.7.	KWK Marcel – przypadek nr 6: Zwarcie wysokorezystancyjne na 303 metrze linii kablowej w polu nr 1 rozdzielnic R-605 .....	88
5.8.	Analiza kryterium $Y_{0>}$ na podstawie danych kopalnianych .....	91
5.9.	Podsumowanie rozdziału.....	97
<b>6.</b>	<b>Analiza selektywności poprzecznej kryterium admitancyjnego <math>Y_{0&gt;}</math> na podstawie modelowej sieci .....</b>	<b>99</b>
6.1.	Opis wybranej sieci.....	99
6.2.	Wartości skuteczne napięcia $U_0$ oraz prądów $I_0$ wybranych pól w sieci bez wyższych harmonicznyc .....	100
6.3.	Analiza widmowa stanu nieustalonego w sieci bez udziału wyższych harmonicznyc.....	105
6.4.	Pomiar admitancji wybranych odpływów w sieci bez udziału wyższych harmonicznyc ....	107
6.5.	Wartość skuteczna napięcia $U_0$ oraz prądów $I_0$ wybranych pól w sieci z pojawiającymi się wyższymi harmonicznymi.....	110
6.6.	Pomiar admitancji wybranych linii w sieci z udziałem wyższych harmonicznyc.....	113
6.7.	Wpływ wyższych harmonicznyc na wartość mocy czynnej wydzielanej w miejscu zwarcia .....	115
6.8.	Częstotliwość przebiegów przejściowych prądu doziemnego przy zwarciach doziemnych w sieci z izolowanym punktem gwiazdowym transformatora.....	117
6.9.	Podsumowanie rozdziału.....	126
<b>7.</b>	<b>Podsumowanie i wnioski .....</b>	<b>128</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>130</b>
	<b>Spis rysunków .....</b>	<b>139</b>
	<b>Spis tabel.....</b>	<b>146</b>
	<b>Załącznik nr 1 – Pozostałe dane zebrane w tabelach.....</b>	<b>147</b>
	<b>Załącznik nr 2 – Inne przebiegi nieuwzględnione w części właściwej pracy.....</b>	<b>158</b>
	<b>Streszczenie.....</b>	<b>183</b>
	<b>Abstract.....</b>	<b>185</b>

## **Podziękowania**

Pragnę wyrazić moje najszczerze podziękowania dla najważniejszej osoby w moim życiu, mojej kochanej żony, Aleksandry Kulińskiej.

To dzięki Tobie ta rozprawa doktorska stała się możliwa. Przez wszystkie te lata, gdy byłem zanurzony w procesie badawczym, to Ty byłaś moją ostoją spokoju i moim wsparciem. To Twoja cierpliwość i niezachwiane wsparcie dawały mi siłę, aby kontynuować prace, nawet w najtrudniejszych chwilach. Twoja miłość, wyrozumiałość i niezmienna wiara we mnie były nieocenione. Nie da się w pełni wyrazić słowami, jak bardzo doceniam Twoje ciche poświęcenie, które pozwoliło mi zająć się tym ambitnym projektem. Bez Ciebie ta praca byłaby o wiele trudniejsza do napisania. Dziękuję Ci, Kochana, za wszystko.

## Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń

- $I_{CLi}$  – prąd pojemnościowy linii za miejscem zainstalowania zabezpieczenia,
- $I_{kz}$  – wartość skuteczna prądu ziemnozwarciowego zmierzona z wykorzystaniem przekładników prądowych,
- $I_0$  – wartość skuteczna składowej zerowej prądu mierzona w badanym odplywie,
- $I_{0nast}$  – wartość nastawy zabezpieczenia ziemnozwarciowego zerowoprądowego,
- $k_b$  – współczynnik bezpieczeństwa,
- $R_{ZW}$  – rezystancja mierzona w miejscu zwarcia doziemnego w sieci z izolowanym punktem neutralnym,
- $T$  – okres (20 ms),
- $U_0$  – wartość skuteczna składowej zerowej napięć fazowych w sieci z izolowanym punktem neutralnym,
- $U_{0max}$  – maksymalna możliwa wartość skuteczna składowej zerowej napięcia w sieci z izolowanym punktem neutralnym, napięcie osiąga tą wartość dla rezystancji zwarcia równej 0, jest ono równe napięciu fazowemu w sieci,
- $U_{0nast}$  – wartość nastawy zabezpieczenia ziemnozwarciowego zerowonapięciowego,
- $U_F$  – wartość skuteczna napięcia fazowego,
- $Y_0$  – admitancja składowej zerowej, mierzona jako iloraz wartości skutecznej składowej zerowej prądu ziemnozwarciowego zmierzonej z wykorzystaniem przekładników prądowych oraz wartości skutecznej składowej zerowej napięcia,
- $Y_{0nast}$  – wartość nastawy zabezpieczenia admitancyjnego,
- $\Delta Y_{0\mu}$  – błąd wynikający z czułości zabezpieczeń admitancyjnych,
- $\Delta I_{0\mu}$  – błąd wynikający z czułości zabezpieczeń zerowoprądowych,
- $\beta$  – iloraz wartości skutecznej składowej zerowej napięcia do wartości skutecznej napięcia fazowego galwanicznie połączonej sieci. Wartość tego ilorazu mieści się w zakresie od 1 (dla zwarcia niskorezystancyjnego) do 0 (dla braku zwarcia w sieci).

## **1. Wprowadzenie do tematu**

### **1.1. Charakterystyka kopalń węgla kamiennego w Polsce**

Kopalnie węgla kamiennego stanowią istotny element gospodarki Polski, szczególnie jej systemu energetycznego. Według danych WUG z 2020 roku, w Polsce działało 26 kopalń węgla kamiennego, z czego 22 kopalnie to kopalnie państwowe, a 4 kopalnie to prywatne przedsiębiorstwa. W sumie zatrudnienie w sektorze górnictwa w Polsce wynosiło około 80 tys. osób [1].

Charakterystyczne dla kopalń węgla kamiennego są trudne warunki pracy oraz wysokie wymagania w zakresie bezpieczeństwa i ochrony środowiska. Praca w kopalniach wymaga od pracowników specjalistycznej wiedzy i umiejętności oraz stosowania złożonych procedur i zasad bezpieczeństwa.

Polskie kopalnie węgla kamiennego charakteryzują się również wysokim zużyciem energii elektrycznej. W 2020 roku łączny pobór energii elektrycznej przez kopalnie wyniósł około 6,8 TWh, co stanowiło około 2% całkowitego poboru energii elektrycznej w Polsce [1 – 3].

Wymienione wyżej cechy kopalń węgla kamiennego oraz panujące tam warunki środowiskowe (wilgotność, zagrożenie wybuchowe metanu i pyłu węglowego) powodują, że działalność ta jest szczególnie narażona na ryzyko wypadków oraz awarii. Dlatego też istotne znaczenie ma ciągłe doskonalenie procesów technologicznych oraz zabezpieczeń, które chronią pracowników i środowisko przed niebezpieczeństwami wynikającymi z działalności kopalń.

### **1.2. Wykorzystanie energii elektrycznej w kopalniach**

Energia elektryczna jest niezbędna do prowadzenia wszelkich operacji technologicznych w kopalniach, takich jak wiercenie, ładowanie, transport, wentylacja, oświetlenie czy odwadnianie. W związku z tym, zużycie energii elektrycznej w kopalniach jest znaczące. W kopalniach podziemnych, które są przedmiotem tej rozprawy, energia jest wykorzystywana głównie do napędu maszyn i urządzeń, a także

do zasilania systemów zabezpieczeń i monitoringu. W ostatnich latach, ze względu na rosnącą świadomość ekologiczną oraz narzucaną odgórnie konieczność ograniczenia emisji CO<sub>2</sub>, coraz większy nacisk kładziony jest na efektywne wykorzystanie energii w kopalniach [4 – 7].

Charakterystyka mocy odbiorników elektrycznych w kopalniach jest złożona i zmienna, co wynika z różnorodności procesów technologicznych oraz zmieniających się, często cyklicznie, warunków pracy. Obciążenie może być podzielone na stałe, związane z podstawowymi systemami utrzymania ruchu kopalni, takimi jak wentylacja, oświetlenie czy systemy sterowania, oraz zmienne, które jest związane z maszynami i urządzeniami wykorzystywanymi w trakcie realizacji poszczególnych procesów. Obciążenie zmienne może być dalej podzielone na cykliczne, wynikające z harmonogramu pracy, oraz losowe, związane z nieprzewidywalnymi zdarzeniami takimi jak awarie sprzętu czy konieczność przeprowadzenia nieplanowanych działań, np. wymuszonych przez warunki górniczo-geologiczne.

Istnieje wiele czynników wpływających na efektywność energetyczną kopalni. Czynniki te można podzielić na techniczne, organizacyjne i środowiskowe [6, 7]. Do czynników technicznych należą:

- wydajność maszyn i urządzeń,
- technologie oszczędzające energię,
- optymalizacja systemów energetycznych,
- automatyzacja i sterowanie procesami.

Czynniki organizacyjne obejmują:

- planowanie i harmonogramowanie procesów,
- zarządzanie i kontrola zużycia energii,
- szkolenia pracowników i podnoszenie świadomości.

Natomiast czynniki środowiskowe to:

- środowiskowe warunki pracy w wyrobiskach podziemnych, takie jak temperatura, wilgotność i ciśnienie,
- rozległość przestrzenna i głębokość kopalni,



- zakłócenia związane z kopalnianą siecią rozdzielczą.

Intensywny pobór energii elektrycznej w kopalniach może mieć bezpośredni wpływ na częstość działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych, głównie z uwagi na zwiększone ryzyko przeciążenia sieci elektrycznej. Wzrost obciążeń elektrycznych może prowadzić do przekroczenia zdolności przewodów i urządzeń do przewodzenia prądu, co z kolei może skutkować nadmiernym nagrzewaniem się i występowaniem zjawisk fizykochemicznych prowadzących do przyspieszenia starzenia izolacji i wreszcie do wystąpienia uszkodzeń tych elementów. W takich warunkach, jeśli zabezpieczenia ziemnozwarciowe nie są odpowiednio dobrane i nie działają selektywnie, mogą wystąpić sytuacje, w których narastające prądy zwarcia nie zostaną skutecznie odizolowane, co zwiększa ryzyko wystąpienia zwarć doziemnych. niezawodność i selektywność zabezpieczeń ziemnozwarciowych jest więc kluczowym elementem utrzymania bezpieczeństwa i ciągłości pracy w kopalniach, ponieważ zapewnia ona skuteczną reakcję najczęściej występujące zakłócenia w sieci elektrycznej. W przypadku awarii lub wystąpienia zwarć, właściwie dostosowane i zabezpieczone obwody są w stanie szybko wykryć i odłączyć zagrożone odcinki sieci, minimalizując ryzyko rozwoju dalszych uszkodzeń, prowadzących do rozwoju sytuacji potencjalnie niebezpiecznych pod względem środowiskowym. Dlatego też, dbałość o właściwą selektywność zabezpieczeń ziemnozwarciowych jest nieodzowna dla zachowania ciągłości i bezpieczeństwa pracy w kopalniach. [7, 8].

Optimalizacja poboru energii oraz poprawa efektywności energetycznej mogą przyczynić się do zwiększenia selektywności działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Poprzez zastosowanie nowoczesnych technologii, takich jak automatyzacja, sterowanie procesami, czy technologie oszczędzające energię, można zmniejszyć obciążenie kopalnianej sieci rozdzielczej, a tym samym zwiększyć jej odporność na zakłócenia ziemnozwarciowe [8]. Minimalizację zakłóceń można także uzyskać poprzez stosowanie coraz lepszych materiałów izolacyjnych, doskonalenie konstrukcji kabli elektroenergetycznych oraz stosowanie ochrony przepięciowej minimalizującej narażenia izolacji.

### 1.3. Bezpieczeństwo pracy w kopalniach węgla kamiennego

Bezpieczeństwo pracy w kopalniach węgla kamiennego jest kluczowym aspektem zarówno dla pracowników, jak i dla efektywności eksploatacji złoża. Kopalnie węgla kamiennego są z natury środowiskiem niebezpiecznym, z uwagi na wiele czynników, takich jak wysoka metanowość, zagrożenie wybuchem pyłu węglowego, wysoka wilgotność, wysoka temperatura oraz trudne warunki pracy na dużych głębokościach. W związku z tym, zapewnienie bezpieczeństwa w kopalniach wymaga stosowania złożonych systemów zabezpieczeń oraz rygorystycznego przestrzegania norm i procedur bezpieczeństwa [9 – 13]. Podstawowe zasady bezpieczeństwa w kopalniach obejmują m.in.:

- ciągłe monitorowanie i kontrolowanie stężenia metanu oraz pyłu węglowego, aby uniknąć zagrożenia wybuchowego,
- utrzymywanie odpowiednio wydajnego i niezawodnego systemu wentylacji w celu zapewnienia ciągłego dopływu świeżego powietrza dla pracowników oraz usuwania szkodliwych substancji z atmosfery kopalnianej,
- regularne prowadzenie prac związanych z utrzymaniem infrastruktury kopalni, takich jak obudowa wyrobisk czy kontrola stanu technicznego maszyn i urządzeń,
- okresowe szkolenie pracowników z zakresu bezpieczeństwa i higieny pracy oraz prawidłowego korzystania z wyposażenia ochronnego i ratunkowego,
- wprowadzanie systemów alarmowych, sygnalizacyjnych i komunikacyjnych, umożliwiających szybką reakcję w sytuacjach awaryjnych,
- utrzymywanie niezawodnych systemów zasilania i zabezpieczeń elektroenergetycznych, mających na celu minimalizowanie ryzyka rozwoju awarii i niebezpiecznych sytuacji związanych z pracą przy urządzeniach elektrycznych.

Jednym z istotnych elementów całego systemu bezpieczeństwa w kopalniach jest właściwe funkcjonowanie systemów zasilania oraz zabezpieczeń zwarciovych, w tym ziemnozwarciowych. W związku z istniejącymi zagrożeniami rażeniowymi, pożarowymi

oraz wybuchowymi, polskie przepisy i normy są niezwykle rygorystyczne w zakresie niezawodności i szybkości działania zabezpieczeń (tabela 1.1). W tabeli poniżej przedstawiono wybrane normy związane bezpieczeństwem w polskim górnictwie. Z uwagi na fakt, że Polskich Norm i norm branżowych związanych z niniejszą tematyką jest kilkaset skupiono się na związanych pośrednio lub bezpośrednio z tematyką niniejszej rozprawy.

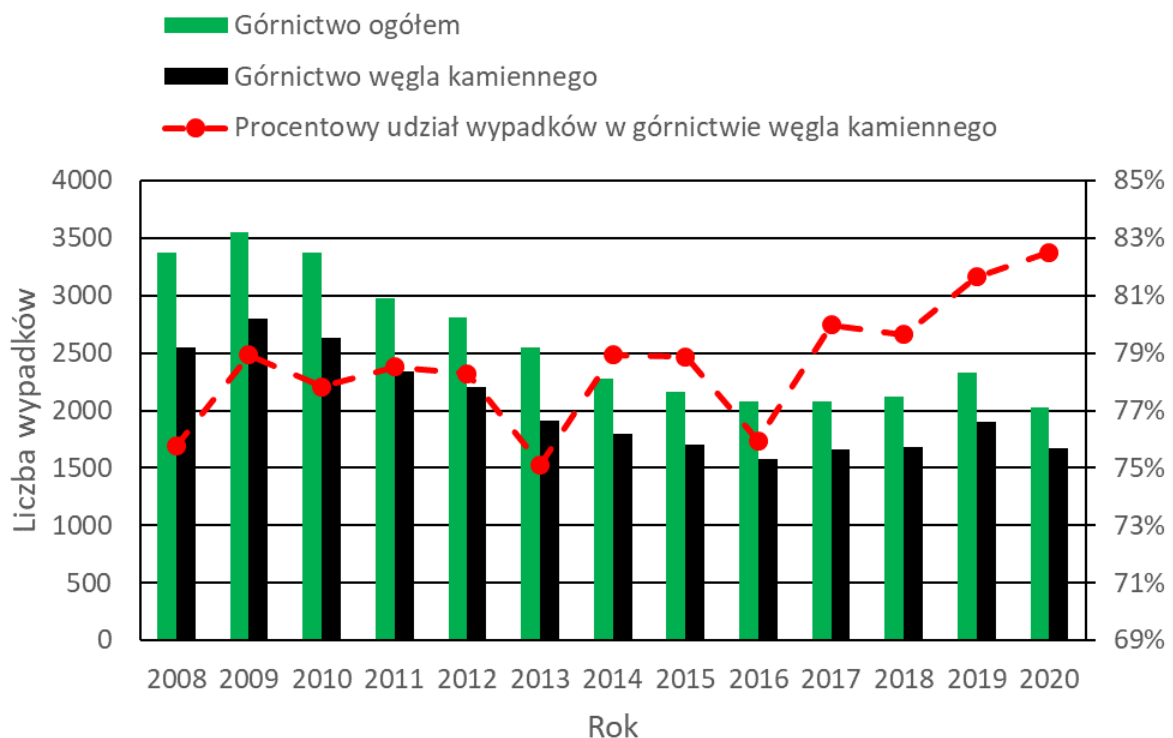
W tym kontekście, odpowiednie działanie zabezpieczeń ziemnozwarciowych jest kluczowe dla zapewnienia niezawodnego dostępu do energii elektrycznej oraz utrzymania ciągłości ruchu zakładu górniczego i bezpieczeństwa załogi. Właściwy dobór i koordynacja nastaw zabezpieczeń ziemnozwarciowych wpływa również na minimalizację niepożądanych wyłączeń fragmentów sieci, co ma istotne znaczenie z ekonomicznego punktu widzenia.

*Tabela 1.1. Wykaz wybranych Polskich Norm związanych z bezpieczeństwem elektrycznym i stosowanych w polskim górnictwie węgla kamiennego.*

<b>Nr normy</b>	<b>Tytuł</b>
<b>PN-G-42000:1996</b>	Górnictwo. Elektroenergetyka kopalniana. Napięcia znamionowe.
<b>PN-G-42040:1996</b>	Środki ochronne i zabezpieczające w elektroenergetyce kopalnianej. Zabezpieczenia upływowe. Wymagania i badania.
<b>PN-G-42041:1997</b>	Środki ochronne i zabezpieczające w elektroenergetyce kopalnianej. System uziemiających przewodów ochronnych. Wymagania.
<b>PN-G-42042:1998</b>	Środki ochronne i zabezpieczające w elektroenergetyce kopalnianej. Zabezpieczenia zwarciove i przeciążeniowe. Wymagania i zasady doboru.
<b>PN-G-42044:2000</b>	Środki ochronne i zabezpieczające w elektroenergetyce kopalnianej. Zabezpieczenia ziemnozwarciowe. Wymagania i zasady doboru.
<b>PN-G-42060:1997</b>	Elektroenergetyka kopalniana. Obciążalność przewodów oponowych i kabli stosowanych w podziemnych wyrobiskach zakładów górniczych.
<b>PN-G-50000:2002</b>	Ochrona pracy w górnictwie. Maszyny górnicze. Ogólne wymagania bezpieczeństwa i ergonomii.
<b>PN-G-50001:2002</b>	Ochrona pracy w górnictwie. Wyposażenie elektryczne maszyn górniczych. Wymagania ogólne.
<b>PN-G-50003:2003</b>	Ochrona pracy w górnictwie. Urządzenia elektryczne górnicze. Wymagania i badania.

#### 1.4. Wypadkowość w polskim górnictwie

Wypadkowość w polskim górnictwie jest problemem, który w istotnym stopniu wpływa zarówno na bezpieczeństwo pracy, jak i na efektywność ekonomiczną sektora. Pomimo ciągłego postępu technologicznego oraz wdrażania nowoczesnych rozwiązań mających na celu zwiększenie poziomu bezpieczeństwa w kopalniach węgla kamiennego, wciąż odnotowuje się przypadki wypadków przy pracy. Według danych Głównego Urzędu Statystycznego, w ostatnich latach w polskim górnictwie węgla kamiennego odnotowano spadek liczby wszystkich wypadków przy pracy (rys. 1.1 i 1.2) [14 – 16].

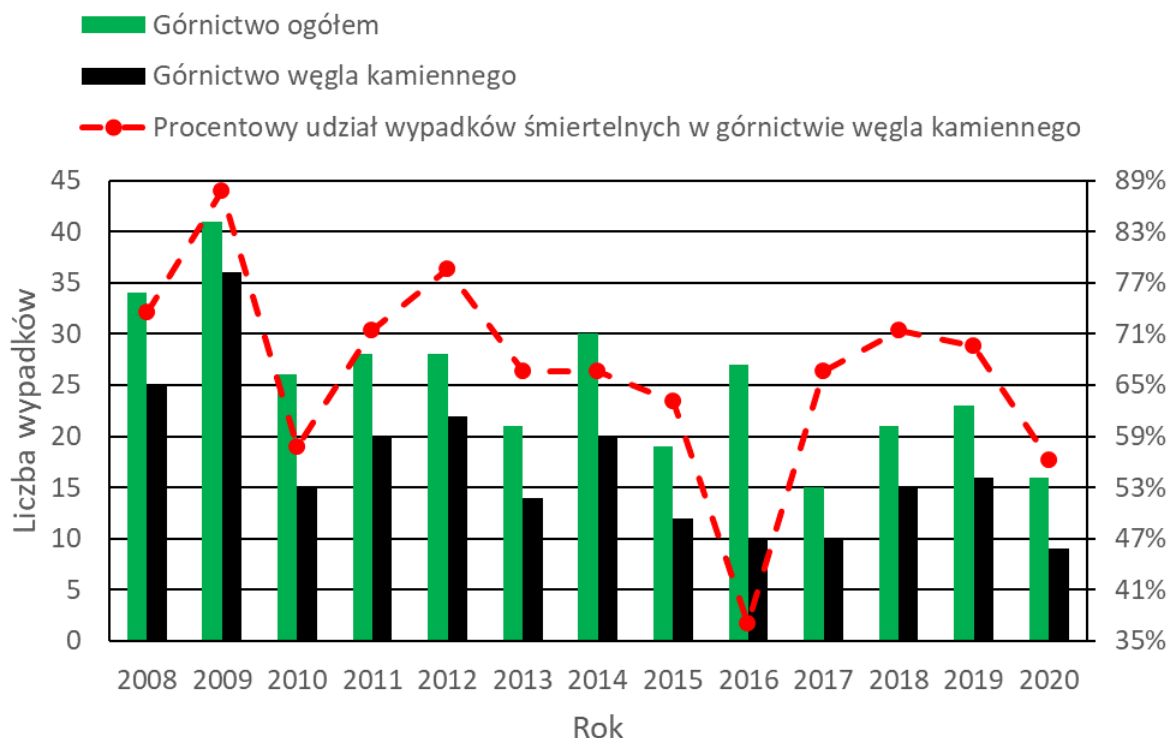


Rys. 1.1. Wypadkowość w polskim górnictwie w latach 2008-2020. W zestawieniu zaprezentowano liczbę wypadków w górnictwie ogółem jak i w górnictwie węgla kamiennego. Opracowanie własne na podstawie [14 – 16].

Z przedstawionych charakterystyk wyraźnie wynika, że liczba wypadków w polskim górnictwie spadła z około 3500 do nieco ponad 2000 na przestrzeni ostatnich 12 lat. Tendencja ta dotyczy również wypadków związanych z wydobywaniem węgla kamiennego. Liczba ta spadła z 2553 w 2008 roku do 1674 w 2020 roku. Warto

jednak zwrócić uwagę na jeszcze jeden trend. Oznacza to, że odsetek wypadków w kopalniach węgla kamiennego w odniesieniu do wszystkich kopalń w Polsce wzrósł z 75% do 82%. Podobną tendencję można zaobserwować w przypadku wypadków śmiertelnych. Liczba ofiar śmiertelnych w całym przemyśle wydobywczym spadła z 41 w 2009 r. do 16 w 2020 r. W kopalniach węgla kamiennego liczba ofiar śmiertelnych spadła z 36 (2009) do 9 (2020).

Nie można jednak jednoznacznie określić zależności udziału ofiar śmiertelnych w górnictwie węgla kamiennego do liczby wypadków śmiertelnych w całej branży wydobywczej. Przedstawione dane pozwalają jedynie przyjąć, że około 68% wszystkich wypadków śmiertelnych w polskim górnictwie miało miejsce w kopalniach węgla kamiennego. Należy jednak podkreślić, że odsetek ten zmienia się w granicach od 36% do 89% (rys. 1.2) zależnie od roku, co sugeruje, że wynik ten należy traktować z dużą ostrożnością.



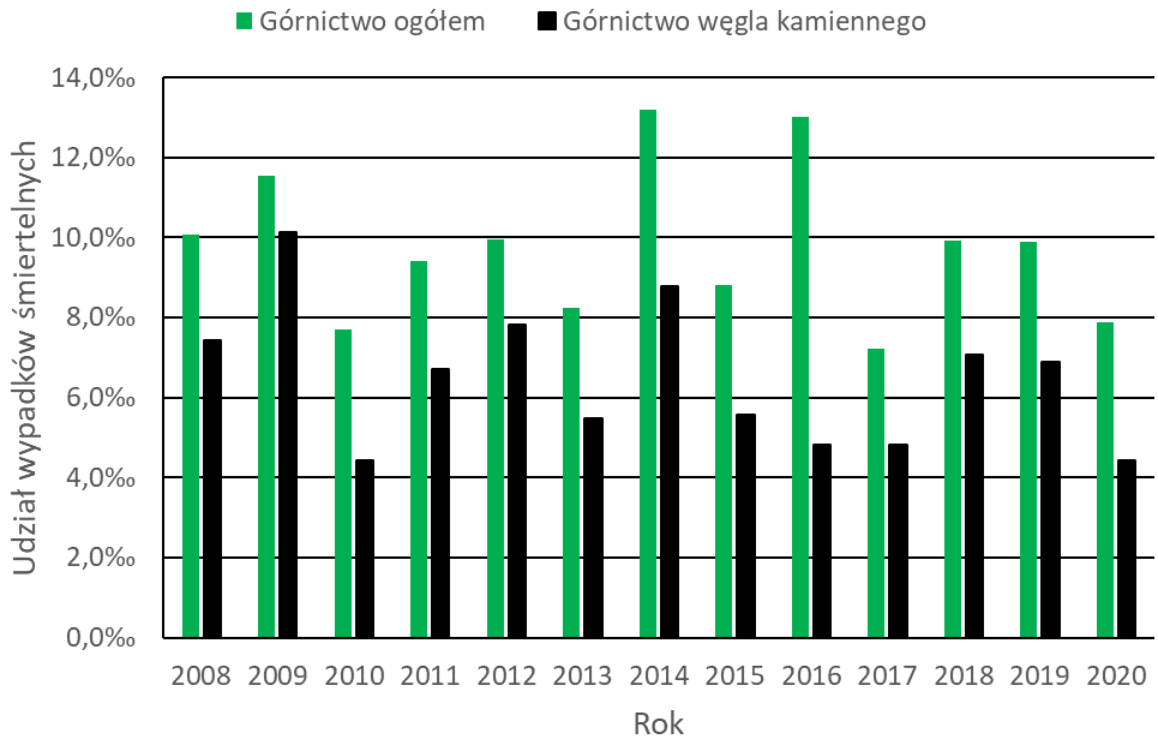
Rys. 1.2. Wypadki śmiertelne w polskim górnictwie w latach 2008-2020. W zestawieniu zaprezentowano liczbę wypadków śmiertelnych w górnictwie ogółem jak i w górnictwie węgla kamiennego. Opracowanie własne na podstawie [14 – 16].

Kończąc te rozważania można jeszcze skupić się na całkowitej ilości wypadków śmiertelnych w górnictwie i górnictwie węgla kamiennego w stosunku do całkowitej liczby wypadków w branży. Wyniki te zostały przedstawione na rys. 1.3. W całym przemyśle wydobywczym wskaźnik wypadków śmiertelnych oscyluje w okolicach 1%. Można tu zauważyć delikatną tendencję spadkową. Udział wypadków śmiertelnych w górnictwie węgla kamiennego do wszystkich wypadków górniczych wykazuje wyraźną tendencję spadkową. Na podstawie tych danych można przypuszczać, że jest to efekt wdrożenia nowoczesnych rozwiązań technologicznych i organizacyjnych mających na celu poprawę jakości i bezpieczeństwa pracy.

Mimo tych optymistycznych danych, branża górnicza wciąż pozostaje jednym z najbardziej niebezpiecznych sektorów pod względem wypadkowości. Wypadki te mają różne przyczyny, takie jak: zawalenie się wyrobiska, uderzenie przez ruchome elementy maszyn, zatrucia gazami czy porażenia prądem elektrycznym. Analizując wyniki kontroli oraz oględzin miejsc niebezpiecznych zdarzeń i wypadków przeprowadzonych w kopalniach węgla kamiennego [14 – 16] można jednak zauważyć, że przyczyną przynajmniej 20% wszystkich wypadków ciężkich i śmiertelnych są czynniki związane z prądem elektrycznym (20% w 2017 roku, 20,7% w 2018 roku, 25,8% w 2019 roku czy też 26% w 2020 roku).

Wypadki w kopalniach węgla kamiennego mogą wynikać z różnych przyczyn. Można do nich zaliczyć m.in.:

- błędy ludzkie, takie jak nieprawidłowe oceny sytuacji, niedostateczne przestrzeganie procedur bezpieczeństwa czy niewłaściwe korzystanie z wyposażenia ochronnego (77% przypadków w 2020 roku),
- uwarunkowania geologiczne, takie jak nieprzewidziane pęknięcia skał, gazowość czy zawodnienia,
- awarie sprzętu i maszyn, spowodowane np. zużyciem, nieprawidłowym montażem lub eksploatacją, brakiem prac remontowych, itp.
- niewystarczające szkolenie i świadomość pracowników w zakresie występowania zagrożeń oraz bezpieczeństwa.



*Rys. 1.3. Udział wypadków śmiertelnych dla całego przemysłu wydobywczego oraz kopalń węgla kamiennego w stosunku do całkowitej liczby wypadków w górnictwie. Opracowanie własne na podstawie [14 – 16].*

Właściwe funkcjonowanie systemów zabezpieczeń elektrycznych w kopalniach ma kluczowe znaczenie dla zmniejszenia ryzyka wypadków. W szczególności, zabezpieczenia ziemnozwarciowe odgrywają istotną rolę w prewencji wypadków związanych z porażeniem prądem elektrycznym oraz zagrożeniami pożarowymi i wybuchowymi. Szybkość i niezawodność działania tych zabezpieczeń mają bezpośredni wpływ na poziom bezpieczeństwa pracy w kopalniach, gdyż umożliwiają wyłączenie uszkodzonych fragmentów sieci zanim zwarcie doziemne, charakteryzujące się stosunkowo niewielką wartością prądu w miejscu uszkodzenia przekształci się w zwarcie międzyfazowe, stwarzające znacznie większe zagrożenie pod kątem rażeniowym, wybuchowym i pożarowym.

W celu zmniejszenia liczby wypadków w polskim górnictwie, niezbędne są działania prewencyjne oraz stałe podnoszenie świadomości pracowników w zakresie bezpieczeństwa pracy [14 – 16]. Do takich działań należą:

- systematyczne szkolenia i instruktaże dla pracowników, dotyczące przestrzegania zasad bezpieczeństwa pracy, prawidłowego korzystania z wyposażenia ochronnego oraz reagowania w sytuacjach awaryjnych,
- monitorowanie stanu technicznego sprzętu i maszyn, a także regularne przeglądy i konserwacja, aby zapewnić ich niezawodność i bezpieczeństwo użytkowania,
- wdrożenie nowoczesnych systemów zabezpieczeń i technologii mających na celu zwiększenie poziomu bezpieczeństwa pracy w kopalniach, takich jak automatyzacja procesów czy systemy monitoringu i kontroli,
- opracowanie i wdrożenie odpowiednich procedur awaryjnych, które umożliwiają szybkie i skuteczne reagowanie na zagrożenia oraz minimalizowanie skutków ewentualnych wypadków,
- współpraca z organami nadzoru i kontrolnymi, takimi jak Państwowa Inspekcja Pracy czy Główny Instytut Górnictwa, w celu wymiany doświadczeń i wiedzy oraz monitorowania przestrzegania przepisów bezpieczeństwa w kopalniach,
- współpraca z jednostkami naukowymi, takimi jak Politechnika Śląska czy Akademia Górniczo-Hutnicza, w celu lepszego zrozumienia procesów i zjawisk zachodzących w kopalniach i ciągłego ulepszania stosowanych technologii.

### **1.5. Uzasadnienie wyboru tematu rozprawy doktorskiej**

Wybór tematu niniejszej rozprawy doktorskiej wynika z pilnej potrzeby zrozumienia wpływu charakteru doziemienia oraz konfiguracji kopalnianej sieci rozdzielczej o napięciu 6 kV na selektywność działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w polskich kopalniach węgla kamiennego. Kopalnie te stanowią kluczowy sektor przemysłu w Polsce, a prawidłowe funkcjonowanie ich infrastruktury elektrycznej jest nie tylko kwestią efektywności operacyjnej, ale także zagadnieniem związanym z bezpieczeństwem pracowników oraz ekonomiczną opłacalnością działalności górniczej.



W obliczu unikalnych wyzwań stawianych przez pracę w kopalniach węgla, w tym trudnych warunków środowiskowych w podziemiach kopalń oraz często zmieniających się warunków pracy, zagadnienie selektywności zabezpieczeń ziemnozwarciowych staje się szczególnie istotne. Brak odpowiedniej selektywności może prowadzić do nieprzewidzianych i częstych przerw w dostawie energii, co może mieć negatywne skutki zarówno operacyjne, jak i finansowe. Zakłócenie przebiegu procesu odwadniania i przewietrzania kopalń, mogące w skrajnych sytuacjach (przy zbyt długim czasie trwania) prowadzić nawet do konieczności przerwania procesu technologicznego oraz konieczności ewakuacji załogi.

Dodatkowo, aspekty związane z bezpieczeństwem pracowników w kopalniach węgla są absolutnie priorytetowe. Sam fakt, że (w zależności od roku) co czwarty czy też co piąty wypadek ciężki lub śmiertelny w górnictwie węgla kamiennego jest związany z awarią maszyn, urządzeń lub sieci elektrycznej świadczy o niewystarczającym dotychczas rozwiązaniu problemu.

## **1.6. Podsumowanie**

W niniejszym rozdziale przedstawiono wprowadzenie do tematyki bezpieczeństwa w kopalniach węgla kamiennego w Polsce. Omówiono charakterystykę kopalń węgla kamiennego, uwzględniając specyficzne warunki pracy i środowiska. Następnie skupiono się na poborze energii elektrycznej w kopalniach oraz na roli niezawodnych systemów zasilania i zabezpieczeń ziemnozwarciowych w utrzymaniu ciągłości pracy zakładów górniczych i bezpieczeństwa załogi.

W podrozdziale 1.3 przedstawiono zagadnienia związane z bezpieczeństwem w kopalniach węgla kamiennego, w tym z zagrożeniami rażeniowymi, pożarowymi oraz wybuchowymi oraz roli odpowiednich zabezpieczeń w ich minimalizacji. W podrozdziale 1.4 poruszono temat wypadkowości w polskim górnictwie, pokazując, że mimo ogólnego trendu zmniejszania się liczby wypadków, wciąż istnieje potrzeba dalszych działań mających na celu poprawę bezpieczeństwa pracy.

Podsumowując, pierwszy rozdział niniejszej rozprawy doktorskiej ma na celu przedstawienie kontekstu, w którym odbywa się działalność górnicza w Polsce, a także zwrócenie uwagi na kluczowe aspekty bezpieczeństwa pracy w kopalniach węgla kamiennego. W kolejnych rozdziałach zostaną przedstawione bardziej szczegółowe zagadnienia związane z zabezpieczeniami ziemnozwarciowymi, ich roli w zapewnieniu bezpiecznego funkcjonowania kopalnianej sieci rozdzielczej oraz analizą złożonych zjawisk ziemnozwarciowych.

## **2. Cele i teza rozprawy doktorskiej**

### **2.1. Wstęp**

W kopalniach węgla kamiennego, niezawodny dopływ energii elektrycznej jest jednym z najważniejszych czynników decydujących o ciągłości ruchu zakładu górniczego oraz bezpieczeństwie załogi. Jednakże środowisko kopalniane charakteryzuje się wysoką metanowością oraz zagrożeniem wybuchem pyłu węglowego, co wymaga stosowania rygorystycznych norm i przepisów dotyczących zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Zwarcia doziemne są jednym z najczęściej występujących zakłóceń w kopalnianej sieci elektroenergetycznej, a ich skutkami mogą być zagrożenia rażeniowe, pożarowe lub wybuchowe [17 – 19].

### **2.2. Specyfikacja kopalnianej sieci rozdzielczej SN**

Kopalniana sieć elektroenergetyczna to sieć rozdzielcza o napięciu 6 kV, która charakteryzuje się izolowanym punktem neutralnym. Jest to sieć rozległa, skomplikowana i często poddawana przebudowom, co wiąże się z dużym ryzykiem wystąpienia różnego rodzaju zakłóceń. Pomimo stosunkowo niewielkich wartości prądu ziemnozwarciowego w porównaniu do wartości prądów występujących przy zwarciach dwu- i trójfazowych, istnieje duże ryzyko wystąpienia zagrożeń rażeniowych, pożarowych i wybuchowych. Wynika to z wysokiej wilgotności otoczenia oraz możliwości wystąpienia mieszanki metanowo-pyłowej w powietrzu. Wymaga to stosowania szczególnie rygorystycznych przepisów i norm dotyczących zabezpieczeń ziemnozwarciowych, które muszą zapewniać niezawodność oraz szybkość działania zabezpieczeń, a jednocześnie minimalizować ryzyko niepożądanych wyłączeń fragmentów sieci.

### **2.3. Problemy wynikające z występowania zakłóceń ziemnozwarciowych**

W kopalnianej sieci elektroenergetycznej prawidłowe działanie zabezpieczeń ziemnozwarciowych jest szczególnie ważne ze względu na ryzyko wystąpienia różnego

rodzaju zagrożeń, takich jak rażenia elektryczne, pożary czy wybuchy. Wymaga to zastosowania specjalnych zabezpieczeń, które zapewnią selektywność i bezzwłoczność wyłączeń, a jednocześnie będą działać w sposób niezawodny i szybki.

Ze względu na specyfikę sieci kopalnianej, w której występują często skomplikowane konfiguracje, linie równoległe i zamknięte, występują trudności w doborze odpowiedniego kryterium zabezpieczeń ziemnozwarciowych [8, 9, 20]. Dodatkowo, w przypadku zwarcia doziemnego, konieczne jest uwzględnienie zagrożenia rażeniowego, pożarowego oraz wybuchowego [9, 10, 17 – 19].

Współczesne przekaźniki zabezpieczeniowe oraz sterowniki polowe umożliwiają stosowanie kilku kryteriów zabezpieczeniowych, w tym kryteriów nadprądowych oraz admitancyjnych. Jednakże, konieczne jest odpowiednie skoordynowanie tych kryteriów pod względem czasowym i prądowym, aby zapewnić selektywność poprzeczną działania, rozumianą jako bezbłędne wskazanie uszkodzonego odpływu, i uniknąć niepożądanych wyłączeń.

Automatyka zabezpieczeniowa odgrywa kluczową rolę w zapewnieniu niezawodności i szybkości działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w kopalnianej sieci elektroenergetycznej. Wymaga to jednak odpowiedniego doboru parametrów zabezpieczeń, takich jak prądy zwarcia, czasy wyłączeń, czy wartości nastaw. Konieczne jest również ciągłe monitorowanie stanu sieci oraz zabezpieczeń i ich weryfikacja.

#### **2.4. Teza pracy**

W kontekście współczesnych kopalnianych sieci elektroenergetycznych, gdzie niezawodność i szybkość działania zabezpieczeń są kluczowe dla zapewnienia ciągłości pracy zakładu oraz bezpieczeństwa załogi, istnieje potrzeba zastosowania złożonych i zróżnicowanych rozwiązań zabezpieczeniowych. Zjawiska ziemnozwarciowe stanowią istotne wyzwanie w tym kontekście, ze względu na ich potencjalnie rażące skutki, takie jak rażenia elektryczne, pożary czy wybuchy. Z racji tego, że problem zwarć doziemnych w polskim górnictwie nie został w sposób całkowicie satysfakcjonujący rozwiązany,

a obecne normy wymagają aktualizacji, sformułowana została następująca teza pracy doktorskiej:

**Zjawiska ziemnozwarciowe w sieciach kopalnianych posiadają złożony i zróżnicowany charakter. Przepisy i normy narzucają wysokie wymagania dotyczące niezawodności i szybkości działania zabezpieczeń, przy jednoczesnym szerokim zakresie możliwości udostępnionym przez współczesne wielofunkcyjne przekaźniki zabezpieczeniowe i sterowniki polowe. Efektem tego jest konieczność jednoczesnego stosowania kilku kryteriów zabezpieczeniowych, wliczając w to kryteria admitancyjne. Kryteria te muszą być ze sobą odpowiednio skoordynowane pod względem czasowym i prądowym.**

## **2.5. Cele naukowe i uytylitarne rozprawy doktorskiej**

Przed przystąpieniem do badań został sformułowany cel naukowy i uytylitarny niniejszej rozprawy doktorskiej.

Celem naukowym rozprawy jest opracowanie modelu symulacyjnego kopalnianej sieci rozdzielczej SN umożliwiającego analizę złożonych zjawisk ziemnozwarciowych oraz koordynację charakterystyk zabezpieczeń ziemnozwarciowych. W ramach tego celu zostały wykonane następujące zadania:

- Przeprowadzenie szczegółowej analizy zarejestrowanych danych statystycznych dotyczących działania zabezpieczeń w wybranych kopalniach węgla kamiennego.
- Opracowanie cyfrowego modelu symulacyjnego rozdzielczej sieci kopalnianej umożliwiającego zbadanie różnych konfiguracji sieci.
- Implementacja układów pomiarowych, takich jak przekładniki prądowe i napięciowe składowej zerowej oraz algorytmy i kryteria działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych, takich jak nadprądowe i admitancyjne.
- Porównanie wyników uzyskanych z wykorzystaniem opracowanego modelu z danymi zarejestrowanymi w rzeczywistych sieciach kopalnianych.

Celem użytkowym pracy jest określenie wymagań projektowych dotyczących stosowania zabezpieczeń ziemnozwarciowych, doboru ich nastaw oraz sformułowanie wytycznych do opracowania nowej normy, uwzględniającej współczesny stan techniki zabezpieczeniowej i możliwości stwarzane przez nowoczesne rozwiązania przełączników zabezpieczeniowych i sterowników polowych oraz możliwości rejestracji i analizy rzeczywistych przypadków zwarć doziemnych.

## **2.6. Podsumowanie rozdziału**

W niniejszym rozdziale przedstawiono wybraną problematykę dotyczącą stosowania zabezpieczeń ziemnozwarciowych w kopalnianej sieci elektroenergetycznej. Opisano specyfikę sieci kopalnianej, w tym jej konfigurację oraz problemy wynikające z występowania ziemnozwarciowych zakłóceń. Sformułowano tezę pracy, która dotyczy złożonego charakteru zjawisk ziemnozwarciowych w sieciach kopalnianych oraz wysokich wymagań narzucanych przez obowiązujące normy i przepisy. Zdefiniowano cele pracy, w tym opracowanie modelu symulacyjnego kopalnianej sieci rozdzielczej oraz określenie wymagań projektowych dotyczących zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Wyniki prowadzonych badań i analiz powinny przyczynić się do poprawy niezawodności oraz bezpieczeństwa kopalnianej sieci elektroenergetycznej poprzez dostarczenie nowych rozwiązań technicznych i normatywnych.

### 3. Specyfika kopalnianej sieci rozdzielczej średniego napięcia

#### 3.1. Sposoby pracy punktu neutralnego sieci SN

Do rozdziału energii elektrycznej wykorzystuje się niejednokrotnie bardzo rozbudowane i skomplikowane sieci elektroenergetyczne zazwyczaj niskich napięć, a tam gdzie niskie napięcia okazują się niewystarczające stosuje się średnie napięcia. Natomiast do przesyłu energii elektrycznej ze względu na minimalizację strat energii wykorzystuje się sieci średnich, wysokich i najwyższych napięć. Analogicznie w górnictwie do przesyłu i rozdziału energii wykorzystuje się sieci SN. Sieci te są bardzo rozbudowane, rozległe i ciągle przebudowywane wraz ze zmienną strukturą kopalni wynikającą z procesu eksploatacji złoża [20 – 22].

W przypadku kopalnianych sieci elektroenergetycznych wybór układu ze względu na bezpieczeństwo jest narzucony odpowiednimi przepisami [9 – 13, 23, 24]. Dlatego w polskim górnictwie, ze względu na m.in. powszechnie występujące zagrożenie rażeniowe, pożarowe i wybuchowe zarówno w sieciach niskonapięciowych jak i w sieciach średnich napięć, stosuje się sieci o izolowanym punkcie neutralnym.

Sposób połączenia punktu neutralnego sieci z ziemią ma ogromny wpływ na sposób pracy sieci, zwłaszcza występujące podczas awarii zjawiska oraz sposób działania automatyki zabezpieczeniowej. W przypadku sieci niskich napięć można wyróżnić z punktu widzenia techniki ochrony przeciwporażeniowej pięć układów sieciowych: TN-C, TN-S, TN-C-S, TT oraz IT. W przypadku sieci średnich napięć pracują one z reguły z nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym [25, 26]. Spośród różnych stosowanych na świecie rozwiązań można wyróżnić:

- sieć skompensowaną,
- sieć uziemioną przez rezystor,
- sieć z izolowanym punktem neutralnym.

Jako sieć skompensowaną (czasem nazywaną siecią uziemioną przez dławik) rozumie się sieć, w której punkt neutralny przynajmniej jednego uzwojenia transformatora jest uziemiony przez dławik gaszący, a łączna indukcyjność dławików

gaszących jest dostrojona do pojemności doziemnej sieci [26]. Odpowiedni dobór indukcyjności dławika powoduje zazwyczaj tzw. samowygaszenie zakłóceń poprzez wprowadzenie dodatkowej impedancji (reaktancji indukcyjnej) między punktem neutralnym a ziemią. Kiedy wystąpi zwarcie doziemne, prąd zaczyna płynąć przez reaktancję indukcyjną dławika powodując wzrost pola magnetycznego wokół niego, który z kolei zwiększa impedancję obwodu, ograniczając przepływ prądu. Ostatecznie, ograniczenie prądu zwarcia zmniejsza ilość energii dostarczonej do łuku elektrycznego uniemożliwiając jego podtrzymanie. Bardzo często w tego typu sieciach stosuje się automatykę wymuszania składowej czynnej – AWSz. Układ ten w chwili zwarcia tymczasowo podłącza równolegle do dławika gaszącego rezystor, który powiększa wartość prądu ziemnozwarciowego. Z uwagi na niewielkie wartości tego prądu jego chwilowe zwiększenie może pomóc w szybszym i bardziej niezawodnym wykrywaniu zwarcia oraz w skutecznym wyłączeniu uszkodzonego fragmentu sieci. W rezultacie takie rozwiązanie poprawia pracę zabezpieczeń ziemnozwarciowych [26 – 28]. Jednak w sieciach górniczych nie jest praktycznie stosowane [8].

Sieć z punktem neutralnym uziemionym przez rezystancję to taka sieć, w której przynajmniej jeden punkt neutralnym transformatora jest uziemiony przez rezystor tak dobrany, że składowa czynna ewentualnego zwarcia doziemnego będzie większa od składowej pojemnościowej. W praktyce składowa czynna przekracza zwykle 100 A. Sieci takie o napięciu znamionowym 10 kV są stosowane np. w KGHM [29].

Powyższe dwa rozwiązania (zwłaszcza sieć skompensowana) są popularne w napowietrznych sieciach SN. W polskim górnictwie węgla kamiennego do przesyłu energii w liniach średnich napięć wykorzystuje się sieci z izolowanym punktem neutralnym. W sieci o izolowanym punkcie neutralnym wartość prądu doziemienia jest stosunkowo niewielka (często mniejszy od prądów obciążenia), natomiast napięcia fazowe w fazach niedoziemionych zwiększają się  $\sqrt{3}$  razy [30 – 34]. Dla porównania w sieci o skutecznie uziemionym punkcie neutralnym wartości prądów zwarciovych przy zwarcu doziemnym są bardzo duże, natomiast występujące w nim przepięcia są stosunkowo niewielkie. Wybór sposobu uzmiennienia punktu neutralnego sieci wpływa

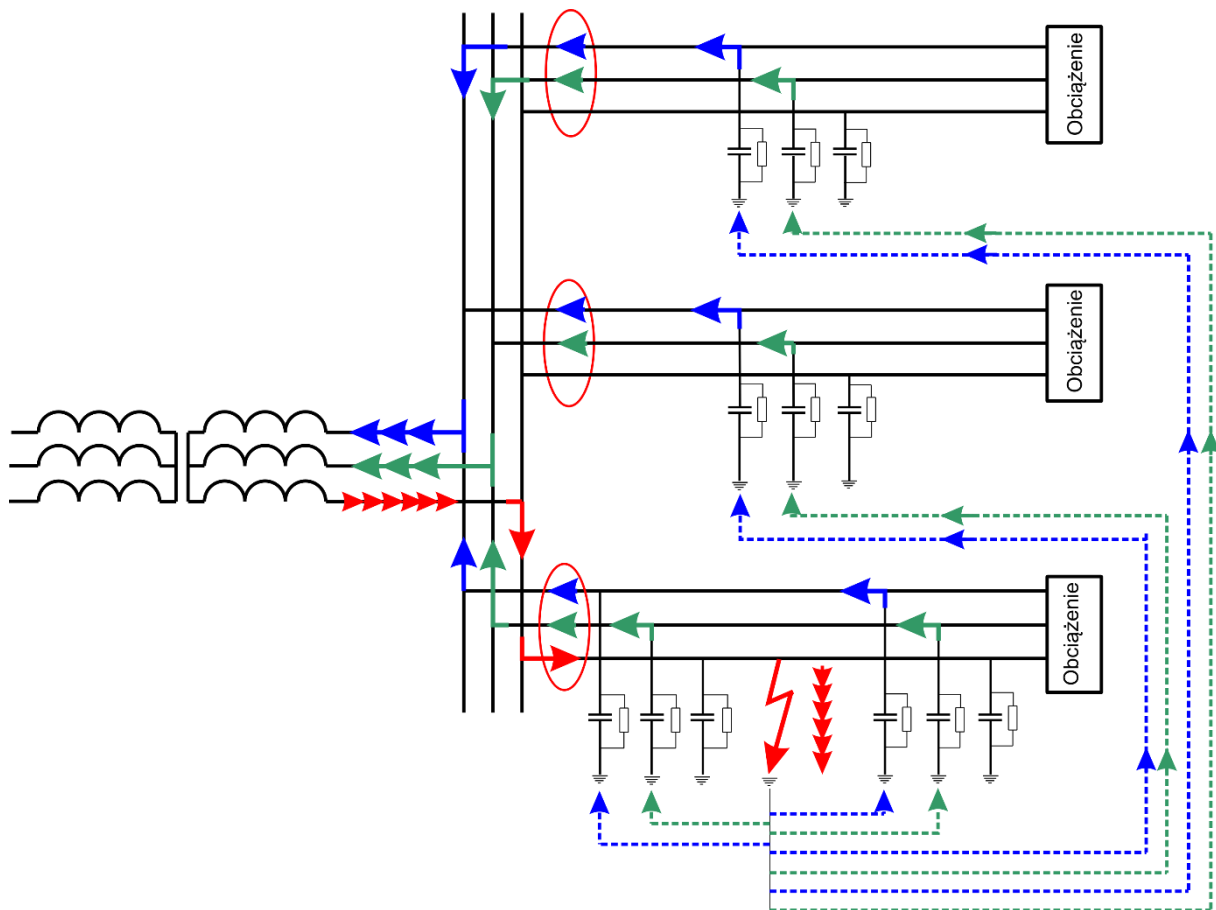


m.in. na zagrożenia rażeniowe, pożarowe, wybuchowe (w przypadku stref zagrożonych wybuchem) oraz na wymogi stawiane działaniu zabezpieczeń ziemnozwarciowych.

W tego typu sieci zawsze istnieje sprzężenie pojemnościowe pomiędzy przewodami a ziemią, które w przypadku wystąpienia zwarcia doziemnego powoduje przepływ prądu pojemnościowego. Zazwyczaj te pojemności rozłożone wzdłuż całej sieci, aby uprościć obliczenia, są skupione w jedną sumaryczną pojemność dla każdej fazy. Wartość składowej zerowej prądu, będącą sumą prądów obciążenia pomniejszona trzykrotnie, przy braku zwarcia doziemnego wynosi zero. Gdy w jednej z faz powstaje zwarcie doziemne, napięcie pomiędzy pozostałymi fazami a ziemią wzrasta  $\sqrt{3}$  razy. Prąd w uszkodzonej linii przepływa z transformatora poprzez rezystancję zwarcia (która w przypadku zwarcia metalicznego wynosi  $0 \Omega$ ), ziemię, pojemności doziemne zdrowych linii i poprzez zdrowe linie wraca do transformatora. Wartość składowej zerowej prądu uwzględniająca pojemność doziemną całej galwanicznie połączonej sieci jest znacznie mniejsza niż typowe wartości prądu obciążenia linii (uwzględniając prądy znamionowe czy też rozruchowe silników indukcyjnych).

W rzeczywistych sieciach, o bardziej złożonej (rozgałęzionej) strukturze, przepływ prądów jest znacznie bardziej skomplikowany (rys. 3.1). Napięcie między fazami a ziemią w uszkodzonej linii jest obniżone, a napięcie w pozostałych fazach jest podwyższone. W związku z tym pojemność uszkodzonej fazy jest rozładowywana (czerwone strzałki na rysunku), a pojemności pozostałych (zdrowych) faz są dodatkowo ładowane (niebieskie i zielone strzałki na rysunku). Wartości składowych zerowych prądów mierzone przez przekaźniki zabezpieczeniowe są określane przez pojemności całej galwanicznie połączonej sieci.

W przemyśle wydobywczym zwarcia doziemne są powszechnym tematem badań naukowych ze względu na złożoność zjawisk fizycznych występujących w miejscu zwarcia i ciągły brak rozwiązań uwzględniających każdy przypadek [27 – 38].



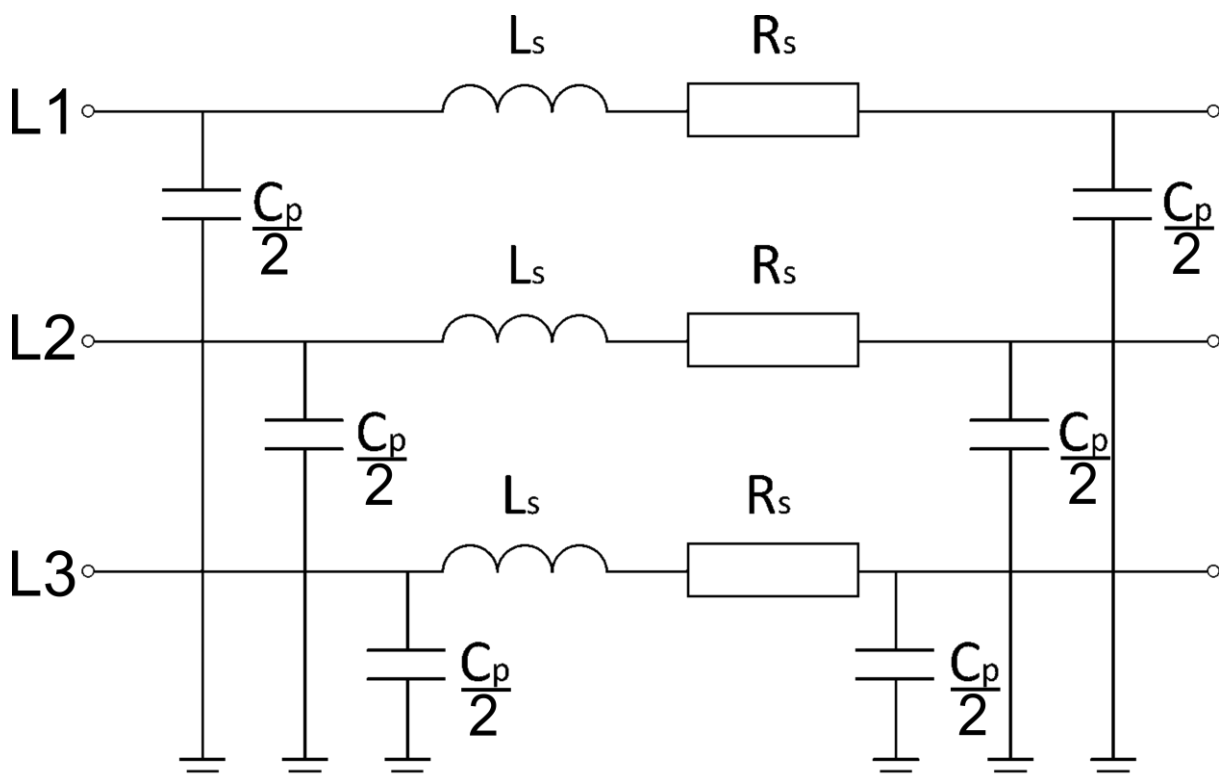
Rys. 3.1. Model prostej, rozgałęzionej sieci z izolowanym punktem neutralnym w przypadku zwarcia doziemnego.

### 3.2. Model matematyczny linii kablowej

W sieciach kopalnianych średniego napięcia stosuje się kable i przewody oponowe. Są one narażone na różne uszkodzenia mechaniczne, takie jak miażdżenie czy też uderzenia. Z powodu często spotykanego w polskim górnictwie węglowym występowania niebezpiecznych stężeń metanu oraz pyłu węglowego tego typu uszkodzenia stwarzają zagrożenie nie tylko rażeniowe, ale także wybuchowe [37, 38]. Zwarcia międzyfazowe powstałe z tego powodu wydzielają, w krótkim czasie ogromne ilości energii, w związku z tym są niezwykle niebezpieczne. Z drugiej strony są stosunkowo łatwe do wykrycia, ponieważ można miejsce uszkodzenia dostrzec gołym okiem. Nieco inaczej jest ze zwarciami doziemnymi, które często są niedostrzegalne przez pracowników. Ponadto, gdy zabezpieczenia nie zadziałają prawidłowo istnieje poważne zagrożenie rażeniowe, z powodu wydostania się napięcia roboczego na zewnątrz kabla lub przewodu oponowego [39].

W literaturze można spotkać różne struktury modeli matematycznych linii kablowych, jednak zdaniem naukowców [40 – 43] nie istnieje uniwersalny model linii kablowej, który można wykorzystać do analizy stanów przejściowych. Popularne programy inżynierskie, takie jak NETOMAC czy też EMTP [44 – 46] nie stosują uniwersalnego modelu linii kablowej. Inne stosowane w górnictwie rozwiązania – jak SWN [47, 48] co prawda ujednolicają i upraszczają model linii kablowej, jednak w większości analiz nie są przeznaczone do obliczania stanów przejściowych, zwłaszcza zwarć doziemnych.

Jednym z najpopularniejszych modeli linii kablowej stosowany w rozważaniach analitycznych jak i badaniach symulacyjnych jest model  $\Pi$  [49, 50]. Model ten zakłada, że strukturę dowolnego odcinka kabla można uprościć do układu o parametrach podłużnych i poprzecznych (rys. 3.2).



Rys. 3.2. Uproszczony model  $\Pi$  linii kablowej.  $R_s$  oraz  $L_s$  to parametry podłużne, natomiast  $C_p$  to parametr poprzeczny.

Rezystancja podłużna w tym modelu wynika wprost z rezystancji żył roboczych, indukcyjność podłużna odzwierciedla wpływ indukcyjności wynikających ze skrętnego układania żył, natomiast wartość pojemności poprzecznej liczona jest wprost

z pojemności doziemnej danego kabla. Powyższy model można rozwinąć o wpływ konduktancji poprzecznej oraz o wpływ pojemności międzyfazowej, jednak pominięto te dwa czynniki. Pojemności międzyfazowe pominięto ze względu na obowiązek stosowania ekranów indywidualnych w kablach w kopalnianych sieciach średnich napięć. Przyczyną jest nieznaczny wpływ konduktancji na przebiegi oraz fakt, że wszystkie kable i przewody oponowe w górnictwie węglowym w sieciach SN powinny mieć ekrany indywidualne uziemione, więc pojemności międzyprzewodowe przestają mieć znaczenie. Modelowanie linii kablowej za pomocą czwórnik  $\Pi$  traktuje się jako odwzorowanie niedokładne ze względu na fakt, że skupienie parametrów rozłożonych w rzeczywistości wzdłuż całego odcinka kabla zniekształca charakterystyki częstotliwościowe. Jednak powszechnie przyjmuje się, że odwzorowując linię energetyczną przez większą liczbę tego typu czwórników połączonych łańcuchowo, dokładność otrzymanych przebiegów rośnie [49 – 51].

Niektórzy badacze [52 – 57] uważają, że w przypadku sieci, w których występują częstotliwości niższe od 1 kHz daną linię o długości  $x$  można opisać za pomocą równań różniczkowych zwyczajnych (3.1, 3.2).

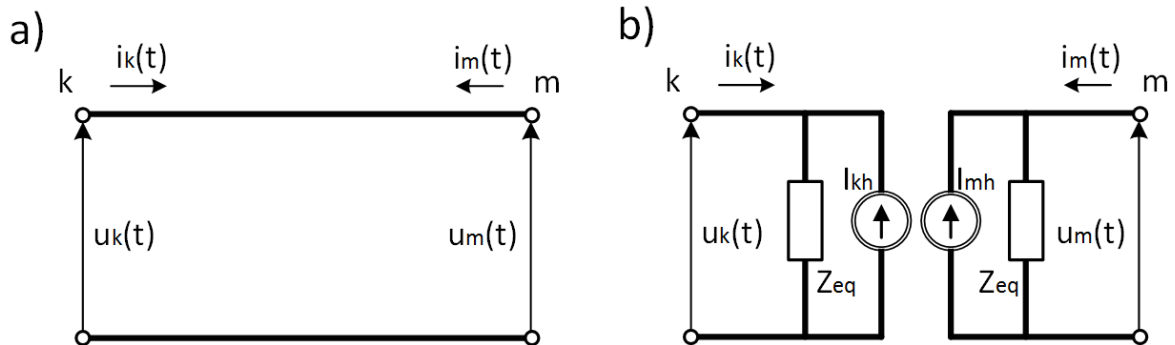
$$-\frac{dU}{dx} = ZI \quad (3.1)$$

$$-\frac{dI}{dx} = YU \quad (3.2)$$

Jednak z uwagą na skomplikowaną strukturę sieci kopalnianych tego typu rozwiązanie, mimo prawdopodobnie najlepszego odzwierciedlenia sieci przesyłowej byłoby niezwykle trudne do wdrożenia. Głównymi powodami takiego stanu jest bardzo długi czas symulacji w celu otrzymania zadowalających rezultatów oraz skomplikowane obliczenia składowych macierzy impedancji  $Z$  oraz admitancji  $Y$ , gdyż rozwiązania tego modelu są przedstawiane w postaci funkcji hiperbolicznych.

Obecnie powszechnie stosowany w sieciach napowietrznych do analizy stanów przejściowych w przewodach jest model J. Martiego [55]. Model ten pozwala zastąpić model zaproponowany przez Dommela i Meyera (rys. 3.3) [52 – 54] jako układ

zastępczy. Marti do opisu parametrów układu zastępczego wykorzystał rozważania d'Alemberta i Bergerona.



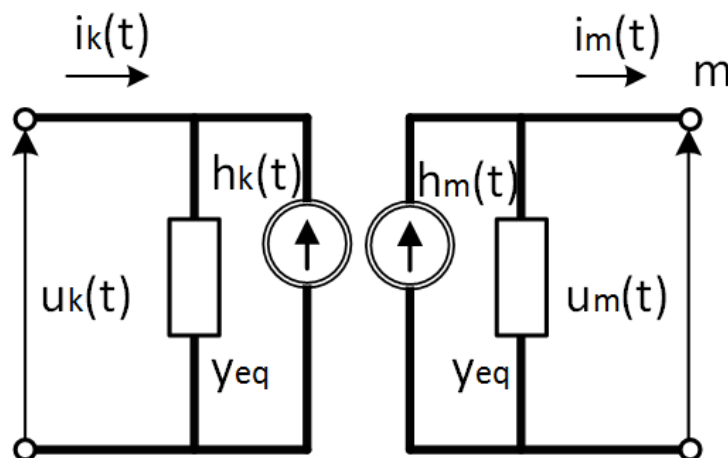
Rys. 3.3. Uproszczony model Dommela: a) fragment linii, b) model częstotliwościowo-zależny zaproponowany wg J. Martiego.

W linii kablowej fale w dziedzinie częstotliwości można opisać wzorami (3.3) dla fal pierwotnych oraz (3.4) dla fal odbitych, gdzie impedancję układu liniowego można opisać wzorem (3.5), gdzie  $R_0$ ,  $R_i$  oraz  $C_i$  są parametrami zastępczej sieci R-C. Jako zastępczą sieć R-C J. Marti przyjął szeregowe połączenie  $n$  wiązań  $R_i$ - $C_i$  z rezystorem  $R_0$ .

$$\begin{cases} F_k(\omega) = U_k(\omega) + Z_{eq}(\omega)I_k(\omega) \\ F_m(\omega) = U_m(\omega) + Z_{eq}(\omega)I_m(\omega) \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\begin{cases} B_k(\omega) = U_k(\omega) - Z_{eq}(\omega)I_k(\omega) \\ B_m(\omega) = U_m(\omega) - Z_{eq}(\omega)I_m(\omega) \end{cases} \quad (3.4)$$

$$Z(\omega) = R_0 + \sum_{i=1}^n \frac{\frac{1}{C_i}}{\omega + \frac{1}{R_i C_i}} \quad (3.5)$$



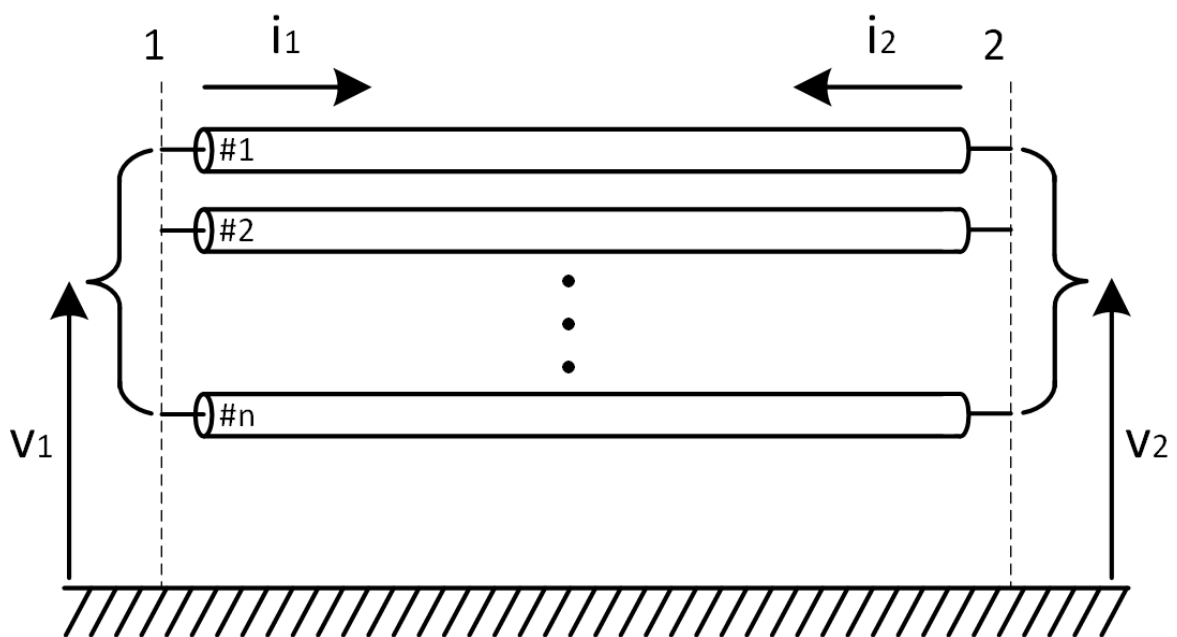
Rys. 3.4. Równoważny obwód w dziedzinie czasu zaproponowany przez L. Martiego.

L. Marti zaproponował równoważny obwód w dziedzinie czasu (rys. 3.4) [57]. Model ten jest kompatybilny z różnymi programami do analizy sieci elektroenergetycznych (jak np. EMTP). Równania opisujące linię w dziedzinie czasu można opisać zależnościami:

$$\begin{cases} y_{eq}u_m(t) + i_m(t) = h_m(t) \\ y_{eq}u_k(t) + i_k(t) = h_k(t) \end{cases} \quad (3.6)$$

W powyższym wzorze przyjęto, że  $y_{eq}$  jest symetryczną stałą macierzą,  $h_m(t)$  i  $h_k(t)$  są równoważnikami historii źródeł prądu. Szczegółowe wyprowadzenia wzorów zarówno modelu J. Martiego jak i L. Martiego są opisane w pracach autorów [56, 57].

Kolejnym możliwym do zastosowania jest model ARMA zaproponowany przez T. Noda [58, 59]. W tym modelu linię kablową wprost traktuje się jako linię długą składającą się z  $n$  przewodników o długości  $l$  (rys. 3.5).



Rys. 3.5. Linia wielofazowa.

W dziedzinie częstotliwości, prądy i napięcia w odległości  $x$  od zasilanego końca wyrażone są wektorami:

$$I(x, \omega) = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$V(x, \omega) = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

W pracach [58, 59] autorzy po licznych przekształceniach równań telegrafistów otrzymują następujące zależności:

$$\begin{cases} i_1(t) = y_0(t) * v_1(t) - i_{p1}(t) \\ i_2(t) = y_0(t) * v_2(t) - i_{p2}(t) \end{cases} \quad (3.9)$$

gdzie:

$$\begin{cases} i_{p1}(t) = h^T(t) * (y_0(t) * v_2(t - \tau) + i_2(t - \tau)) \\ i_{p2}(t) = h^T(t) * (y_0(t) * v_1(t - \tau) + i_1(t - \tau)) \end{cases} \quad (3.10)$$

W powyższych równaniach przyjęto, że  $h(t) = F^{-1}\{H(\omega)\}$ . Sama macierz fali odkształcenia w dziedzinie fazowej  $H(\omega)$  określono zależnością:

$$H(\omega) = e^{j\omega t} e^{-\Gamma(\omega)l} \quad (3.11)$$

przyjmując, że  $\Gamma(\omega)$  to macierz stałej propagacji.

### 3.3. Metody wyznaczania składowej zerowej napięcia oraz prądu

Jedną z powszechnych metod analizy układów elektroenergetycznych trójfazowych jest metoda składowych symetrycznych (przekształcenie Fortescue'a) [49 – 51, 60]. Metoda ta zakłada, że poprzez proste przekształcenia liniowe można zastąpić układ trzech wektorów niesymetrycznych ( $\underline{U}_{L1}$ ,  $\underline{U}_{L2}$ ,  $\underline{U}_{L3}$ ) trzema równoważnymi układami symetrycznymi:

$$\begin{cases} \underline{U}_{L1} = \underline{U}_0 + \underline{U}_1 + \underline{U}_2 \\ \underline{U}_1 = \underline{U}_0 + \underline{\alpha}^2 \underline{U}_1 + \underline{\alpha} \underline{U}_2 \\ \underline{U}_2 = \underline{U}_0 + \underline{\alpha} \underline{U}_1 + \underline{\alpha}^2 \underline{U}_2 \end{cases} \quad (3.12)$$

gdzie  $\underline{U}_0$ ,  $\underline{U}_1$ ,  $\underline{U}_2$  to wektory symetryczne (odpowiednio zerowy, zgodny oraz przeciwny),  $\underline{\alpha}$  to operator kątowy obrotu. Powoduje on obrót fazowy o  $\frac{2}{3}\pi$  w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara. Jest on równy:

$$\begin{cases} \underline{\alpha} = e^{j\frac{2}{3}\pi} \\ \underline{\alpha}^2 = e^{-j\frac{2}{3}\pi} \end{cases} \quad (3.13)$$

Po takim przekształceniu układu równań (3.12) można otrzymać:

$$\begin{cases} \underline{U}_0 = \frac{1}{3}(\underline{U}_{L1} + \underline{U}_{L2} + \underline{U}_{L3}) \\ \underline{U}_1 = \frac{1}{3}(\underline{U}_{L1} + \underline{\alpha}\underline{U}_{L2} + \underline{\alpha}^2\underline{U}_{L3}) \\ \underline{U}_2 = \frac{1}{3}(\underline{U}_{L1} + \underline{\alpha}^2\underline{U}_{L2} + \underline{\alpha}\underline{U}_{L3}) \end{cases} \quad (3.14)$$

Metoda ta umożliwia obliczenie rozptywu prądów osobno dla każdego układu symetrycznego, następnie obliczyć rozptyw wypadkowy metodą superpozycji. Powyższe układy równań są prawdziwe nie tylko dla napięć, ale także dla prądów.

Z punktu widzenia ziemnozwarciowej EAZ najważniejszymi parametrami transformacji Fortescue'a są składowa zerowa napięcia oraz prądu.

W normalnym stanie  $U_0$  co do wartości skutecznej jest równe 0 V, niezależnie od rodzaju sieci. W przypadku, gdy nastąpi zwarcie doziemne wartość  $U_0$  w całej galwanicznie ze sobą połączonej sieci będzie równa:

$$U_0 = \beta U_F \quad (3.15)$$

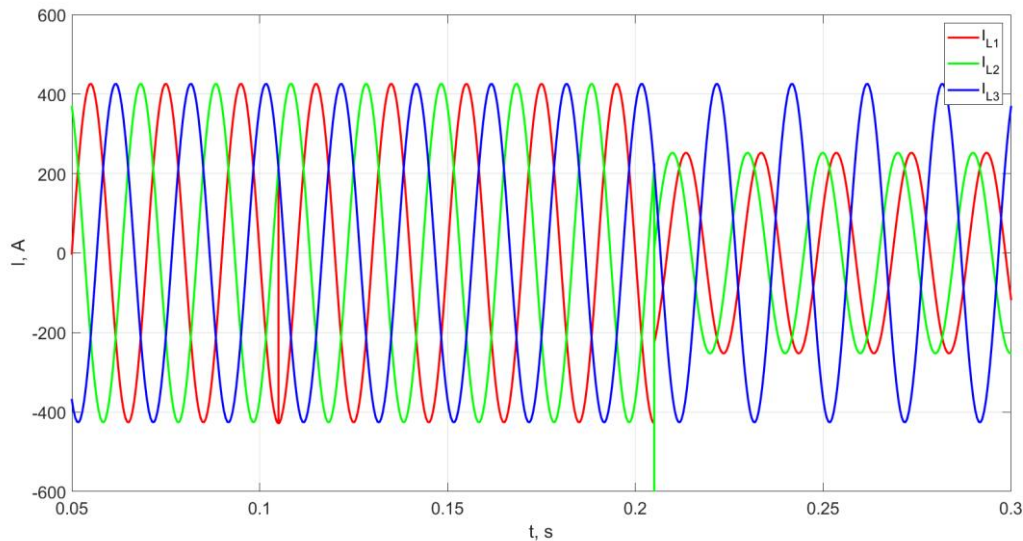
gdzie współczynnik  $\beta$  mieści się w przedziale od 0 do 1 [25 – 28]. W literaturze przyjmuje się, że  $\beta = 0$  gdy w sieci nie pojawia się żadne doziemienie oraz  $\beta = 1$  gdy impedancja zwarcia jednofazowego z ziemią jest równa  $0 \Omega$  (zwarcie metaliczne).

Jak już wcześniej zostało wspomniane wartość prądu ziemnozwarciowego w sieciach z izolowanym punktem neutralnym jest niewielki w stosunku do prądów roboczych. Pomiar wartości prądów w celu wykrycia doziemienia jest niewystarczający, ponieważ prądy płynące w żyłach roboczych praktycznie nie ulegają zmianie (rys. 3.6). W przypadku innych zwarć (np. dwufazowe z ziemią) sama analiza przebiegów prądów w poszczególnych fazach może wystarczyć do wykrycia zakłócenia. Należy pamiętać że analizowane tu przebiegi są tylko wynikiem symulacji. W rzeczywistości zwarcie dwufazowe z ziemią mogłoby spowodować poważne uszkodzenia całej linii, gdyby nie zostało wyłączone.

Dlatego istotna, z punktu widzenia selektywności i niezawodności wykrywania doziemień, jest instalacja na początku każdej linii układu pomiarowego, który wyznacza wartość składowej zerowej prądów wpływających do danego odpływu dla każdego pola osobno. W zależności od rezystancji zwarcia, pojemnościowego prądu zwarcia



doziemnego całej galwanicznie połączonej sieci, udziału pojemności doziemnej linii za miejscem pomiaru oraz miejsca zwarcia wartość  $I_0$  a także jego przesunięcie fazowe względem prądu zwarciovego będzie się różnić dla każdego odpływu.



Rys. 3.6. Przebiegi prądów w żyłach roboczych w sieci z izolowanym punktem neutralnym. Prądy dla linii, w której nastąpiło zwarcie jednofazowe z ziemią w fazie L1 w chwili  $t = 105$  ms oraz zwarcie dwufazowe faz L1 i L2 z ziemią w chwili  $t = 205$  ms.

Powszechnie w przemyśle do pomiarów składowych zerowych prądów i napięć stosuje się omawianą metodę analityczną. Jest to metoda otwartego trójkąta w przypadku napięcia oraz przekładniki Ferrantiego i układy Holmgrena w przypadku prądów.

### 3.4. Opis zabezpieczeń stosowanych w kopalnianych polach rozdzielczych SN

Każda kopalniana rozdzielnica średnich napięć jest wyposażona w szereg różnych zabezpieczeń. Można je podzielić na zabezpieczenia wykorzystujące podstawowe harmoniczne prądów i napięć zerowych oraz zabezpieczenia wykorzystujące wyższe harmoniczne [61, 62].

Do grupy zabezpieczeń wykorzystujących podstawowe harmoniczne prądów i napięć zerowych zalicza się:

- zabezpieczenia zerowonapięciowe ( $U_0$ ),
- zabezpieczenia zerowoprądowe ( $I_0$ ),

- zabezpieczenia czynnomocowe kierunkowe,
- zabezpieczenia biernomocowe kierunkowe,
- zabezpieczenia admitancyjne (w tym konduktancyjne i susceptancyjne).

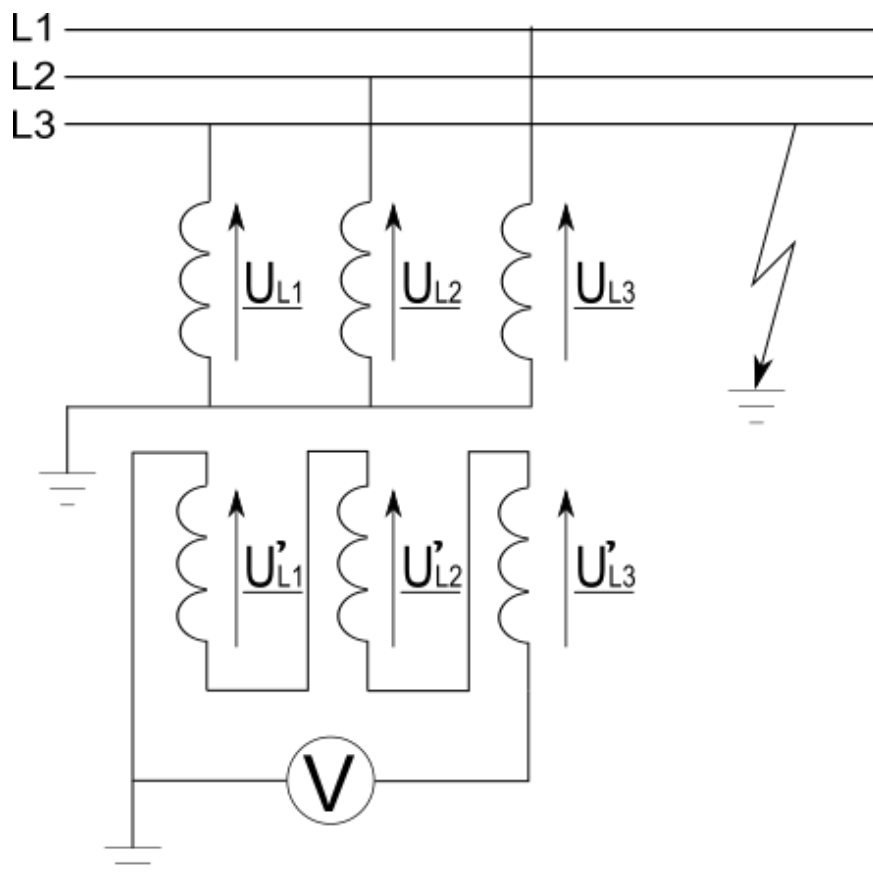
Do grupy zabezpieczeń wykorzystujących wyższe harmoniczne można zaliczyć urządzenia, które reagują na:

- wartość bezwzględną sumy wyższych harmonicznym w prądzie zerowym,
- wartość 5 harmonicznej prądu zerowego,
- stosunek wartości wyższych harmonicznym do wartości prądu pierwszej harmonicznej w prądzie zerowym danej linii,
- wartość sumy wyższych harmonicznym prądów zerowych poszczególnych liniach, które odchodzą z tych samych szyn zbiorczych danej rozdzielnicy.

Ponieważ w kopalnianych sieciach średnich napięć stosuje się głównie urządzenia wykorzystujące podstawowe harmoniczne prądów i napięć zerowych w ramach niniejszej rozprawie skupiono się wyłącznie na analizie pracy tego typu zabezpieczeń. W rozdziale 6 poświęcono także trochę miejsca wpływowi wyższych harmonicznym na zjawiska ziemnozwarciowe, jednak ze względu na znaczną złożoność tego zjawiska postanowiono nie odnosić tych wyników do pracy zabezpieczeń wykorzystujących wyższe harmoniczne.

Pierwszym z zabezpieczeń z grupy zabezpieczeń wykorzystujących wyższe harmoniczne są zabezpieczenia zerowonapięciowe. Stosuje się je jako samodzielne urządzenie montowane w rozdzielnicy jedynie do sygnalizacji zwarcia. Ponadto wykorzystuje się je jako zabezpieczenie stanowiące element rozruchowy dla innych zabezpieczeń, np. admitancyjnych. Jest to też jedyne zabezpieczenie, które zainstalowane w rozdzielnicy jest w stanie wykryć doziemienie w całej galwanicznie połączonej sieci. Niestety wykrywa jedynie fakt zaistnienia doziemienia, natomiast nie można przy pomocy analizy wartości  $U_0$  zlokalizować miejsca zwarcia. Powszechnie jako źródło sygnału dla zabezpieczenia nadnapięciowego zerowego wykorzystuje się układ otwartego trójkąta przekładników napięciowych [49 – 51]. Układ ten cechuje się niewielkimi błędami pomiarowymi, pomijalnie małym szumem pomiarowym oraz

stabilnością temperaturową uzyskanych wyników. W układzie tym wykorzystuje się trzy indukcyjne przekładniki napięciowe. Uzwojenia pierwotne są połączone w gwiazdę. W tego typu układzie punkt gwiazdowy tych uzwojeń musi być uziemiony. Uzwojenia wtórne są połączone w tzw. otwarty trójkąt (rys. 3.7). Podłączony do zacisków wyjściowych woltomierz albo przekaźnik napięciowy mierzy moduł wektorowej sumy napięć faz względem ziemi. Należy w tym miejscu pamiętać, że wartość ta (po przeliczeniu na stronę pierwotną) jest potrojoną wartością składowej zerowej napięcia  $3U_0$  (3.17) występującej w sieci zarówno w normalnym jak i awaryjnym stanie pracy.



Rys. 3.7. Układ otwartego trójkąta przekładników napięciowych. Woltomierz wskazuje napięcie różne od zera podczas doziemienia w sieci.

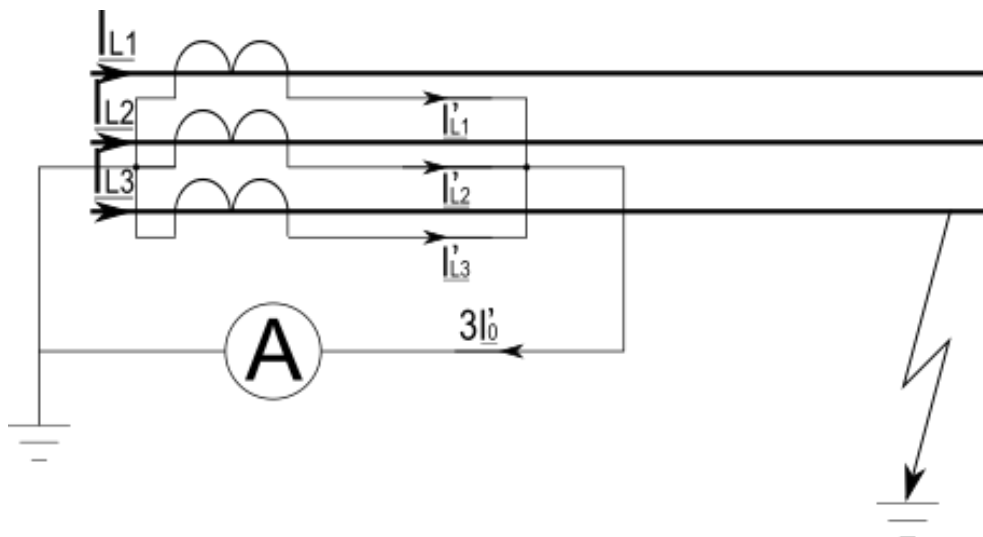
$$\underline{3U'_0} = \underline{U'_{L1}} + \underline{U'_{L2}} + \underline{U'_{L3}} \quad (3.16)$$

W obecnie stosowanych sieciach praktycznie stosuje się dwa typy układów. Takie, w których wartość  $3U'_0$  podczas doziemienia zeroworezystancyjnego (3.16) jest równa

100 V oraz takie, w których ta wartość wynosi 57,8 V. Wartość tą należy uwzględnić przy ustalaniu nastaw zabezpieczeń w sterownikach polowych.

Poza filtrami składowej zerowej napięcia w kopalnianych sieciach rozdzielnicach średnich napięć stosuje się filtry składowej zerowej prądu w postaci przekładników Ferrantiego oraz układy Holmgreena. Oba układy wraz z układem otwartego trójkąta są składowymi wszystkich typów zabezpieczeń wykorzystujących podstawowe harmoniczne prądów i napięć zerowych.

Układ Holmgreena polega na zainstalowaniu w każdej fazie przekładnika prądowego. Następnie prądy wtórne wszystkich przekładników są sumowane (rys. 3.8). W celu prawidłowego działania takiego układu istotne jest, aby wszystkie przekładniki prądowe miały identyczne parametry. W przeciwnym razie mogą pojawiać się prądy wyrównawcze zmniejszające czułość zabezpieczenia [63, 64]. Ze względu na zasadę działania i sposób montażu zazwyczaj układy Holmgreena stosuje się w stacjach rozdzielczych na szynach prądowych oraz w liniach napowietrznych. Montaż bezpośrednio na linii kablowej jest niemożliwy. W takich sytuacjach stosuje się przekładniki Ferrantiego.

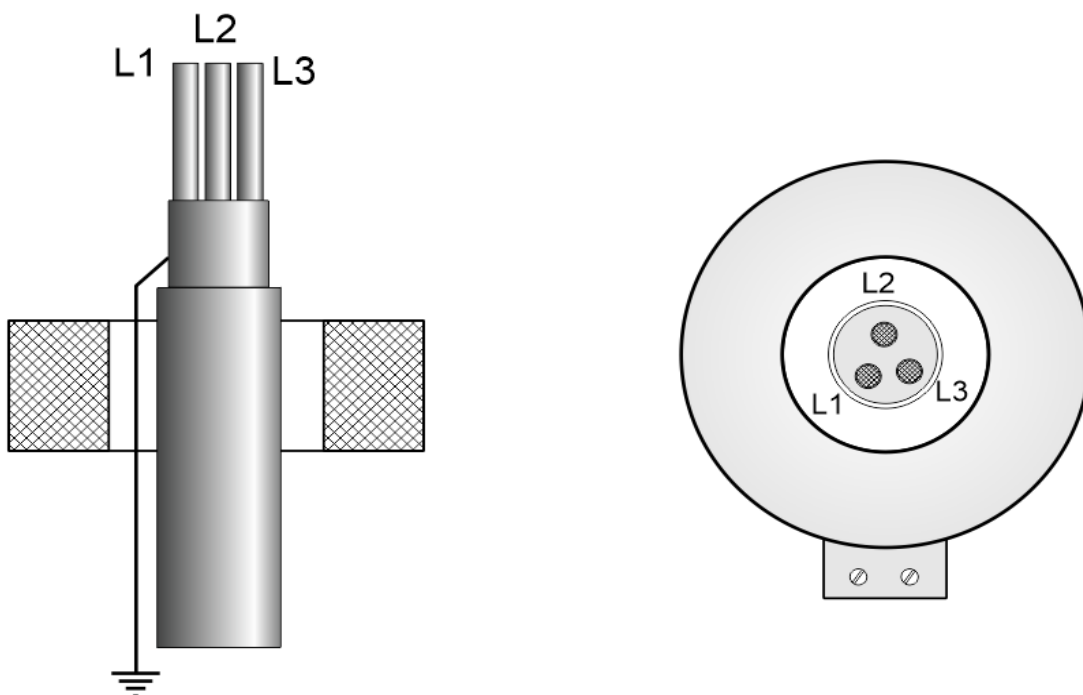


Rys. 3.8. Układ Holmgreena. Amperomierz wskazuje wartość różną od zera podczas zwarcia doziemnego.

Przekładnik Ferrantiego składa się z uzwojenia pierwotnego, którym jest kabel stanowiący odpyływ danego pola oraz uzwojenia wtórnego, które jest nawinięte na toroidalny rdzeń magnetyczny (rys. 3.9). Przy konstrukcji przekładnika Ferrantiego

z punktu widzenia automatyki zabezpieczeniowej najważniejsze są dwa aspekty [63, 64]:

- wartość minimalnego prądu zwarciovego (czasami mniejsza od 1 A) indukująca sygnał o mocy wystarczającej do spowodowania zadziałania zabezpieczenia,
- napięcie uchybowe przy obciążeniu maksymalnym obwodu pierwotnego w stanie normalnym mniejsze od napięcia wywołującego zadziałanie zabezpieczenia.



Rys. 3.9. Sposób montażu przekładnika Ferrantiego na kablu energetycznym.

Podczas montażu przekładnika Ferrantiego należy pamiętać, aby przeprowadzić przewód uziemiający ekrany kabla przez przekładnik Ferrantiego. Dzięki temu odejmowany jest strumień magnetyczny prądów płynących przez ekrany (ogólne oraz indywidualne) kabla.

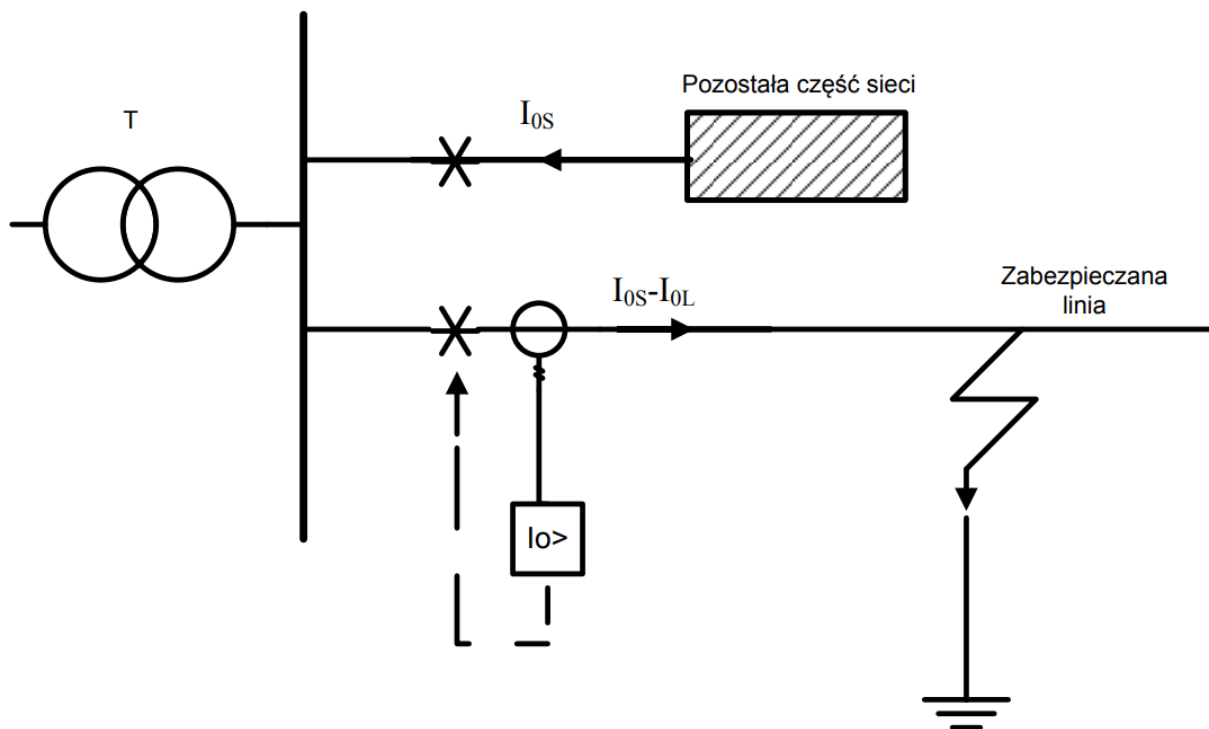
Bez względu na to, czy w sieci zastosuje się przekładnik Ferrantiego, czy też układ Holmgreena, oba te układy mierzą ten sam parametr - wartość składowej zerowej prądu w punkcie pomiaru. Należy jednak pamiętać, że analogicznie jak w przypadku składowej zerowej napięcia, układy tego typu po przeliczeniu na stronę pierwotną

w rzeczywistości mierzą potrójną wartość składowej zerowej prądu (3.17). Dlatego ważne jest, aby brać to pod uwagę przy doborze nastaw poszczególnych zabezpieczeń ziemnozwarciowych.

$$3I_0 = I_{L1} + I_{L2} + I_{L3} \quad (3.17)$$

### 3.5. Kryterium $I_0 >$

Kryterium nadprądowe zerowe opiera się na pomiarze wartości składowej zerowej prądu. Wartość tą uzyskuje się za pomocą przekładników połączonych w układ Holmgreena lub poprzez przekładnik Ferrantiego. Podczas doziemienia w zabezpieczanej linii od strony zasilania płynie prąd zerowy całej sieci ( $I_{0S}$ ) pomniejszony o prąd zerowy fragmentu zabezpieczanej linii ( $I_{0L}$ ) za miejscem zainstalowanego układu pomiarowego (rys. 3.10).



Rys. 3.10. Rozpływ prądu zerowego podczas zwarcia doziemnego w zabezpieczanej linii.

Zabezpieczenie mierzy składową zerową prądu płynącą w zabezpieczanej linii i porównuje wartość zmierzoną z wartością nastawy członu rozruchowego zabezpieczenia (3.18).

$$I_{0nast} \geq k_b I_{CLi} + \Delta I_{0\mu} \quad (3.18)$$

Po przekroczeniu wartości rozruchowej następuje po upływie określonego czasu wyłączenie zabezpieczanego obiektu. O skuteczności działania tego zabezpieczenia decyduje spełnienie warunku selektywności poprzecznej. Jeżeli warunek selektywności poprzecznej nie może być spełniony wówczas stosuje się kryterium kierunkowe. Zabezpieczenia te skupiają się na wyznaczeniu kierunku prądu zerowego na podstawie pomiaru przebiegów prądu zerowego, napięcia zerowego i kąta fazowego pomiędzy tym prądem i napięciem. Do selektywnego wykrywania doziemień wykorzystuje się fakt, że w linii uszkodzonej przebieg składowej zerowej prądu jest odwrócony w fazie w stosunku do przebiegu składowej zerowej prądu w liniach nieuszkodzonych. W praktyce rzeczywista wartość rozruchowa zabezpieczenia decydująca o jego czułości będzie opisana wzorem:

$$I_r = \frac{I_{r0}}{\cos(\varphi_0 - \varphi)} \quad (3.19)$$

gdzie:

$I_r$  – prąd zadziałania zabezpieczenia,

$I_{r0}$  – nastawiony prąd rozruchowy zabezpieczenia,

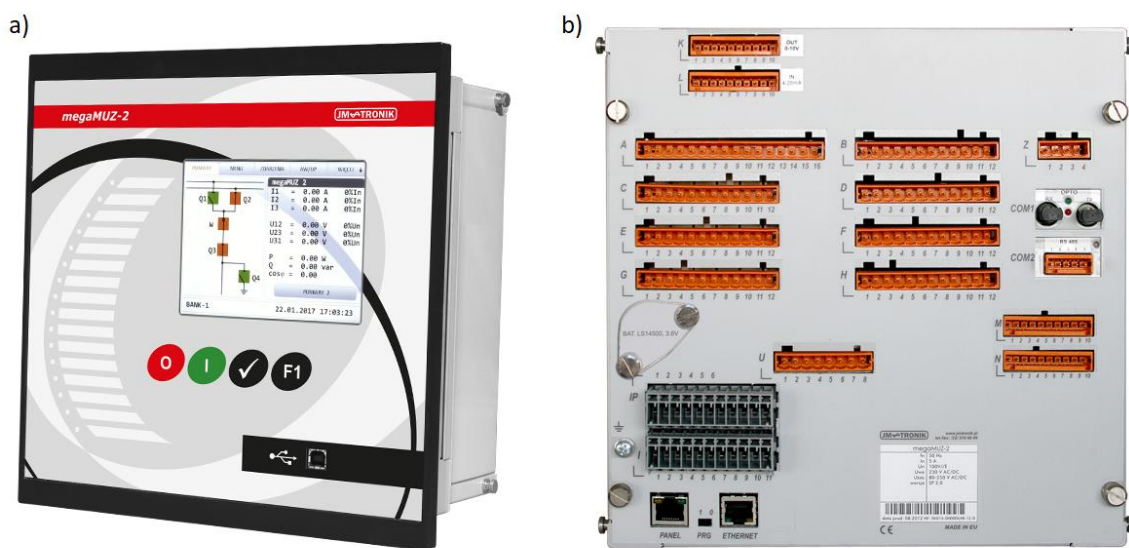
$\varphi_0$  – nastawiony kąt charakterystyczny dla rodzaju pracy punktu neutralnego sieci,

$\varphi$  – kąt przesunięcia fazowego między składową zerową napięcia oraz prądu.

### 3.6. Problemy wynikające ze stosowanych zabezpieczeń cyfrowych

Obecnie w kopalnianych sieciach stosuje się nowoczesne cyfrowe przekaźniki zabezpieczające, które wraz z połączeniem ze sterownikiem polowym, przykładowo multiMUZ czy też megaMUZ (rys. 3.11) tworzy zabezpieczenie łączące w sobie wszystkie wymienione wcześniej zabezpieczenia w zależności od ustawień użytkownika. Zabezpieczenia te rejestrują w momencie zwarcia takie przebiegi jak chwilowe wartości prądów i napięć fazowych czy też wartości chwilowe prądów i napięć zerowych. W większości przypadków zabezpieczenia te rejestrują te przebiegi z częstotliwością próbkowania 1,6 kHz lub 2 kHz [65 – 68].

Taka częstotliwość próbkowania tworzy 32 próbki na okres. Z punktu widzenia stworzenia lepszego modelu sieci do analizy zwarć doziemnych taka rozdzielczość może być niewystarczająca. W czasie pierwszego okresu po pojawieniu się zwarcia zachodzą różne zjawiska zwarciove o dużej dynamice, które w tym przedziale czasowym mają dużo wyższe harmoniczne i istnieje duże prawdopodobieństwo niezarejestrowania tych zjawisk.



Rys. 3.11. Sterownik polowy megaMUZ-2 [68].

Błędna interpretacja wyników z powodu zjawiska aliasingu może skutkować błędami przy tworzeniu modelu symulacyjnego. Dlatego przy tworzeniu modelu posiłkowano się także wynikami powstałymi w stanie ustalonym, obliczonymi wartościami skutecznymi oraz danymi literaturowymi. Wyjątkowo przydatne były dane do obliczenia parametrów zastępczych kabli i przewodów oponowych przy tworzeniu modelu [39].

### 3.7. Analiza poprawności działania przekładników Ferrantiego

Przekładniki Ferrantiego są istotnym elementem większości typów i rodzajów zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Są umieszczane na każdej linii odpywowej, stąd nawet w najprostszej galwanicznie połączonej sieci SN może być ich nawet



kilkadziesiąt. Dlatego też istotne z punktu widzenia niniejszej pracy jest określenie prawidłowości działania tego typu przekładników.

Główna składowa prądu ziemnozwarciowego ma znamionową częstotliwość sieciową (50 Hz), ale występują tu również istotne składowe przejściowe o częstotliwościach określonych przez pojemność i indukcyjność uszkodzonej sieci. Zanikają szybko, ale mogą pojawiać się powtarzalnie, szczególnie w przypadku zwarć o skokowo zmiennej rezystancji. Te składowe przejściowe prądu doziemnego mogą mieć częstotliwość (w zależności od parametrów sieci) w zakresie od kilkuset do kilku tysięcy herców [69]. Mogą również wystąpić stany nieustalone o częstotliwości znacznie niższej niż znamionowa częstotliwość sieciowa – m.in. 25 Hz lub nawet kilka Hz, w wyniku oscylacji pozazwarciowych wywołanych ferrezonansami [70] związanym z nieliniową indukcyjnością przekładników napięciowych wprowadzonych do sieci. Przekładniki Ferrantiego są podstawowymi czujnikami generującymi sygnały wejściowe dla przekaźników ziemnozwarciowych. W literaturze temat analizy charakterystyk częstotliwościowych różnych typów przekładników prądowych był wielokrotnie poruszany m.in. [71 – 73], jednak do tej pory nie przeprowadzono takich testów dla przekładników składowej zerowej prądu. Specyficzna konstrukcja tego transformatora oparta na sumowaniu strumieni magnetycznych generowanych przez poszczególne prądy fazowe wymaga odrębnych badań eksperymentalnych. Odpowiedź częstotliwościowa przekładników prądowych składowej zerowej może nie mieć znaczenia w przypadku starych (i dość powolnych) zabezpieczeń elektromechanicznych, ale może być bardzo ważna w przypadku nowoczesnych i szybkich zabezpieczeń elektronicznych i cyfrowych – mogą one wykorzystywać przebiegi przejściowe w celu zwiększenia selektywności poprzecznej i czułości ich algorytmów wykrywania i eliminacji zakłóceń. Błędy amplitudowe mogą być bardzo istotne nawet w przypadku prostego zabezpieczenia nadprądowego, a błędy fazowe mogą mieć znaczenie w przypadku przekaźników kierunkowych oraz w przypadku bardziej złożonych algorytmów zabezpieczeniowych, przykładowo przy obliczaniu  $Y_0$ .

W ramach weryfikacji prawidłowości działania przekładników Ferrantiego przeprowadzono pomiary zgodnie z deklaracjami producenta przekładników: IO1s oraz IO-100-N [74 – 75]. Są to dwa najczęściej stosowane typy przekładników w polskich kopalniach węgla.

Przekładnik IO-100-N przeznaczony jest do zakładania na pojedynczy kabel trójżyłowy o maksymalnej zewnętrznej średnicy kabla 100 mm. Może on współpracować z zabezpieczeniami ziemnozwarciowymi, których obwody wejściowe posiadają impedancję obciążenia nie większą od 2 Ω [75]. Badany przekładnik posiada znamionową przekładnię prądową równą 100. W niniejszej pracy przyjęto, że znamionowa przekładnia prądowa  $K_n$  (3.20) jest ilorazem znamionowego prądu strony pierwotnej przekładnika  $I_{pn}$  do znamionowego prądu strony wtórnej  $I_{sn}$ .

$$K_n = \frac{I_{pn}}{I_{sn}} \quad (3.20)$$

W tabeli 3.1 porównano maksymalny deklarowany przez producenta względny błąd prądowy przekładni  $\Delta I$  (3.21) [74, 75] do zmierzonego w sposób laboratoryjny dla wybranych prądów strony pierwotnej. Porównanie wartości z danymi deklarowanymi przez producenta miało na celu sprawdzenie czy dalsze badania będą przeprowadzone na sprawnym egzemplarzu. Ze względu na ograniczenia sprzętowe ograniczono wartość prądu pierwotnego do 20 A przy częstotliwości 50 Hz. Pomiary wykonano dla dwóch różnych rezystancji obciążenia: 1 Ω oraz 2 Ω, odpowiadające kolejno 50% oraz 100% maksymalnej dopuszczalnej impedancji obwodów wejściowych zabezpieczeń ziemnozwarciowych, które można podłączyć do tego zabezpieczenia. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów i otrzymanych wyników można wnioskować, że dla częstotliwości znamionowej przekładnik działa prawidłowo, ponieważ niezależnie od wartości prądu pierwotnego  $I_p$  oraz rezystancji obciążenia błąd prądowy rzeczywisty był mniejszy od deklarowanego przez producenta.

$$\Delta I = \frac{(K_n \cdot I_s - I_p) \cdot 100\%}{I_p} \quad (3.21)$$

Tabela 3.1. Porównanie błędu prądowego rzeczywistego z deklarowanym przez producenta przekładnika IO-100-N dla wybranych prądów pierwotnych

l.p.	$I_p$ , A	$I_s$ , mA	$\Delta I$ , %	
			rzeczywisty	deklarowany
<b><math>R_{obc} = 1 \Omega</math></b>				
1	1	10,43	4,3	4,5
2	5	51,14	2,3	2,5
3	10	102,1	2,1	2,5
4	15	153,1	2,1	2,5
5	20	203,8	1,9	2,5
<b><math>R_{obc} = 2 \Omega</math></b>				
6	1	10,57	5,7	8
7	5	51,22	2,4	2,5
8	10	102,3	2,3	2,5
9	15	153,4	2,3	2,5
10	20	204,2	2,1	2,5

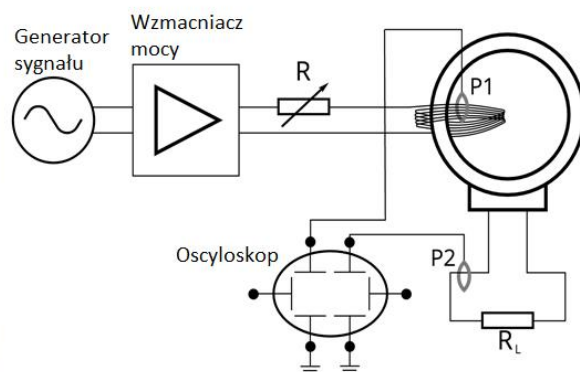
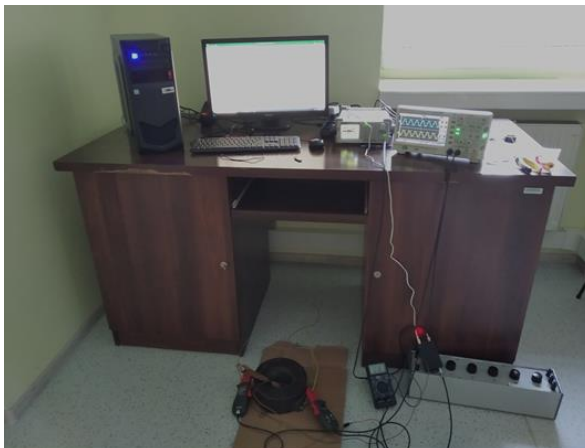
Analogicznego sprawdzenia dokonano dla przekładnika IO1s. Jednak w tym przypadku zgodnie z zaleceniami producenta [75] zmierzono wartość prądu strony wtórnej przy dodatkowym obciążeniu jej rezystorem 3,5  $\Omega$ . Wyniki pomiarów zamieszczono w tabeli 3.2. Sprawdzenie polegało na określeniu czy przy danym prądzie pierwotnym  $I_p$  prąd wtórny  $I_s$  mieści się pomiędzy minimalnym  $I_{smin}$  a maksymalnym  $I_{smax}$  prądem wtórnym deklarowanym przez producenta. W tym przypadku także można przyjąć, że dany przekładnik działa prawidłowo.

Tabela 3.2. Sprawdzenie poprawności działania przekładnika IO1s zgodnie z zaleceniami producenta.

L.p.	$I_p$ , A	$I_s$ , mA	$I_{smin}$ , mA	$I_{smax}$ , mA
1	1	7,86	7,12	8,20
2	3	23,83	21,65	24,90
3	5	39,84	36,80	42,35
4	8	64,12	58,90	67,75

Po określeniu braku nieprawidłowości w analizowanych układach Ferrantiego pracujących przy częstotliwości znamionowej postanowiono określić ich wpływ częstotliwości sygnału na błąd prądowy oraz błąd kątowy obu przekładni. Układ pomiarowy składał się ze źródła prądu przemiennego w postaci generatora funkcyjnego SDG1025 [76] i dwukanałowego oscyloskopu cyfrowego mierzącego przebiegi prądu po stronie pierwotnej oraz wtórnej. Sygnał wyjściowy z generatora

przebiegów był wzmacniany przez wzmacniacz mocy FPA301-20W [77]. Ponieważ istniało ryzyko uszkodzenia wyjścia wzmacniacza z powodu zwarcia, podłączono dodatkowy rezystor (ustawiony na  $1 \Omega$ ) do obwodu zasilania. W celu zwiększenia dokładności pomiarów po stronie pierwotnej, kabel wielokrotnie nawijano na cewce pomiarowej w celu uzyskania całkowitego prądu 5 A (rys. 3.12). Przed przystąpieniem do właściwych pomiarów sprawdzono wpływ metody nawijania kabla na wyniki pomiarów. Okazało się, że w przypadku tego typu przekładników prądowych sposób nawijania przewodów nie ma znaczącego wpływu na wyniki. Oba prądy mierzono sondami prądowymi. Przebiegi prezentowane były na wyświetlaczu oscyloskopu. Zarejestrowane przebiegi sinusoidalne dla wybranych częstotliwości z zakresu od 0,1 Hz do 100 kHz zostały zapisane w pliku tekstowym. Po kilku wstępnych pomiarach stwierdzono, że optymalnym rozwiązaniem będzie rejestracja od 7 do 28 tys. próbek na okres (w zależności od częstotliwości).



*Rys. 3.12. Zdjęcie (z lewej) oraz schemat (z prawej) stanowiska pomiarowego do badania wpływu częstotliwości prądu pierwotnego na błąd prądowy i kątowy przekładnika Ferrantiego.*

Istotą prawidłowego wyznaczenia błędów względnych przekładnika prądowego jest odpowiedni dobór metody wyznaczania wartości bieżących adekwatnie do zarejestrowanych danych surowych. Metoda przetworzenia danych może mieć wpływ na uzyskiwane wyniki i ich późniejszą interpretację. Pierwsza metoda wykorzystuje bezpośrednio definicje wartości średniej  $I_{DC}$  i wartości skutecznej prądu  $I_{RMS}$  (gdzie  $k$  jest dowolną liczbą całkowitą):

$$I_{DC} = \frac{1}{kT} \int_t^{t+kT} i_x(t) dt \quad (3.22)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{kT} \int_t^{t+kT} i_x^2(t) dt} \quad (3.23)$$

Przedstawione powyżej równania mają sens fizyczny tylko dla sygnałów ciągłych. W przypadku przebiegów ciągłych, ale rejestrowanych w sposób dyskretny powyższe wzory można aproksymować do następujących postaci:

$$I_{DC} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n i_k \quad (3.24)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n i_k^2} \quad (3.25)$$

W powyższych równaniach przyjęto, że  $n$  to liczba próbek dwóch pełnych okresów. Do dalszych rozważań przyjęto, że przebiegi składają się z jednej harmonicznnej i składowej stałej. W tym przypadku wartość skuteczną pierwszej harmonicznnej można obliczyć z zależności:

$$I_{1h} = \sqrt{I_{RMS}^2 - I_{DC}^2} \quad (3.26)$$

Na podstawie powyższych informacji ogólne równanie sinusoidalne dla zarejestrowanego przebiegu prądu można zapisać korzystając ze wzoru (3.27) pamiętając o tym, że ta zależność jest prawdziwa zarówno dla prądu pierwotnego jak i wtórnego przekładnika Ferrantiego.

$$i_x(t) = I_{1h} \sqrt{2} \sin(\omega t + \phi) + I_{DC} \quad (3.27)$$

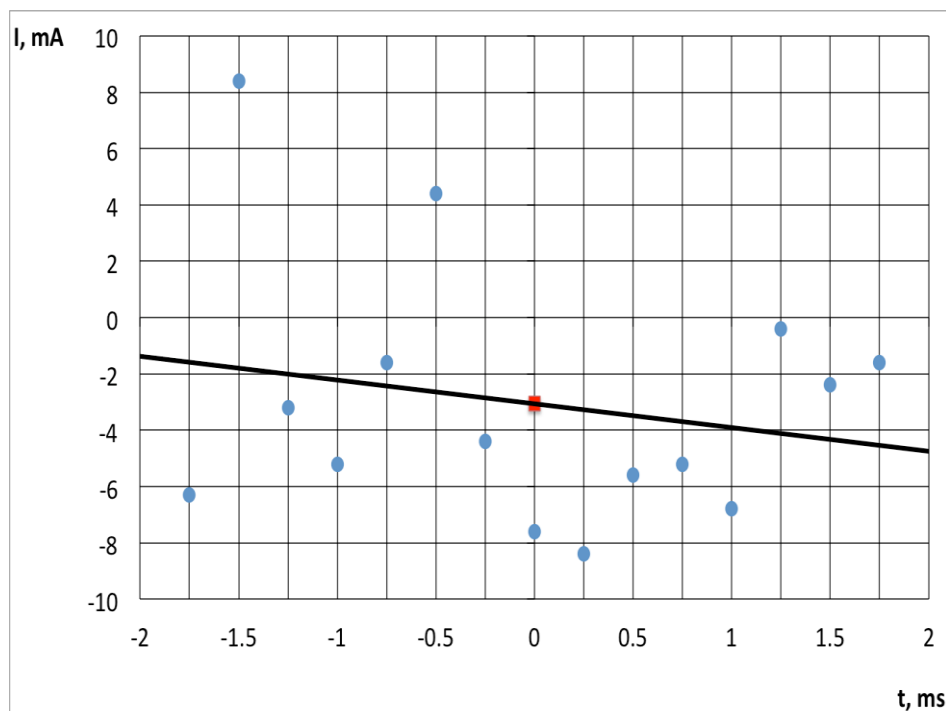
Do określenia przesunięcia fazowego pomiędzy zarejestrowanymi przebiegami potrzebna jest jeszcze jedna informacja. Stosunkowo prosta do wyznaczenia jest chwilowa wartość prądu w chwili  $t = 0$ . Ale w analizowanych sytuacjach ważne jest, aby wyeliminować lub zminimalizować wpływ szumów. W tym celu przyjmuje się, że  $i_x(0)$  jest średnią arytmetyczną próbki dla czasu  $t = 0$  ( $i_j$ ) oraz siedmiu poprzednich i siedmiu kolejnych próbek (3.28). Przykład takiego obliczenia przedstawiono na rys. 3.13.

$$i_x(0) = \frac{i_j + \sum_{k=1}^7 (i_{j-k} + i_{j+k})}{15} \quad (3.28)$$

Przy tak małej liczbie próbek fragment przebiegu sinusoidalnego w tym zakresie można aproksymować linią prostą. Dla czasu  $t = 0$  zależność wt wynosi 0. Dlatego wartość przesunięcia fazowego można obliczyć korzystając ze wzoru (3.29).

$$\phi = \arcsin \frac{i_x(0) - I_{DC}}{I_{1h}\sqrt{2}} \quad (3.29)$$

Powyższa metoda wyznaczenia parametrów niezbędnych do wyznaczenia błędów względnych przekładni przekładnika Ferrantiego jest bardzo dobra pod warunkiem braku wyższych harmonicznych lub gdy takowe stanowią nie więcej niż kilka procent wartości pierwszej harmonicznej. W ramach niniejszych badań nie wykazano znacznych obecności wyższych harmonicznych.



Rys. 3.13. Przykład wyznaczenia wartości  $i_x(0)$ .

Istnieje alternatywna, lecz bardziej czasochłonna i wymagająca obliczeniowo metoda, polegająca na dopasowaniu zarejestrowanych przebiegów, zarówno pierwotnych, jak i wtórnych, do równania sinusoidalnego przy użyciu metody najmniejszych kwadratów. Kryterium dopasowania uwzględnia amplitudę, składową stałą i przesunięcie fazowe. Wyniki uzyskane obiema metodami zostały porównane,

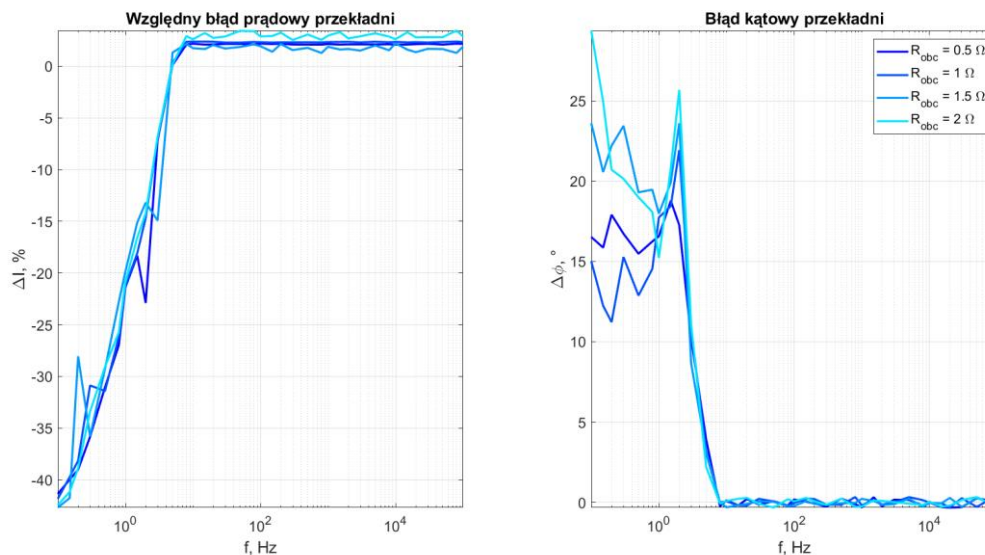
a niemal identyczne wyniki uzyskano dla zakresu częstotliwości od 1 Hz do 100 kHz. Jednak przy niższych częstotliwościach zauważono pewne rozbieżności. Okazało się, że względny błąd prądowy w skrajnych przypadkach był o 20% wyższy w przypadku metody najmniejszych kwadratów niż w przypadku metody całkowej, a błąd kątowy był o 23% wyższy. W związku z tym, wyniki otrzymane metodą najmniejszych kwadratów zostały przyjęte do dalszej analizy jako bardziej pesymistyczne. Należy jednak podkreślić, że ta metoda jest bardziej pracochłonna i czasochłonna, ale może być przydatna w sytuacjach wymagających większej dokładności.

Ponieważ prąd pierwotny nie był zależny od ani od parametrów obciążenia ani od transformatora, a generator przebiegów wraz ze wzmacniaczem wyjściowym charakteryzują się bardzo dużą dokładnością, niepewność obliczenia wartości prądu metodą najmniejszych kwadratów wynosiła poniżej 1%.

W przypadku prądu po stronie wtórnej odnotowano szumy, silnie zależne od częstotliwości prądu po stronie pierwotnej. Dla prądów o częstotliwościach wyższych niż 5 Hz szum był praktycznie niezauważalny, natomiast w zakresie 0,1 do 5 Hz szumy zniekształcały przebieg sinusoidalny. Jednak w dalszym ciągu możliwe było wyznaczenie wszystkich parametrów prądu wtórnego. Obliczone błędy kątowe oraz względne błędy prądowe dla obu przekładników przedstawiono na rys. 3.14 oraz 3.15. Względny błąd prądowy obliczano każdorazowo ze wzoru (3.21), natomiast jako wartość błędu kątowego przyjęto różnicę między wektorami prądów pierwotnego i wtórnego. Błąd kątowy uznano za dodatni, jeżeli wektor prądu po stronie wtórnej wyprzedza wektor prądu po stronie pierwotnej.

Jak pokazano na powyższych charakterystykach przekładnia prądowa oraz kątowa tych przekładników Ferrantiego powyżej 5 Hz jest w przybliżeniu stała. Odchylenia w tym zakresie mogą być spowodowane błędem próbkowania oscyloskopu oraz doбором metody analizy danych roboczych. Jednak przy niższych częstotliwościach znacznie zwiększają się wartości błędów prądowych i kątowych.

Wartość rezystancji obciążenia w zakresie do 2  $\Omega$  nie wpływa w znaczący sposób na błąd prądowy przekładni. Przy bardzo niskich częstotliwościach (poniżej 1 Hz) wartość rezystancji obciążenia ma wpływ na błąd kątowy przekładnika IO-100-N.



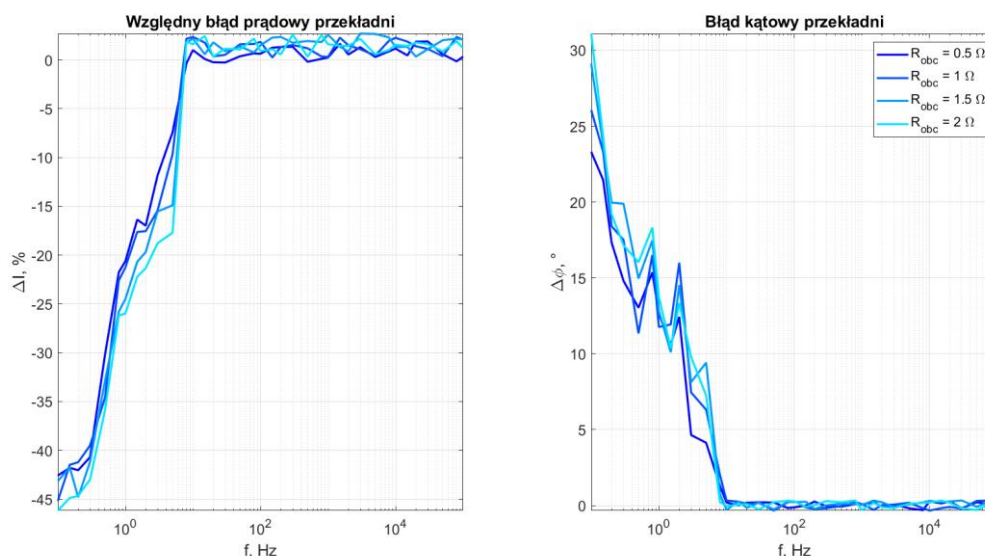
Rys. 3.14. Wpływ częstotliwości na względny błąd prądowy oraz błąd kątowy przekładnika Ferrantiego typu IO-100-N dla wybranych wartości rezystancji obciążenia z zakresu od 0,5 do 2  $\Omega$ .

Przesunięcie fazowe między prądem wtórnym a pierwotnym powyżej 5 Hz utrzymuje się na poziomie około  $0^\circ$ . Poniżej tej wartości kąt przesunięcia fazowego osiąga wartości dodatnie. Można zauważyć ogólną tendencję do wzrostu błędu kąтового wraz ze spadkiem częstotliwości.

Z przeprowadzonych badań wynika, że przekładniki Ferrantiego stosowane w przemyśle wydobywczym są skutecznym narzędziem do pomiaru składowych zerowych prądu zwarciovego o częstotliwościach powyżej 10 Hz, w tym dla częstotliwości sieciowej 50 Hz. W normalnych warunkach eksploatacyjnych błędy przekładników są znikome. Jednakże w zakresie niskich częstotliwości, zwłaszcza w tych poniżej 1 Hz, obwód magnetyczny może ulec nasyceniu, co utrudnia dokładny pomiar prądu. Analizowane błędy są w dużej mierze niewrażliwe na impedancję obciążenia obwodu wtórnego. Zatem, przekładniki Ferrantiego są bardzo dobrym narzędziem do pomiaru składowych zerowych prądu zwarciovego o częstotliwościach



powyżej 10 Hz w górnictwie, jednakże w przypadku niskich częstotliwości (poniżej 1 Hz) powinno się zastosować inne metody pomiarowe.



Rys. 3.15. Wpływ częstotliwości na względny błąd prądowy oraz błąd kątowy przekładnika Ferrantiego typu IO1s dla wybranych wartości rezystancji obciążenia z zakresu od 0,5 do 2 Ω.

Podsumowując, sygnały otrzymane z zabezpieczeń zerowoprądowych wykorzystujące przekładniki Ferrantiego są miarodajne w analizowanym zakresie. Główną przyczyną ewentualnego błędu w pomiarach może być błąd ludzki, np. poprzez błędne wpisanie przekładni przekładnika prądowego do sterownika polowego archiwizującego dane zarejestrowane z omawianych przekaźników. W procesie analizy wyników otrzymanych z kopalń w dalszej części niniejszej rozprawy, została przeprowadzona weryfikacja możliwości popełnienia takiego błędu. W trakcie przeprowadzonych badań i kontroli nie stwierdzono żadnych nieprawidłowości, co wskazuje na prawidłowe funkcjonowanie zabezpieczeń.

## 4. Metodyka prowadzonych badań

### 4.1. Wybór programu symulacyjnego

Jednym z ważniejszych elementów niniejszej pracy jest dobór numerycznego modelu symulacyjnego sieci niezbędnego do dalszej analizy. W tym celu należy dobrać środowisko programistyczne umożliwiające wykonanie szeregu różnych czynności pomiarowo-symulacyjnych. Jednym z głównych czynników przy wyborze programu był fakt wielokrotnej i wszechstronnej weryfikacji wyników symulacji programów z rodziny EMTP z danymi pomiarowymi [44 – 46, 55, 78, 79] w ostatnich trzech dekadach. Ze względu na złożoność kopalnianych sieci rozdzielczych w wyborze programu symulacyjnego uwzględniono następujące kryteria:

- możliwość zamodelowania rozległej sieci elektroenergetycznej składającej się z dużej liczby węzłów i gałęzi;
- szeroki wybór modeli linii kablowych;
- możliwość zastosowania jednocześnie wielu źródeł napięciowych jednocześnie oraz źródeł zawierających wyższe harmoniczne;
- możliwość zapisu wyników w postaci, która umożliwia ich analizę w zewnętrznych programach obliczeniowych, typu MATLAB czy też Microsoft Excel.

ATP-EMTP to środowisko symulacyjne, które zostało wybrane ze względu na wiele korzyści, jakie oferuje. Jednym z głównych powodów wyboru tego programu jest szeroka społeczność programistów i użytkowników zrzeszona wokół tego programu [80], co umożliwia ewentualne konsultacje nad otrzymanymi wynikami z szeroką społecznością międzynarodową. To oznacza, że użytkownik programu ATP-EMTP może liczyć na wsparcie i pomoc w rozwiązywaniu problemów związanych z jego zastosowaniem.

Najważniejszym argumentem przemawiającym za wyborem środowiska ATP-EMTP jest jego zdolność do modelowania sieci elektroenergetycznych składających się z dużej liczby węzłów i gałęzi. Program ten posiada także wiele wbudowanych modeli

linii kablowych (Noda, jMarti, Π), co pozwala na wybór najbardziej odpowiedniego modelu do danego zadania. ATP-EMTP daje również możliwość zastosowania wielu źródeł napięciowych jednocześnie oraz źródeł składających się z wyższych harmonicznych.

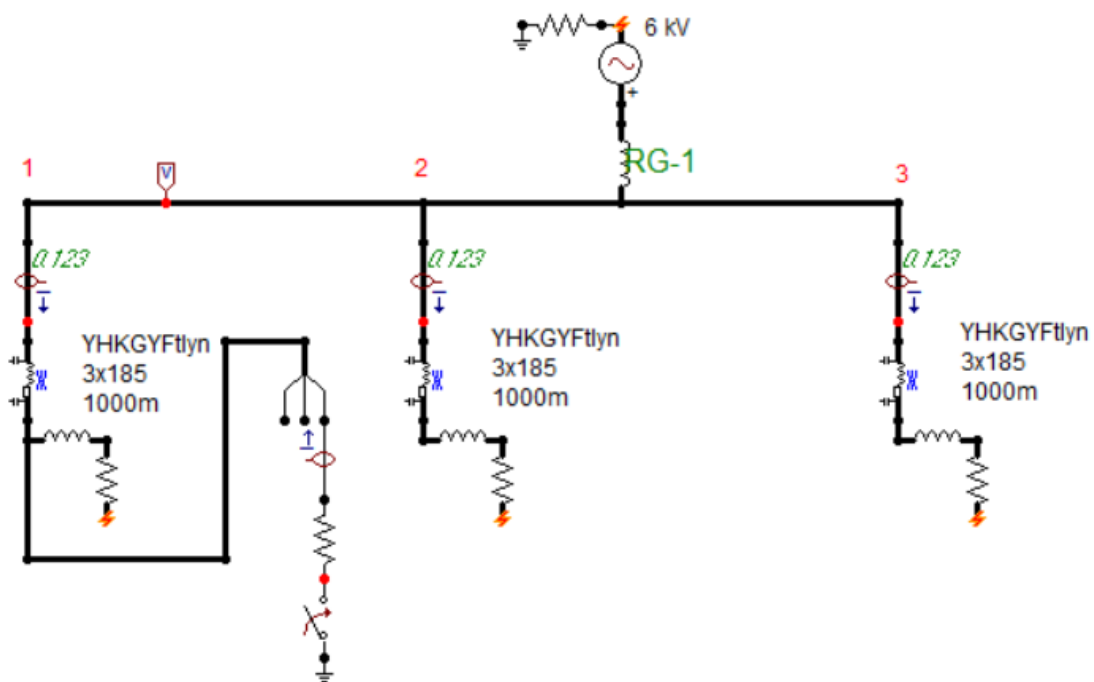
Maksymalne parametry analizowanej sieci (liczba węzłów – 6 000, liczba gałęzi – 10 000, liczba źródeł – 900) są wystarczające do odtworzenia kopalnianej sieci średnich napięć. ATP-EMTP umożliwia również obliczenie parametrów linii na podstawie danych geometrycznych i materiałowych, co jest szczególnie przydatne w przypadku złożonych sieci.

Warto również zwrócić uwagę na łatwość korzystania z całego środowiska ATP-EMTP. Podstawowym narzędziem do tworzenia i edycji danych wejściowych jest edytor tekstowy, a dodatkowo program ATPDRAW umożliwia graficzną edycję danych wejściowych. Po utworzeniu modelu sieci i wprowadzeniu danych wejściowych program zapisuje je z rozszerzeniem \*.dat lub .atp. Główna część pakietu (program TPBIGx.EXE) jest uruchamiana w oknie poleceń DOS. Jej celem jest przetworzenie danych wejściowych (.dat lub \*.atp) i wykonanie obliczeń symulacyjnych. Wyniki symulacji zapisywane są w formacie \*.pl4 i mogą być łatwo analizowane w wbudowanym programie PLOTXY. Ponadto ATP-EMTP udostępnia program PL4TOMAT, który umożliwia przekonwertowanie wyników z formatu \*.pl4 do formatu \*.mat. Format ten umożliwia odczytanie wyników symulacji przez program MATLAB, który ma znacznie szersze możliwości analizy wyników niż wbudowany program PLOTXY. Warto zaznaczyć, że ATP-EMTP jest jednym z najbardziej popularnych programów do symulacji elektroenergetycznych systemów zasilania, a jego rozwój jest nadal aktywny. Pakiet ten znalazł zastosowanie w wielu dziedzinach elektrotechniki, w tym w badaniach i projektach związanych z energetyką, przemysłem, nauką i edukacją. Jego popularność wynika między innymi z dostępności szerokiej bazy wiedzy na temat programu, w tym dokumentacji, poradników, artykułów naukowych i forów internetowych, które umożliwiają szybkie rozwiązywanie problemów i dzielenie się doświadczeniami między użytkownikami. Ponadto, ATP-EMTP jest zgodny

z normami międzynarodowymi i standardami branżowymi, co czyni go narzędziem niezbędnym w projektowaniu i analizie systemów elektroenergetycznych [78, 79].

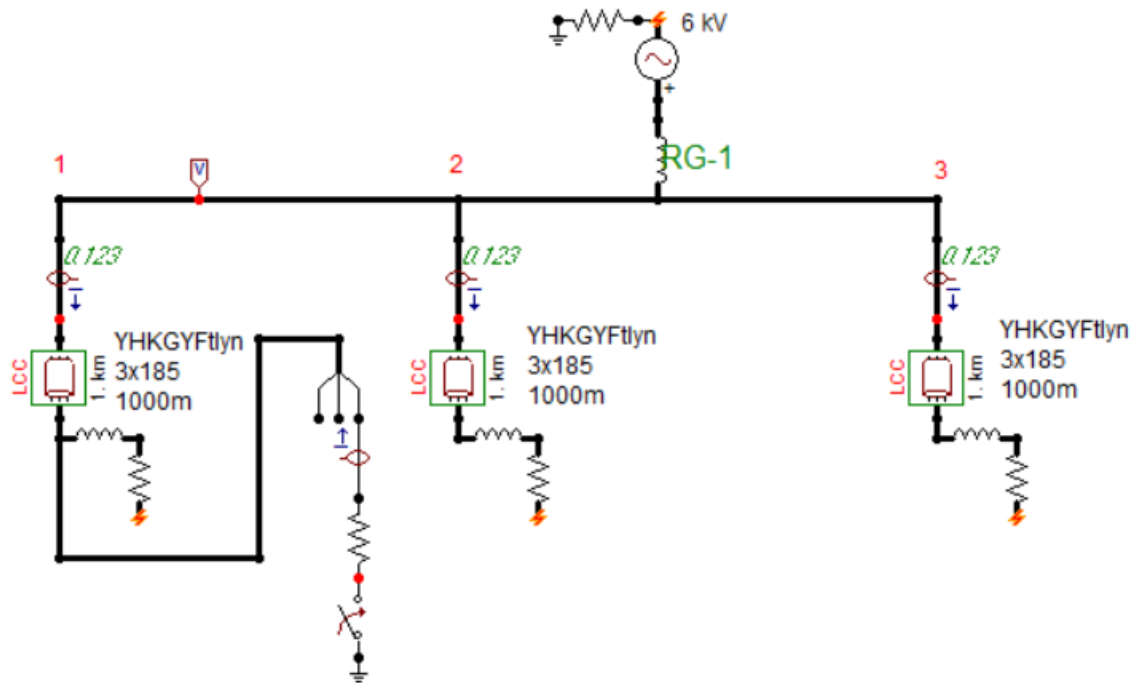
#### 4.2. Dobór modelu linii kablowej

Przy analizie sieci elektroenergetycznych, jednym z najważniejszych elementów jest dobór odpowiedniej struktury i parametrów modelu linii kablowej. W poprzednim rozdziale, przedstawione zostały najważniejsze modele linii kablowych. Jednak przed przystąpieniem do analizy wybranych zarejestrowanych przypadków rzeczywistych, ważny jest dobór odpowiedniego modelu linii kablowej. W tym celu przeprowadzono porównanie praktycznej aplikacji dwóch modeli, które uwzględniają parametry poprzeczne linii kablowej: model  $\Pi$  oraz model zCable zaproponowany przez J. Martiego. Oba modele są dostępne jako gotowe moduły w programie ATP-EMTP.



Rys. 4.1. Model prostej sieci z izolowanym punktem neutralnym magistralnej jednostronnie zasilanej 6 kV. Przykład modelu  $\Pi$  zasymulowanego w programie ATP-EMTP dla doziemienia metalicznego występującego na końcu pola nr 1. Długość każdego odpyły w prezentowanym przykładzie wynosi 1000 m.

W celu przeprowadzenia porównania, stworzono model prostej sieci elektroenergetycznej 6 kV z wykorzystaniem obu modeli numerycznych (rys. 4.1 i 4.2). Następnie uzyskane wyniki porównano z powszechną wiedzą na temat doziemień [49 – 60].

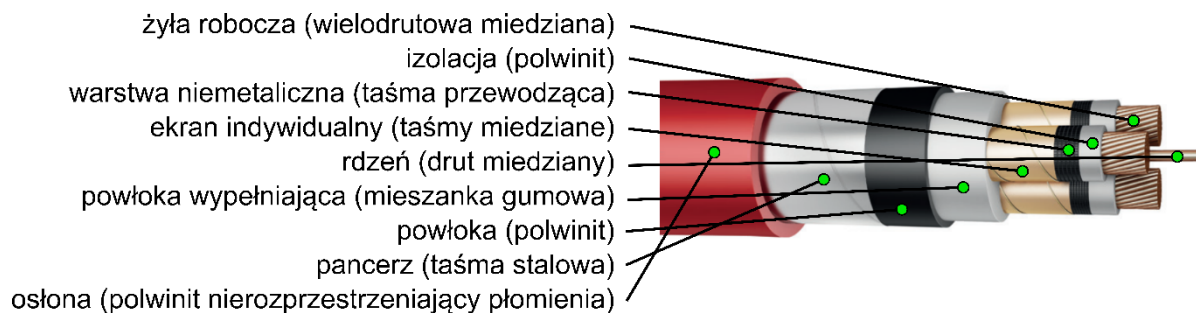


Rys. 4.2. Model prostej sieci z izolowanym punktem neutralnym magistralnej jednostronnie zasilanej 6 kV. Przykład modelu zCable zasymulowanego w programie ATP-EMTP dla doziemienia metalicznego występującego na końcu pola nr 1. Długość każdego odpływu w prezentowanym przykładzie wynosi 1000 m.

Zaproponowany model składa się z jednego źródła w postaci transformatora zasilającego analizowaną sieć, rozdzielnicę główną RG oraz trzech odpływów będących kablami typu YHKGYFtlyn 3x185 mm<sup>2</sup> o równej długości (rys. 4.3) [39, 81]. Przyjęty do celów symulacyjnych kabel jest kablem elektroenergetycznym górniczym z żyłami miedzianymi w ekranie indywidualnym o polu promieniowym, o izolacji polwinitowej, w powłoce polwinitowej opancerzony taśmami stalowymi lakierowanymi, o osłonie polwinitowej nierozprzestrzeniającej płomienia. Jednostkowy prąd ziemnozwarciowy tego kabla wynosi 2,83 A/km.

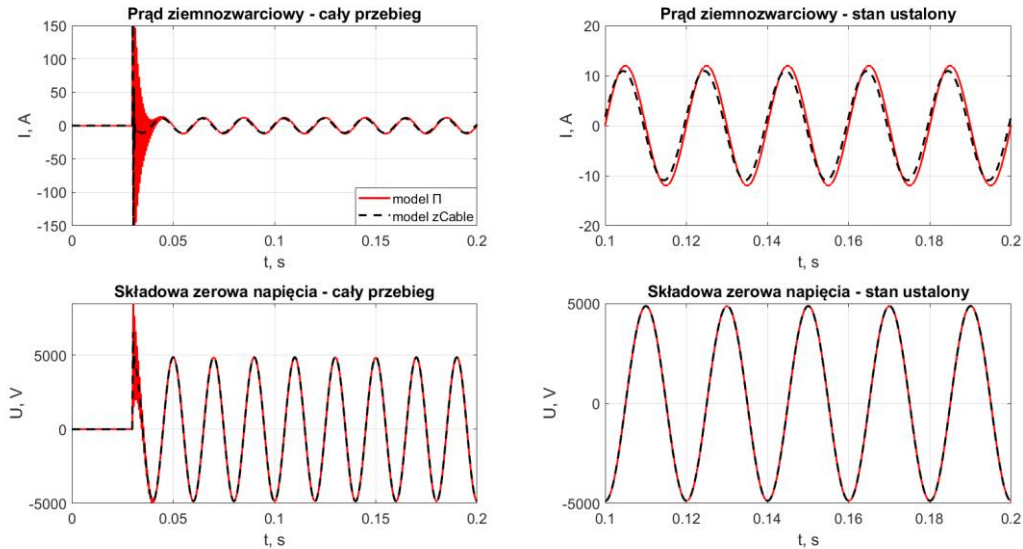
Doziemienie o niskiej rezystancji wprowadzono na końcu jednej z tych linii (pole nr 1). Porównanie przeprowadzono dla trzech sytuacji:

- trzy kable o długości 1000 m każdy – prąd ziemnozwarciowy całej sieci wyniósł 8,79 A (przypadek nr 1),
- trzy kable o długości 350 m każdy – prąd ziemnozwarciowy całej sieci wyniósł 3,08 A (przypadek nr 2),
- trzy kable o długości 100 m każdy – prąd ziemnozwarciowy całej sieci wyniósł 0,88 A (przypadek nr 3).



Rys. 4.3. Budowa elektroenergetycznego kabla górniczego YHKGYFtlyn 3.6/6 kV.

W przyjętym modelu przyjęto, że zwarcie nastąpiło w chwili  $t = 300$  ms od rozpoczęcia czasu symulacji. W powyższej symulacji jak i w każdej późniejszej w ramach niniejszej pracy przyjęto, że każde wywołane zwarcie następowało w momencie, w którym wartość chwilowa napięcia fazowego uszkodzonej linii osiąga lokalne ekstremum. Co prawda chwila zwarcia nie wpływa na wartość ustaloną prądu doziemnego, jednak na przebieg jego przebieg w stanie nieustalonym już tak. Wynika to z faktu, iż w momencie, gdy wartość napięcia osiąga maksimum, różnica potencjałów pomiędzy żyłą roboczą a uziemieniem (w postaci np. ekranów ochronnych) jest największa, co sprzyja powstaniu uszkodzenia izolacji, a w efekcie zwarcia. Należy jednak zaznaczyć, że wystąpienie zwarcia w chwili maksymalnej wartości napięcia nie jest regułą, a jedynie tendencją. W praktyce, powstanie zwarcia może zależeć od wielu czynników, takich jak właściwości materiałowe przewodów, parametry napięcia, wartości prądów, a także sposobu połączenia przewodów. Zestawienie wyników symulacji dla przypadku pierwszego (trzy odpływy o długości 1000 m każdy) przedstawiono na rys. 4.4. Ponadto porównano wartości prądów ziemnozwarciowych w tabeli 4.1.



Rys. 4.4. Przebiegi prądu ziemnozwarciowego oraz składowej zerowej napięcia dla modeli przedstawionych na rys. 4.1 i 4.2. Cały przebieg oraz stan ustalony.

Różnica pomiędzy prądem ziemnozwarciowym obliczeniowym a zamodelowanym wynika z faktu nieuwzględniania parametrów poprzecznych i podłużnych linii w obliczeniach. Uwzględniania jest jedynie pojemność doziemną izolacji żył roboczych. Pominięte parametry mają jednak wpływ na wartość skuteczną doziemienia. Przykładowo rezystancja żył roboczych zwiększa impedancję całej sieci widzianej z punktu widzenia miejsca zwarcia, w efekcie czego nieznacznie obniża prąd ziemnozwarciowy.

Tabela 4.1. Porównanie wyników symulacyjnych z obliczeniowymi dla sieci 6 kV z izolowanym punktem neutralnym magistralnej trzyodpływowej jednostronnie zasilanej o takich samych kablach i tych samych długościach odpływów

	Długość każdego z odpływów, m	Prąd ziemnozwarciowy, A		
		Obliczeniowy	Model $\Pi$	Model zCable
Przypadek nr 1	1000	8,79	8,52	8,17
Przypadek nr 2	350	3,08	2,93	-
Przypadek nr 3	100	0,88	0,81	-

Wyniki uzyskane z obu modeli numerycznych pokrywają się z wiedzą teoretyczną dotyczącą doziemienia, co potwierdza ich skuteczność w modelowaniu rzeczywistych sieci elektroenergetycznych. Analiza wyników wskazuje jednak na pewne różnice w ilości wyższych harmonicznych składających się na stan nieustalony. W przypadku modelu zCable ich ilość jest mniejsza niż w przypadku modelu  $\Pi$ . W przypadku modelu

П zaobserwowano występowanie znacznych wahań wartości chwilowej, których wartość była ponad trzydziestokrotnie większa niż amplituda prądu w stanie ustalonym.

W przypadku krótszych długości kabli, program ATP-EMTP nie przeprowadza symulacji dla modelu zCable z powodu pojawienia się komunikatu o błędzie wywołanym dzieleniem przez zero. W związku z faktem, iż kopalniana sieć składa się z dużej liczby odcinków, w tym wielu krótszych od 500 m, postanowiono w celu ujednoczenia symulacji wykorzystać wyłącznie model П.

#### **4.3. Stosowane modele zwarcia doziemnego**

W literaturze [82 – 84] spotyka się głównie dwa modele zwarcia doziemnego w sieci z izolowanym punktem neutralnym, mianowicie model zwarcia rezystancyjnego ze zmienną rezystancją oraz model zwarcia o dwóch stałych rezystancjach przełączanych półokresowo. W pierwszym z tych modeli, wartość rezystancji zwarcia doziemnego jest zmienna i zależy od momentu zwarcia. W drugim modelu, rezystancja zwarcia doziemnego jest określona jako dwie stałe wartości, zmieniające się w sposób półokresowy w czasie (rys. 4.5).

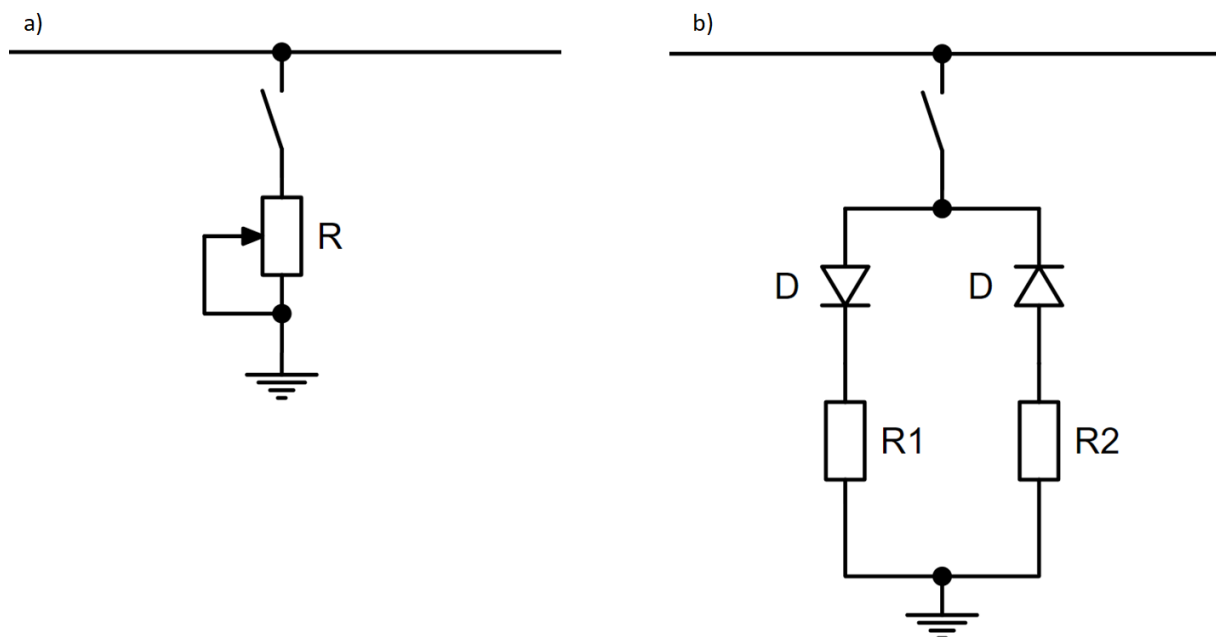
Model zwarcia rezystancyjnego ze zmienną rezystancją wykorzystywany jest głównie w celu dokładnego uwzględnienia dynamicznych procesów zachodzących podczas zwarcia doziemnego niskorezystancyjnego, takich jak drgania i oscylacje. Zmienna wartość rezystancji zwarcia w tym modelu umożliwia dokładne odwzorowanie tych procesów, co pozwala na uzyskanie bardziej realistycznych wyników symulacji [82 – 85]. Szczególnym przypadkiem tego modelu doziemienia jest zwarcie metaliczne o zerowej wartości rezystancji.

Z kolei model zwarcia o dwóch stałych rezystancjach przełączanych półokresowo stosowany jest przeważnie w sytuacjach tzw. zwarć wysokorezystancyjnych. Model ten często wykorzystywany jest w zwarciach występujących w liniach napowietrznych. Zwarcia wysokorezystancyjne są bardzo złożonym zjawiskiem i wykazują wysoce nieliniowe zachowania. Można w takich zwarciach zauważyć także fakt, że doziemienie



ma różne przebiegi dla dodatnich i ujemnych półcykli. Cecha ta jest nazywana w literaturze asymetrią. Nieliniowość i asymetria są naturalnymi właściwościami zwarcia wysokorezystancyjnego. Z uwagi na fakt, że analizowane zwarcia w niniejszej pracy występują w kablach górniczych i nie pojawia się zwarcie powietrzne model ten można uprościć do dwóch rezystancji przełączanych półokresowo [82 – 85].

Oba modele mają swoje zastosowania w różnych sytuacjach i wybór odpowiedniego modelu zależy od konkretnej sytuacji oraz celu symulacji.

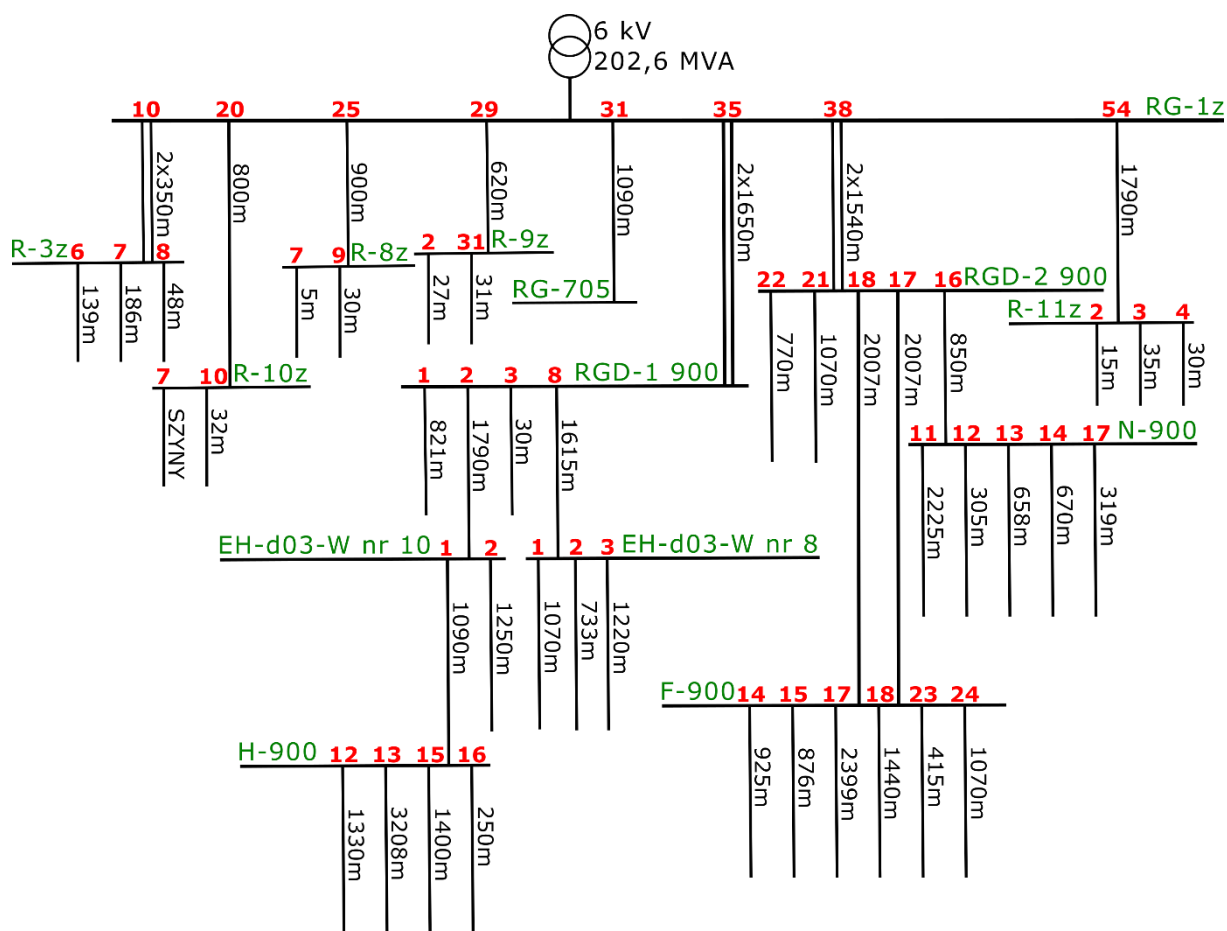


Rys. 4.5. Stosowane modele zwarcia doziemnego: a) dla zwarć niskorezystancyjnych, b) dla zwarć wysokorezystancyjnych.

W ramach niniejszej rozprawy doktorskiej rozważano oba modele zwarcia doziemnego w sieci z izolowanym punktem neutralnym. Niemniej jednak, w trakcie prowadzonych badań okazało się, że oba te modele są niewystarczające i nie uwzględniają istotnych aspektów dynamiki zwarcia doziemnego. Wobec tego, podjęto decyzję o opracowaniu własnego, bardziej złożonego modelu zwarcia doziemnego, który został szczegółowo opisany w dalszej części pracy.

#### 4.4. Wybór przypadków do dalszej analizy

W trakcie przygotowania rozprawy w latach 2019 – 2021 zbierano dane o zwarciah doziemnych występujących w różnych kopalniach należących do Polskiej Grupy Węglowej S.A. oraz Jastrzębskiej Spółki Węglowej S.A. łącznie zebrano informacje o 13 zwarciah doziemnych z 5 kopalń. W celu zachowania przejrzystości toku rozumowania i obliczeń do dalszej analizy wybrano tylko część przypadków.



Rys. 4.6. Schemat przedstawiający konfigurację sieci dla analizowanych zwarciah w KWK Zofiówka.

Przy wyborze przypadków przyjęto następujące kryteria:

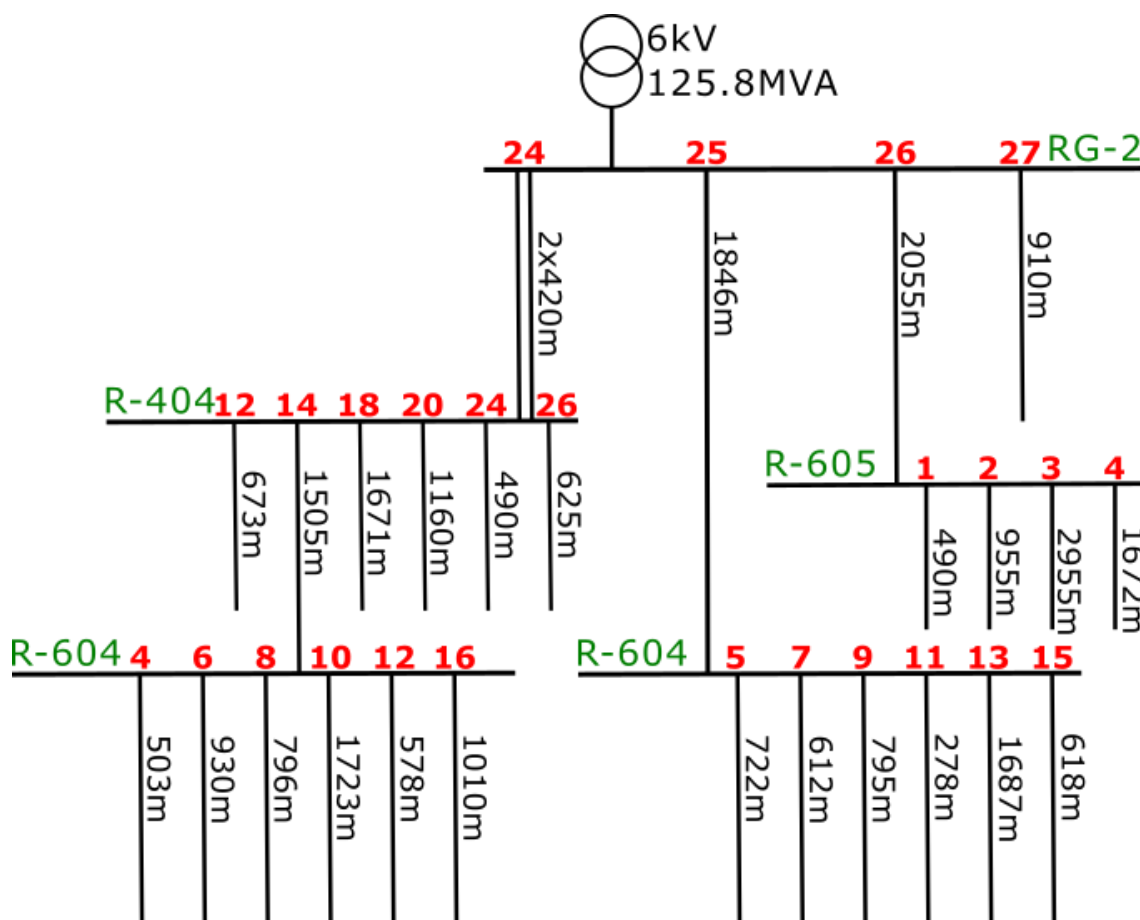
- w celu weryfikacji poprawności wykonania analizy dla danej konfiguracji sieci przedstawiono tylko te konfiguracje, w których wystąpiły minimum dwa różne zwarciah doziemne,
- uwzględniono tylko te przypadki, w których uzyskano wyniki z minimum trzech różnych zabezpieczeń ziemnozwarciowych,

- w ramach danej konfiguracji pojawiło się przynajmniej jedno zwarcie metaliczne (lub zbliżone) oraz jedno zwarcie wysokorezystancyjne.

Po przyjęciu powyższych kryteriów w niniejszej pracy skupiono się na dwóch sieciach kopalnianych. Pierwszą siecią jest rozdzielcza sieć elektroenergetyczna 6 kV występująca w KWK Zofiówka. Prąd ziemnozwarciowy tej sieci wynosi 70,1 A. Schemat sieci przedstawiono na rys. 4.6 a parametry poszczególnych elementów w tabeli Z.1.

W ramach tej konfiguracji wystąpiły trzy zwarcia:

- zwarcie wysokorezystancyjne o zmiennej rezystancji w linii RGD-2 p. 22 na 495 metrze (zwarcie z dnia 19 lipca 2020 roku z godziny 3:19:22),
- zwarcie metaliczne w linii RGD-2 p. 22 na 495 metrze (zwarcie z dnia 19 lipca 2020 roku z godziny 5:37:54),
- zwarcie wysokorezystancyjne o zmiennej rezystancji w linii H-900 p.16 na 200 metrze (zwarcie z dnia 24 października 2020 roku z godziny 19:06:18).



Rys. 4.7. Schemat przedstawiający konfigurację sieci dla analizowanych zwarć w KWK Marcel dla części Markłowice.

Drugą kopalnią, z której wyniki zostały zaprezentowane i przeanalizowany jest sieć elektroenergetyczna 6 kV występująca w KWK Marcel. Rejestracje pochodzą z pola marklowickiego. Prąd ziemnozwarciowy sieci wynosi 45,7 A. Schemat sieci przedstawiono na rys. 4.7 a parametry poszczególnych elementów w tabeli Z.2.

W ramach poniższej konfiguracji wystąpiły trzy zwarcia:

- zwarcie wysokorezystancyjne o zmiennej rezystancji w linii R-604 p. 16 na 725 metrze (zwarcie z dnia 22 września 2019 roku z godziny 4:39:03),
- zwarcie metaliczne w linii R-604 p. 16 na 725 metrze (zwarcie z dnia 23 września 2019 roku z godziny 23:11:48),
- zwarcie wysokorezystancyjne o zmiennej rezystancji w linii R-605 p. 1 na 303 metrze (zwarcie z dnia 14 grudnia 2019 z godziny 2:18:49).

W celu zapewnienia przejrzystości informacji szczegółowe informacje o każdym z przypadków zostaną podane w odpowiednim podrozdziale kolejnego rozdziału pracy.

## **5. Analiza przypadków zwarć doziemnych w dwóch kopalniach - badanie wpływu charakteru doziemienia oraz konfiguracji sieci rozdzielczej**

### **5.1. Zakres prowadzonej analizy**

Celem niniejszego rozdziału pracy jest przedstawienie szczegółowej analizy zarejestrowanych przypadków zwarć doziemnych w dwóch kopalniach. Przeanalizowane zostanie łącznie sześć przypadków, które pozwolą na zbadanie wpływu charakteru doziemienia oraz konfiguracji kopalnianej sieci rozdzielczej na selektywność poprzeczną działania zabezpieczeń ziemnozwarciowych.

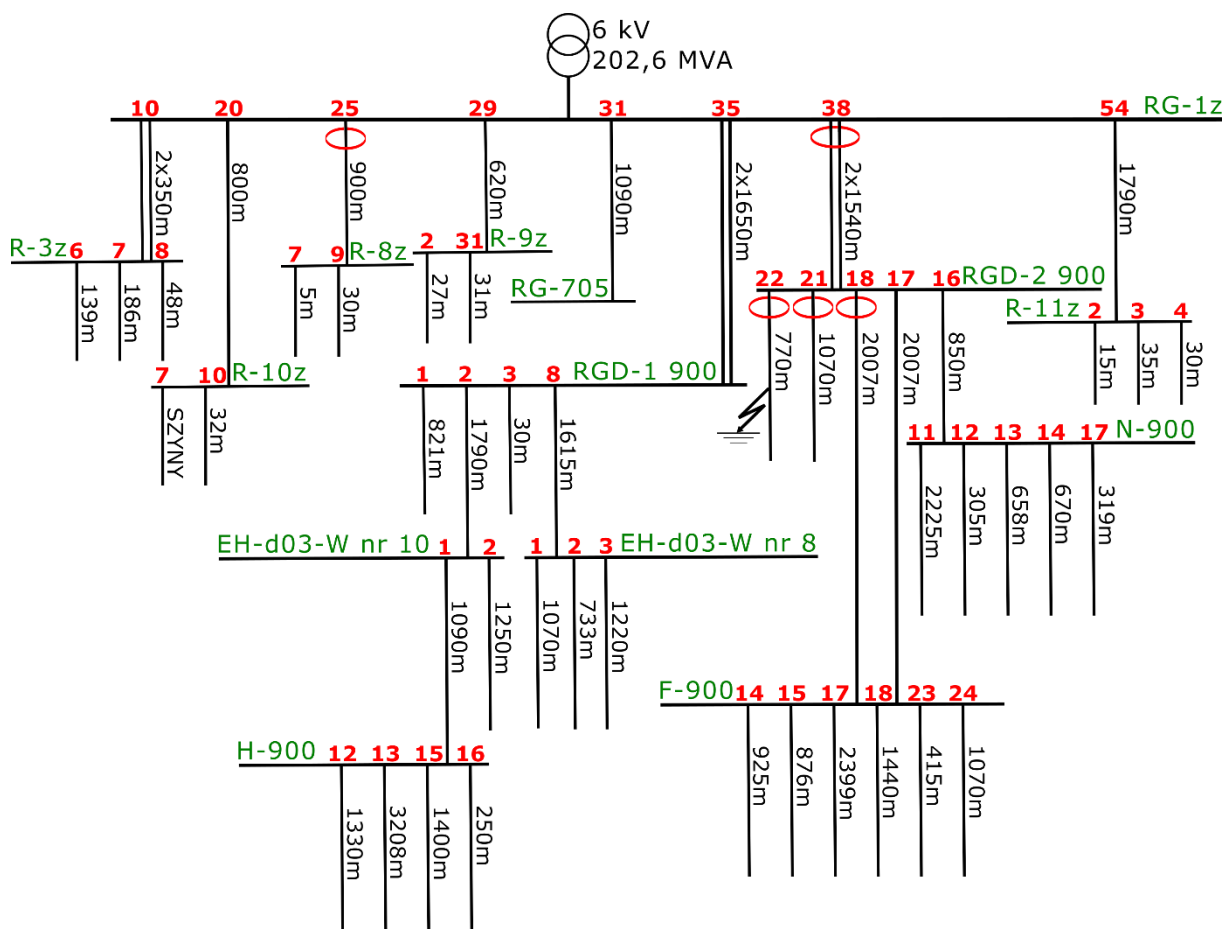
W kolejnych podrozdziałach zostaną przedstawione trzy przypadki z każdej z badanych kopalń, a następnie zostaną poddane analizie z uwzględnieniem czynników wpływających na selektywność poprzeczną zabezpieczeń. W celu zagwarantowania spójności i przejrzystości analizy, każdy przypadek zostanie opisany w sposób analogiczny, uwzględniając takie elementy jak parametry sieci, rodzaj zabezpieczeń, charakter doziemienia oraz opis zdarzenia. Na koniec rozdziału zostaną sformułowane wnioski oraz rekomendacje dotyczące dalszych badań.

### **5.2. KWK Zofiówka – przypadek nr 1: Zwarcie wysokorezystancyjne na 495 metrze linii kablowej w polu nr 22 rozdzielnicy RGD-2**

Pierwszy z analizowanych przypadków niniejszego rozdziału miał miejsce 19 lipca 2020 roku o godzinie 3:19:22 w polu 22, odpływie z rozdzielnicy dołowej RGD-2, znajdującej się na głębokości 900 m. Linia, w której doszło do zdarzenia, była wyposażona w kabel YHKGXSekyn 3x70 mm<sup>2</sup>, a miejsce zwarcia doziemnego znajdowało się 495 metrów od początku kabla. Zwarcie doziemne, które wówczas wystąpiło miało charakter wysokorezystancyjny, co sugeruje, że mogło dojść do uszkodzenia izolacji kabla, ale nie do całkowitego przebicia. Późniejszy wywiad wykazał, że kabel znajdował się w wyrobisku w osłoniętym kanale kablowym. Prawdopodobną przyczyną zwarcia były naturalne procesy starzeniowe izolacji kabla.

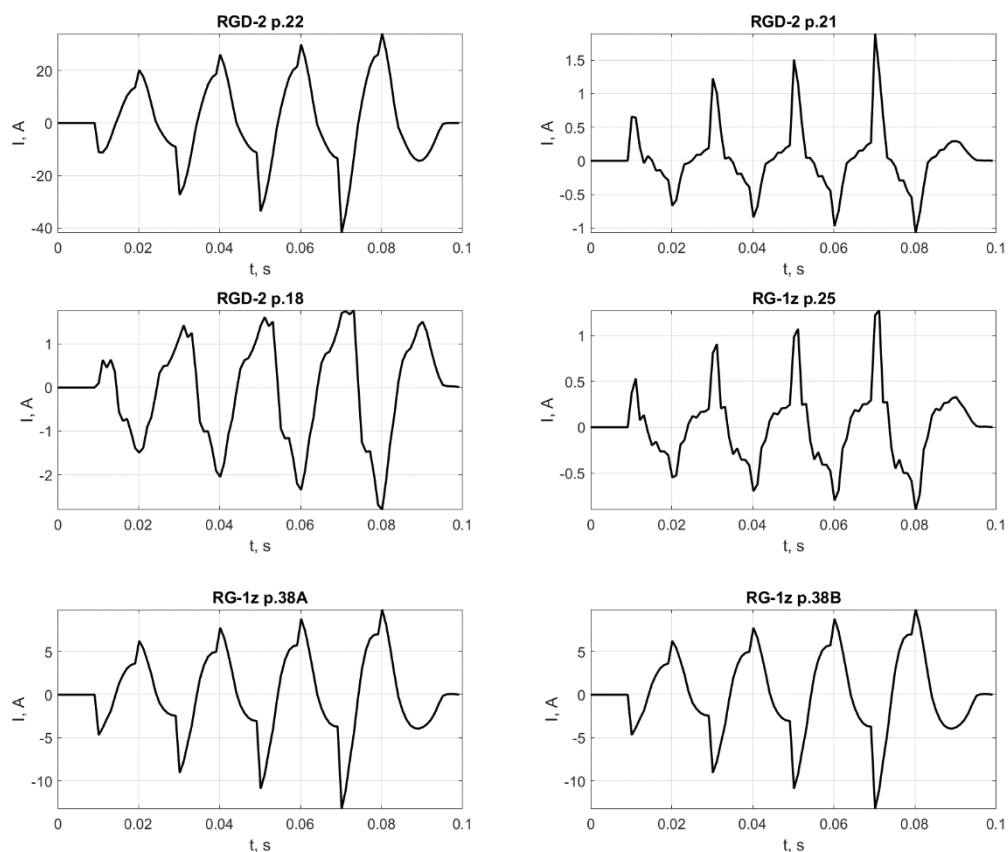
W chwili wystąpienia zdarzenia system zabezpieczeń zadziałał prawidłowo, natychmiast wyłączając linię. Po pewnym czasie system automatyki restytucyjnej uruchomił linię ponownie, co jest zgodne z powszechnie stosowanymi zaleceniami [86]. Ponowne załączenie uszkodzonej już linii wiązało się z późniejszymi konsekwencjami. W wyniku tego zdarzenia doszło do doziemienia, które jest przedmiotem analizy w przypadku nr 2 opisanego w rozdziale 5.3.

Do analizy przebiegu zwarcia udało się pozyskać dane zarejestrowane przez pięć sterowników połowych rozmieszczonych w różnych polach. Dokładne rozmieszczenie wykorzystywanych układów automatyki zabezpieczeniowej zaznaczono na rys. 5.1. Wykorzystywane sterowniki polowe w opisywanym przykładzie to multiMUZ-3 (pola 25 i 38 rozdzielnic RG-1z oraz pole 18 rozdzielnicy RGD-2) i multiMUZ-2 (pola 21 i 22 rozdzielnicy RGD-2).



Rys. 5.1. Schemat sieci dla przypadku nr 1 z KWK Zofiówka wraz z symbolicznym przedstawieniem miejsca zwarcia oraz rozmieszczenie układów automatyki zabezpieczeniowej, które zarejestrowały zdarzenie.

Pozyskane przebiegi składowych zerowych prądów na początkach poszczególnych odplywów zarejestrowane przez sterowniki polowe przedstawiono na rys. 5.2. Ponieważ układy automatyki zabezpieczeniowej rejestrują i archiwizują wartości chwilowe prądów z przekładnika Ferrantiego jako sumę wartości chwilowych prądów to przebiegi w dalszej części pracy także będą przedstawiane i analizowane w ten sposób (jako  $3 \cdot I_0$ ) jednocześnie pamiętając, że rzeczywista wartość  $I_0$  jest trzykrotnie mniejsza. Niestety w omawianym przypadku nie został zapisany przebieg czasowy składowej zerowej napięcia. Jednakże z dyspozytorni pozyskano informację o wartości skutecznej tego napięcia, które wynosiło ok 28% wartości znamionowej napięcia fazowego, gdy w sieci nie występuje żadna awaria. Jest to kolejny dowód potwierdzający przypuszczenie o wysokorezystancyjnym charakterze zwarcia.

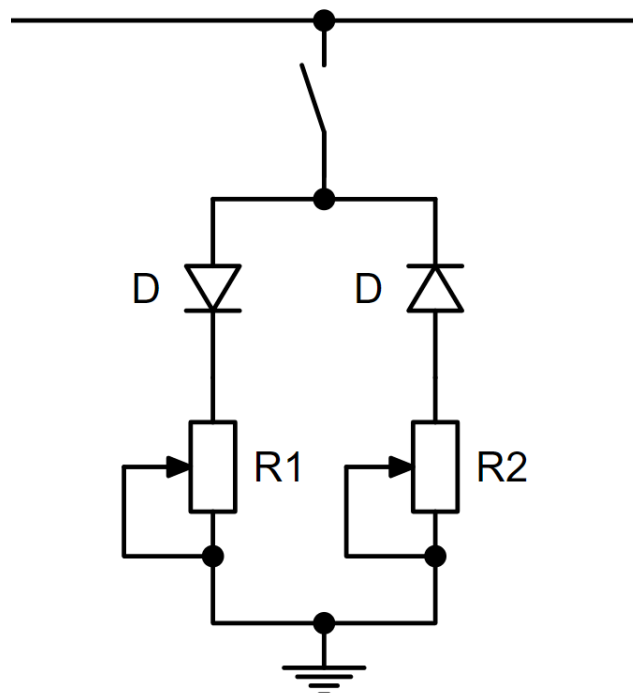


*Rys. 5.2. Przebiegi prądów  $3I_0$  zarejestrowane przez aparaturę pomiarową. Częstotliwość próbkowania wynosiła 1000 Hz. Czas trwania zwarcia 80 ms.*

Analizując powyższe przebiegi można dość do pewnych wniosków. Mianowicie, zwarcia doziemnego w miejscu doziemienia nie można w tym przypadku traktować

jako zwarcia o stałej rezystancji z uwagi na fakt stopniowego narastania składowych zerowych prądów. Wiąże się to wprost ze stopniowym narastaniem wartości prądu zwarciovego. Nie można także tego modelu traktować jako zwarcia o zmiennej rezystancji zmiennej w czasie. Co prawda zmienna rezystancja odzwierciedla wzrost prądu zwarciovego, jednak w tym przypadku wprost widać wyraźną asymetrię pomiędzy dodatnimi a ujemnymi półkami cyklu zwarciovego.

Modelem odzwierciedlającym zarejestrowaną asymetrię prądu doziemnego jest model zwarcia w formie dwóch rezystancji przełączanych półokresowo. Dodatkowo za słusnością przyjęcia tego modelu przemawiają charakterystyczne piki w chwili przełączenia rezystancji (na przebiegach to 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 i 80 milisekunda). Tworząc obwiednię dodatniej jak i ujemnej części przebiegów można także zauważyć stopniowy wzrost prądu. Słuszną koncepcją w tym przypadku jest przyjęcie nowego (dla kopalnianych sieci przesyłowych średnich napięć z izolowanym punktem neutralnym) modelu zwarcia doziemnego (rys. 5.3). W liniach napowietrznych podobny model był krótko analizowany w literaturze jako model przejściowy do bardziej złożonych modeli doziemień [85].



*Rys. 5.3. Model zwarcia doziemnego jako dwóch rezystancji zmiennych w czasie przełączanych półokresowo.*



W ramach pracy przeprowadzono analizę porównawczą pomiędzy wcześniejszymi modelami a przyjętym do dalszej analizy modelem przedstawionym na rys. 5.3.

W celu uwzględnienia i próby optymalnego zamodelowania wyższych harmonicznych powstających w stanach nieustalonych doziemienia przyjęto, że krok próbkowania w programie ATP-EMTP wynosi  $\Delta t = 10^{-8}$  s. Z uwagi na fakt, że sterowniki polowe rejestrują zwarcie z częstotliwością próbkowania 1000 Hz należało przeprowadzić interpolację zarejestrowanych danych, tak aby było możliwe porównanie wyników symulacji i rejestracji. Z reguły najpopularniejszą metodą interpolacji jest interpolacja liniowa [87]. Interpolacja liniowa to najprostsza forma interpolacji, która zakłada, że przebieg między dwoma punktami ma charakter liniowy. Jest ona prosta do zrozumienia i implementacji, a także szybka obliczeniowo. W wielu przypadkach może dostarczyć satysfakcjonujących wyników, zwłaszcza jeśli dane są równomiernie rozłożone i nie ma dużych zmian sygnału między sąsiednimi punktami.

Z racji tego, że w rozpatrywanym przypadku pomiędzy zarejestrowanymi punktami pojawia się duża dynamika sygnału pokuszono się o zastosowanie interpolacji kwadratowej. Zakłada ona, że relacja między punktami jest reprezentowana przez funkcję kwadratową. Interpolacja kwadratowa może dostarczyć dokładniejszych wyników, jeśli sygnał ma charakter nieliniowy. Jest ona, jednak bardziej złożona do implementacji i wymaga więcej mocy obliczeniowej. Przy wyborze metody interpolacji skupiono się na 4 parametrach każdej z nich:

- **charakter danych.** Jeśli dane mają charakter liniowy, interpolacja liniowa może być wystarczająca. Jeśli dane mają charakter nieliniowy, interpolacja kwadratowa może zapewnić lepsze dopasowanie.
- **liczba punktów.** Jeśli do dyspozycji jest duża liczba punktów, interpolacja liniowa może być wystarczająca.
- **czas obliczeń.** Jeśli czas jest krytycznym czynnikiem, interpolacja liniowa może być preferowana ze względu na swoją prostotę i szybkość obliczeń.

- **dokładność.** Jeśli dokładność jest kluczowa, interpolacja kwadratowa może być preferowana, ponieważ potrafi lepiej dostosować się do nieliniowych trendów.

Pozyskane dane mają charakter nieliniowy, zarejestrowane dane składają się z ok. 100 punktów, czas obliczeń nie jest istotny, natomiast najważniejsza jest dokładność. Dlatego też w dalszej pracy postanowiono interpolować punkty przy użyciu interpolacji kwadratowej.

Jeżeli chodzi o problem dopasowania modelu zwarcia doziemnego do zarejestrowanych danych, metoda Monte Carlo [88 – 90] może być użyta do eksploracji przestrzeni parametrów modelu. Dla każdego zestawu parametrów, można obliczyć błąd absolutny między danymi a predykcjami modelu.

Problemem pozostała jeszcze metoda estymacji wyników. Powszechnie stosowaną metodą jest metoda najmniejszych kwadratów, jednak istnieją również inne metody, które mogą być używane do porównywania otrzymanych wyników z konkretną funkcją. Jednym z takich podejść jest wykorzystanie odchylenia przeciętnego, znanego również jako błąd absolutny [91]. Podobnie jak w metodzie najmniejszych kwadratów, w podejściu z wykorzystaniem odchylenia przeciętnego chodzi o minimalizację sumy błędów. Główną różnicą jest to, że zamiast kwadratów różnic między danymi empirycznymi a danymi modelu, używa się wartości bezwzględnych tych różnic.

Formuła matematyczna dla błędu absolutnego (odchylenia przeciętnego) wygląda następująco dla rejestrowanych prądów:

$$\Delta I = \frac{\sum_{i=1}^n |3 \cdot I_{i0sym} - 3 \cdot I_{i0pom}|}{3n} \quad (5.1)$$

W powyższym wzorze przyjęto, że  $3 \cdot I_{i0sym}$  to symulowana potrójna składowa zerowa prądu w i-tym punkcie a  $3 \cdot I_{i0pom}$  to zmierzona (interpolowana) potrójna składowa zerowa prądu w i-tym punkcie, gdzie liczba punktów wynosi n.

W przeciwieństwie do metody najmniejszych kwadratów, metoda oparta na błędzie absolutnym jest mniej wrażliwa na pojedyncze, dużo odstające punkty, co może być zaletą w przypadku pojawienia się szumów w symulowanych i interpolowanych przebiegach.

Ważne jest jednak, aby pamiętać, że optymalizacja oparta na błędzie absolutnym jest matematycznie bardziej skomplikowana niż metoda najmniejszych kwadratów, głównie ze względu na nieliniowość funkcji wartości bezwzględnej. Może to prowadzić do większych trudności w znalezieniu najlepszego dopasowania, szczególnie w przypadku bardziej skomplikowanych modeli. Jednak odporność tej metody na występowanie punktów znacznie odległych od reszty obserwacji przemówiła na jej korzyść w stosunku do metody najmniejszych kwadratów.

Podsumowując: zarejestrowane dane były interpolowane z wykorzystaniem interpolacji kwadratowej, dobór parametrów modelu zwarcia był dokonany metodą Monte Carlo z wykorzystaniem metody błędu absolutnego. Powyższa metoda została przyjęta dla każdej analizowanej sytuacji umożliwiając ujednoczenie otrzymanych wyników. Dla analizowanego przypadku wprowadzono 4 (opisane poniżej) modele zwarcia doziemnego i dla każdego z nich obliczono wartość błędu absolutnego. Wyniki zamieszczono w tabeli 5.1.

Model nr 1 to model doziemienia o stałej rezystancji. Metodą najmniejszego błędu absolutnego wartość tej rezystancji wyniosła 534  $\Omega$ . Model nr 2 to model o dwóch stałych rezystancjach przełączanych półokresowo. Wartości tych rezystancji wyniosły 272 oraz 493  $\Omega$ . Model nr 3 to model zwarcia o rezystancji zmiennej w czasie. Na podstawie omawianej metody okazało się, że można ją opisać następującą zależnością (gdzie czas, mierzony w sekundach, liczony jest od momentu wystąpienia zwarcia):

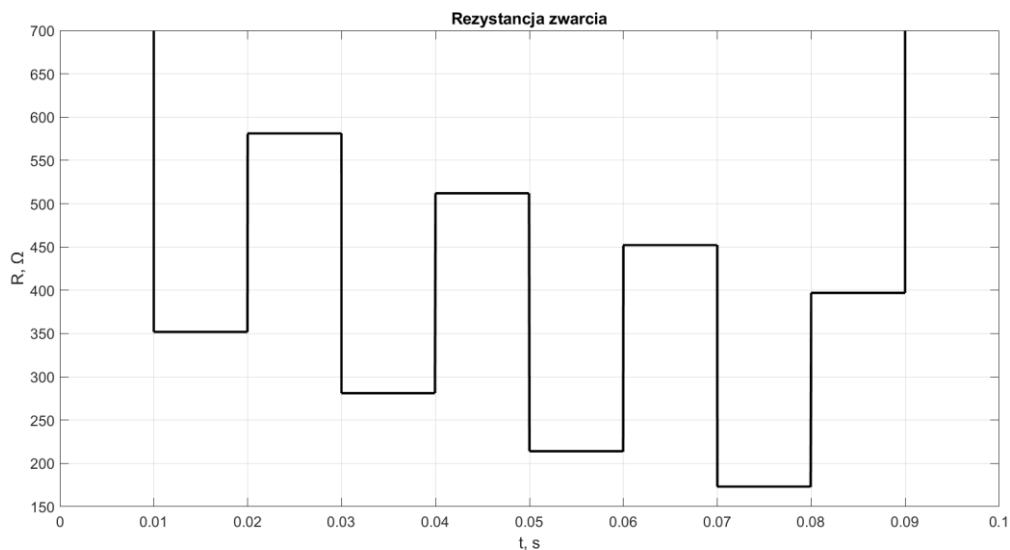
$$R(t) = 519 \cdot e^{-8,21t}, \Omega \quad (5.2)$$

Jako model nr 4 przyjęto zwarcie o dwóch zmiennych rezystancjach przełączanych półokresowo. Sam przebieg zmiany rezystancji oraz otrzymane parametry modelu umieszczono na rys. 5.4.

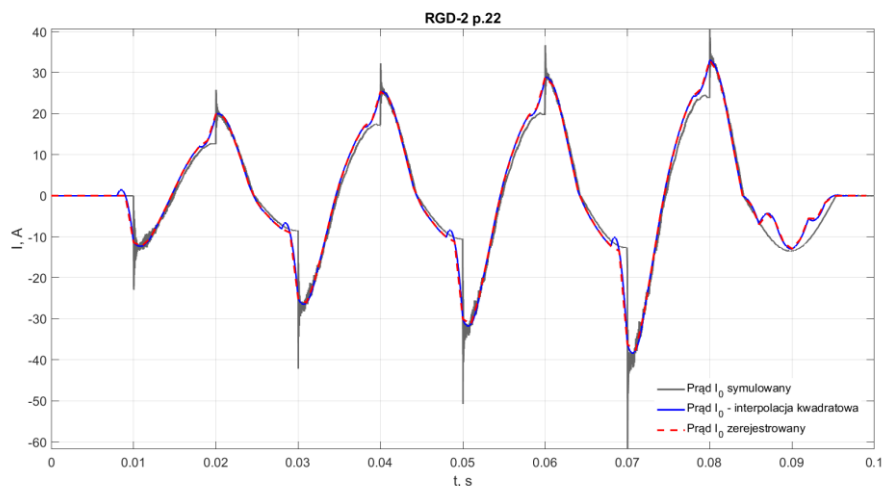
Model nr 4 jest swojego rodzaju połączeniem dwóch wcześniejszych modeli. Na podstawie wyników zamieszczonych w tabeli 5.1 można zaobserwować, że przyjęty model w dużo lepszym stopniu odwzorowuje same zwarcie w stosunku do modeli poprzednich.

Tabela 5.1. Wartość odchylenia przeciętnego prądów w  $I_0$  w poszczególnych polach dla wybranych modeli prądów doziemnych, które zostały zoptymalizowane metodą najmniejszego błędu absolutnego dla przypadku nr 1.

Pole	Wartość odchylenia przeciętnego $\Delta I$ , A			
	Model nr 1	Model nr 2	Model nr 3	Model nr 4
RGD-2 900 p.22	7,66	2,94	4,81	1,28
RGD-2 900 p.21	0,66	0,37	0,19	0,17
RGD-2 900 p.18	0,89	0,33	0,57	0,15
RG-1z p.38A	3,94	1,41	1,24	0,94
RG-1z p.38B	3,02	2,15	1,83	0,86
RG-1z p.25	0,56	0,12	0,15	0,098

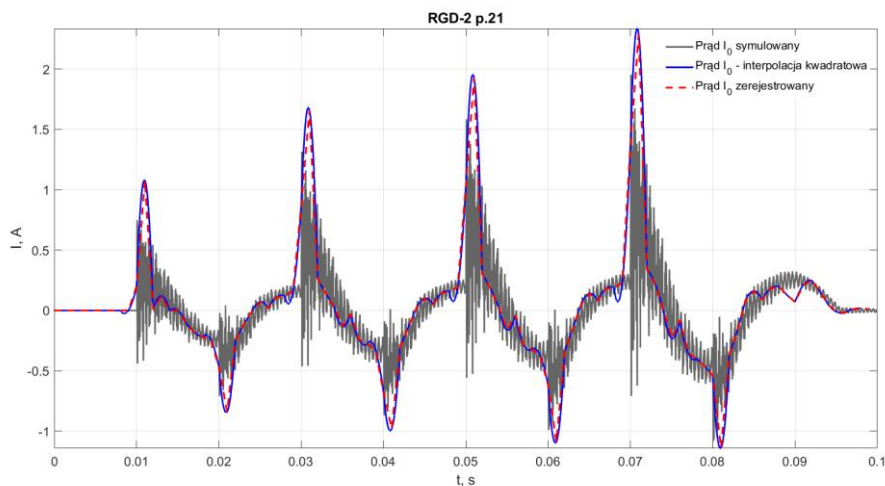


Rys. 5.4. Charakterystyka przedstawiająca zmianę rezystancji zwarcia w miejscu doziemienia dla przyjętego modelu (przypadek nr 1).



Rys. 5.5. Przebiegi prądu  $3I_0$  od czasu dla pola 22 w rozdzielni RGD-2 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 1. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.

Przedstawione na rys. 5.5-5.7 oraz Z.1-Z.3 przebiegi porównujące zarejestrowane przebiegi z wynikami przeprowadzonych symulacji pokazują, że zaproponowany model dla analizowanego przypadku w bardzo dużym stopniu odzwierciedla rzeczywisty kształt przebiegu prądu zwarciovego. Można zauważyć, że w liniach, które nie są bezpośrednio powiązane z miejscem zwarcia szumy pojawiające się w wynikach obliczeń są znacznie większe niż w liniach powiązanych z doziemieniem. Zaobserwowane oscylacje są w dużej mierze powiązane z faktem, że model  $\Pi$  linii kablowej jest modelem, w którym jest bardzo duża liczba węzłów i gałęzi, które ze sobą mogą wzajemnie rezonować. Niemniej dla linii, w której nastąpiło zwarcie wpływ takich oscylacji jest pomijalnie mały.

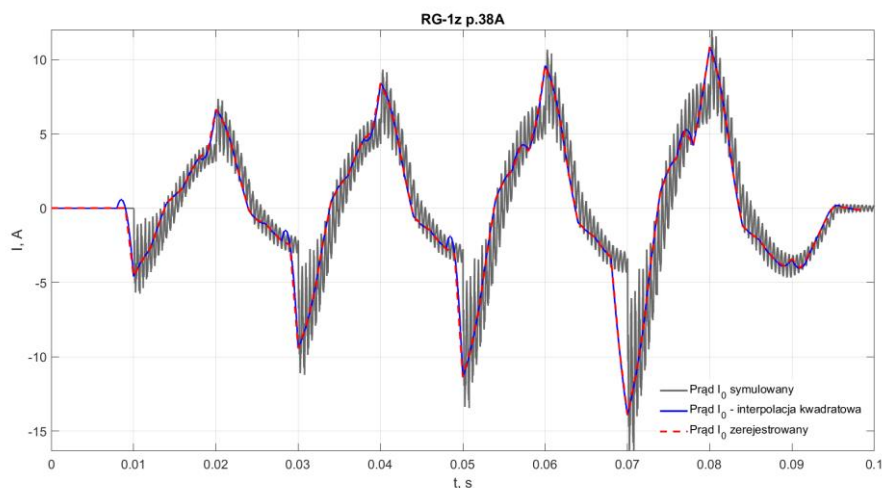


Rys. 5.6. Przebiegi prądu  $3I_0$  od czasu dla pola 21 w rozdzielni RGD-2 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 1. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.

Zaproponowany model zwarcia w zadowalającym stopniu odwzorowuje charakterystyczne dla tego rodzaju zwarcia „piki” prądu, które pojawiają się w chwilach, gdy napięcie  $U_0$  przechodzi przez punkt 0 V, co z uwagi na niemalże czysto pojemnościowy charakter linii kablowej z punktu widzenia miejsca zwarcia powoduje gwałtowny wzrost wartości chwilowej prądu  $I_0$  w momencie osiągnięcia lokalnego ekstremum prądu.

Wracając do samego modelu rezystancji zwarcia można pokusić się o wyprowadzenie równań opisujących każdą z obu przełączanych rezystancji. Z racji

tego, że niewielkie zmiany rezystancji w ramach jednego półokresu w pomijalnie mały sposób wpływają na przebiegi prądów  $I_0$  można przyjąć, że obie rezystancje w pewien sposób zmniejszają się w czasie i dopiero wzajemne przełączanie pomiędzy rezystancjami wpływa na parametry jakościowe i ilościowe analizowanych prądów.



Rys. 5.7. Przebiegi prądu  $3I_0$  od czasu dla pola 38 (jedna z dwóch linii równoległych) w rozdzielnicy RG-1z dla zwarcia omawianego w przypadku nr 1. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.

Dlatego też wprowadzono oznaczenia określające wartości początkowe ( $R_{1p}$  i  $R_{2p}$ ), wartości końcowe ( $R_{1k}$  i  $R_{2k}$ ), czasy początkowe ( $t_{1p}$  i  $t_{2p}$ ) i czasy końcowe ( $t_{1k}$  i  $t_{2k}$ ) dla obu rezystancji (rys. 5.8). Na ich podstawie z wykorzystaniem prostych przekształceń matematycznych wyprowadzono wzory opisujące przebieg zmienności wartości obu rezystancji dla przyjętego modelu zwarcia.

Omawiane równania wyglądają w następujący sposób ( $R_1(t)$  to linia czerwona na wykresie natomiast  $R_2(t)$  to linia niebieska):

$$R_1(t) = R_{1p} e^{\alpha_1(t-t_{1p})}, \Omega \quad (5.3)$$

$$R_2(t) = R_{2p} e^{\alpha_2(t-t_{2p})}, \Omega \quad (5.4)$$

gdzie współczynniki  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  można opisać równaniami:

$$\alpha_1 = \frac{\ln R_{1p} - \ln R_{1k}}{t_{1k} - t_{1p}} \quad (5.5)$$

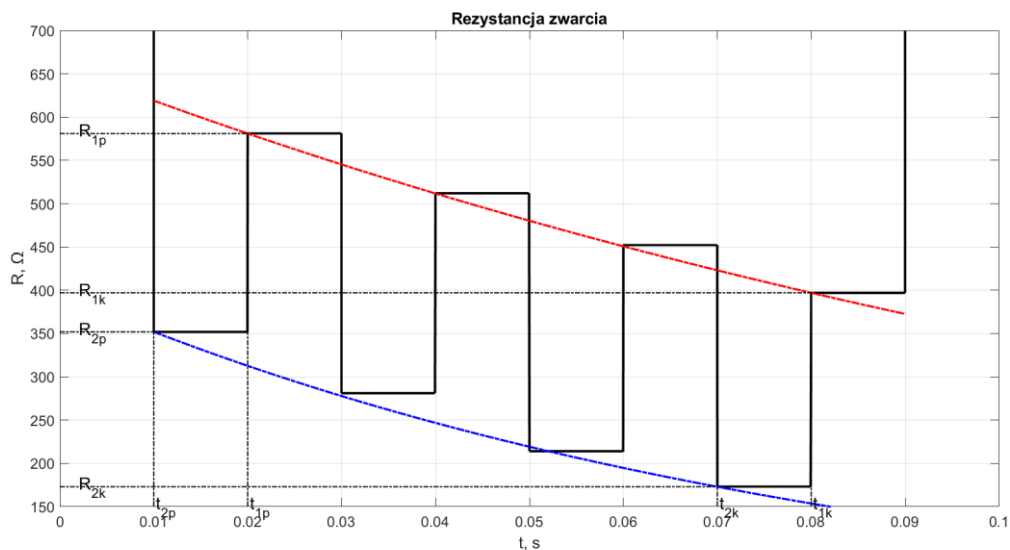
$$\alpha_2 = \frac{\ln R_{2p} - \ln R_{2k}}{t_{2k} - t_{2p}} \quad (5.6)$$

Dla analizowanego przypadku powyższe równania przyjmują postać:

$$R_1(t) = 660 \cdot e^{-6,35t}, \Omega \quad (5.7)$$

$$R_2(t) = 396 \cdot e^{-11,84t}, \Omega \quad (5.8)$$

Charakterystyki przedstawiające moduł różnicy pomiędzy przebiegami symulowanymi a zmierzonymi dla omawianego modelu zwarcia zostały przedstawione na rys. Z.4-Z.9.



Rys. 5.8. Sposób obliczenia równań opisujących obie rezystancje przełączające.

### 5.3. KWK Zofiówka – przypadek nr 2: Zwarcie metaliczne na 495 metrze linii kablowej w polu nr 22 rozdzielnicy RGD-2

Drugi analizowany przypadek z kopalni Zofiówka nastąpił jeszcze tego samego dnia, 19 lipca 2020 roku, o godzinie 5:37:54, również w polu 22, odpływie z rozdzielnicy dołowej RGD-2. Tak jak w przypadku nr 1, miejsce zwarcia doziemnego znajdowało się 495 metrów od punktu początkowego linii, która była wyposażona w kabel YHKGXSekyn 3x70 mm<sup>2</sup> w tym miejscu. Jednak tym razem zwarcie miało charakter niskorezystancyjny, zbliżony do metalicznego, co wskazuje na znaczne pogorszenie stanu izolacji kabla, prawdopodobnie spowodowane wcześniejszym zdarzeniem. Przy takim zwarciu wartość prądu w miejscu zwarcia jest znacznie większa, a tym samym występuje większe zagrożenie pożarowe, rażeniowe oraz wybuchowe.

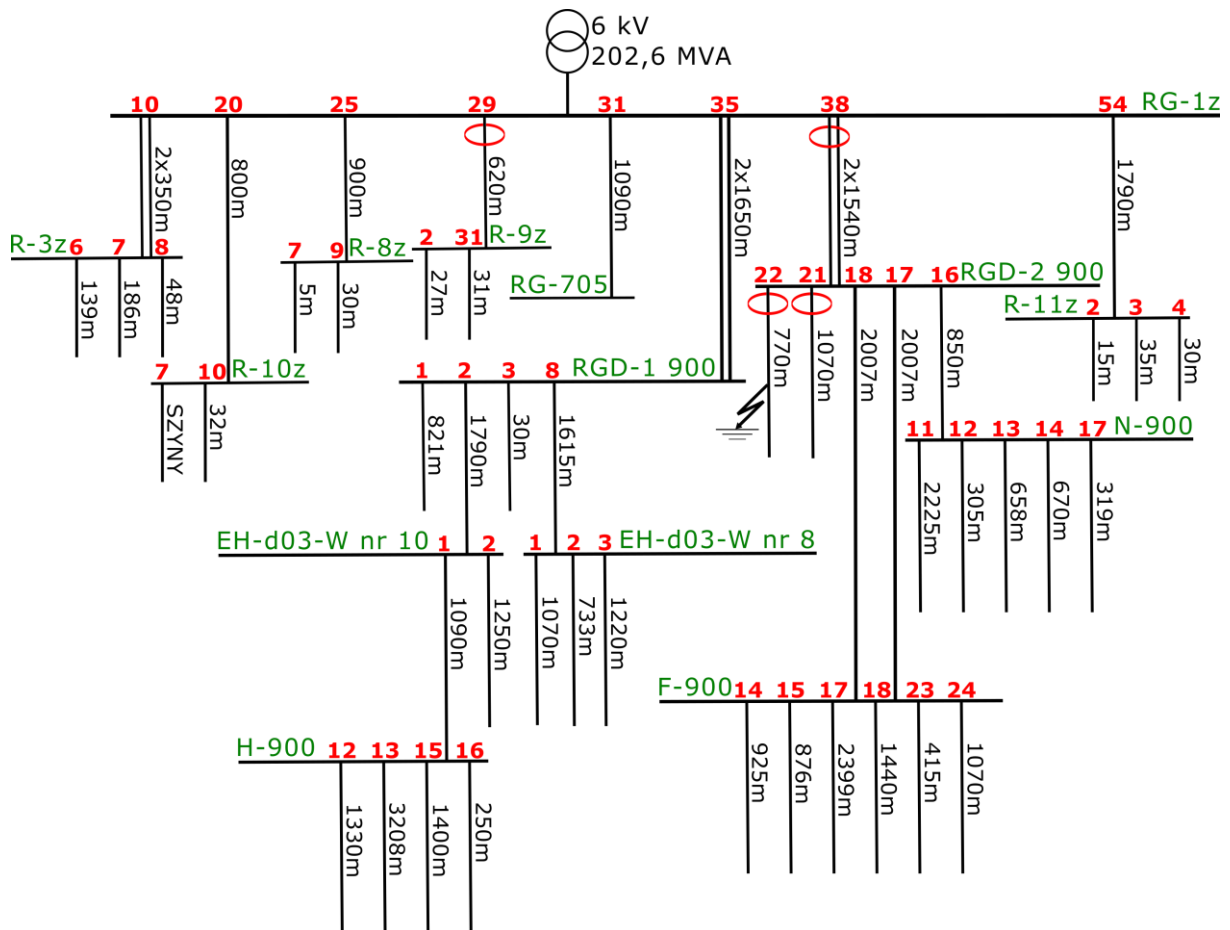
Podobnie jak w przypadku nr 1, zabezpieczenie ziemnozwarciowe w sterowniku polowym zadziałało prawidłowo i natychmiastowo wyłączyło uszkodzoną linię. Niestety, po pewnym czasie system automatyki restytucyjnej zdecydował o ponownym uruchomieniu pola. Pomimo poprawności takiego działania według powszechnie stosowanych zaleceń [86], ponowne załączenie linii w obecności niskorezystancyjnego zwarcia mogło prowadzić do poważniejszych konsekwencji.

Takie konsekwencje wystąpiły jeszcze tego samego dnia, około godziny 7:30, kiedy doszło do zwarcia trójfazowego z ziemią. Ten znacznie poważniejszy rodzaj awarii z uwagi na większą wartość wydzielanej energii, czyli większe zagrożenie wybuchowe i pożarowe, mógł być bezpośrednio spowodowany zignorowaniem wystąpienia wcześniejszych zwarć doziemnych. Tak jak w przypadku nr 1, dane do analizy przebiegu zwarcia a następnie jego modelowania zostały uzyskane z czterech sterowników polowych rozmieszczonych w różnych polach. Zastosowane sterowniki polowe to multiMUZ-3 (pola 29 i 38 rozdzielnicy RG-1z) i multiMUZ-2 (pola 21 i 22 rozdzielnicy RGD-2). Rozmieszczenie wykorzystanych układów automatyki zabezpieczeniowej w analizowanej sieci zostało przedstawione na rys. 5.9.

Przypadek nr 2 jest szczególnie istotny z kilku powodów. Po pierwsze, wystąpiło tu zwarcie doziemne o charakterze niskorezystancyjnym, zbliżonym do metalicznego. Oznacza to, że zwarcie to można traktować jako rezystancję o stałej, niskiej wartości. Taka sytuacja jest doskonałym przykładem do badania, ponieważ pozwala na skoncentrowanie się na analizie samego zjawiska zwarcia, bez dodatkowych komplikacji wynikających z dynamiki i nieliniowości zwarcia wysokorezystancyjnego.

W kontekście zastosowania kombinacji metody Monte Carlo, interpolacji kwadratowej i metody najmniejszego błędu absolutnego, przypadek ten umożliwia weryfikację tych technik. Dzięki stałej, niskiej rezystancji zwarcia, możliwe jest dokładne określenie rzeczywistych parametrów zwarcia. Następnie można użyć tych metod do estymacji owych parametrów na podstawie dostępnych danych i porównać wyniki z prawdziwymi wartościami.





Rys. 5.9. Schemat sieci dla przypadku nr 2 z KWK Zofiówka wraz z symbolicznym przedstawieniem miejsca zwarcia oraz rozmieszczenie układów automatyki zabezpieczeniowej, które zarejestrowały zdarzenie.

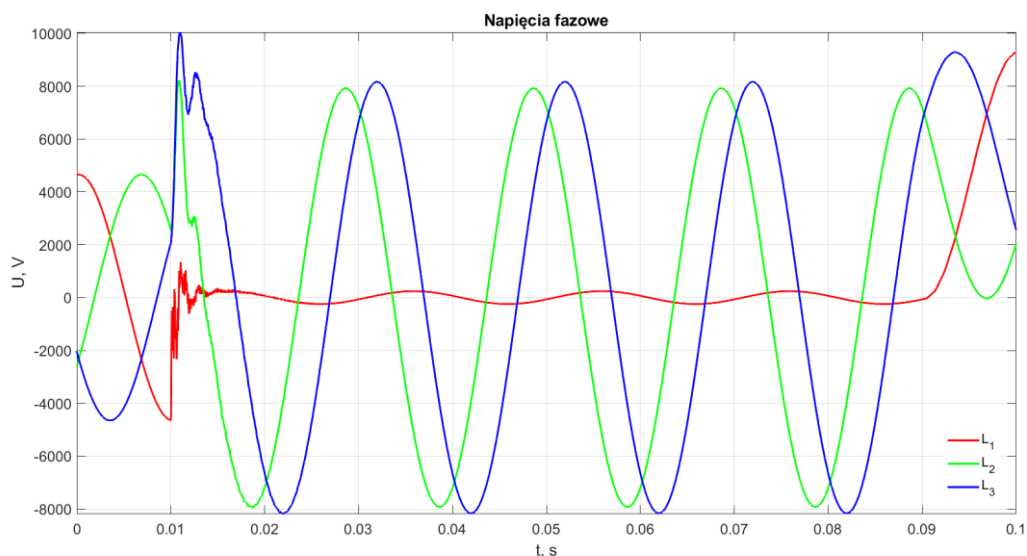
Jeżeli omawiane metody są skuteczne, powinny one z powodzeniem estymować parametry zwarcia, nawet w obliczu niepewności i szumów obecnych w danych. Dzięki temu, efektywność zaproponowanych technik może być potem sprawdzona w innych, bardziej skomplikowanych przypadkach, takich jak zwarcia wysokorezystancyjne.

Tabela 5.2. Wartość odchylenia przeciętnego prądów w  $I_0$  w poszczególnych polach dla przyjętego modelu doziemienia, który został zoptymalizowane metodą najmniejszego błędu absolutnego dla przypadku nr 2.

Pole	Wartość odchylenia przeciętnego, A
RGD-2 900 p.22	27,20
RGD-2 900 p.21	0,68
RG-1z p.38A	7,56
RG-1z p.38B	7,56
RG-1z p.29	0,75

Pierwszą przesłanką sugerującą niskorezystancyjne zwarcie doziemne jest fakt, że zarejestrowana wartość skuteczna  $U_0$  wyniosła 99% wartości napięcia fazowego źródła. Kolejne dwa powody mówiące o zwarcu niskorezystancyjnym jest duży pik wartości chwilowych prądów na początku zwarcia oraz znacznie większe wartości skuteczne  $I_0$  w uszkodzonym polu niż w przypadku poprzedniej sytuacji. Otrzymane wartości odchyłeń przeciętnych w poszczególnych polach zostały przedstawione w tabeli 5.2. Poniższe dane pozwoliły ustalić najbardziej dopasowaną wartość rezystancji zwarcia w modelu symulacyjnym dla tego przypadku. Na tej podstawie można przyjąć, że wartość rezystancji zwarcia w omawianym przykładzie wyniosła  $1,82 \Omega$

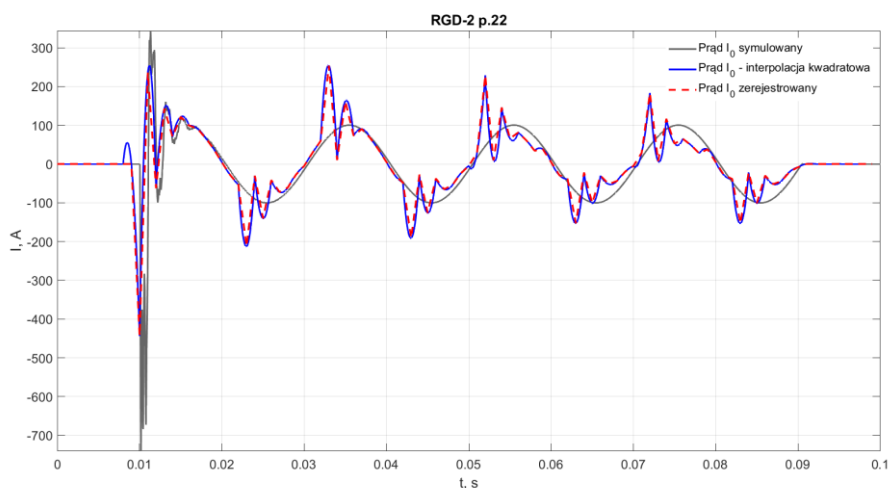
Z racji tego, że jest to zwarcie niskorezystancyjne to napięcie fazowe w uszkodzonej fazie powinno być zbliżone do zera a w pozostałych wzrosnąć  $\sqrt{3}$  razy. Przebieg napięć w układzie symulacyjnym potwierdza te założenia (rys. 5.10).



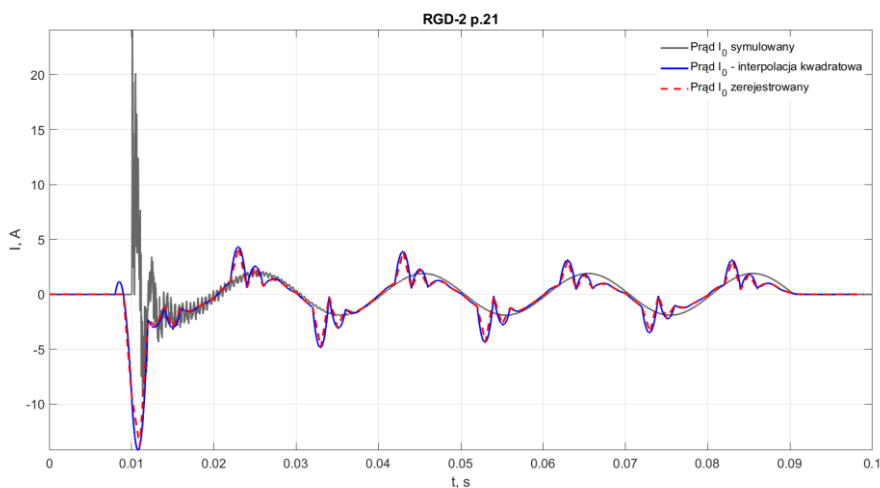
*Rys. 5.10. Przebieg napięć fazowych w sieci dla przypadku nr 2 podczas doziemienia. Dane z programu ATP-EMTP.*

Doziemienie niskorezystancyjne o stałej rezystancji i niemalże zerowym czasie załączania charakteryzuje się tym, że w stanie nieustalonym pojawia się duże oscylacje wartości chwilowych wszystkich typów przebiegów (m.in. przebiegów  $I_0$  i  $U_0$ ), natomiast w stanie ustalonym przebiegi te przyjmują kształt przebiegu sinusoidalnego. Dla potwierdzenia powyższych założeń przeprowadzono analizę porównawczą przebiegów zarejestrowanych oraz zasymulowanych. Wyniki zaprezentowano na rys.

5.11, 5.12, Z.10 i Z.11. Charakterystyki przedstawiające moduł różnicy pomiędzy przebiegami symulowanymi a zmierzonymi dla omawianego modelu zwarcia zostały przedstawione na rys. Z.12-Z.15.



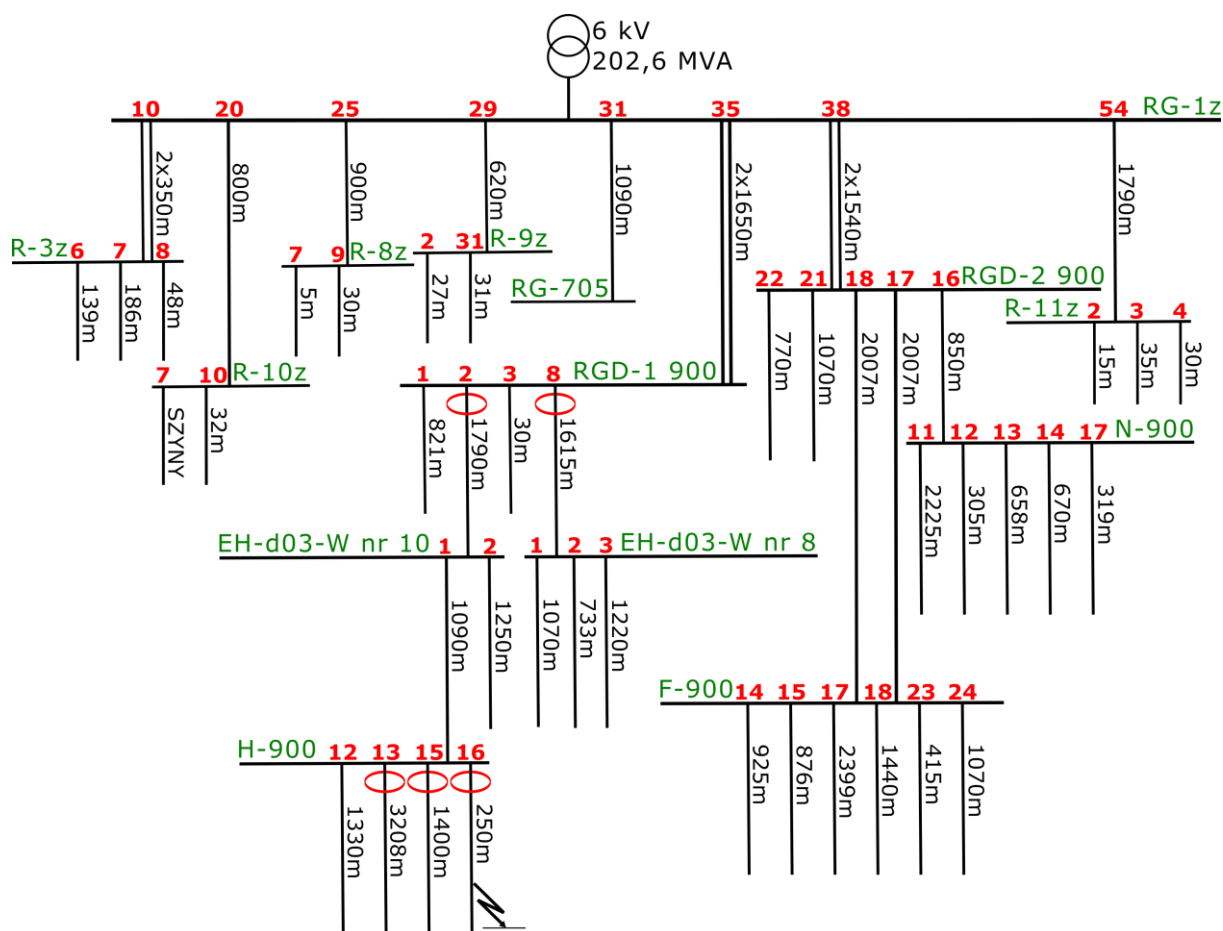
Rys. 5.11. Przebiegi prądu  $3I_0$  od czasu dla pola 22 w rozdzielnicy RGD-2 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 2. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.



Rys. 5.12. Przebiegi prądu  $3I_0$  od czasu dla pola 21 w rozdzielnicy RGD-2 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 2. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.

#### 5.4. KWK Zofiówka – przypadek nr 3: Zwarcie wysokorezystancyjne na 200 metrze linii kablowej w polu nr 16 rozdzielnicy H-900

Przypadek nr 3, który jest niezależny od poprzednio opisanego ciągu zdarzeń, dotyczy tej samej konfiguracji sieci, lecz występuje w innym miejscu i w innym czasie. Zdarzenie miało miejsce 24 października 2020 roku o godzinie 19:06:18, w linii H-900 w polu nr 16, na 200 metrze (rys. 5.13). W przeciwieństwie do zdarzenia z rozdziału 5.3, zwarcie to miało charakter wysokorezystancyjny i co istotne, cechowało się zmienną rezystancją. Ta zmienność podwyższa poziom złożoności analizy i interpretacji tego zdarzenia.



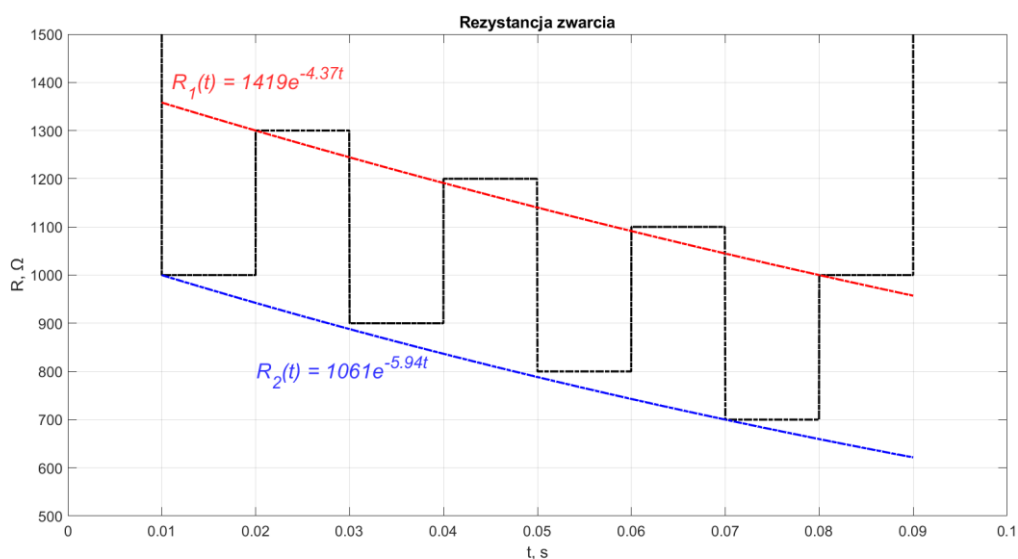
Rys. 5.13. Schemat sieci dla przypadku nr 3 z KWK Zofiówka wraz z symbolicznym przedstawieniem miejsca zwarcia oraz układów automatyki zabezpieczeniowej, które zarejestrowały zdarzenie.

Kabel wykorzystany w linii to YHKGXSekyn 3x50 mm<sup>2</sup>, typ stosowany powszechnie w kopalniach z uwagi na odporność na trudne warunki podziemne.

Późniejsze oględziny kabla ujawniły nacięcie w powłoce, co sugeruje, że przyczyną zwarcia mogło być uszkodzenie mechaniczne. Zmienność rezystancji zwarcia może wynikać z wpływu tego uszkodzenia mechanicznego na przewodność elektryczną izolacji kabla.

Przypadek ten jest szczególnie interesujący w porównaniu z przypadkiem nr 1, gdzie również wystąpiło zwarcie wysokorezystancyjne. Analiza obu przypadków pozwoli na dogłębne zrozumienie wpływu dynamiki zmian rezystancji na przebieg zjawiska zwarcia doziemnego.

Podczas zdarzenia zabezpieczenie ziemnozwarciowe w sterowniku polowym zadziałało poprawnie, natychmiast wyłączając linię po wykryciu zwarcia. Po ponownym załączeniu linii, w przeciwieństwie do poprzednich przypadków, przez kolejne 7 dni nie zanotowano żadnych niepokojących zdarzeń, takich jak kolejne zwarcia. Dane do analizy zwarcia pozyskano z pięciu sterowników polowych rozmieszczonych w polach: 2 i 8 rozdzielnic RGD-1 na poziomie 900 m oraz 13, 15 i 16 rozdzielnic H-900. Wszystkie sterowniki to typ multiMUZ-2 [92]. Z racji podobieństwa przebiegów czasowych prądów przyjęto ten sam model zwarcia co w przypadku nr 1. Model wraz z obliczonymi przebiegami czasowymi zmian obu rezystancji zwarcia przedstawiono na rys. 5.14.



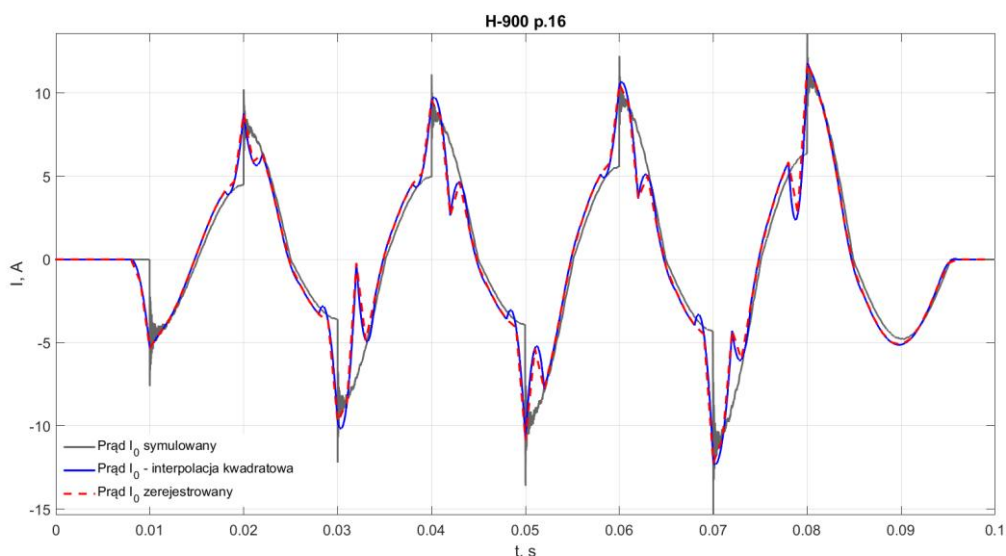
Rys. 5.14. Charakterystyka przedstawiająca zmianę rezystancji zwarcia w miejscu doziemienia dla przyjętego modelu (przypadek nr 3).

Tak jak w poprzednich przypadkach obliczeń dopasowywano model symulacyjny do interpolacji kwadratowej zarejestrowanych wyników metodą najmniejszego błędu absolutnego. W związku z tym w tabeli 5.3. przedstawiono wyniki tego błędu dla poszczególnych pól dla zoptymalizowanego modelu zwarcia.

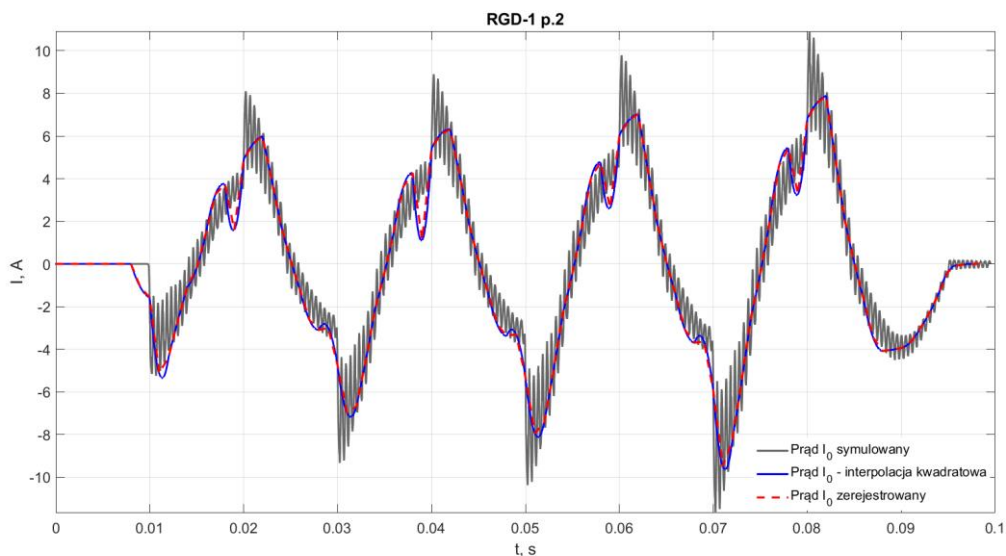
Tabela 5.3. Wartość odchylenia przeciętnego prądów w  $I_0$  w poszczególnych polach dla przyjętego modelu doziemienia, który został zoptymalizowane metodą najmniejszego błędu absolutnego dla przypadku nr 3.

Pole	Wartość odchylenia przeciętnego, A
H-900 p.16	0,42
H-900 p.15	0,31
H-900 p.13	0,29
RGD-1 p.2	0,88
RGD-1 p.8	0,26

Dane z zarejestrowanych przebiegów prądów  $3I_0$  przedstawiono na rys. 5.15, 5.16 oraz Z.16-Z.18. Charakterystyki przedstawiające moduł różnicy pomiędzy przebiegami symulowanymi a zmierzonymi dla omawianego modelu zwarcia zostały przedstawione na rys. Z.19-Z.23.

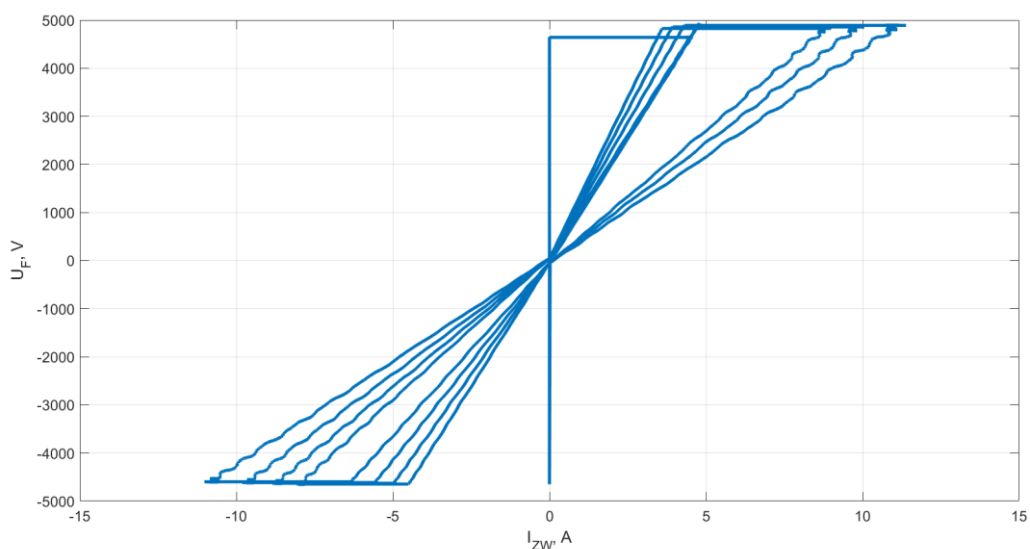


Rys. 5.15. Przebiegi prądu  $3I_0$  od czasu dla pola 16 w rozdzielni H-900 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 3. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.



Rys. 5.16. Przebiegi prądu  $3I_0$  od czasu dla pola 2 w rozdzielnicy RGD-1 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 3. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.

Przypadek ten jest o tyle ciekawy, że wyniki symulacji przeprowadzonych z wykorzystaniem dopasowanego modelu praktycznie idealnie odzwierciedlają przebiegi zarejestrowane. Co prawda w polach, które nie są bezpośrednio powiązane z miejscem zwarcia pojawiają się znaczące oscylacje, posiadające wyższe harmoniczne.



Rys. 5.17. Charakterystyka prądowo-napięciowa dynamicznej rezystancji zwarcia dla zidentyfikowanego modelu zwarcia dla przypadku nr 3.

Tak jak już zostało to wcześniej wspomniane, jest to związane bezpośrednio z przyjętym modelem linii kablowej (wzajemnych rezonansów pomiędzy różnymi miejscami linii). Do potwierdzenia słuszności przyjętego modelu rezystancji w miejscu zwarcia jest to wystarczające. Ponieważ wstępnie w tym miejscu można przyjąć opisaną wcześniej strukturę modelu, należy sprawdzić jak wygląda dynamiczna charakterystyka prądowo-napięciowa przyjętej rezystancji zwarcia. Została ona umieszczona na rys. 5.17. Kształt tej charakterystyki dodatkowo potwierdza słuszność przyjętego modelu. Jest ona zgodna z charakterystykami doziemień dostępnych w literaturze [54].

#### **5.5. KWK Marcel – przypadek nr 4: Zwarcie wysokoimpedancyjne na 725 metrze linii kablowej w polu nr 16 rozdzielnicy R-604**

Czwarty przypadek, który został poddany analizie, jest szczególny z kilku względów. Po pierwsze, jest to pierwszy przypadek zwarcia doziemnego w niniejszej pracy z KWK Marcel, a dokładniej pola markłowskiego. Po drugie, jest to przykład zwarcia, którego przyczyną było błędne działanie człowieka, a nie naturalne procesy starzenia lub uszkodzenia mechaniczne wynikające z warunków pracy. Zwarcie wysokorezystancyjne o zmiennej rezystancji wystąpiło 22 września 2019 roku o godzinie 4:39:03 na linii R-604, w polu 16 (rys. 5.18), 725 metrów od początku linii. Przyczyną zwarcia było upuszczenie rozpory obudowy ŁP na kabel przez pracownika. W rezultacie doszło do uszkodzenia izolacji kabla i powstania zwarcia doziemnego.

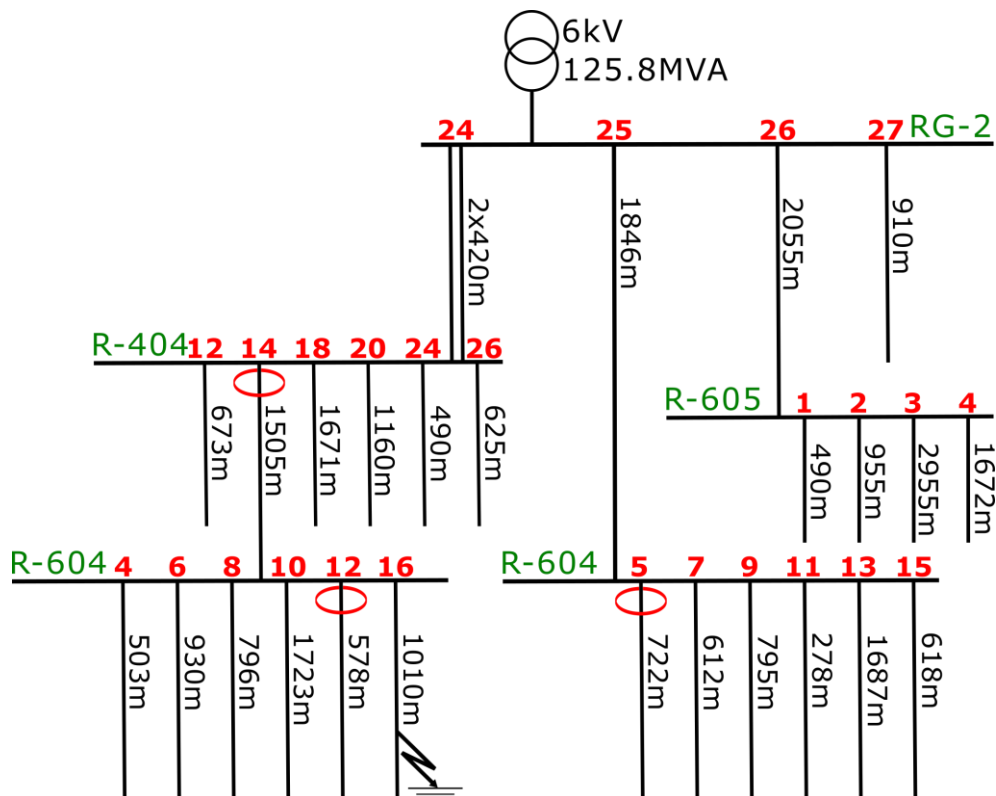
Zabezpieczenia ziemnozwarciowe zadziałały prawidłowo, natychmiast wyłączając linię. Jednak, zgodnie z procedurami przyjętymi na kopalni, po pewnym czasie linię załączono ponownie. Prawdopodobnie ta decyzja była przyczyną zwarcia metalicznego, które nastąpiło w tym samym miejscu kolejnego dnia. Przypadek ten zostanie przedstawiony w rozdziale 5.6.

W tym przypadku nie udało się zarejestrować przebiegów składowych zerowych prądu w miejscu zwarcia z uwagi na awarię funkcji akwizycji danych sterownika polowego megaMUZ-2. Jednak udało się zarejestrować dane z trzech innych pól: pole



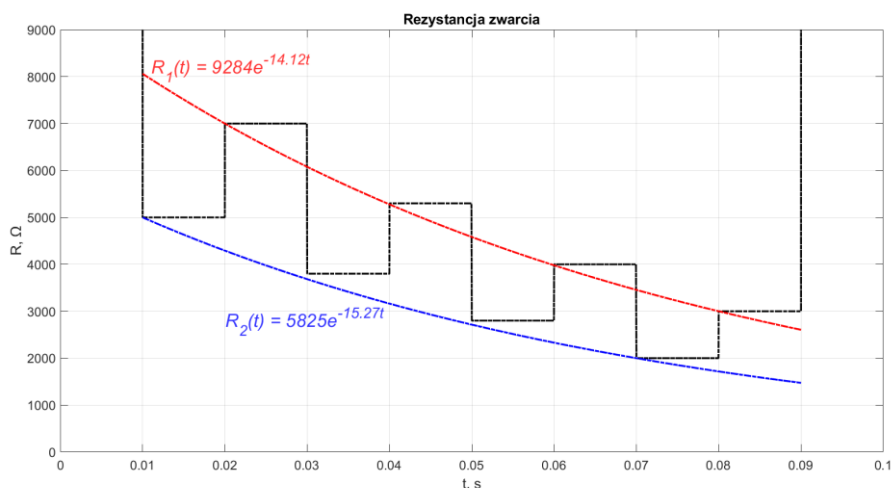
12 z rozdzielnicy R-404, pole 14 z rozdzielnicy R-604 oraz pole 5 z drugiej części rozdzielnicy R-604. Wszystkie te pola były wyposażone w sterowniki megaMUZ-2.

Podobnie jak w poprzednich przypadkach, zastosowano metody symulacji i analizy porównawczej, aby zrozumieć dynamikę tego zdarzenia i wyciągnąć wnioski, które mogą pomóc w przyszłych sytuacjach podobnego rodzaju.



Rys. 5.18. Schemat sieci dla przypadku nr 4 i 5 z KWK Marcel wraz z symbolicznym przedstawieniem miejsca zwarcia oraz układów automatyki zabezpieczeniowej, które zarejestrowały zdarzenie.

Po dokładnym przeanalizowaniu przebiegów zarejestrowanych w przypadku nr 4, można zauważyć pewne istotne cechy, takie jak asymetria czy też niewielkie wartości składowej zerowej prądu sugerujące wysoką wartość rezystancji zwarcia. W związku z tym konieczne jest zastosowanie specyficznego modelu zwarcia. Tym razem, ponownie zdecydowano się na model zwarcia o dwóch zmiennych rezystancjach, które są przełączane półokresowo. Taki model wydaje się najlepiej odzwierciedlać kształt zarejestrowanych przebiegów i pozwoli na jak najdokładniejsze odwzorowanie rzeczywistego stanu sieci w momencie wystąpienia zdarzenia.



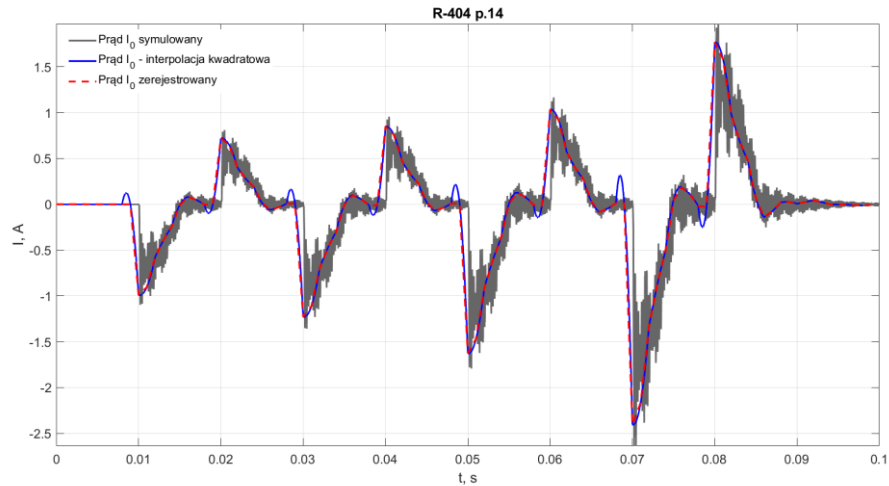
Rys. 5.19. Charakterystyka przedstawiająca zmianę rezystancji zwarcia w miejscu doziemienia dla przyjętego modelu (przypadek nr 4).

Podobnie jak w poprzednich przypadkach, do dopasowania parametrów modelu do zarejestrowanych przebiegów użyto metody najmniejszego błędu absolutnego. Ten proces polegał na generowaniu zasymulowanych przebiegów na podstawie modelu zwarcia i następnie dopasowywaniu ich do interpolacji kwadratowej zarejestrowanych przebiegów (tabela 5.4).

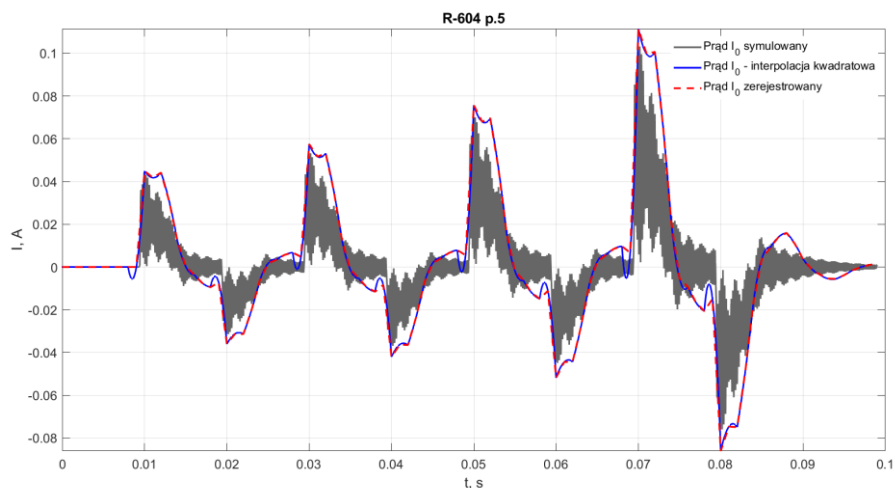
Tabela 5.4. Wartość odchylenia przeciętnego prądów w  $I_0$  w poszczególnych polach dla przyjętego modelu doziemienia, który został zoptymalizowane metodą najmniejszego błędu absolutnego dla przypadku nr 4.

Pole	Wartość odchylenia przeciętnego, A
R-404 p.14	0,146
R-604 p.5	0,013
R-604 p.12	0,022

Dane z zarejestrowanych przebiegów prądów  $3I_0$  przedstawiono na rys. 5.20-5.22. Charakterystyki przedstawiające moduł różnicy pomiędzy przebiegami symulowanymi a zmierzonymi dla omawianego modelu zwarcia zostały przedstawione na rys. Z.23-Z.25. Jak widać – ponownie pojawiają się problemy związane z przyjętym modelem linii kablowej. Można po kilku już przypadkach zauważyć, że sama wartość rezystancji zwarcia doziemnego mocno wpływa na pojawiające się szumy. Związane to jest z ograniczeniami przyjętego modelu  $\Pi$  linii kablowej.

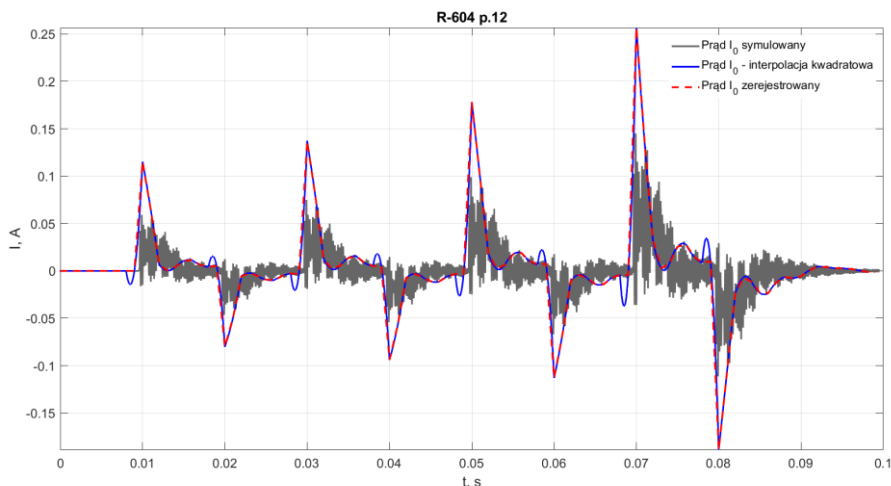


Rys. 5.20. Przebiegi prądu  $3I_0$  od czasu dla pola 14 w rozdzielnicy R-404 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 4. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.

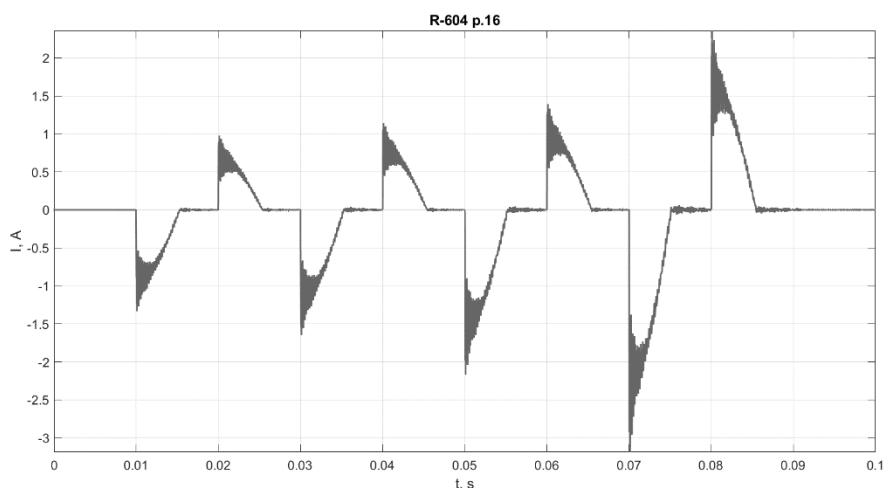


Rys. 5.21. Przebiegi prądu  $3I_0$  od czasu dla pola 5 w rozdzielnicy R-604 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 4. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.

Oznacza to, że prawdopodobnie istnieje pewna graniczna wartość rezystancji zwarcia, powyżej której model  $\Pi$  nie może być zastosowany. Dla każdej konfiguracji ta wartość graniczna będzie inna i będzie zależęć od pojemności i złożoności sieci. Niemniej dla rozważanego przypadku jeszcze model  $\Pi$  można zastosować. Na podstawie otrzymanych wyników sporządzono prawdopodobny przebieg prądu  $3I_0$  dla pola, w którym nastąpiło zwarcie (rys. 5.22).



Rys. 5.22. Przebiegi prądu  $3I_0$  od czasu dla pola 12 w rozdzielnicy R-604 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 4. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.



Rys. 5.23. Przebieg prądu  $3I_0$  od czasu dla pola 16 w rozdzielnicy R-604 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 4. Wynik symulacji.

Wyniki tego procesu pokazują, jak skomplikowane i zróżnicowane mogą być przypadki zwarcí doziemnych, a także jak ważne jest precyzyjne modelowanie i analiza takich zdarzeń.

## 5.6. KWK Marcel – przypadek nr 5: Zwarcie metaliczne na 725 metrze linii kablowej w polu nr 16 rozdzielnicy R-604

Piąty przypadek, który nastąpił w kopalni KWK Marcel, stanowi kolejny ciekawy przykład na ilustrację potencjalnego powiązania między kolejnymi zdarzeniami w sieci.

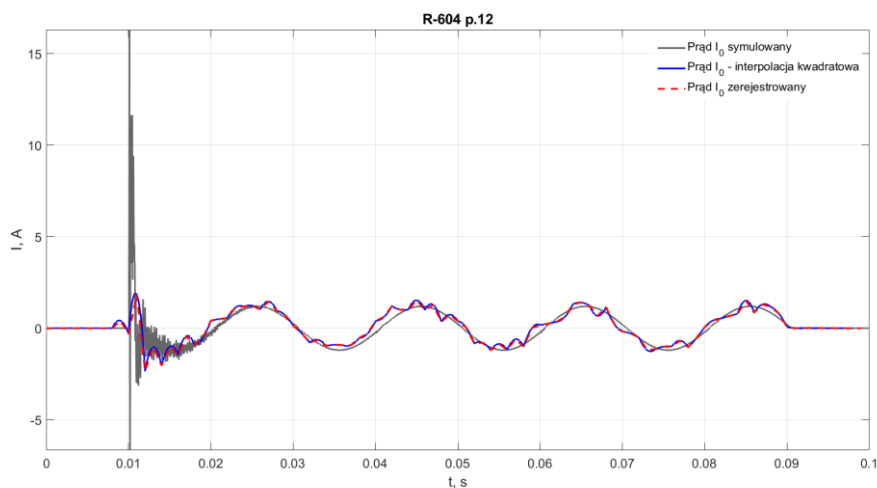
Tym razem zdarzenie miało miejsce w tej samej linii (R-604, pole 16), w której wystąpił przypadek nr 4, a konkretnie 725 metrów od punktu początkowego. Zwarcie miało miejsce 23 września 2019 roku o godzinie 23:11:48. Co istotne, w tym przypadku doszło do zwarcia metalicznego, które ze względu na większe zagrożenie pożarowe i wybuchowe jest znacznie poważniejszym zdarzeniem w porównaniu do zwarcia wysokorezystancyjnego z poprzedniego podrozdziału.

Przypadek nr 5 jest prawdopodobnie pośrednim następstwem poprzedniego zdarzenia, które miało miejsce na tej samej linii. To sugeruje, że mimo początkowego prawidłowego działania zabezpieczeń i ponownego uruchomienia linii, uszkodzenie kabla YHKGYe<sub>ky</sub> 3x50mm<sup>2</sup> było na tyle poważne, że doprowadziło do kolejnego, tym razem bardziej poważnego zdarzenia. Po wystąpieniu zwarcia, pole zostało wyłączone na trzy dni, co pozwoliło na przeprowadzenie niezbędnych prac naprawczych. W tym czasie, na uszkodzonym kablu założono mufę, co pozwoliło na przywrócenie normalnej pracy linii po zakończeniu naprawy. Dodatkowo, warto zaznaczyć, że dane dotyczące tego zdarzenia zostały zarejestrowane przez te same sterowniki polowe, co w przypadku nr 4. Oznacza to, że informacje pochodziły z pól 12 i 5 rozdzielnic R-604 i 14 rozdzielnic R-404 (rys. 5.18).

*Tabela 5.5. Wartość odchylenia przeciętnego prądów w  $I_0$  w poszczególnych polach dla przyjętego modelu doziemienia, który został zoptymalizowane metodą najmniejszego błędu absolutnego dla przypadku nr 5.*

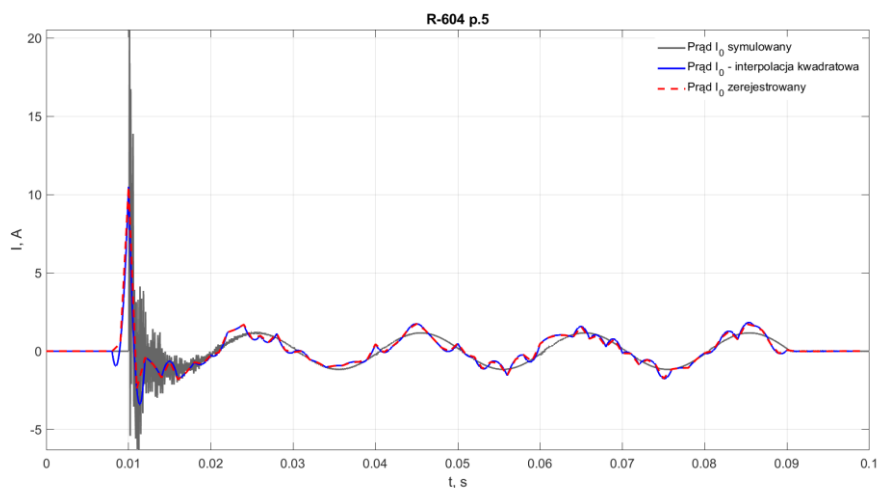
Pole	Wartość odchylenia przeciętnego, A
<b>R-404 p.14</b>	5,42
<b>R-604 p.5</b>	0,34
<b>R-604 p.12</b>	0,25

Analiza tego przypadku pokazuje, jak istotne jest dokładne zrozumienie i ocena skutków pierwszego zdarzenia, przed ponownym uruchomieniem linii. To zdarzenie pokazuje również, jak ważne jest odpowiednie monitorowanie i utrzymanie sieci, aby zapobiegać poważniejszym problemom w przyszłości.



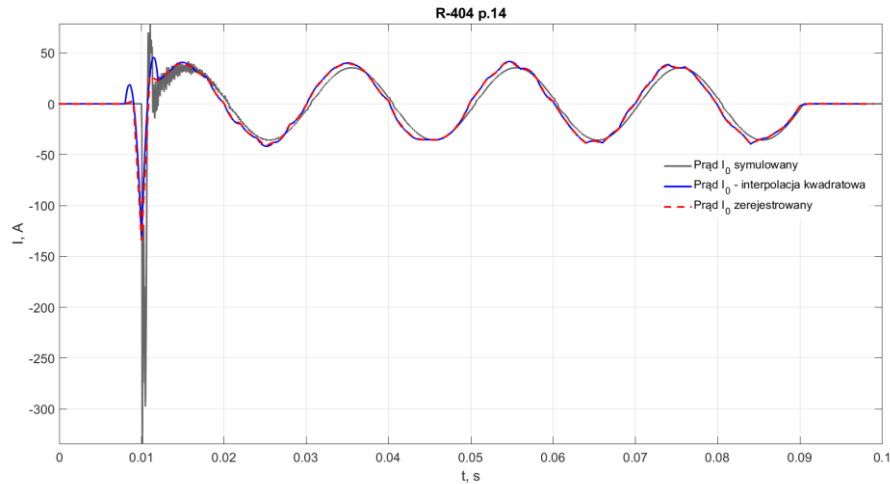
Rys. 5.24. Przebiegi prądu  $3I_{10}$  od czasu dla pola 12 w rozdzielnicy R-604 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 5. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.

Podobnie jak poprzednio, do dopasowania parametrów modelu do zarejestrowanych przebiegów użyto metody najmniejszego błędu absolutnego (tabela 5.5).

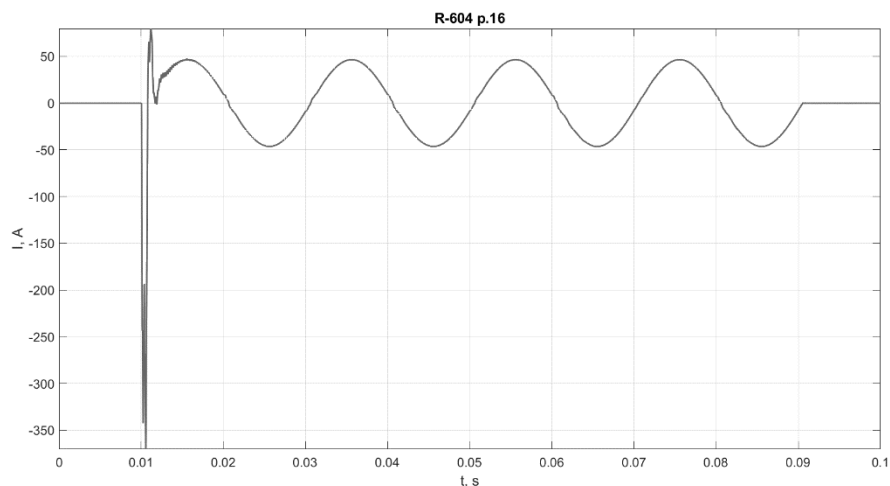


Rys. 5.25. Przebiegi prądu  $3I_{10}$  od czasu dla pola 5 w rozdzielnicy R-604 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 5. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.

W tym przypadku z racji, że mamy do czynienia ze zwarcie metalicznym jako model zwarcia przyjęto zwarcie o stałej rezystancji. Najlepsze dopasowanie modelu uzyskano po przyjęciu wartości rezystancji w miejscu zwarcia równej  $2,11 \Omega$ .



Rys. 5.26. Przebiegi prądu  $3I_0$  od czasu dla pola 14 w rozdzielnicy R-404 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 5. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.



Rys. 5.27. Przebieg prądu  $3I_0$  od czasu dla pola 16 w rozdzielnicy R-604 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 5. Wynik symulacji.

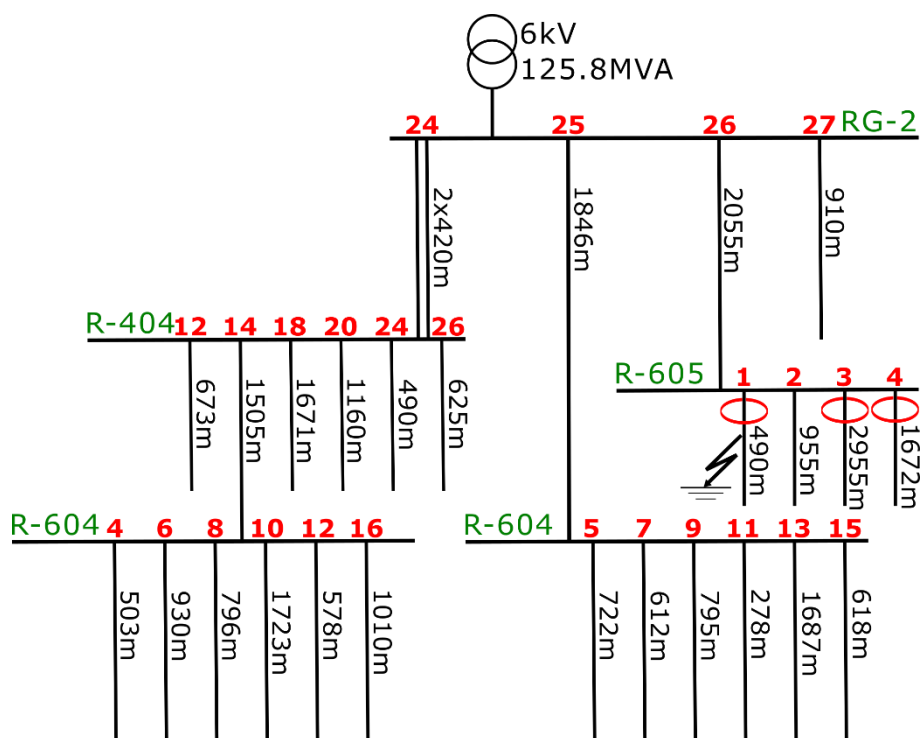
Dane z zarejestrowanych przebiegów prądów  $3I_0$  przedstawiono na rys. 5.24-5.26. Charakterystyki przedstawiające moduł różnicy pomiędzy przebiegami symulowanymi a zmierzonymi dla omawianego modelu zwarcia zostały przedstawione na rys. Z.26-Z.28. Jak widać – mniejsza rezystancja zwarcia zmniejsza szумы wynikające z modelu  $\Pi$  linii kablowej.

Wynik symulacji przedstawiające przebieg czasowy  $3I_0$  pokazano na rys. 5.25. Jak widać symulacja nie odzwierciedla w pełni rzeczywistych przebiegów, jednak zdaniem autora niniejszej rozprawy porównania są na zadowalającym poziomie (przynajmniej

w zakresie częstotliwości 50 Hz, różnice przejawiają się dopiero dla wyższych częstotliwości).

### 5.7. KWK Marcel – przypadek nr 6: Zwarcie wysokorezystancyjne na 303 metrze linii kablowej w polu nr 1 rozdzielnic R-605

Ostatni analizowany w tym rozdziale przypadek miał miejsce 14 grudnia 2019 roku o godzinie 2:18:49 w linii R-605 p. 1 na 303 metrze kabla w KWK Marcel (rys. 5.28). Podobnie jak w poprzednich przypadkach, zwarcie miało charakter wysokorezystancyjny o rezystancji zmiennej w czasie.

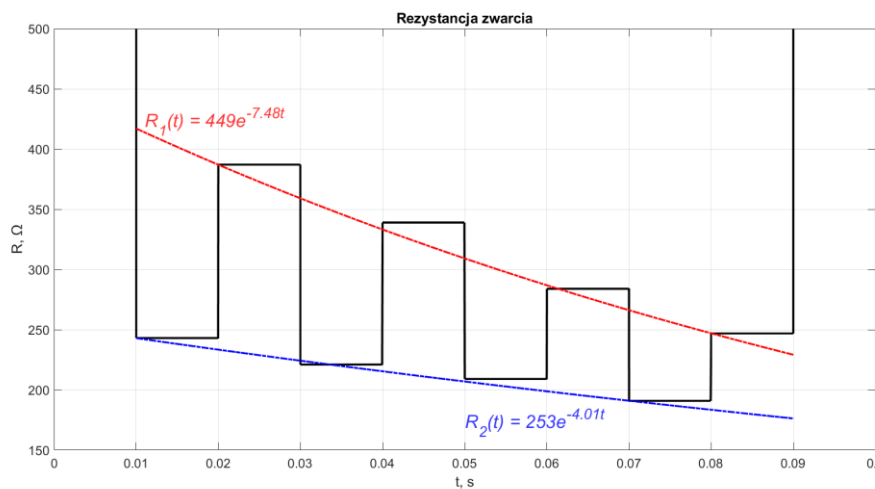


Rys. 5.28. Schemat sieci dla przypadku nr 6 z KWK Marcel wraz z symbolicznym przedstawieniem miejsca zwarcia oraz układów automatyki zabezpieczeniowej, które zarejestrowały zdarzenie.

W przeciwieństwie do wcześniejszych zdarzeń, przyczyna tego doziemienia pozostaje nieznana, choć przypuszcza się, że mogła mieć charakter naturalny wynikający ze starzenia się izolacji oraz ewentualnego przepięcia. Wyjątkowość tego przypadku polega na tym, że mimo braku jednoznacznej przyczyny, automatyka zabezpieczeniowa eliminacyjna i restytucyjna zadziałała prawidłowo, wyłączając



i ponownie załączając linię. W ciągu kolejnych 7 dni nie zarejestrowano żadnych innych niepokojących zdarzeń w tym polu.



Rys. 5.29. Charakterystyka przedstawiająca zmianę rezystancji zwarcia w miejscu doziemienia dla przyjętego modelu (przypadek nr 6).

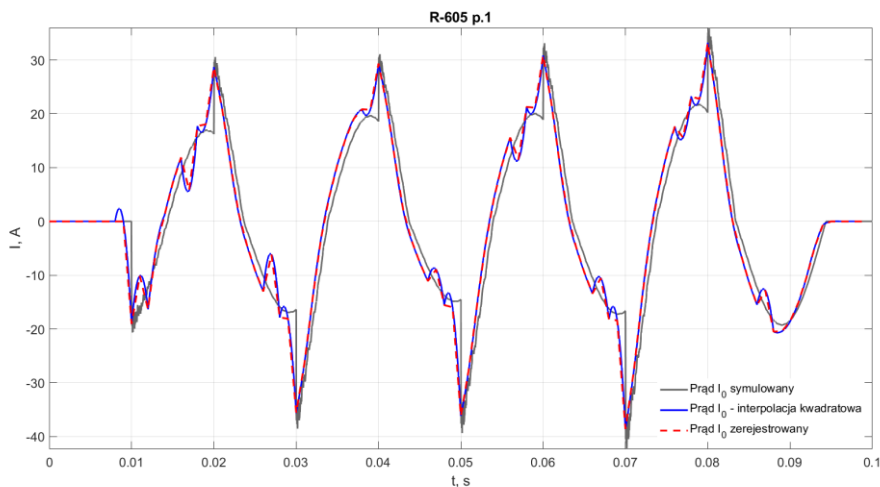
Zwarcie wystąpiło w kablu YHKGXSfty 3x50mm<sup>2</sup>. Należy podkreślić, że w tym przypadku zarejestrowały zdarzenie tylko 3 sterowniki MegaMUZ-2, zainstalowane w polach 1, 3 i 4 rozdzielnic R-605. To oznacza, że analiza tego przypadku opierała się na mniejszej liczbie danych niż w przypadku danych z KWK Zofiówka. Jednak mimo tego ograniczenia, przypadek nr 6 dostarczył kolejnych informacji do dalszych analiz.

Analiza kształtu zarejestrowanych przebiegów, w szczególności ich asymetrii, prowadzi do wniosku, że należy ponownie zastosować model rezystancji zwarcia jako zwarcia o dwóch zmiennych w czasie rezystancjach przełączanych półokresowo.

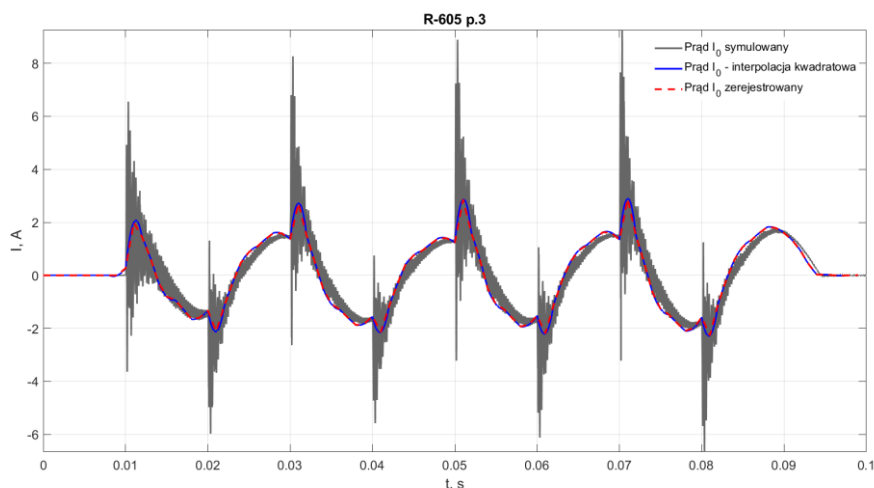
Procedura dopasowania modelu do rzeczywistych przebiegów była analogiczna do stosowanej w poprzednich przypadkach. Zasymulowane przebiegi porównywano z interpolacją kwadratową zarejestrowanych przebiegów, minimalizując wartość błędów absolutnych (tabela 5.6) uzyskując model rezystancji doziemienia (rys. 5.29).

Tabela 5.6. Wartość odchylenia przeciętnego prądów w  $I_0$  w poszczególnych polach dla przyjętego modelu doziemienia, który został zoptymalizowany metodą najmniejszego błędów absolutnych dla przypadku nr 5.

Pole	Wartość odchylenia przeciętnego, A
R-605 p.1	3,12
R-605 p.3	0,30
R-605 p.4	0,31



Rys. 5.30. Przebiegi prądu  $3I_0$  od czasu dla pola 1 w rozdzielnicy R-605 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 6. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.

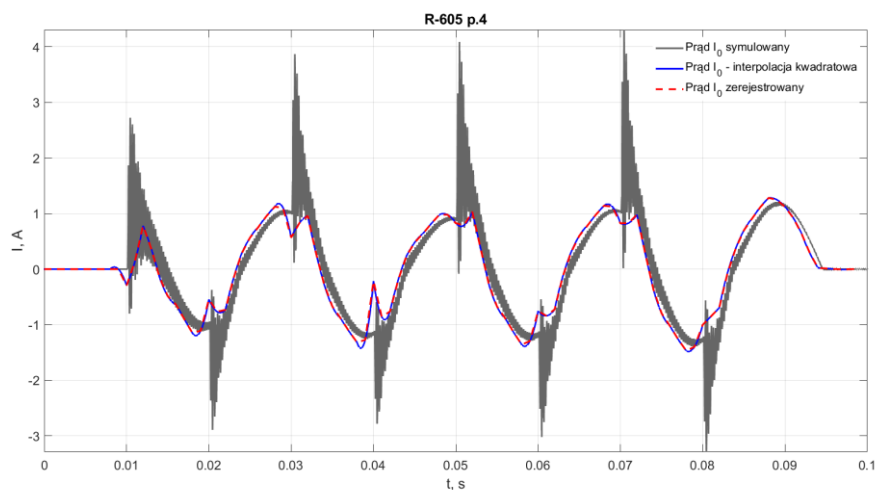


Rys. 5.31. Przebiegi prądu  $3I_0$  od czasu dla pola 3 w rozdzielnicy R-605 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 6. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.

Interesujące obserwacje dotyczą pola nr 1, w którym doszło do zwarcia. Pomimo zmiennych warunków, zarejestrowane zniekształcenia, w chwili prawdopodobnego przechodzenia przebiegu składowej zerowej napięcia przez zero, były stosunkowo niewielkie, co sugeruje, że rezystancja zwarcia mogła być mniejsza niż w przypadku nr 4. Jest to ważna obserwacja, która może przyczynić się do lepszego zrozumienia

procesów zachodzących w trakcie zwarcia doziemnego o zmiennej rezystancji, a także do dalszego rozwoju naszych modeli i metod analizy.

Dane z zarejestrowanych przebiegów prądów  $3I_0$  przedstawiono na rys. 5.30-5.32. Charakterystyki przedstawiające moduł różnicy pomiędzy przebiegami symulowanymi a zmierzonymi dla omawianego modelu zwarcia zostały przedstawione na rys. Z.29-Z.31.



Rys. 5.32. Przebiegi prądu  $3I_0$  od czasu dla pola 4 w rozdzielnicy R-605 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 6. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.

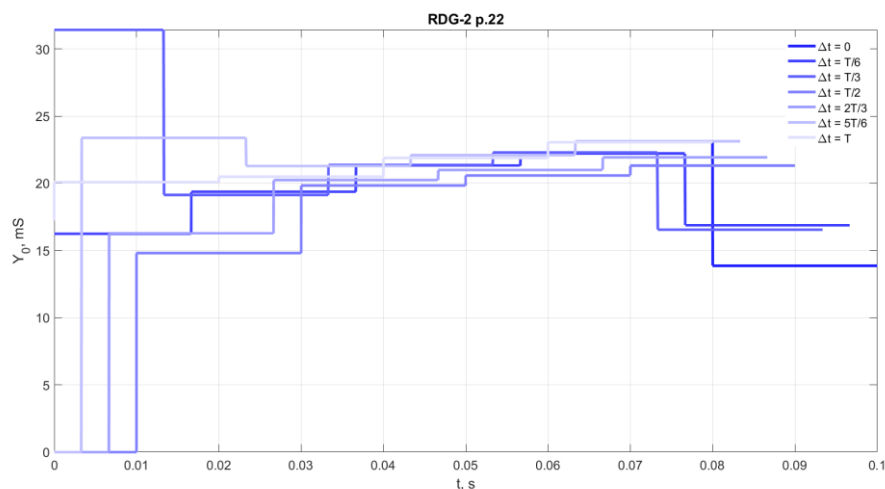
## 5.8. Analiza kryterium $Y_0 >$ na podstawie danych kopalnianych

W elektroenergetycznych sieciach rozdzielczych SN stosowanych w kopalniach węgla kamiennego w Polsce jako zabezpieczenia ziemnozwarciowe najczęściej wykorzystuje się zabezpieczenia zerowoprądowe i zerowonapięciowe ze względu na rygorystyczne przepisy dotyczące bezpieczeństwa [9] oraz zabezpieczenia kierunkowe ze względu na precyzyjne określenie uszkodzonego odpywu. Z tego powodu pojawia się pytanie: czy możliwe jest zabezpieczanie takiej sieci przy użyciu zabezpieczeń admitancyjnych? Zabezpieczenia admitancyjne mają za zadanie wykrywać zwarcia doziemne na podstawie zmiany admitancji w sieci. Stosowane w górnictwie sterowniki polowe posiadają w swoim oprogramowaniu odpowiednie funkcje, które pozwalają im pełnić rolę zabezpieczeń admitancyjnych. Oznacza to, że w praktyce istnieje możliwość

zabezpieczania sieci przy użyciu tych urządzeń - jest to jedynie kwestia odpowiedniego odblokowania i ustawienia już zainstalowanych funkcji.

W celu zbadania możliwości praktycznego zastosowania zabezpieczeń admitancyjnych w sieciach kopalnianych, w tej części rozprawy zostaną przeprowadzone obliczenia admitancji  $Y_0$  dla przykładowych zdarzeń w sieciach opisanych wcześniej w podrozdziałach 5.3 do 5.7. Obliczenia te zostaną przeprowadzone zgodnie z definicją admitancji doziemnej, którą można potraktować jako iloraz wartości skutecznej składowej zerowej prądu mierzonej w danym punkcie do wartości skutecznej składowej zerowej napięcia (5.9). Wyniki tych obliczeń pozwolą na ocenę skuteczności zabezpieczeń admitancyjnych w wykrywaniu zwarcć doziemnych

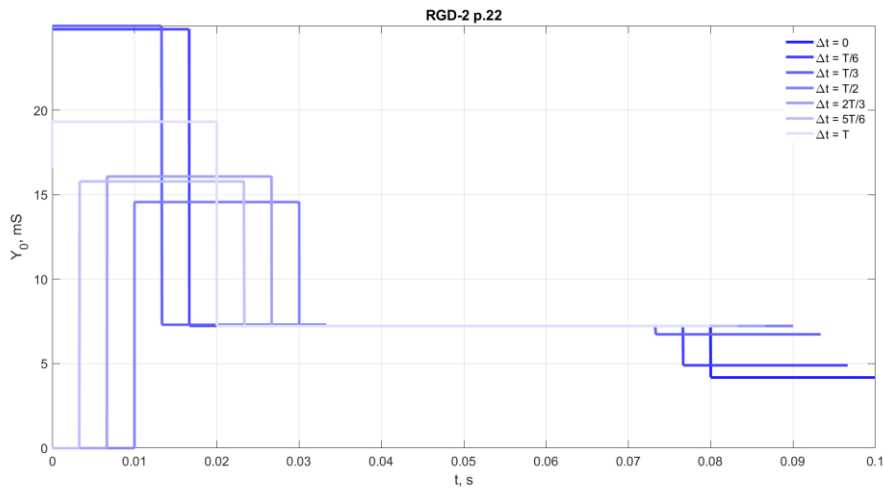
$$Y_0 = \frac{I_0}{U_0} \quad (5.9)$$



Rys. 5.33. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi  $Y_0$  dla czasu pomiaru  $t = 20$  ms dla pola 22 rozdzielnic RDG-2 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 1.

Istotny w tej zależności jest fakt, że w celu obliczenia jakiegokolwiek wartości skutecznej należy przyjąć czas w jakim będzie dokonywane całkowanie. Domyślnie to jest jeden okres, dla polskiej sieci 20 ms. Jednak w zależności od potrzeb ten czas może być różny. Przykładowo w liniach napowietrznych przyjmuje się ten czas jako 500 ms [93 – 97]. Z racji tego, że istotnym czynnikiem w polskim górnictwie jest czas zadziałania (ze względu na zagrożenia rażeniowe, pożarowe i wybuchowe) to czas 500 ms jest

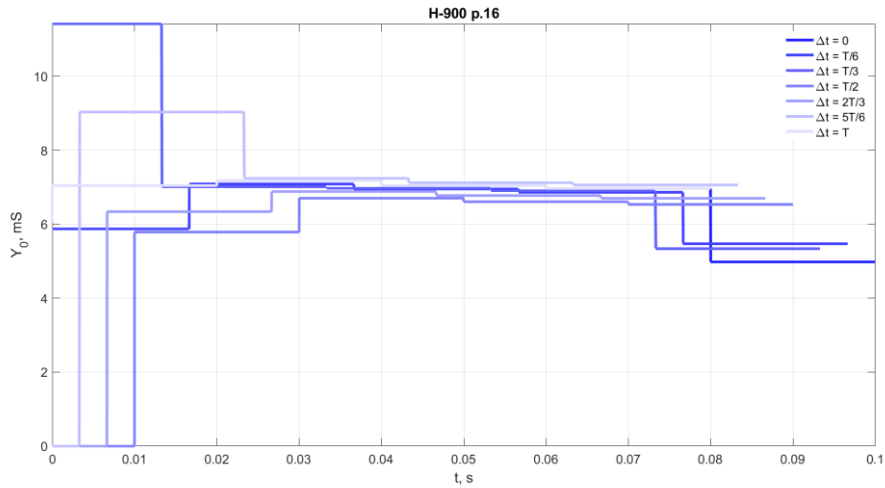
stanowczo za długi. Prawdopodobnie 100 ms lub krótszy. Niemniej, rozważając teoretycznie czy czas całkowania 20 ms jest wystarczający pojawia się pytanie o to, w którym momencie właściwe będzie rozpoczęcie pierwszego pomiaru.



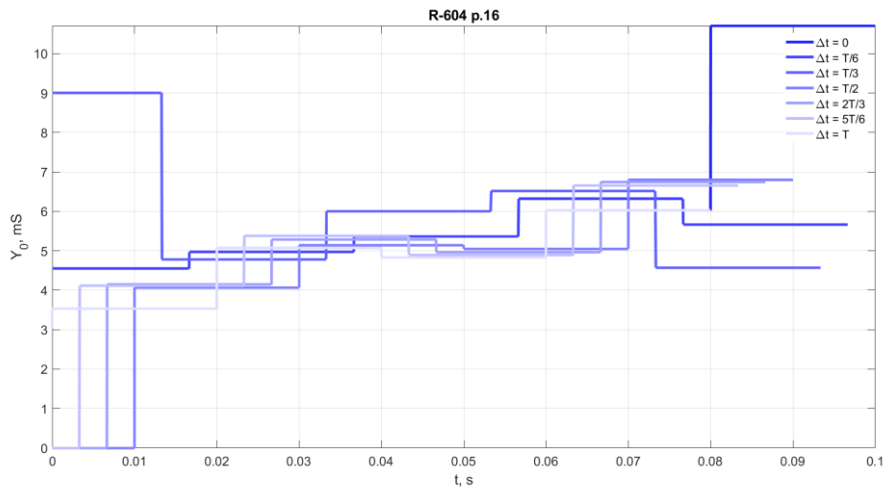
Rys. 5.34. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi  $Y_0$  dla czasu pomiaru  $t = 20$  ms dla pola 22 rozdzielnic RDG-2 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 2.

Logiczne jest, że przy przyjęciu czasu pomiaru 20 ms przyjęcie za punkt początku pomiaru ekstremum jednego z napięć fazowych, ponieważ – tak jak to zostało wcześniej wspomniane – istnieje największe prawdopodobieństwo, że właśnie w ekstremum zwarcie się pojawi. W przypadku sieci trójfazowej w czasie trwania jednego okresu ( $T = 20$  ms) pojawia się 6 takich ekstremów.

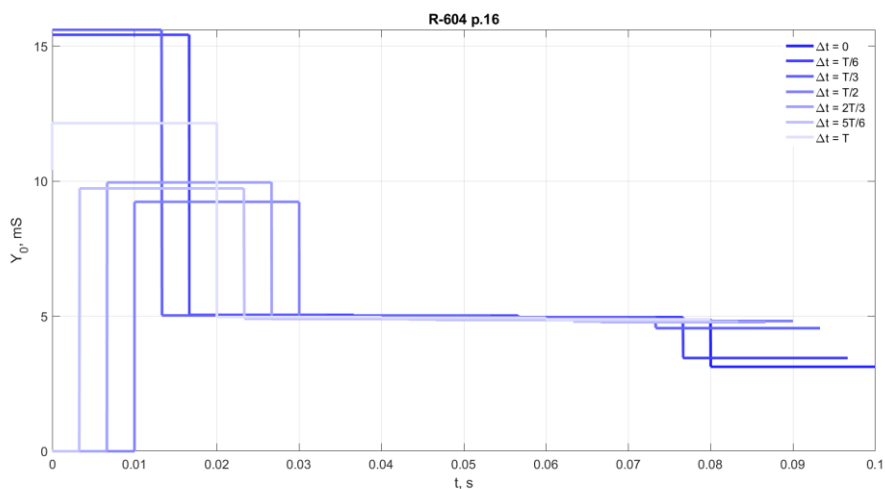
Z racji tego, że pomiar  $Y_0$  dokonywany jest w sposób ciągły, z tym że dopóki nie nastąpi zwarcie to te wyniki pomiarów nie są aktywizowane. Przesunięcie czasowe chwili zwarcia z początkiem pomiarów admitancji mogą spowodować, że wartość  $Y_0$  dla danej chwili mocno będzie odbiegać od wyniku oczekiwanego. Świetnie ten problem opisują charakterystyki przedstawione na rys. 5.33-5.58 oraz Z.32-Z.50. Na poniższych charakterystykach przedstawiono wspomniane 6 możliwości przesunięcia  $\Delta t$  między początkiem zwarcia a początkiem pomiarów admitancji.



Rys. 5.35. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi  $Y_0$  dla czasu pomiaru  $t = 20$  ms dla pola 16 rozdzielnic H-900 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 3.



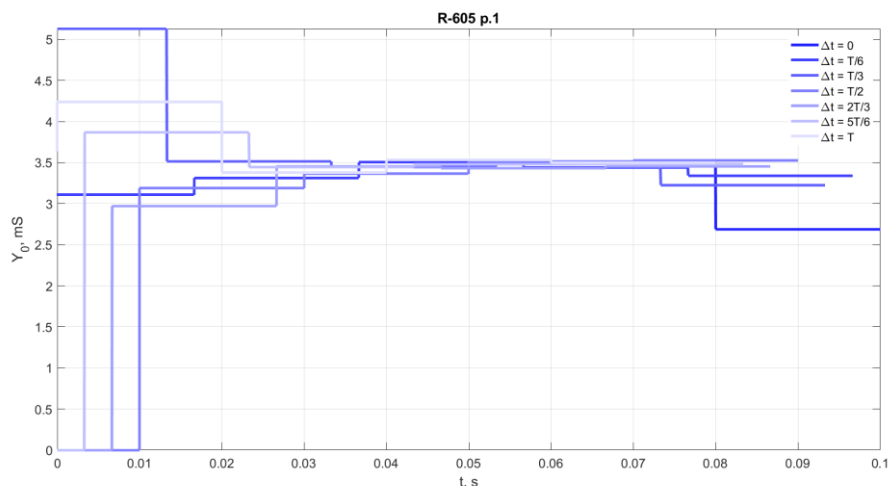
Rys. 5.36. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi  $Y_0$  dla czasu pomiaru  $t = 20$  ms dla pola 16 rozdzielnic R-604 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 4.



Rys. 5.37. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi  $Y_0$  dla czasu pomiaru  $t = 20$  ms dla pola 16 rozdzielnic R-604 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 5.

Jak widać w skrajnych przypadkach dla czasu pomiaru 20 ms pojawiają się sytuacje, gdzie  $Y_0$  w początkowej fazie zwarcia może być zbyt małe, aby w pobudzić zabezpieczenie w uszkodzonej linii lub zbyt duże i spowodować zadziałanie zabezpieczeń w niewłaściwym polu. W związku z tym konieczne jest wprowadzenie dłuższego czasu całkowania oraz wykorzystanie innego kryterium wykrywającego początek zwarcia doziemnego.

Jak zauważono w podanych sytuacjach zwarcie najczęściej było wyłączone w ciągu 80 ms od rozpoczęcia zwarcia, więc jako czas pomiaru proponuje się wprowadzenie czasu  $t = 80$  ms, a jako zabezpieczenie wykrywające początek zwarcia wykorzysta się zabezpieczenia zerowonapięciowe.



Rys. 5.38. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi  $Y_0$  dla czasu pomiaru  $t = 20$  ms dla pola 1 rozdzielnicy R-605 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 6.

Zsynchronizowanie zabezpieczenia admitancyjnego z zabezpieczeniem zerowonapięciowym stanowi przesłankę o możliwości zastosowania takich układów na kopalni. Niemniej dla podanych sieci sprawdzono poprawność zadziałania zabezpieczeń. W tym celu wyliczono  $Y_0$  dla każdej sieci, dla każdego z analizowanych punktów pomiarowych. Zarówno dla danych zarejestrowanych jak i dla danych symulowanych (tabela 5.7). Nasuwa się tu problem doboru wartości nastawy takiego zabezpieczenia. W tym celu skorzystano ze wzoru wykorzystywanego w innych typach sieci [26-28]:

$$Y_{0nast} \geq \frac{k_b I_{CLi}}{U_{0max}} + \Delta Y_{0\mu} \quad (5.10)$$

gdzie:  $k_b$  – współczynnik bezpieczeństwa (1,2),  $I_{CLi}$  – prąd pojemnościowy zabezpieczanej i-tej linii,  $U_{0max}$  – maksymalna wartość skuteczna składowej zerowej napięcia. Współczynnik  $\Delta Y_{0\mu}$  – błąd pomiaru admitancji (dla układów Ferrantiego między 0,6 a 0,8 mS, tu przyjęto 0,8).

Tabela 5.7. Porównanie obliczonych wartości  $Y_0$  dla zarejestrowanych przebiegów oraz zasymulowanych w programie ATP-EMTP i porównanie ich z  $I_{0nast}$ .

Pole	zasymulowane $Y_0$ , mS	zarejestrowane $Y_0$ , mS	$Y_{0nast}$	Czy zadziała zabezpieczenie?
<b>Przypadek nr 1</b>				
RG-1z p.25	0,21	0,20	0,714	NIE   NIE
RG-1z p.38A	1,91	2,06	10,9	NIE   NIE
RG-1z p.38B	1,91	2,05	10,9	NIE   NIE
RGD-2p.18	0,72	0,58	2,57	NIE   NIE
RGD-2p.21	0,25	0,24	1,09	NIE   NIE
RGD-2 p.22	6,49	6,78	1,02	TAK   TAK
<b>Przypadek nr 2</b>				
RG-1z p.29	0,21	0,19	1,04	NIE   NIE
RG-1z p.38A	2,86	2,73	10,9	NIE   NIE
RGD-2 p.21	0,33	0,27	1,09	NIE   NIE
RGD-2 p.22	9,59	9,09	1,02	TAK   TAK
<b>Przypadek nr 3</b>				
H-900 p.16	6,47	6,50	0,68	TAK   TAK
H-900 p.15	0,57	0,75	1,19	NIE   NIE
H-900 p.13	0,64	0,58	1,51	NIE   NIE
RGD-1 p.2	5,48	5,45	5,15	NIE   NIE
RGD-1 p.8	0,58	0,73	2,98	NIE   NIE
<b>Przypadek nr 4</b>				
R-404 p.14	3,04	3,51	3,78	NIE   NIE
R-604 p.5	0,18	0,19	0,89	NIE   NIE
R-604 p.12	0,29	0,27	0,90	NIE   NIE
R-604 p.16	3,75	b.d.	1,01	TAK   -----
<b>Przypadek nr 5</b>				
R-404 p.14	3,23	2,85	3,78	NIE   NIE
R-604 p.5	0,12	0,11	0,89	NIE   NIE
R-604 p.12	0,16	0,09	0,90	NIE   NIE
R-604 p.16	5,26	b.d.	1,01	TAK   -----
<b>Przypadek nr 6</b>				
R-605 p.1	3,42	3,41	0,78	TAK   TAK
R-605 p.3	0,37	0,30	1,11	NIE   NIE
R-605 p.4	0,28	0,17	1,36	NIE   NIE



Jak widać niezależnie, który przypadek był analizowany zaproponowany wzór spełnia swoją funkcję selektywnego wyłączania uszkodzonych pól. Ponadto powyższe zestawienie dodatkowo potwierdza słuszność przyjętych modeli. Uzasadniając: parametr  $Y_0$  dla sieci symulowanej jak i dla przebiegów zarejestrowanych są bardzo do siebie zbliżone. W związku z faktem, że w każdym przypadku zabezpieczenie admitancyjne zadziałałoby prawidłowo zasadne jest uwzględnienie możliwości zastosowania kryterium  $Y_0 >$  w automatyce zabezpieczeniowej stosowanej w sieciach kopalnianych. Temat zostanie rozwinięty w rozdziale 6.

W literaturze są opisywane wzory określające górną granicę doboru  $I_{0nast}$  dla innych rodzajów sieci, jednak z uwagi na fakt iż one wykorzystują parametry dławika uziemiającego sieć skompensowaną bez AWSC nie są możliwe do uwzględnienia w przyjętym modelu. Przyjmując dane z tabeli 5.7 można zauważyć, że niezależnie od rodzaju zwarcia wartość  $Y_0$  wzrosła znacznie ponad  $Y_{0nast}$  tylko w polu, w którym nastąpiło zwarcie. Problemem może być zabezpieczenie admitancyjne w polu poprzedzającym pole, w którym nastąpiło zwarcie. Admitancja w takich polach niebezpiecznie blisko zbliżyła się do  $Y_{0nast}$ . Co można zaobserwować w przypadku nr 4 z tabeli 5.7. Rozwiązaniem może być zwiększenie wartości współczynnika bezpieczeństwa  $k_b$  we wzorze 5.10.

## 5.9. Podsumowanie rozdziału

W tym rozdziale przeprowadzono szczegółową analizę sześciu przypadków zwarć doziemnych, które wystąpiły w kopalnianych sieciach średnich napięć. Zestawienie obejmowało dwa przypadki zwarć metalicznych oraz cztery przypadki zwarć wysokorezystancyjnych. Dla każdego z tych przypadków podjęto próbę odtworzenia zwarcia w programie symulacyjnym ATP-EMTP. W tym celu, jako model linii kablowej przyjęto model  $\Pi$ . Mimo że model ten nie jest doskonały i wprowadza wiele gałęzi i węzłów nieistniejących w rzeczywistości, okazał się użyteczny w procesie symulacji. Należy jednak zaznaczyć, że w niektórych sytuacjach pojawiały się liczne rezonanse wzajemne, generując dodatkowe wyższe harmoniczne w przebiegach.

Do modelowania rezystancji zwarcia zastosowano dwa podejścia. W przypadku zwarcń niskorezystancyjnych, przyjęto model rezystora o stałej rezystancji. Natomiast dla zwarcń wysokorezystancyjnych, wykorzystano model dwóch rezystorów o rezystancjach zmiennych w czasie, przełączanych półokresowo. Wartości tych rezystancji dobrano metodą najmniejszego błędu absolutnego. Proces ten polegał na dopasowaniu przebiegów symulowanych do interpolacji kwadratowej zarejestrowanych przebiegów. Takie podejście pozwoliło na skuteczną symulację i analizę zjawisk występujących w rzeczywistych (rozległych) sieciach kopalnianych.

Następnym krokiem pracy w było obliczenie wartości admitancji  $Y_0$  dla każdego z wcześniej analizowanych pól we wszystkich badanych przypadkach. To zadanie wymagało obliczenia wartości skutecznych składowych zerowych napięcia oraz prądu. W tym miejscu napotkano na pewien problem - literatura ani dokumenty techniczne producentów nie określają wprost, dla jakiego czasu całkowania (liczby pełnych okresów) powinny być obliczone te wartości skuteczne. Ostatecznie zdecydowano się rozważyć sytuacje dla czasu równego 20 ms (1 pełny okres) oraz 80 ms (4 pełne okresy). Praktycznie podchodząc do problemu, za bardziej prawdopodobny czas, który będzie stosowany w wykorzystaniu zabezpieczeń admitancyjnych, uznano wartość 80 ms, która spełnia wymóg wyłączenia zwarcia poniżej 0,1 s zgodnie z wymaganiami normy [9]. To rozwiązanie jest połączone z sygnalizacją składowej zerowej napięcia przez zabezpieczenie zerowonapięciowe. Po obliczeniu wartości  $Y_0$ , porównano je z parametrem  $Y_{0nast}$ , który na podstawie wzoru (5.10) wyliczono dla każdego pola.

Podsumowując, analizy wykazały, że w każdym z sześciu analizowanych przypadków, zabezpieczenie admitancyjne zadziałałoby prawidłowo. Ta konkluzja jest niezwykle istotna, podkreślając potencjalną skuteczność stosowania zabezpieczeń admitancyjnych w kopalnianych sieciach średnich napięć. Dalsza analiza kryterium admiracyjnego została podjęta w rozdziale 6.

## 6. Analiza selektywności poprzecznej kryterium admitancyjnego $Y_0$ na podstawie modelowej sieci

### 6.1. Opis wybranej sieci

Na podstawie otrzymanych wyników z rozdziału 5.7 można wysunąć wniosek, że kopalniane sieci średnich napięć ze skutecznie izolowanym punktem neutralnym niezależnie od miejsca i rodzaju zwarcia nadają się do zastosowania kryterium admitancyjnego  $Y_0$ . W tym miejscu zasadne jest pytanie czy i w jaki sposób zmienia się  $Y_0$  poszczególnych odplywów w zależności od miejsca wystąpienia zwarcia w danej linii oraz wartości rezystancji tego zwarcia. Przeanalizowany został również wpływ wyższych harmoniczných na pomiar admitancji odplywu.

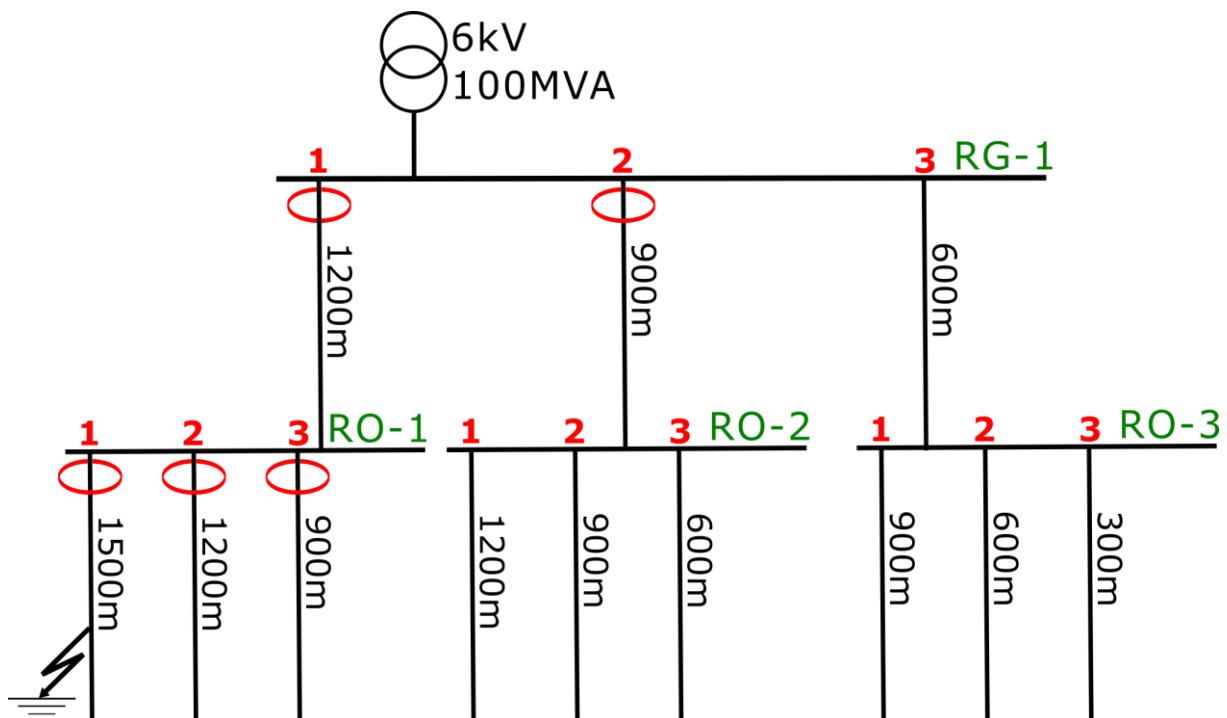
W tym celu stworzono prosty model sieci z izolowanym punktem neutralnym (rys. 6.1). Jako model linii kablowych wykorzystano model  $\Pi$ . Sieć została zaprojektowana w programie ATP/EMTP. W niniejszym modelu przyjęto, że wszystkie linie są liniami kablowymi, w których znajduje się kabel YHKGXSFoyn  $3 \times 185 \text{ mm}^2$ . Łączna długość wszystkich kabli w tej galwanicznie połączonej sieci wynosi 10,8 km a prąd zwarciový wynosi 19,76 A. Za każdym razem zwarcie wymuszano w polu 1 rozdzielnicý oddziałowej RO-1. Do analizy przyjęto, że przebiegi czasowe  $i_0(t)$  oraz  $u_0(t)$  zostały zarejestrowane dla następujących pól:

- rozdzielnicý główný RG-1 pole 1,
- rozdzielnicý główný RG-1 pole 2,
- rozdzielnicý oddziałowý RO-1 pole 1,
- rozdzielnicý oddziałowý RO-1 pole 2,
- rozdzielnicý oddziałowý RO-1 pole 3.

Ponadto przyjęto następujące założenia:

- każdorazowo zwarcie następowowało w 30 ms po rozpoczęciu symulacji,
- zwarcie następiło w chwili, kiedy napięcie fazowé względem ziemi osiągało maksymalną wartość,
- pole, w którym następiło zwarcie nie było odłączane do końca trwania symulacji,

- w celu analizy stanu ustalonych prądów  $i_0(t)$  i napięć  $u_0(t)$  symulacja trwała 500 ms,
- niezależnie od wartości rezystancji zwarcia każdorazowo przyjęto, że rezystancja ta jest niezmienna przez cały okres trwania zwarcia,
- w programie przyjęto, że częstotliwość próbkowania wyniosła  $10^9$  próbek/s, ze względu na analizę wyższych harmonicznych w układzie.



Rys. 6.1. Schemat analizowanej sieci SN.

## 6.2. Wartości skuteczne napięcia $U_0$ oraz prądów $I_0$ wybranych pól w sieci bez wyższych harmonicznych

W dobie stosowania w sieciach przemysłowych różnego rodzaju urządzeń generujących wyższe harmoniczne analiza zjawisk zachodzących w sieci bez wyższych harmonicznych ma ograniczony zakres zastosowania. Niemniej jednak w przypadku sieci SN, w której występuje wyłącznie pierwsza harmoniczna, ułatwia dalsze rozważania nad zagadnieniami doziemień w tego typu sieci.

Dla przyjętej na rys.6.1 konfiguracji sieci otrzymano zbiór przebiegów czasowych napięcia i prądów w sieci dla zwarć występujących w wybranych punktach pola 1 rozdzielnicy RO-1 (tabela 6.1) o rezystancji przyjętych w tabeli 6.2 dla każdego

z punktów. W dalszej części rozdziału przedstawiono przykładowe wyniki dla wybranych długości. Są to typowe wyniki.

*Tabela 6.1. Miejsca zwarcia dla rozdzielnic oddziałowej RO-1 p. 1.*

<b>L.p.</b>	1	2	3	4	5	6
<b>x, m</b>	0	300	600	900	1200	1500

*Tabela 6.2. Wartości rezystancji zwarcia.*

<b>L.p.</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>R<sub>zw</sub>, Ω</b>	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000

Postacie czasowe w tej części rozprawy nie wnoszą nic nowego do dalszej analizy, dlatego skupiono się tu tylko na wartościach skutecznych wybranych przebiegów. Przy ich analizie istotnym parametrem jest czas: zarówno czas trwania pomiaru jak i górna oraz dolna granica całkowania. Omawiane punkty umieszczono w tabeli 6.3. Pierwszy zestaw punktów jest niezwykle istotny. Zazwyczaj wszystkie odkształcenia przebiegów czasowych  $u_0(t)$  oraz  $i_0(t)$  wygaszają się w ciągu pierwszych 20 ms (pierwszy pełny okres zwarcia). Im większe zniekształcenia tym wartość skuteczna prądu w tym przedziale jest większa od wartości skutecznej stanu ustalonego w danym przebiegu. Drugi zestaw punktów wybrano, gdyż w poprzednim rozdziale pracy pokazano, że najczęściej uszkodzona linia jest odłączana już po 80 ms trwania zwarcia, czyli poniżej 0,1 s zgodnie z wymaganiami normy [9]. Dlatego też istotnym wydaje się fakt sprawdzenia wartości skutecznych tych przebiegów dla pierwszych czterech okresów trwania zwarcia. Ostatnia para punktów ma na celu odzwierciedlenie stanu ustalonego. Oczywiście jest to, że dla stanu ustalonego wystarczające byłoby zebranie wyników dla jednego okresu. Jednak postanowiono poszerzyć ten zakres do pięciu okresów w celu wyeliminowania wpływu ewentualnych błędów grubych.

*Tabela 6.3. Przyjęte parametry czasowe do wyznaczenia wartości skutecznych wybranych przebiegów.*

<b>L.p.</b>	<b>t<sub>p</sub>, ms</b>	<b>t<sub>k</sub>, ms</b>	<b>Δt, ms</b>	<b>komentarz</b>
1	30	50	20	Pierwszy okres od chwili rozpoczęcia zwarcia
2	30	110	80	Najczęstszy czas trwania zwarcia przed odłączeniem pola
3	400	500	100	Stan ustalony

Wyniki symulacji wartości skutecznej składowej zerowej prądów i napięcia dla pierwszych 20 ms zwarcia umieszczono na rys. 6.2. Wyniki te zestawiono z wartościami skutecznymi wyznaczonymi dla stanu ustalonego. W celu zachowania przejrzystości wyników pokazano zależności dla miejsca zwarcia na początku i na końcu linii w polu 1 rozdzielnicy RO-1 (dla  $x = 0$  m – kolor niebieski oraz  $x = 1500$  m – kolor czerwony). Wszystkie pozostałe charakterystyki mieszczą się pomiędzy nimi.

Analizę otrzymanych wyników warto rozpocząć od charakterystyki przedstawiającej stosunek wartości skutecznej składowej zerowej napięcia w sieci po nastąpieniu zwarcia do wartości skutecznej napięcia dowolnej z faz przed nastąpieniem zwarcia. Zależność tą opisuje wzór:

$$U_0 = \beta U_F \quad (6.1)$$

W literaturze [25 – 28] zazwyczaj zależność  $\beta = f(R_{ZW})$  jest przedstawiana w postaci charakterystyki liniowej. W ramach niniejszej rozprawy postanowiono przyjąć, że zarówno ta charakterystyka jak i wszystkie zależności opisywane jako funkcja od rezystancji zwarcia będą przedstawiane jako wykresy w skali półlogarytmicznej. Na podstawie zależności  $U_0/U_F = f(R_{ZW})$  proponuje się przyjęcie następującego podziału zwarć doziemnych:

- zwarcia niskorezystancyjne – są to zwarcia, stosunkowo najłatwiejsze do wykrycia, wartość parametru  $\beta$  mieści się w przedziale od 0,9 do 1 (dla stanu ustalonego). Dla analizowanej sieci można przyjąć, że są to doziemienia, w których  $R_{ZW}$  mieści się w przedziale od 0 do 80  $\Omega$ ,
- zwarcia średniorezystancyjne – są to zwarcia, dla których wartość parametru  $\beta$  mieści się w przedziale od 0,2 do 0,9 (dla stanu ustalonego). Dla analizowanej sieci można przyjąć, że są to doziemienia, w których  $R_{ZW}$  mieści się w przedziale od 80 do 800  $\Omega$ ,
- zwarcia wysokorezystancyjne – są to zwarcia, najtrudniejsze do wykrycia, w których wartość parametru  $\beta$  mieści się w przedziale od 0 do 0,2. Dla analizowanej sieci można przyjąć, że są to doziemienia, w których  $R_{ZW}$  mieści się w przedziale powyżej 800  $\Omega$ .

Podział ten jest często spotykany w literaturze [49 – 51] jednak w niniejszej rozprawie jest świadomie zmodyfikowany i rozbudowany przez autora o zwarcia średniorezystancyjne.

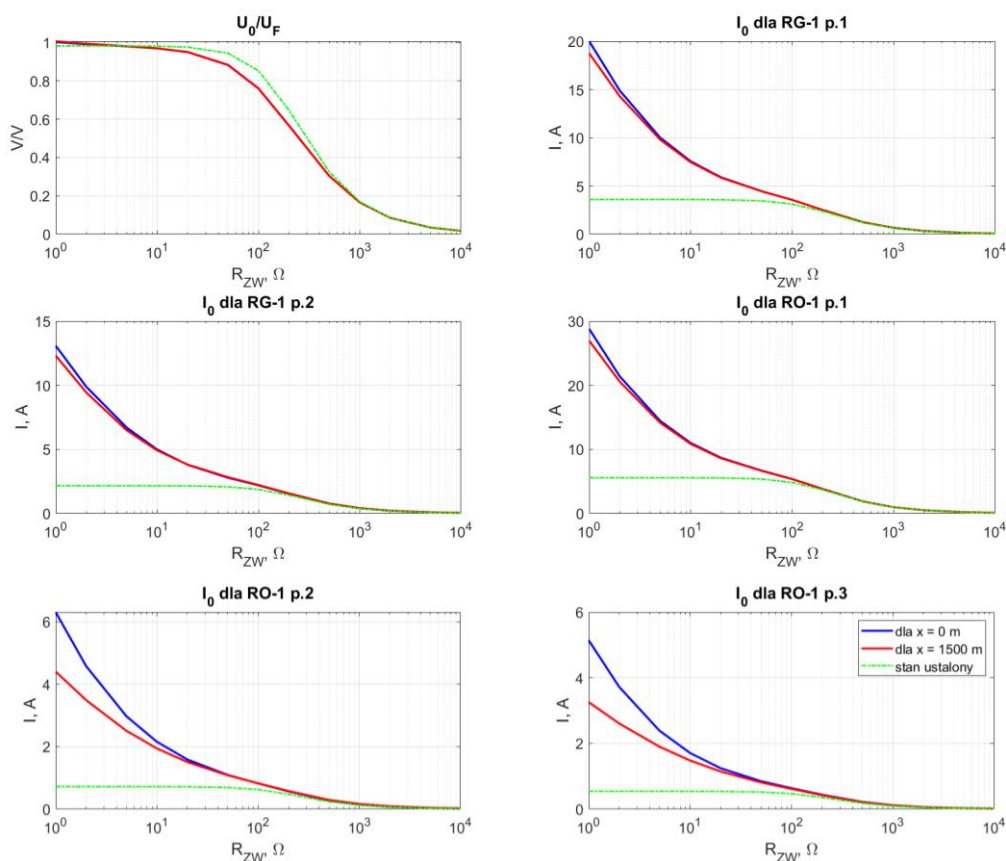
Dla przyjętego podziału można się skupić już całościowo na charakterystykach przedstawionych na rys. 6.2. W przypadku zwarć niskorezystancyjnych dla stanu ustalonego zarówno napięcie  $U_0$  jak i prądy  $I_0$  w poszczególnych miejscach sieci mają praktycznie stałą wartość niezależnie od rezystancji zwarcia. Wynika to z faktu, że cała sieć z punktu widzenia zwarcia ma impedancję znacznie większą niż zwarcie. Jednak jeżeli przyjrzeć się wielkościom  $U_0$  i  $I_0$  można zauważyć, że w tym przedziale stosunek odkształceń prądów w pierwszych 20 ms jest odwrotnie proporcjonalny do  $R_{ZW}$ . Zjawisko to w dosyć prosty sposób można wyjaśnić przyjmując, że sieć z izolowanym punktem neutralnym jest układem typu RLC. W takich układach odpowiedź układu przy gwałtownej zmianie stanu przy stałych wartościach  $L$  oraz  $C$  zależy wprost od części rezystancyjnej. Im mniejsza rezystancja tym oscylacje gasnące w stanie nieustalonym są większe. Wraz ze wzrostem rezystancji oscylacje w stanie nieustalonym maleją.

W przypadku zwarć średniorezystancyjnych  $U_0$  oraz  $I_0$  gwałtownie maleją wraz ze wzrostem rezystancji zwarcia. W tym przedziale impedancja zastępcza sieci z punktu widzenia miejsca zwarcia jest tego samego rzędu wielkości co rezystancja zwarcia. Dlatego też niewielkie zmiany wartości  $R_{ZW}$  powoduje widoczne zmiany analizowanych prądów i napięć. Dla stanu nieustalonego wartości skuteczne prądów  $I_0$  mierzone dla pierwszego okresu zwarcia są niemalże w całym zakresie równe wartościom skutecznym dla stanu ustalonego. Dla zakresu na granicy z obszarem zwarć niskorezystancyjnych te wartości mocno się od siebie różnią.

Tak jak było wspomniane wcześniej, w kopalnianych sieciach średnich napięć z izolowanym punktem neutralnym zwarcia wysokorezystancyjne w teorii nie stanowią dużego zagrożenia, jednak zbagatelizowane mogą przeobrazić się w zwarcia niskooporowe, które następnie mogą spowodować zwarcia międzyfazowe. Jak widać na przedstawionych charakterystykach zarówno napięcie  $U_0$  jak i prądy  $I_0$  są niewielkie,

więc istnieje ryzyko, że pozostaną przez dłuższy czas niewykryte przez przyrządy pomiarowo-zabezpieczające.

Jak widać z przedstawionych charakterystyk w szczególnych przypadkach może okazać się problematyczne skuteczne dobranie nastaw zabezpieczeń zerowoprądowych. Ustawienie czasu całkowania 20 ms może spowodować, że dla małych rezystancji zwarcia poza linią, w której nastąpiło zwarcie może zostać odłączona linia zdrowa. W powyższym przykładzie ustawienie  $I_{0nast}$  na wartość 4 A w polu 3 rozdzielnicy RO-1 może spowodować odłączenie tego pola mimo, że zwarcie miało miejsce na początku pola 1 tej samej rozdzielnicy. W omawianym przykładzie rezystancja zwarcia miałaby zaledwie kilka omów.

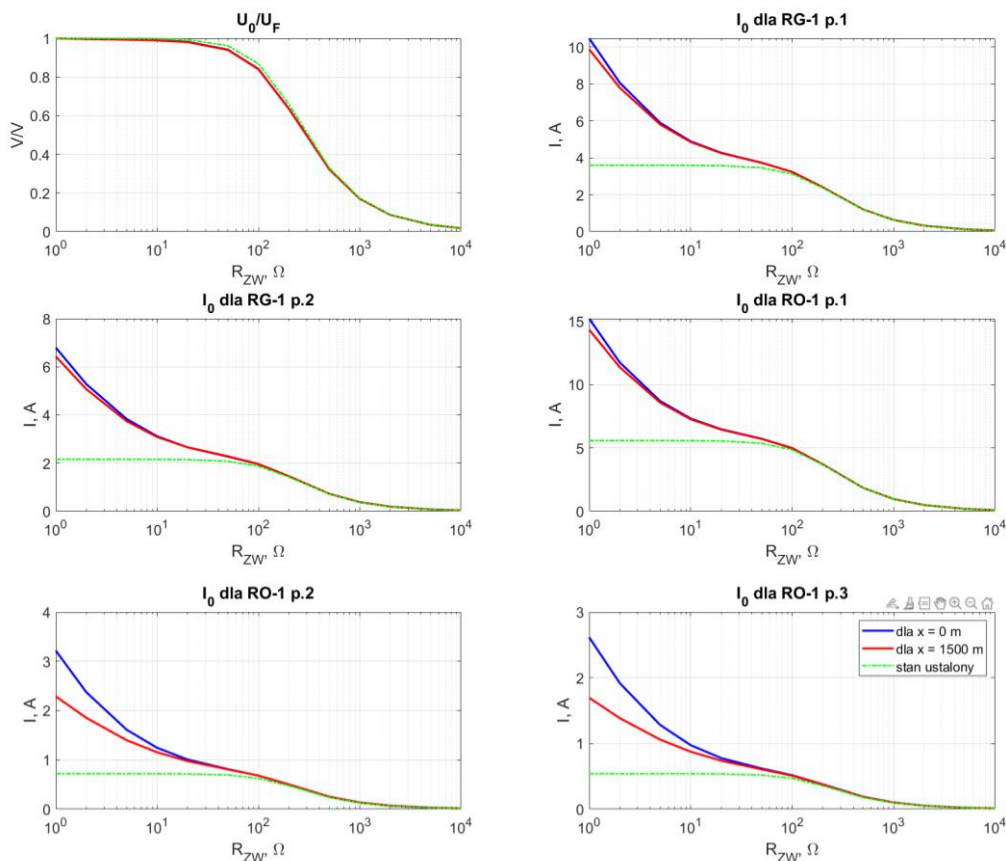


Rys. 6.2.  $U_0/U_F$  oraz prądy  $I_0$  dla wybranych punktów sieci w zależności od rezystancji zwarcia  $R_{ZW}$ . Kolor zielony – dla stanu ustalonego, kolor niebieski – dla  $t_p = 30$  ms i  $\Delta t = 20$  ms oraz  $x = 0$  m, kolor czerwony – dla  $t_p = 30$  ms i  $\Delta t = 20$  ms oraz  $x = 1500$  m.

Częściowym rozwiązaniem tego problemu jest zmiana czasu całkowania. Na rys. 6.3 przedstawione zostały te same wyniki co na rys. 6.2 z tą różnicą, że w tym przypadku czas całkowania wynosi nie 20 ms a 80 ms. Niewielka modyfikacja powoduje



obniżenie znaczenia odkształceń początkowych dla poszczególnych pomiarów. Dzięki tej zmianie czasu całkowania zwiększa się możliwość selektywnego wyłączenia uszkodzonej linii. Skutkiem ubocznym takiego rozwiązania jest wydłużenie czasu reakcji, jednak jak pokazano w poprzednich rozdziałach zabezpieczenia w zdecydowanej większości przypadków także wyłączają uszkodzoną linię w tym czasie.

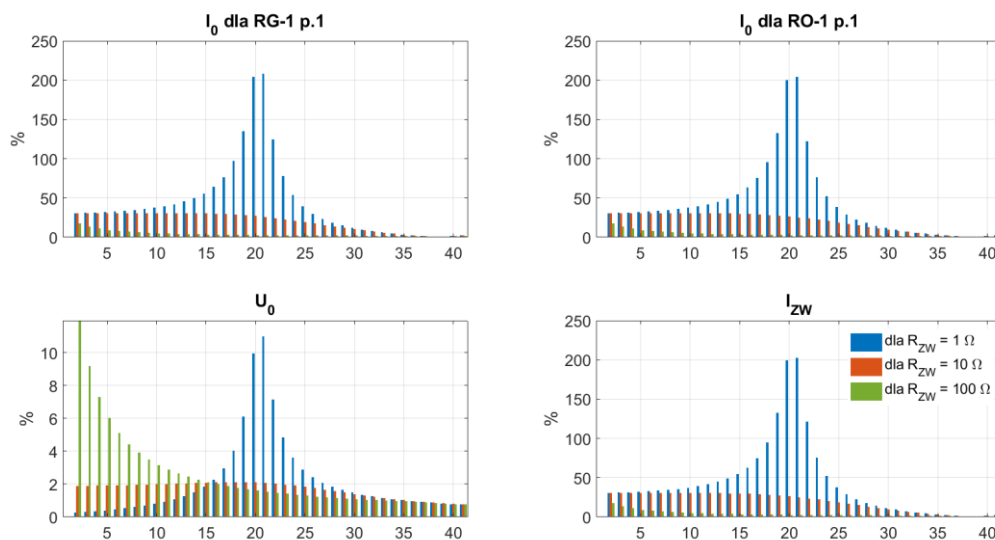


Rys. 6.3.  $U_0/U_F$  oraz prądy  $I_0$  dla wybranych punktów sieci w zależności od rezystancji zwarcia  $R_{ZW}$ . Kolor zielony – dla stanu ustalonego, kolor niebieski – dla  $t_p = 30$  ms i  $\Delta t = 80$  ms oraz  $x = 0$  m, kolor czerwony – dla  $t_p = 30$  ms i  $\Delta t = 80$  ms oraz  $x = 1500$  m.

### 6.3. Analiza widmowa stanu nieustalonego w sieci bez udziału wyższych harmonicznych

W rozdziale 5 można zauważyć, że istotny wpływ na pomiar wartości skutecznej poszczególnych parametrów w czasie pierwszych 20 ms zwarcia mają przebiegi o wysokiej częstotliwości występujące w początkowym okresie zwarcia. We wcześniejszych rozdziałach wyjaśniono, że sieć z izolowanym punktem neutralnym można potraktować jako bardziej złożony układ RLC. W układach RLC [49 – 51, 98, 99]

podczas gwałtownej zmiany rezystancji mogą pojawić się oscylacje gasnące. Oscylacje gasnące należy traktować jako funkcję nieokresową o skończonej energii. Stąd wiadome jest, że widmo amplitudowe stanu nieustalonego ma charakter ciągły [98 – 102]. Ze względu na czytelność postanowiono przedstawić (rys. 6.4) widmo amplitudowe w postaci dyskretnej dla harmonicznych od 2 do 41. Dla wygodniejszego porównania zależności przyjęto procentową wartość wyższych harmonicznych dla danej wielkości w stosunku do pierwszej. Ponieważ wyższe harmoniczne są porównywane z pierwszą postanowiono nie umieszczać jej na poszczególnych charakterystykach.



Rys. 6.4. Procentowy udział wyższych harmonicznych w stosunku do pierwszej harmonicznej dla wybranych rezystancji zwarcia. Przedstawione widma:  $I_0$  dla RG-1 p.1,  $I_0$  dla RO-1 p.1,  $U_0$  oraz  $I_{ZW}$ .

Oczywistym jest fakt, że przy stosunkowo dużych wartościach rezystancji zwarcia ( $R_{ZW} > 100 \Omega$ ) procentowy udział wyższych harmonicznych jest niewielki, stąd też świadomie postanowiono pominąć analizę widma dla zwarcí wysokorezystancyjnych. Pierwszym zauważalnym faktem, który można zaobserwować jest zgodność procentowych charakterystyk widmowych prądów pod kątem zarówno jakościowym jak i ilościowym. Pozwala to określić charakter widmowy prądu zwarcia na podstawie wybranego zarejestrowanego przebiegu  $I_0$ . Przy niewielkich wartościach rezystancji zwarcia wyższe harmoniczne  $i(t)$  będą miały istotny wpływ na przebieg prądu  $I_{ZW}(t)$

w początkowym etapie zwarcia. Dla niewielkich wartości  $R_{zw}$  wyższe harmoniczne mogą osiągać wartości nawet dwukrotnie przewyższającą pierwszą harmoniczną prądu. Ważny jest też fakt, że maksimum tej wartości osiągane jest dla 21 harmoniczej. Zazwyczaj kopalniana sterowniki zabezpieczające rejestrują przebiegi czasowe napięć i prądów z częstością pomiędzy 1000 a 1600 próbek/s. Przy częstotliwości sieci 50 Hz dwudziesta pierwsza harmoniczna wynosi 1050 Hz. Oznacza to, że jest niemożliwe skuteczne uwzględnienie 21. harmoniczej przy pomiarze  $I_0$  oraz  $U_0$  w sieci, co w skrajnych sytuacjach może doprowadzić do wyłączenia oprócz linii uszkodzonej także linii zdrowej. Wraz ze wzrostem rezystancji zwarcia udział wyższych harmoniczych zmniejsza się. Już przy  $R_{zw} = 100 \Omega$  jest znacznie mniejszy niż 50% wartości  $I^{1h}$ .

W przypadku napięcia  $U_0$  dla rezystancji zwarcia w przedziale od 1 do 80  $\Omega$  udział w wyższych harmoniczych tylko raz przekracza 10%  $U_0$ . Sytuacja taka występuje dla 21. harmoniczej, gdy  $R_{zw} = 1 \Omega$ . W przedziale między 100 a 500  $\Omega$  gwałtownie wzrasta udział wyższych harmoniczych (między 2. a 10. harmoniczną). Widmo amplitudowe przyjmuje wówczas postać funkcji homograficznej [100 – 102]. Dla wyższych wartości rezystancji zwarcia dalej można przyjmować, że widmo  $U_0$  ma kształt hiperboli, jednak przegięcie funkcji następuje pomiędzy 1 a 2 harmoniczną, więc udział wyższych harmoniczych w tej sytuacji jest niewielki.

#### **6.4. Pomiar admitancji wybranych odplywów w sieci bez udziału wyższych harmoniczych**

Korzystając ze wzoru (6.2) obliczono możliwe minimalne wartości nastaw zabezpieczeń admitancyjnych dla wybranych odplywów w symulowanej sieci średniego napięcia z izolowanym punktem neutralnym. Wyniki przedstawiono w tabeli 6.4.

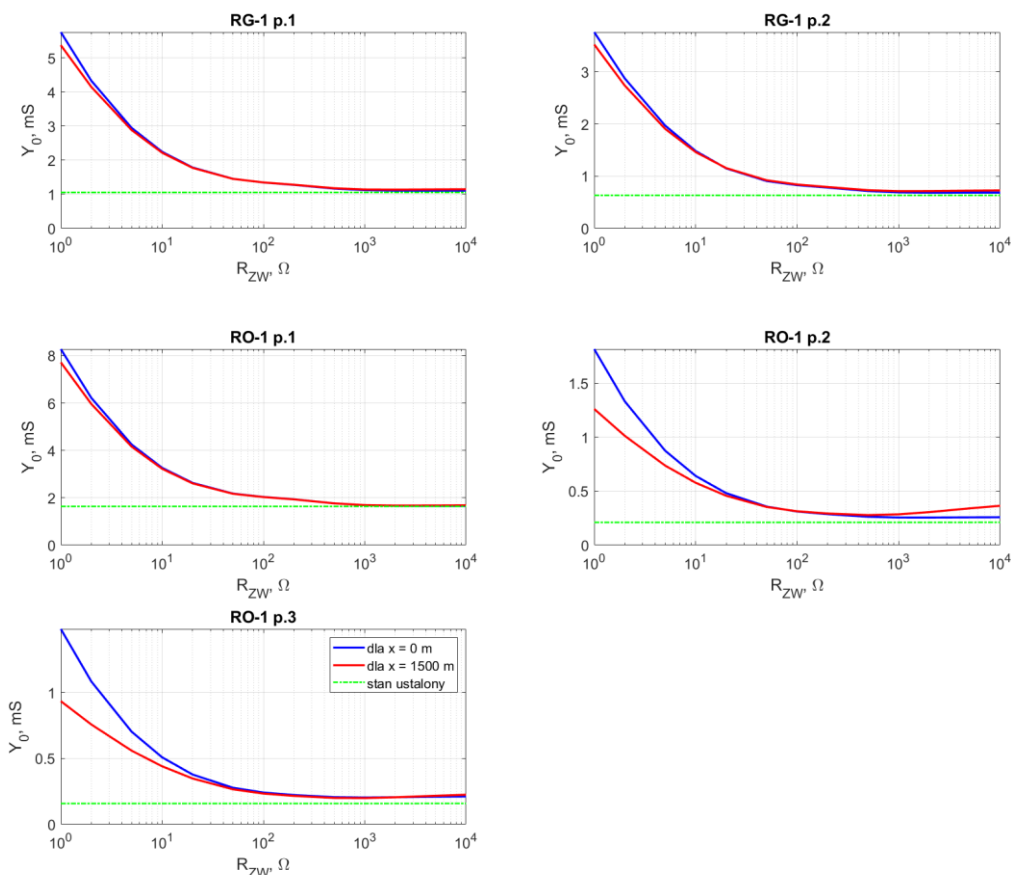
$$Y_{0nast} \geq \frac{k_b I_{CLi}}{U_{0max}} + \Delta Y_{0\mu} \quad (6.2)$$

Tabela 6.4. Dobór nastaw zabezpieczeń w wybranych polach zgodnie z kryterium  $Y_0 >$ .

L.p.	1	2	3	4	5
Pole	RG-1 p.1	RG-1 p.2	RO-1 p.1	RO-1 p.2	RO-1 p.3
$Y_{0nast}$ , mS	3,65	2,89	1,551	1,361	1,171

Przy obliczeniach przyjęto, że parametr  $\Delta Y_{0\mu} = 0,6$  mS. Ponieważ przyjęta sieć nie jest siecią zbyt skomplikowaną istnieje uzasadnione ryzyko, że może dojść do nieselektywnego wyłączenia pól ze względu na kryterium  $Y_0 >$ . Sieć tego typu została wybrana świadomie, ponieważ bardziej rozbudowane sieci (pod kątem ilości pól odpływowych oraz prądu zwarciegowego sieci) powinny w pewniejszy sposób spełniać kryterium admitancyjne. Na rys. 6.5. umieszczono wyniki obliczeń wartości skutecznej  $Y_0$  dla wybranych pól określonych zależnością:

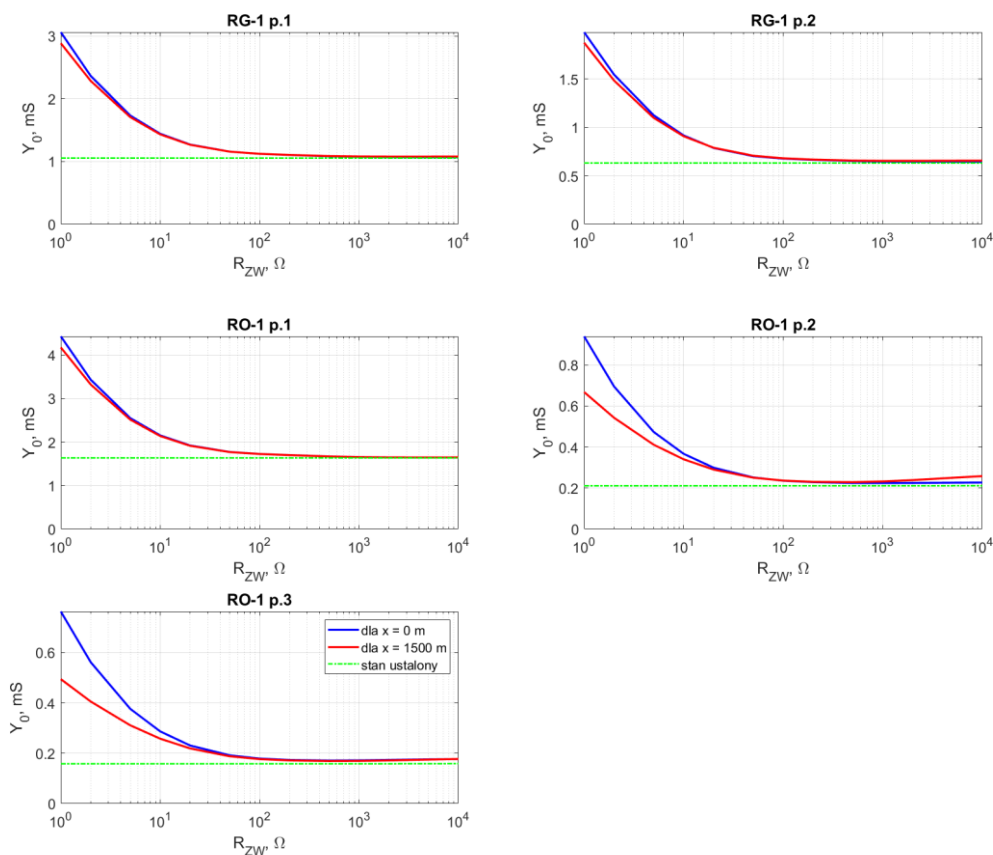
$$Y_0 = \frac{I_0}{U_0} \quad (6.3)$$



Rys. 6.5.  $Y_0$  dla wybranych punktów sieci w zależności od rezystancji zwarcia  $R_{ZW}$ . Kolor zielony – dla stanu ustalonego, kolor niebieski – dla  $t_p = 30$  ms i  $\Delta t = 20$  ms oraz  $x = 0$  m, kolor czerwony – dla  $t_p = 30$  ms i  $\Delta t = 20$  ms oraz  $x = 1500$  m.

W przypadku stanu ustalonego  $Y_0$  jest niezależne od wartości  $R_{ZW}$  i zależy tylko i wyłącznie od pojemności doziemnej danego odpływu oraz lokalizacji zwarcia. Analizując otrzymane wartości dla stanu ustalonego i porównując z  $Y_{0nast}$  z tabeli 6.4 można zaobserwować, że w stanie ustalonym zgodnie z kryterium  $Y_0 >$  zwarcie zostanie wyłączone prawidłowo.

Sytuacja zmienia się diametralnie dla pierwszych chwil zwarcia. Sposób ustawienia czasu całkowania może spowodować, że w skrajnej sytuacji może, na skutek doziemienia w jednym odpływie, zostać wyłączone więcej niż jedno pole. Przykładowo dla przyjętej wartości czasu całkowania 20 ms i rezystancji zwarcia  $R_{ZW} < 2 \Omega$  poza uszkodzoną linią RO-1 p.1 mogą zostać wyłączone linie RO-1 p.2 i RO-1 p.3. W takim układzie należy albo zastosować równolegle dodatkowe kryteria (np. zerowoprądowe kierunkowe), albo kosztem niewielkiego opóźnienia zadziałania wydłużyć zakres czasu całkowania do np. 80 ms.



Rys. 6.6.  $Y_0$  dla wybranych punktów sieci w zależności od rezystancji zwarcia  $R_{ZW}$ . Kolor zielony – dla stanu ustalonego, kolor niebieski – dla  $t_p = 30$  ms i  $\Delta t = 80$  ms oraz  $x = 0$  m, kolor czerwony – dla  $t_p = 30$  ms i  $\Delta t = 80$  ms oraz  $x = 1500$  m.

Wyniki dla takiego rozwiązania zostały przedstawione na rys. 6.6. Jak widać w dalszym ciągu istnieje znikome ryzyko nieselektywnego zadziałania zabezpieczeń admitancyjnych (dla  $R_{zw} < 1 \Omega$  w polu RG-1 p.1) jednak wystarczy wprowadzić dodatkową zwłokę czasową, aby uzyskać zadowalającą skuteczność i selektywność poprzeczną.

### 6.5. Wartość skuteczna napięcia $U_0$ oraz prądów $I_0$ wybranych pól w sieci z pojawiającymi się wyższymi harmonicznymi

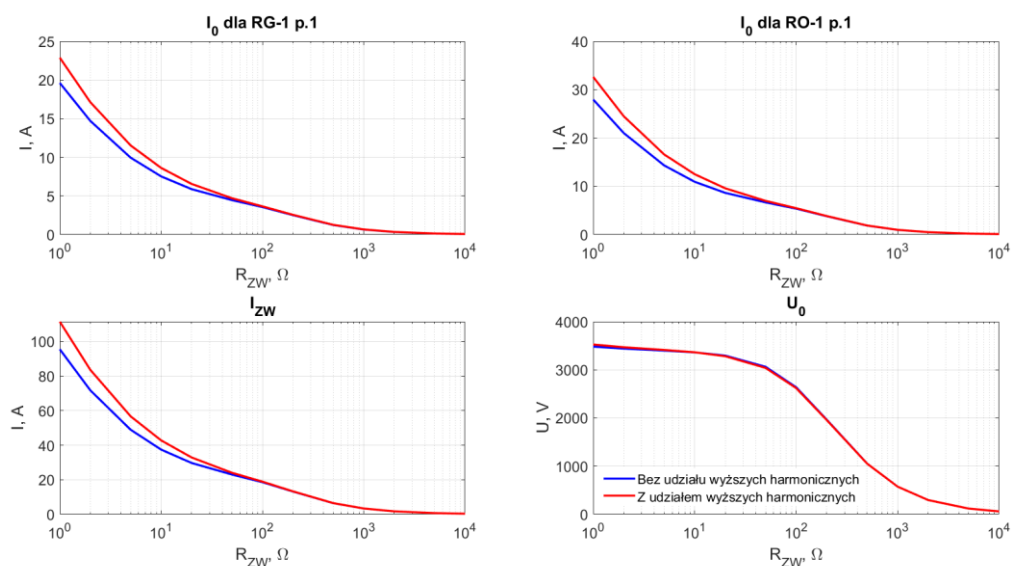
Do tej pory analiza sieci średnich napięć ze skutecznie izolowanym punktem neutralnym opierała się na założeniach, że w sieci przed rozpoczęciem zwarcia nie pojawiały się wyższe harmoniczne. W tej części pracy skupiono się na sytuacji, w której przyjęto, że zgodnie z normą [103] w sieci przemysłowej mogą pojawić się wyższe harmoniczne napięć. Do celów porównawczych przyjęto, że zwarcie doziemne nastąpiło w polu 1 rozdzielniczy RO-1 w punkcie  $x = 600$  m. Przeanalizowano taki sam zakres rezystancji jak we wcześniejszych rozważaniach, czyli zgodnie z tabelą 6.2. Porównanie polega na zestawieniu ze sobą dwóch sytuacji zwarcia doziemnego w sieci bez wyższych harmonicznymi oraz zwarcia w sieci, w której procentowy udział wyższych harmonicznymi przedstawiono w tabeli 6.5.

Tabela 6.5. Procentowy udział składowych wyższych harmonicznymi przyjęty do analizy zwarć doziemnych.

L.p.	1	2	3
Rząd h	3	5	7
Wartość harmonicznymi w stosunku do $U_F^{1h}$ , %	5	6	5

Wartości powyższych harmonicznymi przyjęto jako najwyższe dopuszczalne przez normę. We wspomnianej normie pojawia się dodatkowe obostrzenie mówiące, że średnia wartość wyższych harmonicznymi napięć mierzone w czasie 10 min nie może przekraczać 8%. Dla danych przyjętych w tabeli 6.5. ta wartość wynosi 9,27%, jednak zakłada się, że w perspektywie pomiaru dziesięciominutowego udział wyższych harmonicznymi nie przekroczy wspomnianych 8%.

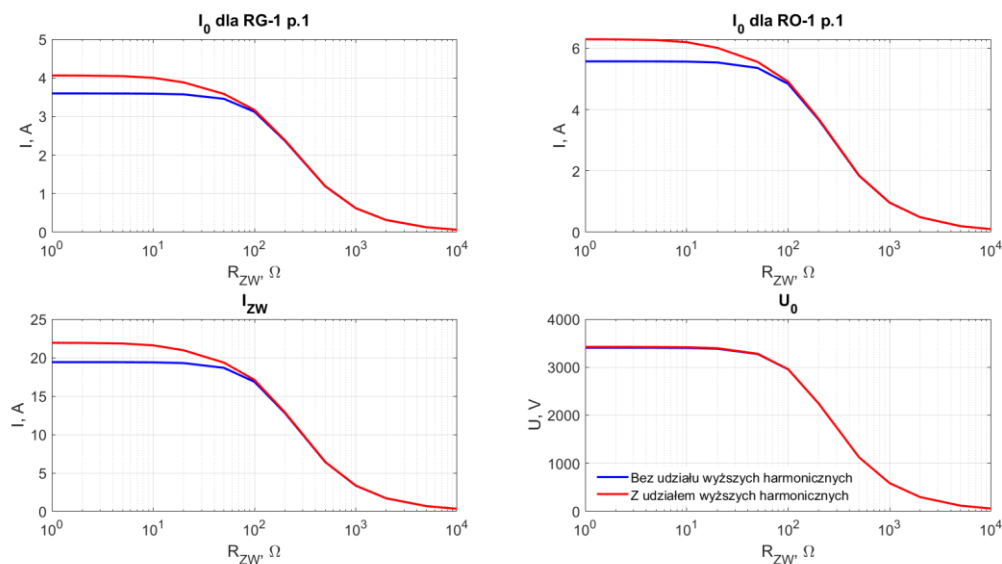
Porównania wartości skutecznych wybranych parametrów wyznaczonych dla stanu nieustalonego (przyjętego jako pierwsze 20 ms zwarcia) oraz stanu ustalonego (zgodnie z tabelą 6.3) umieszczono na rys. 6.7 oraz 6.8. W celu zapewnienia większej czytelności umieszczono na poniższych wykresach zależność  $I_0 = f(R_{ZW})$  tylko dla dwóch linii: RG-1 p.1 oraz RO-1 p.1. Linie te wybrano z uwagi na fakt, że stanowią bezpośrednie połączenie między transformatorem zasilającym sieć a miejscem zwarcia. Ponadto umieszczono zależność  $I_{ZW} = f(R_{ZW})$  oraz  $U_0 = f(R_{ZW})$ . Widać, że napięcie  $U_0$  praktycznie w znikomym stopniu zależy od wyższych harmonicznych. Stąd można zdecydowanie stwierdzić, że wyższe harmoniczne nie powinny wpłynąć za sposób działania zabezpieczeń zerowonapięciowych. Jednak w przypadku prądów ma to już nieco większe znaczenie. Przy niskich wartościach rezystancji zwarcia poszczególne prądy mogą osiągać wartości większe nawet o 15% w stosunku do sytuacji bez wyższych harmonicznych. Przy ustawieniu zabezpieczeń ziemnozwarciowych według kryterium  $I_{0>}$  i krótkim czasie całkowania może dojść do sytuacji, w których nie jest zapewniona selektywność poprzeczna wyłączenia zwarcia.



Rys. 6.7. Prądy  $I_0$  dla wybranych punktów sieci, prąd zwarcia  $I_{ZW}$  oraz napięcie  $U_0$  w zależności od rezystancji zwarcia  $R_{ZW}$  dla  $t_p = 30$  ms i  $\Delta t = 20$  ms oraz  $x = 600$  m. Kolor niebieski – dla sytuacji bez wyższych harmonicznych, kolor czerwony – dla sytuacji z wyższymi harmonicznymi.

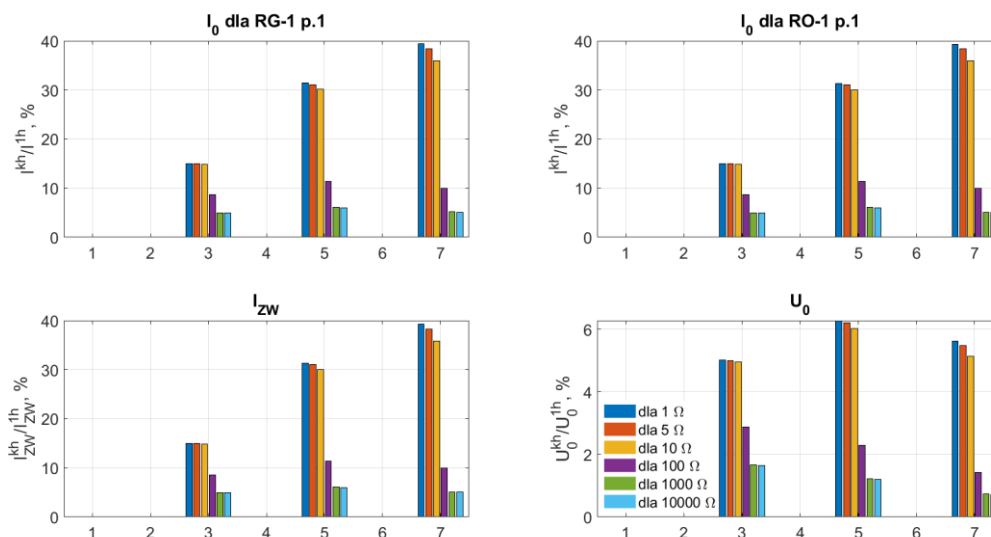
W literaturze [25 – 28] w celu uniknięcia takiej sytuacji zaleca się wydłużenie czasu pomiaru, po którym będzie przebieg całkowany do wartości będących wielokrotnością jednego okresu (np. 40 lub 60 ms) oraz stosowania filtra wyższych harmonicznych.

Obydwie metody mają swoje wady. Wydłużenie czasu całkowania wydłuża czas zadziałania zabezpieczenia. Natomiast filtr wyższych harmonicznych nie uwzględnia faktu, że w czasie nieustalonym odkształcenia są przebiegami nieokresowymi, stąd widmo częstotliwościowe nie jest dyskretne lecz ciągłe. W skrajnych sytuacjach nawet zastosowanie obydwu powyższych rozwiązań jednocześnie w dalszym ciągu może nie być wystarczające.



*Rys. 6.8. Prądy  $I_0$  dla wybranych punktów sieci, prąd zwarcia  $I_{ZW}$  oraz napięcie  $U_0$  w zależności od rezystancji zwarcia  $R_{ZW}$  dla stanu ustalonego oraz  $x = 600$  m. Kolor niebieski – dla sytuacji bez wyższych harmonicznych, kolor czerwony – dla sytuacji z wyższymi harmonicznymi.*





Rys. 6.9. Procentowy udział wyższych harmoniczných w stosunku do pierwszej harmoniczných dla wybranych rezystancji zwarcia. Stan ustalony dla sieci z wyższymi harmonicznymi. Przedstawione widma:  $I_0$  dla RG-1 p.1,  $I_0$  dla RO-1 p.1,  $U_0$  oraz  $I_{ZW}$ .

Analiza widmowa tych samych wielkości co na poprzednich wykresach dla stanu ustalonego przedstawiono na rys. 6.9. Warto zwrócić uwagę na to w jaki sposób wartość rezystancji wpływa na udział wyższych harmoniczných w prądzie doziemnym. Przy zwarciach niskorezystancyjnych można zauważyć pewną zależność, którą najprościej opisuje się następującym wzorem:

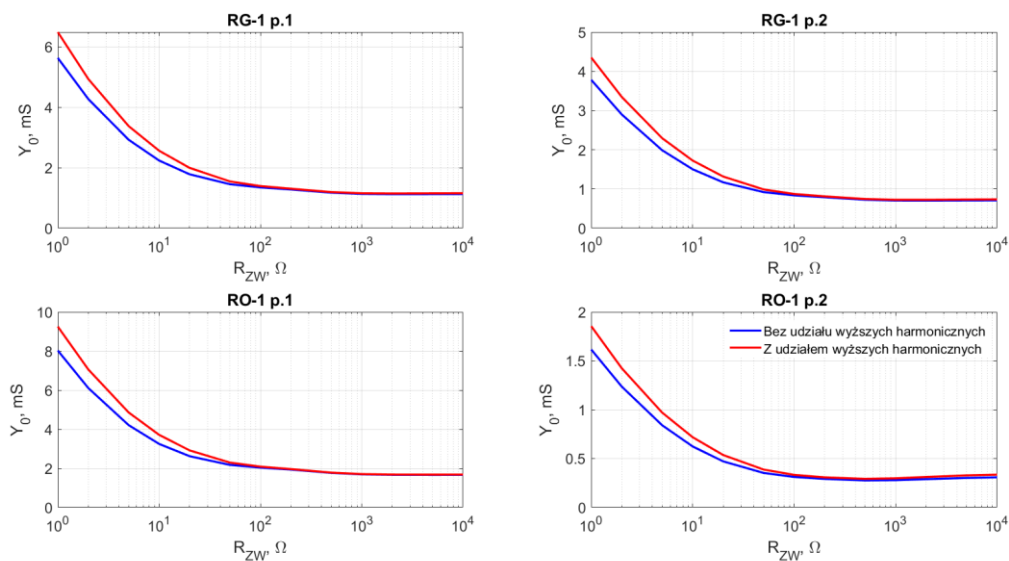
$$\frac{I_0^{kh}}{I_0^{1h}} \approx \frac{U_F^{kh}}{U_F^{1h}} \cdot k \quad (6.4)$$

Przykładowo przyjęto, że trzecia harmoniczna napięcia fazowego  $U_F^{3h}$  przed nastąpieniem doziemienia wynosiła 5%. Okazuje się, że dla małych rezystancji zwarcia trzecia harmoniczna  $I_0^{3h}$  wyniosła ok. 15% wartości pierwszej harmoniczných niezależnie, w którym miejscu ta wartość była mierzona. Wraz ze wzrostem  $R_{ZW}$  udział wyższych harmoniczných maleje.

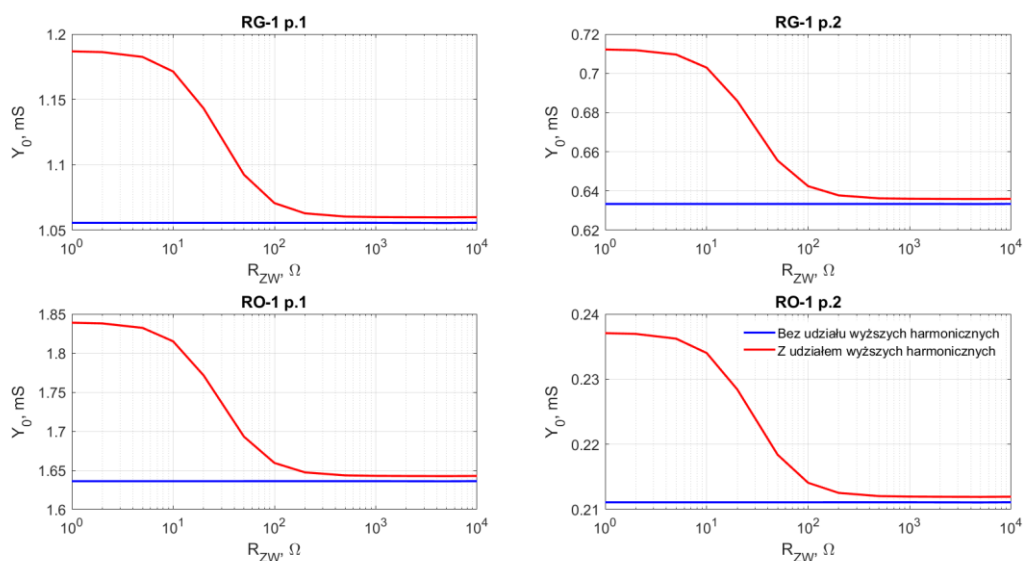
## 6.6. Pomiar admitancji wybranych linii w sieci z udziałem wyższych harmoniczných

W wyniku pojawienia się wyższych harmoniczných w układzie konieczna jest powtórna analiza możliwości stosowania zabezpieczeń admitancyjnych pod kątem kryterium  $Y_0$ . Ponownie zestawiono wyniki  $Y_0$  liczonego według zależności (6.3) dla wybranych punktów sieci dla stanu nieustalonego (rys. 6.10) oraz ustalonego (rys. 6.11)

z tą różnicą, że zestawiono zależność  $Y_0 = f(R_{ZW})$  dla sytuacji z wyższymi harmonicznymi z sytuacją bez wyższych harmonicznymi.



Rys. 6.10.  $Y_0$  dla wybranych punktów sieci w zależności od rezystancji zwarcia  $R_{ZW}$  dla  $t_p = 30$  ms i  $\Delta t = 20$  ms oraz  $x = 600$  m. Kolor niebieski – dla sytuacji bez wyższych harmonicznymi, kolor czerwony – dla sytuacji z wyższymi harmonicznymi.



Rys. 6.11.  $Y_0$  dla wybranych punktów sieci w zależności od rezystancji zwarcia  $R_{ZW}$  dla stanu ustalonego oraz  $x = 600$  m. Kolor niebieski – dla sytuacji bez wyższych harmonicznymi, kolor czerwony – dla sytuacji z wyższymi harmonicznymi

W przypadku stanu ustalonego interesujące jest to, że admitancja nie jest już niezależna od rezystancji zwarcia, jednak ta zależność jest bardzo niewielka. Dla nieco ponad 9% udziału wyższych harmonicznymi napięć przez zwarcie admitancja wzrasta

w najgorszym przypadku o niespełna 15% przy zwarciach niskorezystancyjnych. Przy zwarciach wysokorezystancyjnych ta różnica jest znikoma. W przypadku stanu nieustalonego admittance także wzrasta o podobne wartości. Jednak jak pokazano w rozdziale 5.7. przy niewielkich rezystancjach zwarcia może okazać się, że przyjęcie czasu całkowania 20 ms spowoduje zadziałanie zabezpieczeń w zdrowych odpywach.

Mimo wszystko wpływ wyższych harmonicznych na wartość  $Y_0$  w poszczególnych miejscach sieci jest znikomy i przyjęcie współczynnika bezpieczeństwa  $k_b = 1,2$  we wzorze (6.2) oraz czasu całkowania  $t = 80$  ms jest wystarczające do prawidłowego i selektywnego wykrywania zwarcć doziemnych w sieci kopalnianej.

Istnieją zabezpieczenia, które filtrują wyższe harmoniczne, jednak zazwyczaj są to rozwiązania niekorzystne dla przedsiębiorstw pod kątem ekonomicznym. Ponadto filtrują tylko część harmonicznych [86, 88, 96]. W tym miejscu warto postawić otwarte pytanie, czy przy niewielkim wpływie wyższych harmonicznych na  $Y_0$  zasadne jest stosowanie takich rozwiązań.

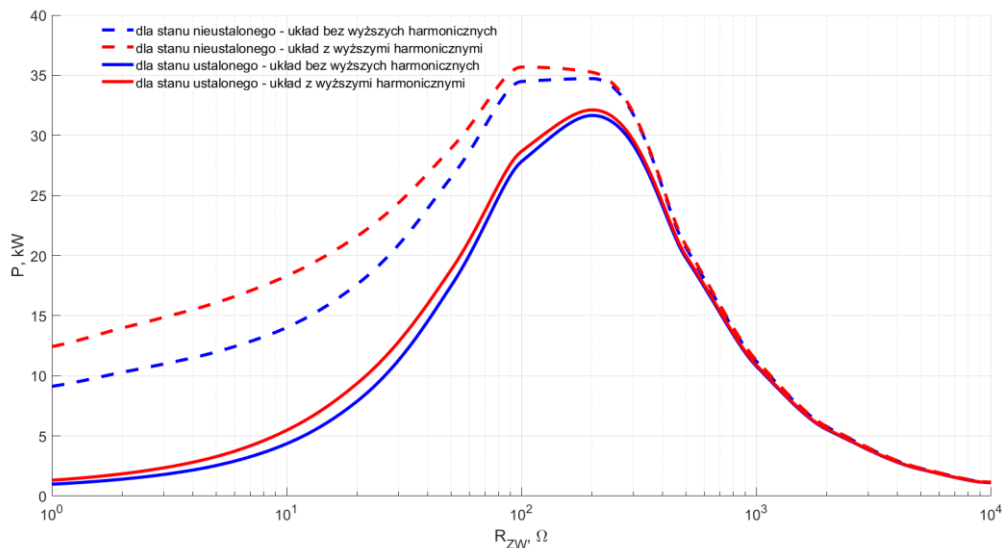
### **6.7. Wpływ wyższych harmonicznych na wartość mocy czynnej wydzielanej w miejscu zwarcia**

Przyjmuje się, że zwarcie doziemne ma charakter rezystancyjny [86 – 87]. W wyniku takiego zwarcia w miejscu doziemienia wydzielą się moc czynna, która oddawana do otoczenia jest w postaci ciepła. Im wyższa moc czynna wydzielana w miejscu zwarcia tym możliwie większe potencjalne szkody wywołane przez doziemienie. W związku z tym postanowiono sprawdzić dla wartości rezystancji przyjętych w tabeli 6.2. wpływ rezystancji zwarcia na moc czynną wydzielaną w miejscu zwarcia. W tym celu wykorzystano następującą zależność:

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_p}^{t_p+T} p(t) dt = \frac{1}{T} \int_{t_p}^{t_p+T} i_{zw}(t) \cdot u_F(t) dt = \frac{1}{T} \int_{t_p}^{t_p+T} i_{zw}^2(t) \cdot R_{zw} dt \quad (6.5)$$

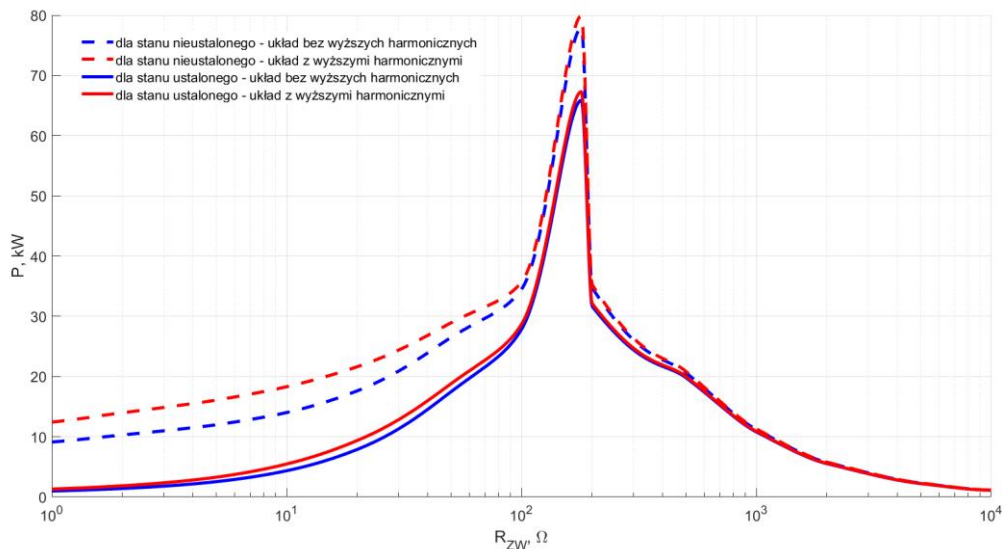
Wyniki dla stanu nieustalonego (pierwsze 20 ms zwarcia) i stanu ustalonego z udziałem i bez udziału wyższych harmonicznych przedstawiono na rys. 6.12. Punkty połączono korzystając z metody interpolacji wielomianem 3-stopnia z ciągłą pierwszą

pochodną. Jak widać wpływ wyższych harmonicznych jest znikomy, jednak zauważalny dla małych wartości rezystancji zwarcia.



Rys. 6.12. Zależność mocy czynnej wydzielanej przez rezystancję zwarcia od wartości  $R_{ZW}$ . Porównanie stanu nieustalonego (pierwsze 20 ms zwarcia) i stanu ustalonego dla sytuacji bez występowania wyższych harmonicznych oraz z wyższymi harmonicznymi.

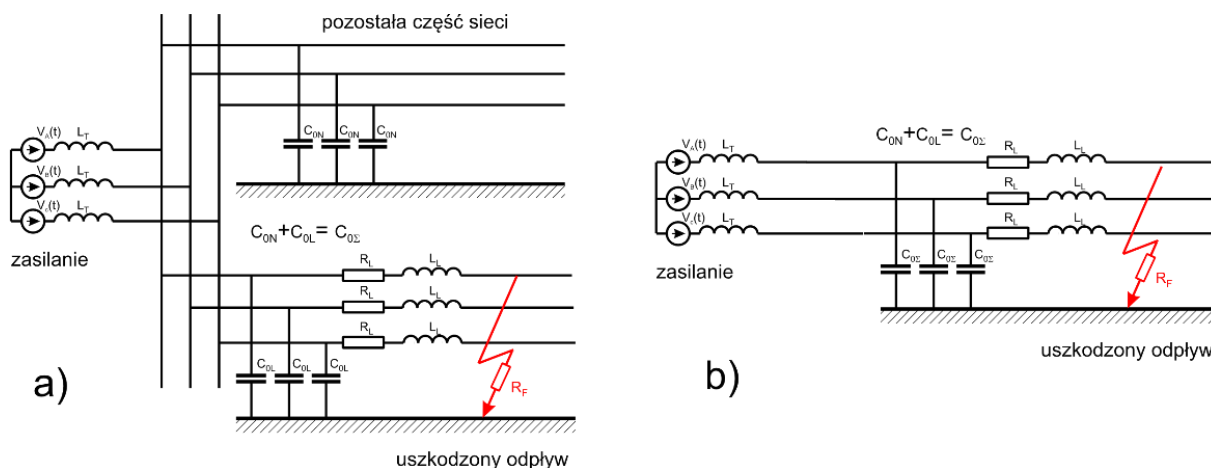
Zauważono, że pomiędzy rezystancją zwarcia 100 a 200  $\Omega$  nastąpiła gwałtowne załamanie krzywej. W związku z tym, że powyższa zależność jest mało prawdopodobna sprawdzono moc wydzielaną w miejscu dla rezystancji równej modułowi impedancji zastępczej sieci z punktu widzenia miejsca zwarcia. Korzystając z metody Thevenina ustalono, że impedancja sieci wynosi 178  $\Omega$ . Stąd wprowadzono dodatkowy punkt obliczeniowy  $R_{ZW} = 178 \Omega$ . Dla tego punktu analogicznie obliczono moc czynną i nowe zależności umieszczono na rys. 6.13. Wartość rezystancji zwarcia ma bardzo duży wpływ na wartość mocy czynnej wydzielanej w miejscu zwarcia. Jednak w odróżnieniu do zwarc międzyfazowych [50 – 52, 60] wartość tej mocy nie jest ona odwrotnie proporcjonalna do rezystancji zwarcia. Najbardziej niekorzystna sytuacja wystąpić może wtedy, gdy rezystancja zwarcia osiągnie wartość zbliżoną do impedancji zastępczej sieci widzianej z miejsca zwarcia.



Rys. 6.13. Zależność mocy czynnej wydzielanej przez rezystancję zwarcia od wartości  $R_{ZW}$  po uwzględnieniu dopasowania odbiornika do źródła. Porównanie stanu nieustalonego (pierwsze 20 ms zwarcia) i stanu ustalonego dla sytuacji bez występowania wyższych harmonicznych oraz z wyższymi harmonicznymi.

### 6.8. Częstotliwość przebiegów przejściowych prądu doziemnego przy zwarciach doziemnych w sieci z izolowanym punktem gwiazdowym transformatora

W momencie zainicjowania zwarcia doziemnego pojawia się stan nieustalony. Ponieważ w sieci o złożonej konfiguracji (znajduje się bardzo wiele elementów akumulujących energię (pojemności i indukcyjności) oraz rozpraszających energię (rezystancje) to przebiegi przejściowe opisywane są równaniami różniczkowymi bardzo wysokiego rzędu, możliwymi jedynie do rozwiązania numerycznego. Przybliżone rozwiązanie analityczne możliwe jest jedynie po przyjęciu określonych założeń upraszczających. W niniejszej pracy przyjęto pokazany na rys. 6.14a uproszczony model sieci uwzględniający jako najważniejsze elementy: indukcyjność źródła zasilania (transformatora), pojemność doziemną uszkodzonej linii, pojemność doziemną pozostałej części sieci oraz rezystancje i indukcyjność uszkodzonej linii. Taka struktura modelu umożliwia równoległe połączenie pojemności doziemnych uszkodzonej linii oraz pozostałej części sieci, co pokazano na rys. 6.14b.



Rys. 6.14. Konfiguracja sieci rozdzielczej przyjmowanej do dalszej analizy: a) model z rozdzielonymi pojemnościami linii i pozostałej części sieci, b) uproszczony model ze zintegrowanymi pojemnościami.

Analiza tego modelu z wykorzystaniem przekształcenia Laplace'a możliwa jest w oparciu o metodę superpozycji pozwalającą odseparować obliczenia składowej ustalonej (łatwej do wyznaczenia) od obliczeń składowej przejściowej. Schemat zastępczy impedancji operatorowej dla składowej przejściowej oraz kolejne etapy upraszczania tego schematu pokazano na rys. 6.15.

Jeżeli zgodnie z rys. 6.15d wyznaczy się zastępczą reaktancję operatorową równoległej gałęzi LC jako:

$$X_Z(s) = \frac{\frac{1}{sC_{0\Sigma}} \cdot \left( \frac{1}{2sC_{0\Sigma}} + \frac{3}{2}sL_T \right)}{\frac{1}{2sC_{0\Sigma}} + \frac{1}{sC_{0\Sigma}} + \frac{3}{2}sL_T} = \frac{\frac{1}{sC_{0\Sigma}} + 3sL_T}{sC_{0\Sigma} \cdot \left( \frac{3}{sC_{0\Sigma}} + 3sL_T \right)} \quad (6.6)$$

gdzie: \$L\_T\$ – indukcyjność uzwojeń transformatora, \$C\_{0\Sigma}\$ - całkowita pojemność całej galwanicznie połączonej sieci, to:

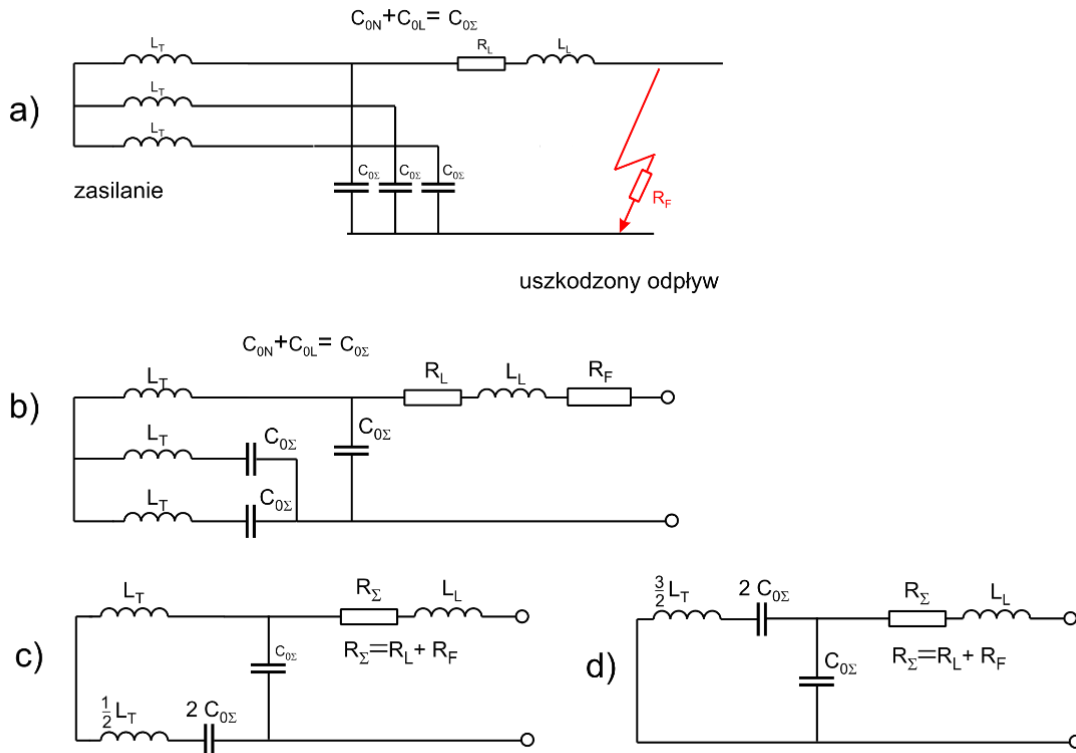
$$X_Z(s) = \frac{1 + 3s^2C_{0\Sigma}L_T}{3sC_{0\Sigma} + 3s^3C_{0\Sigma}^2L_T} \quad (6.7)$$

oraz dla uproszczenia zapisu przyjmie się oznaczenie:

$$R_\Sigma = R_L + R_F \quad (6.8)$$

to sumaryczną impedancję operatorową całego obwodu dla składowej przejściowej \$Z\_\Sigma(s)\$ wyznaczyć można jako:

$$Z_\Sigma(s) = R_\Sigma + sL_L + X_Z(s) = R_\Sigma + sL_L + \frac{1 + 3s^2C_{0\Sigma}L_T}{3sC_{0\Sigma} + 3s^3C_{0\Sigma}^2L_T} \quad (6.9)$$



Rys. 6.15. Schemat zastępczy dla składowej przejściowej (czyli widziany od strony miejsca doziemienia) a) model sieci z rys. 6.14b. b), c), d) kolejne etapy upraszczania schematu.

Po prostym przekształceniu:

$$Z_{\Sigma}(s) = \frac{3C_{0\Sigma}^2 L_L L_T s^4 + 3C_{0\Sigma}^2 L_T R_{\Sigma} s^3 + 3C_{0\Sigma} (L_T + L_L) s^2 + 3C_{0\Sigma} R_{\Sigma} s + 1}{3C_{0\Sigma}^2 L_T s^3 + 3C_{0\Sigma} s} \quad (6.10)$$

gdzie  $L_L$  - indukcyjność uszkodzonej linii, a  $R_{\Sigma}$  - całkowita rezystancja całego obwodu (w tym zarówno żyły linii kablowej, jak i rezystancja zwarcia między linią a ziemią).

Przebieg czasowy składowej przejściowej prądu doziemnego  $I_0(s)$  można więc wyznaczyć z zależności:

$$I_{0T}(s) = U_0(s) \frac{3C_{0\Sigma}^2 L_T s^3 + 3C_{0\Sigma} s}{3C_{0\Sigma}^2 L_L L_T s^4 + 3C_{0\Sigma}^2 L_T R_{\Sigma} s^3 + 3C_{0\Sigma} (L_T + L_L) s^2 + 3C_{0\Sigma} R_{\Sigma} s + 1} \quad (6.11)$$

Charakter występujących w jej składzie przebiegów będzie określony wartościami pierwiastków wielomianu charakterystycznego czyli rozwiązań równania

$$Q(s) = 0 \quad (6.12)$$

Gdzie wielomian charakterystyczny

$$Q(s) = 3C_{0\Sigma}^2 L_L L_T s^4 + 3C_{0\Sigma}^2 L_T R_\Sigma s^3 + 3C_{0\Sigma}(L_T + L_L)s^2 + 3C_{0\Sigma} R_\Sigma s + 1 \quad (6.13)$$

Równanie (6.13) opisuje wielomian rzędu 4 trudny do rozwiązania analitycznego. Można jednak zauważyć że przy pomijalnie małych wartościach  $R_\Sigma$  równanie (6.13) przybiera znacznie prostszą do rozwiązania postać równania dwukwadratowego

$$3C_{0\Sigma}^2 L_L L_T s^4 + 3C_{0\Sigma}(L_T + L_L)s^2 + 1 = 0 \quad (6.14)$$

Przyjmując pomocniczą zmienną:

$$q = s^2 \quad (6.15)$$

można zapisać:

$$3C_{0\Sigma}^2 L_L L_T q^2 + 3C_{0\Sigma}(L_T + L_L)q + 1 = 0 \quad (6.16)$$

Rozwiązaniem równania (6.16) są dwa pierwiastki  $q_1, q_2$  o wartościach ujemnych:

$$q_1 = \frac{-3C_{0\Sigma}(L_T + L_L) + \sqrt{9C_{0\Sigma}^2(L_T + L_L)^2 - 12C_{0\Sigma}^2 L_T L_L}}{6C_{0\Sigma}^2 L_T L_L} \quad (6.17)$$

$$q_2 = \frac{-3C_{0\Sigma}(L_T + L_L) - \sqrt{9C_{0\Sigma}^2(L_T + L_L)^2 - 12C_{0\Sigma}^2 L_T L_L}}{6C_{0\Sigma}^2 L_T L_L} \quad (6.18)$$

upraszczając:

$$q_1 = -\frac{2}{3C_{0\Sigma}(L_L + L_T) - \sqrt{3}C_{0\Sigma}\sqrt{3(L_T^2 + L_L^2) + 2L_T L_L}} \quad (6.19)$$

$$q_2 = -\frac{2}{3C_{0\Sigma}(L_L + L_T) + \sqrt{3}C_{0\Sigma}\sqrt{3(L_T^2 + L_L^2) + 2L_T L_L}} \quad (6.20)$$

Równanie (6.14) będzie więc miało dwie pary sprzężonych pierwiastków urojonych odpowiadających pulsacjom:

$$\omega_{01} = \sqrt{\frac{2}{3C_{0\Sigma}(L_L + L_T) - \sqrt{3}C_{0\Sigma}\sqrt{3(L_T^2 + L_L^2) + 2L_T L_L}}} \quad (6.21)$$

$$\omega_{02} = \sqrt{\frac{2}{3C_{0\Sigma}(L_L + L_T) + \sqrt{3}C_{0\Sigma}\sqrt{3(L_T^2 + L_L^2) + 2L_T L_L}}} \quad (6.22)$$

Powyższe pulsacje odpowiadają częstotliwościom:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{3C_{0\Sigma}(L_L + L_T) - \sqrt{3}C_{0\Sigma}\sqrt{3(L_T^2 + L_L^2) + 2L_T L_L}}} \quad (6.23)$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{3C_{0\Sigma}(L_L + L_T) + \sqrt{3}C_{0\Sigma}\sqrt{3(L_T^2 + L_L^2) + 2L_T L_L}}} \quad (6.24)$$



Upraszczając:

$$f_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{3C_{0\Sigma}(L_L + L_T) - \sqrt{3}C_{0\Sigma}\sqrt{3(L_T^2 + L_L^2) + 2L_T L_L}}} \quad (6.25)$$

$$f_2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{3C_{0\Sigma}(L_L + L_T) + \sqrt{3}C_{0\Sigma}\sqrt{3(L_T^2 + L_L^2) + 2L_T L_L}}} \quad (6.26)$$

Jeżeli przyjmie się dodatkowe uproszczenie polegające na pominięciu indukcyjności uszkodzonej linii  $L_L$  to równanie (6.14) przybiera postać:

$$3C_{0\Sigma}L_T s^2 + 1 = 0 \quad (6.27)$$

której rozwiązaniem jest przebieg jednoczęstotliwościowy o częstotliwości równej:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{3L_T C_{0\Sigma}}} \quad (6.28)$$

Pominięcie w zależności (6.14) wartości rezystancji  $R_\Sigma$  istotnie ułatwia rozwiązanie równania (6.13), jednak uniemożliwia wyznaczenie wartości współczynników opisujących zanikanie składowych oscylacyjnych. Można je jednak uwzględnić jako małe zaburzenie [104, 105] równania (6.14). Po wyznaczeniu wartości pulsacji  $\omega_{01}$  i  $\omega_{02}$  zgodnie z zależnościami (6.21) i (6.22) można równanie (6.12) zapisać w postaci iloczynu czynników:

$$\alpha(s - j\omega_{01})(s + j\omega_{01})(s - j\omega_{02})(s + j\omega_{02}) = 0 \quad (6.29)$$

gdzie wartość wprowadzonego dla skrócenia zapisu współczynnik  $\alpha$  będzie równy:

$$\alpha = 3C_{0\Sigma}^2 L_L L_T \quad (6.30)$$

Równanie (6.29) można uprościć do postaci:

$$\alpha(s^2 + \omega_{01}^2)(s^2 + \omega_{02}^2) = 0 \quad (6.31)$$

W przypadku uwzględnienia rezystancji  $R_\Sigma$  w równaniu (6.13), będące jego rozwiązaniem składowe przejściowe o charakterze przebiegów oscylacyjnych o częstotliwościach  $f_1$  i  $f_2$  byłyby przebiegami tłumionymi a pary sprzężonych zespolonych pierwiastków równania (6.13) przyjmowałyby ogólną postać:

$$\begin{cases} s_{1,2} = -\sigma_1 \pm j\omega_{01} \\ s_{3,4} = -\sigma_2 \pm j\omega_{02} \end{cases} \quad (6.32)$$

Równanie wielomianowe (6.29) można więc zapisać w postaci:

$$\alpha(s - (-\sigma_1 + j\omega_{01}))(s - (-\sigma_1 - j\omega_{01}))(s - (-\sigma_1 + j\omega_{01}))(s - (-\sigma_1 - j\omega_{01})) = 0 \quad (6.33)$$

czyli:

$$\alpha((s + \sigma_1) - j\omega_{01})((s + \sigma_1) + j\omega_{01})((s + \sigma_2) - j\omega_{02})((s + \sigma_2) + j\omega_{02}) = 0 \quad (6.34)$$

Stąd:

$$\alpha((s + \sigma_1)^2 + \omega_{01}^2)((s + \sigma_2)^2 + \omega_{02}^2) = 0 \quad (6.35)$$

a po rozwinięciu:

$$\alpha(s^2 + 2\sigma_1s + \sigma_1^2 + \omega_{01}^2)(s^2 + 2\sigma_2s + \sigma_2^2 + \omega_{02}^2) = 0 \quad (6.36)$$

Zastępując równanie (6.36) w postacią:

$$\alpha(s^4 + b_1s^3 + b_2s^2 + b_3s + b_4) = 0 \quad (6.37)$$

gdzie:

$$\begin{cases} b_1 = 2(\sigma_1 + \sigma_2) \\ b_2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 4\sigma_1\sigma_2 + \omega_{01}^2 + \omega_{02}^2 \\ b_3 = 2(\sigma_1\sigma_2^2 + \sigma_1\omega_{02}^2 + \sigma_2\sigma_1^2 + \sigma_2\omega_{01}^2) \\ b_4 = \sigma_1^2\sigma_2^2 + \sigma_1^2\omega_{02}^2 + \omega_{02}^2\omega_{01}^2 + \sigma_2^2\omega_{01}^2 \end{cases} \quad (6.38)$$

Równanie wielomianowe (6.31) można sprowadzić do postaci:

$$\alpha(s^4 + (\omega_{01}^2 + \omega_{02}^2)s^2 + \omega_{01}^2\omega_{02}^2) = 0 \quad (6.39)$$

Odejmując równanie (6.39) od równania (6.37) uzyskuje się:

$$\alpha(b_1s^3 + (b_2 - \omega_{01}^2 - \omega_{02}^2)s^2 + b_3s + b_4 - \omega_{01}^2\omega_{02}^2) = 0 \quad (6.40)$$

Rozwijając wielomian  $Q(s)$  w szereg Taylora pierwszego rzędu wokół punktów  $\omega_{01}$ ,  $\omega_{02}$  (czyli pomijając wyrazy drugiego i wyższych rzędów z  $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \sigma_1\sigma_2$ ) uzyskuje się:

$$\alpha(2(\sigma_1 + \sigma_2)s^3 + 2(\sigma_1\omega_{02}^2 + \sigma_2\omega_{01}^2)s) = 0 \quad (6.41)$$

Porównując występujące w równaniach (6.41) i (6.13) współczynniki występujące przy odpowiednich potęgach ( $s$  oraz  $s^3$ ) uzyskuje się układ równań:

$$\begin{cases} 2\alpha(\sigma_1 + \sigma_2) = 3C_{0\Sigma}^2 L_T R_\Sigma \\ 2\alpha(\sigma_1\omega_{02}^2 + \sigma_2\omega_{01}^2) = 3C_{0\Sigma} R_\Sigma \end{cases} \quad (6.42)$$

czyli:

$$\begin{cases} \sigma_1 + \sigma_2 = \frac{3}{2\alpha} C_{0\Sigma}^2 L_T R_\Sigma \\ \sigma_1 \omega_{02}^2 + \sigma_2 \omega_{01}^2 = \frac{3}{2\alpha} C_{0\Sigma} R_\Sigma \end{cases} \quad (6.43)$$

Rozwiązanie układu (6.43) ma postać:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{3C_{0\Sigma}R_\Sigma(C_{0\Sigma}L_T\omega_{01}^2 - 1)}{2\alpha(\omega_{01}^2 - \omega_{02}^2)} \\ \sigma_2 = \frac{3C_{0\Sigma}R_\Sigma(1 - C_{0\Sigma}L_T\omega_{02}^2)}{2\alpha(\omega_{01}^2 - \omega_{02}^2)} \end{cases} \quad (6.44)$$

Wstawiając do przedstawionego rozwiązania wartość  $\alpha$  opisaną wzorem (6.30) oraz wartości  $\omega_{01}$  i  $\omega_{02}$  opisane wzorami (6.21) i (6.22) uzyskuje się po przekształceniach:

$$\begin{cases} \sigma_1 = R_\Sigma \frac{3L_T - 3L_L + \sqrt{9L_T^2 + 6L_TL_L + 9L_L^2}}{4L_L\sqrt{9L_T^2 + 6L_TL_L + 9L_L^2}} \\ \sigma_2 = R_\Sigma \frac{3L_L - 3L_T + \sqrt{9L_T^2 + 6L_TL_L + 9L_L^2}}{4L_L\sqrt{9L_T^2 + 6L_TL_L + 9L_L^2}} \end{cases} \quad (6.45)$$

Dla rozważanej na początku rozdziału 6 (przedstawionej na rys. 6.1) symulowanej sieci przemysłowej o zbiorczych parametrach  $C_{0\Sigma} = 6,048 \mu\text{F}$ ,  $L_L = 2,9808 \text{ mH}$ ,  $L_T = 1,109 \text{ mH}$  oraz  $R_\Sigma = 1,07028 \Omega$  przeprowadzono obliczenia uzyskując następujące wyniki:

- $f_1 = 2194 \text{ Hz}$  i  $\sigma_1 = 39 \cdot R_\Sigma = 41,74 \text{ s}^{-1}$  dla pierwszej składowej przejściowej,
- $f_2 = 606 \text{ Hz}$  i  $\sigma_2 = 128 \cdot R_\Sigma = 137,0 \text{ s}^{-1}$  dla drugiej składowej przejściowej.

Warto zwrócić uwagę na fakt, że częstotliwości  $f_1$  oraz  $f_2$  są wyliczone z pulsacji  $\omega_{01}$  oraz  $\omega_{02}$  (6.21 i 6.22), które są pulsacjami przebiegu nietłumionego. Pulsacja drgań tłumionych będzie mniejsza. Można je obliczyć z zależności:

$$\begin{cases} \omega_1 = \sqrt{\omega_{01}^2 - \sigma_1^2} \\ \omega_2 = \sqrt{\omega_{02}^2 - \sigma_2^2} \end{cases} \quad (6.46)$$

Wartości tych pulsacji dla przykładowej sieci analizowanej w tym rozdziale (o schemacie przedstawionym na rys. 6.1) zamieszczono w tabeli 6.6.

Na podstawie danych przedstawionych w tabeli 6.6 można stwierdzić, że dla rezystancji w miejscu zwarcia zbliżonej do zwarcia metalicznego niewielka różnica pomiędzy pulsacją tłumioną a nietłumioną pozwala zaniedbać konieczność obliczania

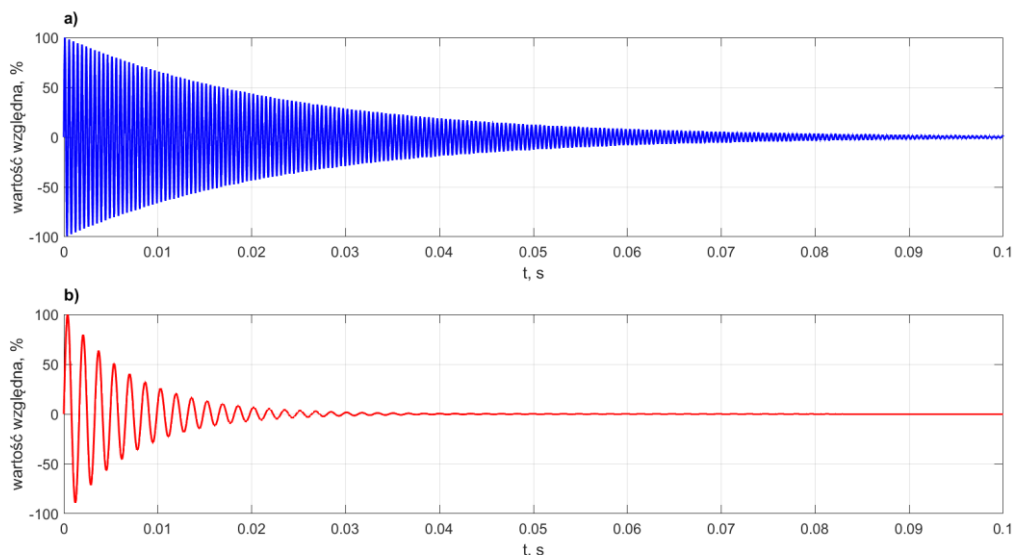
pulsacji tłumionej. Przykładowo dla rezystancji w miejscu zwarcia równej  $10 \Omega$  różnica pomiędzy tymi pulsacjami wynosi  $6,8 \text{ s}^{-1}$  (0,05%) dla składowej o wyższej częstotliwości i  $273,6 \text{ s}^{-1}$  (7,2%) dla składowej o niższej częstotliwości. Składowa prądu o mniejszej częstotliwości ( $f_2$ ) zanika więc ponad trzykrotnie szybciej niż składowa o wyższej częstotliwości ( $f_1$ ). Zjawisko to zostało przedstawione na rys. 6.16. W przypadku występowania większej wartości rezystancji w miejscu doziemienia zanikanie obu składowych przejściowych występuje jeszcze szybciej (rys. 6.17).

Tabela 6.6. Różnica pomiędzy pulsacją przebiegu nietłumionego a pulsacją drgań tłumionych dla zwarcia doziemnego w sieci przedstawionej na rys. 6.1 dla różnych wartości rezystancji w miejscu zwarcia.

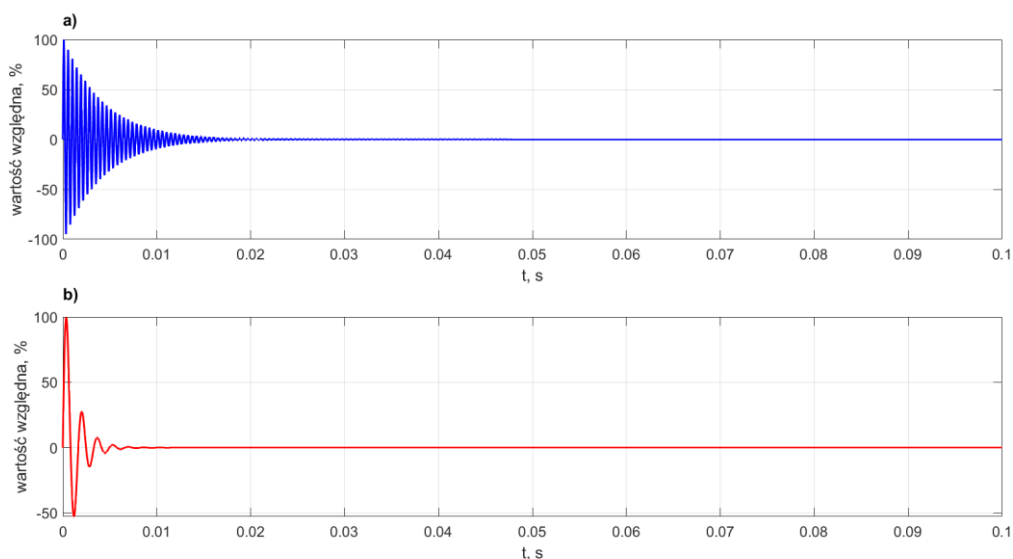
L.p.	$R_{zw}, \Omega$	$f_1, \text{Hz}$	$\omega_{01}, \text{s}^{-1}$	$\sigma_1, \text{s}^{-1}$	$\omega_1, \text{s}^{-1}$	$f_2, \text{Hz}$	$\omega_{02}, \text{s}^{-1}$	$\sigma_2, \text{s}^{-1}$	$\omega_2, \text{s}^{-1}$
1	0	2194	13785,3	41,74	13785,2	606	3807,7	137	3805,1
2	2	2194	13785,3	119,7	13784,8	606	3807,7	393	3787,2
3	5	2194	13785,3	236,7	13783,3	606	3807,7	777	3727,5
4	10	2194	13785,3	431,7	13778,5	606	3807,7	1417	3534,1

Rozważając dalej równanie (6.46) można stwierdzić, że pulsacja drgań tłumionych dla częstotliwości  $f_k$  może wystąpić tylko wtedy, gdy:

$$\omega_{0k} > \sigma_k \quad (6.47)$$

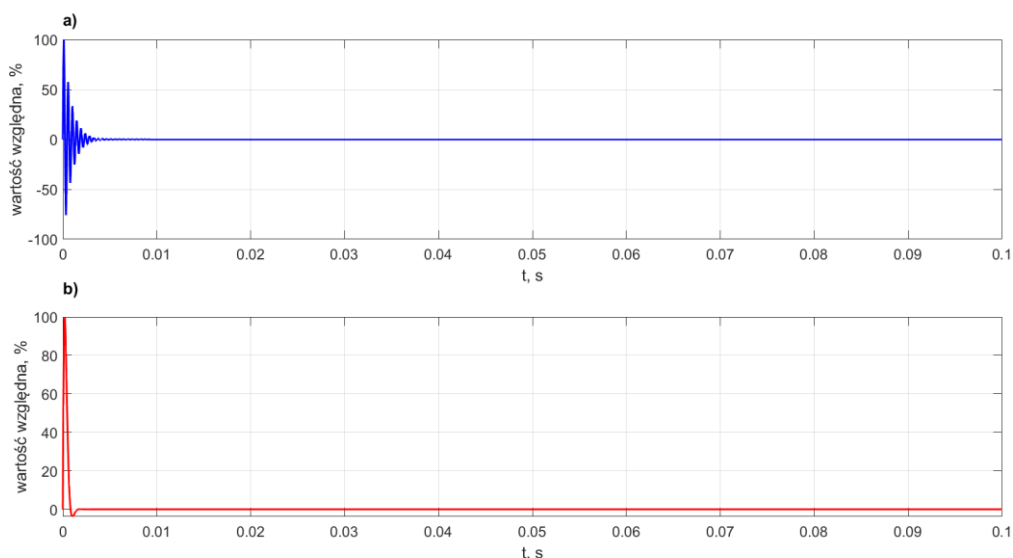


Rys. 6.16. Porównanie częstotliwości i szybkości zanikania obu składowych przejściowych: a) składowa nr 1:  $f_1 = 2194 \text{ Hz}$  oraz  $\sigma_1 = 41,74 \text{ s}^{-1}$ , b) składowa nr 2:  $f_2 = 606 \text{ Hz}$  oraz  $\sigma_2 = 137,0 \text{ s}^{-1}$ . Przebiegi dla rezystancji w miejscu zwarcia równej  $0 \Omega$ .

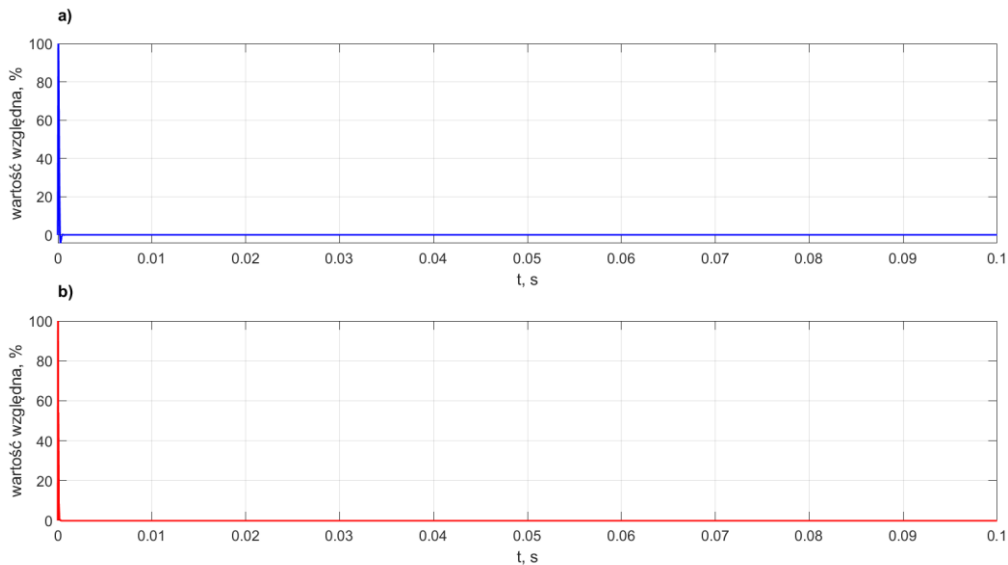


Rys. 6.17. Porównanie częstotliwości i szybkości zanikania obu składowych przejściowych: a) składowa nr 1:  $f_1 = 2194$  Hz oraz  $\sigma_1 = 236,7$   $s^{-1}$ , b) składowa nr 2:  $f_2 = 606$  Hz oraz  $\sigma_2 = 777,0$   $s^{-1}$ . Przebiegi dla rezystancji w miejscu zwarcia równej  $5 \Omega$ .

Okazuje się więc, że można wyliczyć graniczną wartość rezystancji w miejscu zwarcia doziemnego, powyżej których drgania tłumione składowych przejściowych nie wystąpią. Dla omawianego układu wynoszą one odpowiednio  $28,7 \Omega$  (zanim częstotliwości  $f_2$ ) oraz  $352,4 \Omega$  (zanik częstotliwości  $f_1$ ). Przebiegi obu składowych przejściowych dla tych granicznych wartości rezystancji w miejscu zwarcia przedstawiono na rys. 6.18 i 6.19.



Rys. 6.18. Porównanie częstotliwości i szybkości zanikania obu składowych przejściowych: a) składowa nr 1:  $f_1 = 2194$  Hz oraz  $\sigma_1 = 1160,1$   $s^{-1}$ , b) składowa nr 2:  $f_2 = 606$  Hz oraz  $\sigma_2 = 3807,7$   $s^{-1}$ . Przebiegi dla rezystancji w miejscu zwarcia równej  $28,7 \Omega$ .



Rys. 6.19. Porównanie częstotliwości i szybkości zanikania obu składowych przejściowych: a) składowa nr 1:  $f_1 = 2194 \text{ Hz}$  oraz  $\sigma_1 = 13785 \text{ s}^{-1}$ , b) składowa nr 2:  $f_2 = 606 \text{ Hz}$  oraz  $\sigma_2 = 45244 \text{ s}^{-1}$ . Przebiegi dla rezystancji w miejscu zwarcia równej  $352,4 \Omega$ .

Rozważany powyżej model jest modelem uproszczonym, nie uwzględniającym parametrów linii od częstotliwości (zjawisko naskórkowości), a uzyskane wyniki uwarunkowane są specyfiką analizowanej sieci kopalnianej – czyli zasilaniem z transformatora o dużej mocy znamionowej (i związanej z tym niskiej impedancji) oraz dużą indukcyjnością rozważanej linii kablowej (związanej z jej rozległością oraz zastosowaniem kabli ekranowanych). Ze względu na zastosowanie kabli z ekranami indywidualnymi na poszczególnych żyłach w rozważanym modelu pominięto pojemności międzyfazowe.

## 6.9. Podsumowanie rozdziału

W kopalnianych sieciach średnich napięć z izolowanym punktem neutralnym do lokalizacji doziemień zazwyczaj stosuje się zabezpieczenia zerowonapięciowe, które wykrywają fakt zaistnienia zwarcia w galwanicznie połączonej sieci, oraz zabezpieczenia zerowoprądowe, które lokalizują linię, w której następuje zwarcie. W powyższym rozdziale pokazano, że oprócz tych zabezpieczeń możliwe jest zastosowanie zabezpieczeń admitancyjnych, które także przy pracy równoległej z zabezpieczeniami  $I_{0>}$  mogą lokalizować uszkodzony odpływ. Dobór dolnej granicy nastawy zabezpieczenia  $I_{0\text{nast}}$  jest stosunkowo prosty i dla tej granicy zabezpieczenia

admitancyjne z dużym prawdopodobieństwem są w stanie wykryć miejsce zwarcia z zachowaniem zasad selektywności poprzecznej. Miejsce zwarcia w danej linii oraz możliwość pojawienia się wyższych harmoniczných mają znikomy wpływ na poprawność zastosowania tego kryterium. Dużo bardziej istotnym dla uzyskania odpowiedniej selektywności aspektem jest kwestia prawidłowego doboru czasu całkowania przy obliczaniu wartości skutecznych wielkości kryterialnych. Optymalny dobór tego czasu powinien zapewnić jednoczesne spełnienie dwóch przeciwstawnych kryteriów:

- jak najszybsze wykrycie doziemienia i odcięcie dopływu energii do miejsca zwarcia,
- odporność na odkształcenia przebiegów napięć i prądów.

Pomocą w tym doborze mogą być przedstawione w niniejszym rozdziale wyniki badań symulacyjnych.

Otwartym zagadnieniem pozostaje kwestia górnej granicy  $Y_{0nast}$ , która jest prosta do wyliczenia dla sieci z nieskutecznie izolowanym punktem neutralnym. Sieci tego typu praktycznie nie występują w podziemiach kopalń węgla kamiennego. W sieciach z izolowanym punktem neutralnym niemożliwe jest wyliczenie tej granicy. Jednak na podstawie uzyskanych w tym rozdziale jak i w całej pracy wyników wnioskuje się, że górna granica  $Y_{0nast}$  może być większa o zaledwie 15-20% w stosunku do wartości dolnej, aby nie doszło do niewyłączenia uszkodzonego pola (rys. 6.5).

## 7. Podsumowanie i wnioski

Kopalniane sieci elektroenergetyczne pracują w bardzo trudnych warunkach środowiskowych, charakteryzujących się dużą wilgotnością oraz częstymi narażeniami mechanicznymi. Powoduje to ryzyko uszkodzeń izolacji, prowadzące do występowania jednofazowych zwarcí doziemnych (będących najczęstszymi przyczynami zakłóceń powodujących wyłączanie odcinków sieci). Jednocześnie obecność metanu oraz pyłu węglowego stwarza, w sytuacji występowania zwarcí doziemnych, istotne zagrożenie pożarowe i wybuchowe. Wymusza to stosowanie odpowiednich rozwiązań zapewniających bezpieczeństwo pracy w kopalni przez niezawodne, selektywne i szybkie odłączenie uszkodzonych odcinków sieci przerywając dopływ energii do miejsca zwarcia. Wykorzystanie współczesnych technologii, takich jak wielofunkcyjne przekaźniki zabezpieczeniowe i sterowniki polowe, pozwala na zastosowanie różnych kryteriów zabezpieczeniowych, w tym nadprądowych i admitancyjnych, zapewniając niezawodność i szybkość reakcji systemu zabezpieczeń. Odpowiednie skoordynowanie różnych kryteriów zabezpieczeniowych, zarówno pod względem czasowym, jak i prądowym, jest kluczowe dla zapewnienia selektywności działania i uniknięcia niepożądanych wyłączeń.

W celu analizy tych zjawisk w latach 2019-2021 pozyskano dane z kopalń mające umożliwić odtworzenie w jak najbardziej wiarygodny sposób jako model symulacyjny. W ramach pracy określono, że praktycznie do analizy zjawisk ziemnozwarciowych wystarczającym modelem linii kablowych jest model  $\Pi$ . Co prawda z jego zastosowaniem wiąże się wprowadzenie w sieć dodatkowych układów RLC, które w wyniku rezonansów wzajemnych wprowadzają w sieć dodatkowe oscylacje składające się z wyższych harmoniczných. **W pracy po raz pierwszy zastosowano jako model doziemienia w kablowej sieci z izolowanym punktem neutralnym model dwóch rezystancji zmienných w czasie przełączanych półokresowo. Ponadto określono, że powyższy model odwzorowuje tylko zwarcia wysokorezystancyjne. W przypadku zwarcí niskorezystancyjnych optymalne jest przyjęcie modelu doziemienia w postaci**



rezystora o stałej wartości rezystancji. Przyjęcie powyższego modelu kopalnianej sieci rozdzielczej wraz z rezystancją zwarcia spełniło cel naukowy rozprawy.

Otwartym problemem jest zagadnienie związane z zastosowaniem zabezpieczeń admitancyjnych i prawidłowym doбором ich nastaw. Wyniki przeprowadzonych badań (rozdział 5) pokazują, że we wszystkich rzeczywistych przypadkach przedstawionych w pracy zastosowanie zabezpieczenia admitancyjnego skutkowało prawidłowym wyłączeniem. Niemniej jednak na podstawie analizy modelowej sieci (rozdział 6) pokazano, że są newralgiczne przypadki, dla których doszłoby do nieselektywnego wyłączenia. **Dlatego proponuje się uzupełnienie obecnie obowiązującej normy PN-G-42044:2000 o możliwość zastosowania zabezpieczeń admitancyjnych wykorzystujących kryterium admitancyjne  $Y_0$  z adnotacją, że nie mogą pracować jako jedyne zabezpieczenia zabezpieczające poszczególne odprawy.** Dla przyjętego kryterium wystarczające jest, aby nastawa zabezpieczenia admitancyjnego była dobierana według wzoru:

$$1,2 \left( \frac{k_b I_{CLi}}{U_{0max}} + \Delta Y_{0\mu} \right) \geq Y_{0nast} \geq \frac{k_b I_{CLi}}{U_{0max}} + \Delta Y_{0\mu} \quad (7.1)$$

**Opcjonalnie można dopuścić samodzielne stosowanie zabezpieczeń ziemnozwarciowych admitancyjnych w polach, w których dopuszczalne jest stosowanie zabezpieczeń zwłocznych o czasie działania powyżej 100 ms.** W takich polach można wydłużyć czas analizy danych przez zabezpieczenie do wartości większych niż 80 ms minimalizując wpływ stanu nieustalonego. Ustalenie powyższych założeń spełniło cel użyteczny pracy.

W przypadku wydłużenia czasu całkowania celowe będzie przeprowadzenie dalszych badań analizujących wpływ tego parametru na wykrywalność krótkotrwałych wysokorezystancyjnych zwarć doziemnych.

## Literatura

- [1] WUG: Jednostki objęte nadzorem i kontrolą organów nadzoru górniczego w 2019 r., z uwzględnieniem stanu zatrudnienia i wydobycia, Katowice, raport, 2020.
- [2] Dubiński J., Prusek S., Turek M.: Key tasks of science in improving effectiveness of hard coal production in Poland. Arch. Min. Sci. 2017, 62, 597–620.
- [3] Bórawski P., Bełdycka-Bórawska A., Holden L.: Changes in the Polish Coal Sector Economic Situation with the Background of the European Union Energy Security and Eco-Efficiency Policy. Energies 2023, 16, 726.
- [4] Bednarczyk J.: Energochłonność i efektywność energetyczna wydobycia i przetwarzania węgla brunatnego na energię elektryczną. Przegląd Górniczy, 9, 2011, 12–17.
- [5] Gałaś Z.: Analiza energochłonności procesu wydobywczo-przeróbczego słabo związłego piaskowca. Przegląd Górniczy, 2, 2007, 22–27.
- [6] Gałaś Z.: Analiza energochłonności procesu produkcyjnego w kopalni „Klęczany”. Przegląd Górniczy, 11, 2000, 14–20.
- [7] Raport dotyczący kluczowych polskich energochłonnych przemysłów. Opracowanie Krajowa Agencja Poszanowania Energii. S.A. Warszawa, 2009.
- [8] Lorenc J., Hoppel W.: Problemy wykrywania zwarć doziemnych w sieciach pracujących z nieziemionym bezpośrednio punktem neutralnym. Materiały konferencji Politechniki Śląskiej, Ustroń 2005
- [9] Polska Norma PN-G-42044:2000 Środki ochronne i zabezpieczające w elektroenergetyce kopalnianej - Zabezpieczenia ziemnozwarciowe - Wymagania i zasady doboru
- [10] Polska Norma PN-EN 50328:2003+A1:2011 Górnictwo podziemne - Systemy ochrony przeciwwybuchowej.
- [11] Polska Norma PN-EN 61936-1:2010 Moc zainstalowana powyżej 1 kV a.c. - Część 1: Wspólne przepisy.

- [12] Polska Norma PN-EN 50522:2010 Uziemienie instalacji elektrycznych o napięciu przekraczającym 1 kV.
- [13] Polska Norma PN-EN 60079-14:2010 Urządzenia elektryczne do zastosowań w atmosferach potencjalnie wybuchowych - Część 14: Projektowanie, wybór i montaż instalacji elektrycznych.
- [14] WUG: Ocena stanu bezpieczeństwa pracy, ratownictwa górniczego oraz bezpieczeństwa powszechnego w związku z działalnością górniczo-geologiczną w 2020 roku, raport, 2021.
- [15] WUG: Ocena stanu bezpieczeństwa pracy, ratownictwa górniczego oraz bezpieczeństwa powszechnego w związku z działalnością górniczo-geologiczną w 2017 roku, raport, 2018.
- [16] WUG: Ocena stanu bezpieczeństwa pracy, ratownictwa górniczego oraz bezpieczeństwa powszechnego w związku z działalnością górniczo-geologiczną w 2013 roku, raport, 2014.
- [17] Marinovic, N.: *Electrotechnology in Mining*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, the Netherlands, 1990.
- [18] Towsey, C.: *Electrical Safety in Mining - one flash and you're ash*. Australasian Mine Safety Journal 2011, No. 3, 42-47.
- [19] Cawley, J.C.: *Electrical Accidents in the Mining Industry, 1990–1999*. IEEE Trans on IA 2003, Vol. 39, 1570-1577.
- [20] Hoppel W., Lorenc J.: *Dobór nastaw zabezpieczeń w polach linii średniego napięcia*, Autom. Elektroenerg., 2003, 2(39), 35–39.
- [21] Talaga M., Halinka A.: *Selective detection of earthfaults in medium voltage networks of the industrial plants – part I*, Przegląd Elektrotechniczny, 2014, 3(90), 20–23.
- [22] Talaga M., Halinka A.: *Selective detection of earthfaults in medium voltage networks of the industrial plants – part II*, Przegląd Elektrotechniczny, 2014, 3(90), 24–27.

- [23] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21.10.2008 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla maszyn (Dz. U. Nr 2008 poz. 199 poz. 1228 wraz z późniejszymi zmianami).
- [24] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21 sierpnia 2007 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla sprzętu elektrycznego (Dz. U. 2007 Nr 155, poz. 1089).
- [25] Hoppel W., Lorenc J.: Podstawy doboru nastaw zabezpieczeń w polach SN. *Automatyka Elektroenergetyczna*, 2003, 1, 45-50.
- [26] Hoppel W., Lorenc J.: Dobór nastaw zabezpieczeń w polach linii średniego napięcia. *Automatyka Elektroenergetyczna*, 2003, 2, 35-39.
- [27] Lorenc J., Hoppel W.: Technical methods supporting operation of earth fault protections in medium voltage networks, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2009, 9(85), 241–248.
- [28] Lorenc J., Hoppel W.: Contemporary solutions of earth-fault protection in medium voltage networks with a non-solidly earthed neutral, *Autom. Elektr. Zakłócenia*, 2013, 4(14), 18–43.
- [29] Małczak, C., Kaźmierczak, G.: Selektywne wyłączenie zakłóceń elektrycznych w równoległych liniach kablowych średniego napięcia. *Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa*, 2011. 49(8), 8-16.
- [30] Marciniak L., Pavlova-Marciniak I.: Stany przejściowe w kompensowanych sieciach średnich napięć podczas zwarć łukowych, X Międzynar. Konf. Nauk. – APE'01, 2001, 78–92.
- [31] Nohacova L., Vykuka R., Zak F. Kropacek V.: Electrical distribution networks with isolated neutral point - The value of the capacitive earthfault current and impact on the operation of these networks, 2015, 73-76.
- [32] Filipović-Grčić B., Stipetic N., Milardić V., Uglešić I.: The insulation of medium voltage networks with isolated neutral, 2018.
- [33] Ostapchuk O., Kruczek W., Kuznetsov V., Kuznetsov V. V., Tsyplenkov D.: Analysis of the neutral grounding modes influence on the reliability characteristics of local systems with renewable energy sources. *Diagnostyka*, 2021, 22(1), 45-56.

- [34] Marciniak L.: Identyfikacja zwarcí doziemnych wysokorezystancyjnych w sieciach średnich napięć, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2015, 8(91), 185–189.
- [35] Olejnik B.: Lokalizacja miejsca zwarcia doziemnego w skompensowanej sieci średniego napięcia, *Poznań University of Technology Academic Journals - Electrical Engineering*, 2015, 82, 85-92.
- [36] Olejnik B.: Skuteczność czujników przepływu prądu zwarciovego podczas zwarcí doziemnych oporowych, *Aktualna problematyka sieci średnich napięć 2014*, Opalenica, 2014.
- [37] Mikrut M., Pilch Z., Sauczek M.: Poziom harmonicznych w prądzie ziemnozwarciowym w sieciach przemysłowych średniego napięcia. *Zesz. Nauk. Politech. Śląskiej*, 1994, 137, 75-92.
- [38] Mikrut M., Pilch Z., Sauczek M.: Identyfikacja i eliminacja zwarcí jednofazowych z ziemią w sieciach średnich napięć” *Zesz. Nauk. Politech. Śląskiej*, 1999, 164, 63-77.
- [39] Boron W.: *Linie kablowe w podziemnych zakładach górniczych*. 2006.
- [40] Sheng Y., Rovnyak S. M.: Decision Tree-Based Methodology for High Impedance Fault Detection. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2004, 2(19), 533-536.
- [41] Michalik M., Rebizant W., Lukowicz M., Lee S.-J., Kang: Wavelet Transform Approach to High Impedance Fault Detection in MV Networks. *Proceedings of the 2005 IEEE PowerTech Conference*, St. Petersburg, Rosja, 2005.
- [42] Sedighi A. R., Haghifam M. R.: Simulation of High Impedance Ground Fault In Electrical Power Distribution Systems. *International Conference on Power System Technology*, 2010.
- [43] Zamanan N.: A novel methodology for on-line identification of arcing high impedance faults on overhead power distribution feeders. *Rozprawa doktorska*, School of Electronics and Computer Science, Electrical Power Engineering Group, University of Southampton, Anglia, 2008.
- [44] ElectroMagnetic Transients Program (EMTP) Rule Book, [www.eeug.org](http://www.eeug.org)
- [45] EMTP-RV ElectroMagnetic Transient Program, [www.emtp.com](http://www.emtp.com)

- [46] Dommel H. W.: ElectroMagnetic Transients Program, Reference Manual (EMTP Theory Book), Bonneville Power Administration, Portland Oregon, 1986.
- [47] Oprogramowanie SWN 3.0, [www.polsl.pl/rg1/oprogramowanie-2/](http://www.polsl.pl/rg1/oprogramowanie-2/)
- [48] Kowol A., Gągorowski D., Trzep L.: Programy wspomagające projektowanie sieci elektroenergetycznych w podziemnych zakładach górniczych, *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie*, 2016, 4, 30-36.
- [49] Cholewicki T.: *Elektrotechnika teoretyczna, T. II.* Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 1971.
- [50] Chua L. O., Lin P. M.: *Komputerowa analiza układów elektronicznych. Algorytmy i metody obliczeniowe*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 1981.
- [51] Director S. W., Rohrer R. A.: *Podstawy teorii układów elektrycznych*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1976.
- [52] Dommel H. W.: Digital computer solution of electromagnetic transients in single- and multiphase networks, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-88, 1969, 388– 399.
- [53] Dommel H. W.: Nonlinear and time-varying elements in digital simulation of electromagnetic transients, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-90, 1971, 2561–2567.
- [54] Meyer W.S., Dommel H.W.: Numerical Modelling of Frequency-Dependent Transmission-Line Parameters in an Electromagnetic Transients Program, *IEEE Trans.*, PAS-93, 1974, 1401-1409.
- [55] Dommel H. W.: *Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP theory book)*, Bonneville Power Administration, Portland, 1986.
- [56] Marti J. R.: Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations. *IEEE Trans. on Power App. And Syst.*, PAS-101, 1982, 147-155.

- [57] Marti L.: Simulation of Transients in Underground Cables with Frequency Dependent Modal Transformation Matrix, IEEE Trans. on Power Delivery, 1988, 3, 1099-1110.
- [58] Noda T., Nagaoka N., Ametani A.: Further improvements to a phase-domain ARMA line model in terms of convolution, steady-state initialization, and stability. IEEE Trans. Power Deliv., 1997, 3(12), 1327–1332.
- [59] Noda T., Nagaoka N., Ametani A.: Phase Domain Modeling of Frequency-Dependent Transmission Lines by Means of an ARMA Model. IEEE Trans. Power Deliv., 1996, 1(11), 401–411.
- [60] Kacejko P., Machowski J.: Zwarcia w systemach elektroenergetycznych. Warszawa: WNT, 2013.
- [61] Piątek M., Marciniak L.: Analiza możliwości wykorzystania wyższych harmoniczných w zabezpieczeniach ziemnozwarciowych. Zesz. Nauk. Wydz. Elektrotechniki i Autom. Politech. Gdańskiej, 2017, 54, 171–174.
- [62] H. Klein H.: Niektóre problemy koordynacji nastawień zabezpieczeń ziemnozwarciowych w izolowanych sieciach SN, 1–10.
- [63] Koszmider A., Olak J., Piotrowski Z.: Przekładniki prądowe. WNT, 1985.
- [64] Hagel R., Zakrzewski J.: Miernictwo dynamiczne. WNT, 1984.
- [65] Karta katalogowa: Sterownik polowy multiMUZ – 3.
- [66] Karta katalogowa: Sterownik polowy megaMUZ – smart.
- [67] Karta katalogowa: Sterownik polowy MUPASZ 710 plus.
- [68] Karta katalogowa: Sterownik polowy megaMUZ – 2.
- [69] Li S., Xue Y.: Simulation analysis of Arc grounding fault in non-solidly earthed network. IEEE Power & Energy Society General Meeting, Chicago, 2017.
- [70] Wiśniewski J., Anderson E., Karolak J.: Sensitivity of Power Station Auxiliary Network to the Possibility of Ferroresonance Occurrence. Acta Energetica, 2014, 4(21), 171-177.

- [71] Cataliotti A., DiCara D., DiFranco P.A.: Frequency response of Measurement Current Transformer. I2MTC 2008 - IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Victoria, Vancouver, 2008.
- [72] Kaczmarek M., Nowicz R.: Comparison of wide frequency metrological properties of inductive current transformers. *Przełąd Elektrotechniczny* 2012, 88, 63–65.
- [73] Schreiber R., Sikorova I.: Frequency Response Of Selected Current Transformers And Hall-Effect Current Sensors. XXI IMEKO World Congress “Measurement in Research and Industry”, Praga, 2015, 738-742.
- [74] Karta katalogowa: Przekładnik Ferrantiego IO1s.
- [75] Karta katalogowa: Przekładnik Ferrantiego IO-100-N.
- [76] Karta katalogowa: Generator funkcyjny SDG1025.
- [77] Karta katalogowa: Wzmacniacz mocy FPA301-20W.
- [78] Haginomori E., Koshiduka T., Arai J., Ikeda H.: *Power System Transient Analysis, Theory and Practice using Simulation Programs (ATP/EMTP)*, 2016.
- [79] Høidalen H. K., Soloot A. H.: Cable modelling in ATP – from NODA to TYPE94. EMTP Users Gr. Meet., 2010.
- [80] Oficjalne forum użytkowników ATPDraw, <https://www.atpdraw.net/>
- [81] Katalog kabli i przewodów oponowych, Tele-Fonika Kable.
- [82] Emanuel A. E., Cyganski, D. Orr J. A., Shiller S. Gulacheński A. M.: High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kV sidtribution feeders, contributions to the evaluation of the low frequency spectrum. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1990, 5, 676-686.
- [83] Djuric M. B., Terzija V. V.: New approach to the arcing faults detection for fast autoreclosure in transmission systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1995, 10, 1793-1798.
- [84] Johns A. T., Aggarwal R. K., Song Y. H.: Improved techniques for modeling fault arcs on faulted EHV transmission systems. *IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, 1994, 141, 148—154.



- [85] Zamanan N., Sykulski J.: The Evolution of High Impedance Fault Modeling, 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Bucharest, 2014, 77-81.
- [86] Korniluk W., Woliński K. W.: Elektrotenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok, 2009.
- [87] Warsza, Z. L., Puchalski, J.: Estymacja niepewności charakterystyki z pomiarów w punktach kontrolnych. *Pomiary Automatyka Robotyka*, 22(4), 2018, 39-50.
- [88] Geyer C.J., Thompson E.A.: Constrained Monte Carlo maximum likelihood for dependent data *J. R. Statistical Society B*, 1992, 54, 3, 657–699.
- [89] Hastings W.K.: Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications, *Biometrika*, 1970, 57, 97–109.
- [90] Jerrum M., Sinclair A.: The Markov chain Monte Carlo method: an approach to approximate counting and integration, In *Approximation Algorithms for NP-hard Problems*, (Dorit Hochbaum, ed.), PWS, 1996.
- [91] Szydłowski H.: *Teoria pomiarów*. Wyd. II. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1978.
- [92] Karta katalogowa: Sterownik polowy multiMUZ – 3.
- [93] Lorenc J.: *Admitancyjne zabezpieczenia ziemnozwarciowe*. Wyd. Pol. Pozn., Poznań 2007.
- [94] Michalik M., Schier A.: Laboratoryjny układ badawczy cyfrowej automatyki zabezpieczeniowej sieci SN. *Prace Nauk. Inst. Energoelektryki Politech. Wrocławskiej*, 1987, 76, 69–81.
- [95] Michalik M., Schier A.: Mikrokomputerowy system symulacji zwarć doziemnych o łuku przerywanym. *Prace Nauk. Inst. Energoelektryki Politech. Wrocławskiej*, 1988, 79, 37–50.
- [96] Michalik M., Schier A.: Laboratoryjny model sieci SN do badania zjawisk i zabezpieczeń ziemnozwarciowych. *Aktualne problemy automatyki w energetyce*.

V Międzyn. Konf. Nauk. Komit. Elektrot. PAN, Inst. Elektroenerg. i Sterow. Ukł. PŚL. W Gliwicach, 1989, 285–292.

- [97] Lorenc J., Staczek B., Handke J.: Zmodyfikowana metoda kompensacji nadążnej w sieciach SN z asymetrią doziemną. Zesz. Nauk. Wydz. Elektrotechniki i Autom. Politech. Gdańskiej, 2017, 53, 7–9.
- [98] Borucki S.: Ocena stanu technicznego rdzenia oraz uzwojeń transformatora energetycznego w stanie pracy nieustalanej. Przegląd Elektrotechniczny, 2010, 86, 22–25,.
- [99] Halinka A.: Działanie zabezpieczeń nadprądowych w stanach nieustalonych towarzyszących włączaniu nieobciążonych transformatorów SN. Elektroinfo, 2010, 3, 24–27,.
- [100] Kornatowski E., Banaszak S.: Diagnostics of a Transformer's Active Part With Complementary FRA and VM Measurements. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 3, 1398-1406.
- [101] Kornatowski E.: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów wibroakustycznych w bezinwazyjnej diagnostyce transformatorów energetycznych. Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, Szczecin, 2014.
- [102] Lipiński W.: Obliczenia numeryczne w teorii sygnałów i obwodów elektrycznych. Szczecin, Wydawnictwo ZAPOL, Szczecin, 2008.
- [103] Polska Norma PN-EN 61000-2-4: Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Poziomy kompatybilności dotyczące zaburzeń przewodzonych małej częstotliwości w sieciach zakładów przemysłowych.
- [104] Bender C.M., Orszag S.A.: Advanced Mathematical Methods for Scientists and Engineers. Asymptotic Methods and Perturbation Theory. Springer, New York 1999.
- [105] Bush A.W. Perturbation Methods for Engineers and Scientists. CRC Press, Taylor and Francis, Boca Raton 1992.

## Spis rysunków

<b>1. Wprowadzenie do tematu</b> .....	<b>7</b>
Rys. 1.1. Wypadkowość w polskim górnictwie w latach 2008-2020. W zestawieniu zaprezentowano liczbę wypadków w górnictwie ogółem jak i w górnictwie węgla kamiennego. Opracowanie własne na podstawie [14 – 16]. .....	12
Rys. 1.2. Wypadki śmiertelne w polskim górnictwie w latach 2008-2020. W zestawieniu zaprezentowano liczbę wypadków śmiertelnych w górnictwie ogółem jak i w górnictwie węgla kamiennego. Opracowanie własne na podstawie [14 – 16]. .....	13
Rys. 1.3. Udział wypadków śmiertelnych dla całego przemysłu wydobywczego oraz kopalń węgla kamiennego w stosunku do całkowitej liczby wypadków w górnictwie. Opracowanie własne na podstawie [14 – 16]. .....	15
<b>2. Cele i teza rozprawy doktorskiej</b> .....	<b>19</b>
<b>3. Specyfika kopalnianej sieci rozdzielczej średniego napięcia</b> .....	<b>23</b>
Rys. 3.1. Model prostej, rozgałęzionej sieci z izolowanym punktem neutralnym w przypadku zwarcia doziemnego. ....	26
Rys. 3.2. Uproszczony model $\Pi$ linii kablowej. $R_s$ oraz $L_s$ to parametry podłużne, natomiast $C_p$ to parametr poprzeczny. ....	27
Rys. 3.3. Uproszczony model Dommela: a) fragment linii, b) model częstotliwościowo-zależny zaproponowany wg J. Martiego.....	29
Rys. 3.4. Równoważny obwód w dziedzinie czasu zaproponowany przez L. Martiego. ....	29
Rys. 3.5. Linia wielofazowa. ....	30
Rys. 3.6. Przebiegi prądów w żyłach roboczych w sieci z izolowanym punktem neutralnym. Prądy dla linii, w której nastąpiło zwarcie jednofazowe z ziemią w fazie L1 w chwili $t = 105$ ms oraz zwarcie dwufazowe L1 i L2 z ziemią w chwili $t = 205$ ms. ....	33
Rys. 3.7. Układ otwartego trójkąta przekładników napięciowych. Woltomierz wskazuje napięcie różne od zera podczas doziemienia w sieci.....	35
Rys. 3.8. Układ Holmgreena. Amperomierz wskazuje wartość różną od zera podczas zwarcia doziemnego. ....	36
Rys. 3.9. Sposób montażu przekładnika Ferrantiego na kablu energetycznym. ....	37
Rys. 3.10. Rozptył prądu zerowego podczas zwarcia doziemnego w zabezpieczonej linii. ....	38
Rys. 3.11. Sterownik polowy megaMUZ-2 [68]. .....	40
Rys. 3.12. Zdjęcie (z lewej) oraz schemat (z prawej) stanowiska pomiarowego do badania wpływu częstotliwości prądu pierwotnego na błąd prądowy i kątowy przekładnika Ferrantiego. ....	44
Rys. 3.13. Przykład wyznaczenia wartości $i_x(0)$ . ....	46
Rys. 3.14. Wpływ częstotliwości na względny błąd prądowy oraz błąd kątowy przekładnika Ferrantiego typu IO-100-N dla wybranych wartości rezystancji obciążenia z zakresu od 0,5 do 2 $\Omega$ . ....	48
Rys. 3.15. Wpływ częstotliwości na względny błąd prądowy oraz błąd kątowy przekładnika Ferrantiego typu IO1s dla wybranych wartości rezystancji obciążenia z zakresu od 0,5 do 2 $\Omega$ . ....	49
<b>4. Metodyka prowadzonych badań</b> .....	<b>50</b>
Rys. 4.1. Model prostej sieci z izolowanym punktem neutralnym magistralnej jednostronnie zasilanej 6 kV. Przykład modelu $\Pi$ zasymulowanego w programie ATP-EMTP dla doziemienia metalicznego występującego na końcu pola nr 1. Długość każdego odpływu w prezentowanym przykładzie wynosi 1000 m. ....	52
Rys. 4.2. Model prostej sieci z izolowanym punktem neutralnym magistralnej jednostronnie zasilanej 6 kV. Przykład modelu zCable zasymulowanego w programie ATP-EMTP dla doziemienia metalicznego występującego na końcu pola nr 1. Długość każdego odpływu w prezentowanym przykładzie wynosi 1000 m. ....	53
Rys. 4.3. Budowa elektroenergetycznego kabla górniczego YHKGYFtlyn 3.6/6 kV. ....	54
Rys. 4.4. Przebiegi prądu ziemnozwarciowego oraz składowej zerowej napięcia dla modeli przedstawionych na rys. 4.1 i 4.2. Cały przebieg oraz stan ustalony. ....	55
Rys. 4.5. Stosowane modele zwarcia doziemnego: a) dla zwarcisk niskorezystancyjnych, b) dla zwarcisk wysokorezystancyjnych.....	57
Rys. 4.6. Schemat przedstawiający konfigurację sieci dla analizowanych zwarcisk w KWK Zofiówka. ....	58
Rys. 4.7. Schemat przedstawiający konfigurację sieci dla analizowanych zwarcisk w KWK Marcel dla części Marklowice. ....	59

<b>5. Analiza przypadków zwarcí doziemnych w dwóch kopalniach - badanie wpływu charakteru doziemienia oraz konfiguracji sieci rozdzielczej.....</b>	<b>61</b>
Rys. 5.1. Schemat sieci dla przypadku nr 1 z KWK Zofiówka wraz z symbolicznym przedstawieniem miejsca zwarcia oraz rozmieszczenie układów automatyki zabezpieczeniowej, które zarejestrowały zdarzenie.	62
Rys. 5.2. Przebiegi prądów $3I_0$ zarejestrowane przez aparaturę pomiarową. Częstotliwość próbkowania wynosiła 1000 Hz. Czas trwania zwarcia 80 ms.	63
Rys. 5.3. Model zwarcia doziemnego jako dwóch rezystancji zmiennych w czasie przełączanych półokresowo.	64
Rys. 5.4. Charakterystyka przedstawiająca zmianę rezystancji zwarcia w miejscu doziemienia dla przyjętego modelu (przypadek nr 1).	68
Rys. 5.5. Przebiegi prądu $3I_0$ od czasu dla pola 22 w rozdzielnicy RGD-2 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 1. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.	68
Rys. 5.6. Przebiegi prądu $3I_0$ od czasu dla pola 21 w rozdzielnicy RGD-2 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 1. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.	69
Rys. 5.7. Przebiegi prądu $3I_0$ od czasu dla pola 38 (jedna z dwóch linii równoległych) w rozdzielnicy RG-1z dla zwarcia omawianego w przypadku nr 1. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.	70
Rys. 5.8. Sposób obliczenia równań opisujących obie rezystancje przełączające.	71
Rys. 5.9. Schemat sieci dla przypadku nr 2 z KWK Zofiówka wraz z symbolicznym przedstawieniem miejsca zwarcia oraz rozmieszczenie układów automatyki zabezpieczeniowej, które zarejestrowały zdarzenie.	73
Rys. 5.10. Przebieg napięć fazowych w sieci dla przypadku nr 2 podczas doziemienia. Dane z programu ATP-EMTP.	74
Rys. 5.11. Przebiegi prądu $3I_0$ od czasu dla pola 22 w rozdzielnicy RGD-2 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 2. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.	75
Rys. 5.12. Przebiegi prądu $3I_0$ od czasu dla pola 21 w rozdzielnicy RGD-2 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 2. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.	75
Rys. 5.13. Schemat sieci dla przypadku nr 3 z KWK Zofiówka wraz z symbolicznym przedstawieniem miejsca zwarcia oraz układów automatyki zabezpieczeniowej, które zarejestrowały zdarzenie.	76
Rys. 5.14. Charakterystyka przedstawiająca zmianę rezystancji zwarcia w miejscu doziemienia dla przyjętego modelu (przypadek nr 3).	77
Rys. 5.15. Przebiegi prądu $3I_0$ od czasu dla pola 16 w rozdzielnicy H-900 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 3. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.	78
Rys. 5.16. Przebiegi prądu $3I_0$ od czasu dla pola 2 w rozdzielnicy RGD-1 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 3. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.	79
Rys. 5.17. Charakterystyka prądowo-napięciowa dynamicznej rezystancji zwarcia dla zidentyfikowanego modelu zwarcia dla przypadku nr 3.	79
Rys. 5.18. Schemat sieci dla przypadku nr 4 i 5 z KWK Marcel wraz z symbolicznym przedstawieniem miejsca zwarcia oraz układów automatyki zabezpieczeniowej, które zarejestrowały zdarzenie.	81
Rys. 5.19. Charakterystyka przedstawiająca zmianę rezystancji zwarcia w miejscu doziemienia dla przyjętego modelu (przypadek nr 4).	82
Rys. 5.20. Przebiegi prądu $3I_0$ od czasu dla pola 14 w rozdzielnicy R-404 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 4. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.	83

Rys. 5.21. Przebiegi prądu $3I_0$ od czasu dla pola 5 w rozdzielnicy R-604 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 4. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.....	83
Rys. 5.22. Przebiegi prądu $3I_0$ od czasu dla pola 12 w rozdzielnicy R-604 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 4. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.....	84
Rys. 5.23. Przebieg prądu $3I_0$ od czasu dla pola 16 w rozdzielnicy R-604 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 4. Wynik symulacji.....	84
Rys. 5.24. Przebiegi prądu $3I_0$ od czasu dla pola 12 w rozdzielnicy R-604 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 5. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.....	86
Rys. 5.25. Przebiegi prądu $3I_0$ od czasu dla pola 5 w rozdzielnicy R-604 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 5. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.....	86
Rys. 5.26. Przebiegi prądu $3I_0$ od czasu dla pola 14 w rozdzielnicy R-404 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 5. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.....	87
Rys. 5.27. Przebieg prądu $3I_0$ od czasu dla pola 16 w rozdzielnicy R-604 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 5. Wynik symulacji.....	87
Rys. 5.28. Schemat sieci dla przypadku nr 6 z KWK Marcel wraz z symbolicznym przedstawieniem miejsca zwarcia oraz układów automatyki zabezpieczeniowej, które zarejestrowały zdarzenie.....	88
Rys. 5.29. Charakterystyka przedstawiająca zmianę rezystancji zwarcia w miejscu doziemienia dla przyjętego modelu (przypadek nr 6).....	89
Rys. 5.30. Przebiegi prądu $3I_0$ od czasu dla pola 1 w rozdzielnicy R-605 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 6. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.....	90
Rys. 5.31. Przebiegi prądu $3I_0$ od czasu dla pola 3 w rozdzielnicy R-605 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 6. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.....	90
Rys. 5.32. Przebiegi prądu $3I_0$ od czasu dla pola 4 w rozdzielnicy R-605 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 6. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.....	91
Rys. 5.33. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi $Y_0$ dla czasu pomiaru $t = 20$ ms dla pola 22 rozdzielnicy RDG-2 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 1.....	92
Rys. 5.34. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi $Y_0$ dla czasu pomiaru $t = 20$ ms dla pola 22 rozdzielnicy RDG-2 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 2.....	93
Rys. 5.35. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi $Y_0$ dla czasu pomiaru $t = 20$ ms dla pola 16 rozdzielnicy H-900 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 3.....	94
Rys. 5.36. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi $Y_0$ dla czasu pomiaru $t = 20$ ms dla pola 16 rozdzielnicy R-604 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 4.....	94
Rys. 5.37. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi $Y_0$ dla czasu pomiaru $t = 20$ ms dla pola 16 rozdzielnicy R-604 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 5.....	94
Rys. 5.38. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi $Y_0$ dla czasu pomiaru $t = 20$ ms dla pola 1 rozdzielnicy R-605 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 6.....	95
<b>6. Analiza selektywności poprzecznej kryterium admitancyjnego <math>Y_0</math> na podstawie modelowej sieci .....</b>	<b>99</b>
Rys. 6.1. Schemat analizowanej sieci SN.....	100

Rys. 6.2. $U_0/U_F$ oraz prądy $I_0$ dla wybranych punktów sieci w zależności od rezystancji zwarcia $R_{ZW}$ . Kolor zielony – dla stanu ustalonego, kolor niebieski – dla $t_p = 30$ ms i $\Delta t = 20$ ms oraz $x = 0$ m, kolor czerwony – dla $t_p = 30$ ms i $\Delta t = 20$ ms oraz $x = 1500$ m.....	104
Rys. 6.3. $U_0/U_F$ oraz prądy $I_0$ dla wybranych punktów sieci w zależności od rezystancji zwarcia $R_{ZW}$ . Kolor zielony – dla stanu ustalonego, kolor niebieski – dla $t_p = 30$ ms i $\Delta t = 80$ ms oraz $x = 0$ m, kolor czerwony – dla $t_p = 30$ ms i $\Delta t = 80$ ms oraz $x = 1500$ m.....	105
Rys. 6.4. Procentowy udział wyższych harmonicznych w stosunku do pierwszej harmonicznej dla wybranych rezystancji zwarcia. Przedstawione widma: $I_0$ dla RG-1 p.1, $I_0$ dla RO-1 p.1, $U_0$ oraz $I_{ZW}$ .....	106
Rys. 6.5. $Y_0$ dla wybranych punktów sieci w zależności od rezystancji zwarcia $R_{ZW}$ . Kolor zielony – dla stanu ustalonego, kolor niebieski – dla $t_p = 30$ ms i $\Delta t = 20$ ms oraz $x = 0$ m, kolor czerwony – dla $t_p = 30$ ms i $\Delta t = 20$ ms oraz $x = 1500$ m. ....	108
Rys. 6.6. $Y_0$ dla wybranych punktów sieci w zależności od rezystancji zwarcia $R_{ZW}$ . Kolor zielony – dla stanu ustalonego, kolor niebieski – dla $t_p = 30$ ms i $\Delta t = 80$ ms oraz $x = 0$ m, kolor czerwony – dla $t_p = 30$ ms i $\Delta t = 80$ ms oraz $x = 1500$ m. ....	109
Rys. 6.7. Prądy $I_0$ dla wybranych punktów sieci, prąd zwarcia $I_{ZW}$ oraz napięcie $U_0$ w zależności od rezystancji zwarcia $R_{ZW}$ dla $t_p = 30$ ms i $\Delta t = 20$ ms oraz $x = 600$ m. Kolor niebieski – dla sytuacji bez wyższych harmonicznych, kolor czerwony – dla sytuacji z wyższymi harmonicznymi. ....	111
Rys. 6.8. Prądy $I_0$ dla wybranych punktów sieci, prąd zwarcia $I_{ZW}$ oraz napięcie $U_0$ w zależności od rezystancji zwarcia $R_{ZW}$ dla stanu ustalonego oraz $x = 600$ m. Kolor niebieski – dla sytuacji bez wyższych harmonicznych, kolor czerwony – dla sytuacji z wyższymi harmonicznymi. ....	112
Rys. 6.9. Procentowy udział wyższych harmonicznych w stosunku do pierwszej harmonicznej dla wybranych rezystancji zwarcia. Stan ustalony dla sieci z wyższymi harmonicznymi. Przedstawione widma: $I_0$ dla RG-1 p.1, $I_0$ dla RO-1 p.1, $U_0$ oraz $I_{ZW}$ .....	113
Rys. 6.10. $Y_0$ dla wybranych punktów sieci w zależności od rezystancji zwarcia $R_{ZW}$ dla $t_p = 30$ ms i $\Delta t = 20$ ms oraz $x = 600$ m. Kolor niebieski – dla sytuacji bez wyższych harmonicznych, kolor czerwony – dla sytuacji z wyższymi harmonicznymi.....	114
Rys. 6.11. $Y_0$ dla wybranych punktów sieci w zależności od rezystancji zwarcia $R_{ZW}$ dla stanu ustalonego oraz $x = 600$ m. Kolor niebieski – dla sytuacji bez wyższych harmonicznych, kolor czerwony – dla sytuacji z wyższymi harmonicznymi.....	114
Rys. 6.12. Zależność mocy czynnej wydzielanej przez rezystancję zwarcia od wartości $R_{ZW}$ . Porównanie stanu nieustalonego (pierwsze 20 ms zwarcia) i stanu ustalonego dla sytuacji bez występowania wyższych harmonicznych oraz z wyższymi harmonicznymi.....	116
Rys. 6.13. Zależność mocy czynnej wydzielanej przez rezystancję zwarcia od wartości $R_{ZW}$ po uwzględnieniu dopasowania odbiornika do źródła. Porównanie stanu nieustalonego (pierwsze 20 ms zwarcia) i stanu ustalonego dla sytuacji bez występowania wyższych harmonicznych oraz z wyższymi harmonicznymi. .	117
Rys. 6.14. Konfiguracja sieci rozdzielczej przyjmowanej do dalszej analizy: a) model z rozdzielonymi pojemnościami linii i pozostałej części sieci, b) uproszczony model ze zintegrowanymi pojemnościami.....	118
Rys. 6.15. Schemat zastępczy dla składowej przejściowej (czyli widziany od strony miejsca doziemienia) a) model sieci z rys. 6.14b. b), c), d) kolejne etapy upraszczania schematu.....	119
Rys. 6.16. Porównanie częstotliwości i szybkości zanikania obu składowych przejściowych: a) składowa nr 1: $f_1 = 2194$ Hz oraz $\sigma_1 = 41,74$ s <sup>-1</sup> , b) składowa nr 2: $f_2 = 606$ Hz oraz $\sigma_2 = 137,0$ s <sup>-1</sup> . Przebiegi dla rezystancji w miejscu zwarcia równej $0 \Omega$ .....	124
Rys. 6.17. Porównanie częstotliwości i szybkości zanikania obu składowych przejściowych: a) składowa nr 1: $f_1 = 2194$ Hz oraz $\sigma_1 = 236,7$ s <sup>-1</sup> , b) składowa nr 2: $f_2 = 606$ Hz oraz $\sigma_2 = 777,0$ s <sup>-1</sup> . Przebiegi dla rezystancji w miejscu zwarcia równej $5 \Omega$ .....	125
Rys. 6.18. Porównanie częstotliwości i szybkości zanikania obu składowych przejściowych: a) składowa nr 1: $f_1 = 2194$ Hz oraz $\sigma_1 = 1160,1$ s <sup>-1</sup> , b) składowa nr 2: $f_2 = 606$ Hz oraz $\sigma_2 = 3807,7$ s <sup>-1</sup> . Przebiegi dla rezystancji w miejscu zwarcia równej $28,7 \Omega$ . ....	125
Rys. 6.19. Porównanie częstotliwości i szybkości zanikania obu składowych przejściowych: a) składowa nr 1: $f_1 = 2194$ Hz oraz $\sigma_1 = 13785$ s <sup>-1</sup> , b) składowa nr 2: $f_2 = 606$ Hz oraz $\sigma_2 = 45244$ s <sup>-1</sup> . Przebiegi dla rezystancji w miejscu zwarcia równej $352,4 \Omega$ .....	126
<b>7. Podsumowanie i wnioski.....</b>	<b>128</b>
<b>Załącznik nr 1 – Pozostałe dane zebrane w tabelach.....</b>	<b>147</b>
<b>Załącznik nr 2 – Inne przebiegi nieuwzględnione w części właściwej pracy.....</b>	<b>158</b>
Rys. Z.1. Przebiegi prądu $3I_0$ od czasu dla pola 38B (jedna z linii równoległych) w rozdzielnicy RG-1z dla zwarcia omawianego w przypadku nr 1. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację	

kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.....	158
Rys. Z.2. Przebiegi prądu $3I_0$ od czasu dla pola 18 w rozdzielnicy RGD-2 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 1. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.....	158
Rys. Z.3. Przebiegi prądu $3I_0$ od czasu dla pola 25 w rozdzielnicy RG-1z dla zwarcia omawianego w przypadku nr 1. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.....	159
Rys. Z.4. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 22 w rozdzielnicy RDG-2 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 1.....	159
Rys. Z.5. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 21 w rozdzielnicy RDG-2 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 1.....	160
Rys. Z.6. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 38A (jedna z linii równoległych) w rozdzielnicy RG-1z dla zwarcia omawianego w przypadku nr 1. ....	160
Rys. Z.7. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 38B (jedna z linii równoległych) w rozdzielnicy RG-1z dla zwarcia omawianego w przypadku nr 1. ....	161
Rys. Z.8. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 18 w rozdzielnicy RDG-2 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 1 .....	161
Rys. Z.9. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 25 w rozdzielnicy RG-1z dla zwarcia omawianego w przypadku nr 1.....	162
Rys. Z.10. Przebiegi prądu $3I_0$ od czasu dla pola 38B (jedna z linii równoległych) w rozdzielnicy RG-1z dla zwarcia omawianego w przypadku nr 2. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.....	162
Rys. Z.11. Przebiegi prądu $3I_0$ od czasu dla pola 29 w rozdzielnicy RG-1z dla zwarcia omawianego w przypadku nr 2. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.....	163
Rys. Z.12. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 22 w rozdzielnicy RDG-2 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 2.....	163
Rys. Z.13. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 21 w rozdzielnicy RDG-2 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 2.....	164
Rys. Z.14. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 38A w rozdzielnicy RG-1z dla zwarcia omawianego w przypadku nr 2.....	164
Rys. Z.15. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 29 w rozdzielnicy RG-1z dla zwarcia omawianego w przypadku nr 2 .....	165
Rys. Z.16. Przebiegi prądu $3I_0$ od czasu dla pola 15 w rozdzielnicy H-900 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 3. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.....	165
Rys. Z.17. Przebiegi prądu $3I_0$ od czasu dla pola 13 w rozdzielnicy H-900 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 3. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.....	166

Rys. Z.18. Przebiegi prądu $3I_0$ od czasu dla pola 8 w rozdzielnicy RGD-1 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 3. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.....	166
Rys. Z.19. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 16 w rozdzielnicy H-900 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 3.....	167
Rys. Z.20. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 15 w rozdzielnicy H-900 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 3 .....	167
Rys. Z.21. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 13 w rozdzielnicy H-900 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 3.....	168
Rys. Z.22. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 2 w rozdzielnicy RDG-1 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 3.....	168
Rys. Z.23. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 8 w rozdzielnicy RDG-1 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 3.....	169
Rys. Z.24. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 12 w rozdzielnicy R-604 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 4.....	169
Rys. Z.25. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 14 w rozdzielnicy R-404 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 4.....	170
Rys. Z.26. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 5 w rozdzielnicy R-604 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 4.....	170
Rys. Z.27. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 12 w rozdzielnicy R-604 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 5.....	171
Rys. Z.28. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 14 w rozdzielnicy R-404 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 5.....	171
Rys. Z.29. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 5 w rozdzielnicy R-604 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 5.....	172
Rys. Z.30. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 1 w rozdzielnicy R-605 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 6.....	172
Rys. Z.31. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 3 w rozdzielnicy R-605 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 6.....	173
Rys. Z.32. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 4 w rozdzielnicy R-605 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 6.....	173
Rys. Z.33. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi $Y_0$ dla czasu pomiaru $t = 20$ ms dla pola 25 rozdzielnicy RG-1z dla sytuacji opisanej w przypadku nr 1.....	174
Rys. Z.34. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi $Y_0$ dla czasu pomiaru $t = 20$ ms dla pola 38A rozdzielnicy RG-1z dla sytuacji opisanej w przypadku nr 1.....	174
Rys. Z.35. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi $Y_0$ dla czasu pomiaru $t = 20$ ms dla pola 38B rozdzielnicy RG-1z dla sytuacji opisanej w przypadku nr 1.....	175
Rys. Z.36. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi $Y_0$ dla czasu pomiaru $t = 20$ ms dla pola 18 rozdzielnicy RDG-2 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 1.....	175
Rys. Z.37. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi $Y_0$ dla czasu pomiaru $t = 20$ ms dla pola 21 rozdzielnicy RDG-2 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 2.....	176



Rys. Z.38. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi $Y_0$ dla czasu pomiaru $t = 20$ ms dla pola 29 rozdzielnicy RG-1z dla sytuacji opisanej w przypadku nr 2.....	176
Rys. Z.39. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi $Y_0$ dla czasu pomiaru $t = 20$ ms dla pola 38A rozdzielnicy RG-1z dla sytuacji opisanej w przypadku nr 2.....	177
Rys. Z.40. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi $Y_0$ dla czasu pomiaru $t = 20$ ms dla pola 2 rozdzielnicy RGD-1 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 3.....	177
Rys. Z.41. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi $Y_0$ dla czasu pomiaru $t = 20$ ms dla pola 13 rozdzielnicy H-900 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 3.....	178
Rys. Z.42. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi $Y_0$ dla czasu pomiaru $t = 20$ ms dla pola 15 rozdzielnicy H-900 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 3.....	178
Rys. Z.43. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi $Y_0$ dla czasu pomiaru $t = 20$ ms dla pola 14 rozdzielnicy R-404 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 4.....	179
Rys. Z.44. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi $Y_0$ dla czasu pomiaru $t = 20$ ms dla pola 5 rozdzielnicy R-604 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 4.....	179
Rys. Z.45. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi $Y_0$ dla czasu pomiaru $t = 20$ ms dla pola 12 rozdzielnicy R-604 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 4.....	180
Rys. Z.46. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi $Y_0$ dla czasu pomiaru $t = 20$ ms dla pola 14 rozdzielnicy R-404 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 5.....	180
Rys. Z.47. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi $Y_0$ dla czasu pomiaru $t = 20$ ms dla pola 5 rozdzielnicy R-604 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 5.....	181
Rys. Z.48. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi $Y_0$ dla czasu pomiaru $t = 20$ ms dla pola 12 rozdzielnicy R-604 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 5.....	181
Rys. Z.49. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi $Y_0$ dla czasu pomiaru $t = 20$ ms dla pola 3 rozdzielnicy R-605 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 6.....	182
Rys. Z.50. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi $Y_0$ dla czasu pomiaru $t = 20$ ms dla pola 4 rozdzielnicy R-605 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 6.....	182

## Spis tabel

<b>1. Wprowadzenie do tematu</b> .....	<b>7</b>
Tabela 1.1. Wykaz wybranych Polskich Norm związanych z bezpieczeństwem elektrycznym i stosowanych w polskim górnictwie węgla kamiennego. ....	11
<b>2. Cele i teza rozprawy doktorskiej</b> .....	<b>19</b>
<b>3. Specyfika kopalnianej sieci rozdzielczej średniego napięcia</b> .....	<b>23</b>
Tabela 3.1. Porównanie błędu prądowego rzeczywistego z deklarowanym przez producenta przekładnika IO-100-N dla wybranych prądów pierwotnych.....	43
Tabela 3.2. Sprawdzenie poprawności działania przekładnika IO1s zgodnie z zaleceniami producenta. ....	43
<b>4. Metodyka prowadzonych badań</b> .....	<b>50</b>
Tabela 4.1. Porównanie wyników symulacyjnych z obliczeniowymi dla sieci 6 kV z izolowanym punktem neutralnym magistralnej trzyodpływowej jednostronnie zasilanej o takich samych kablach i tych samych długościach odpływów.....	55
<b>5. Analiza przypadków zwarć doziemnych w dwóch kopalniach - badanie wpływu charakteru doziemienia oraz konfiguracji sieci rozdzielczej</b> .....	<b>61</b>
Tabela 5.1. Wartość odchylenia przeciętnego prądów w $I_0$ w poszczególnych polach dla wybranych modeli prądów doziemnych, które zostały zoptymalizowane metodą najmniejszego błędu absolutnego dla przypadku nr 1. ....	68
Tabela 5.2. Wartość odchylenia przeciętnego prądów w $I_0$ w poszczególnych polach dla przyjętego modelu doziemienia, który został zoptymalizowany metodą najmniejszego błędu absolutnego dla przypadku nr 2. ....	73
Tabela 5.3. Wartość odchylenia przeciętnego prądów w $I_0$ w poszczególnych polach dla przyjętego modelu doziemienia, który został zoptymalizowany metodą najmniejszego błędu absolutnego dla przypadku nr 3. ....	78
Tabela 5.4. Wartość odchylenia przeciętnego prądów w $I_0$ w poszczególnych polach dla przyjętego modelu doziemienia, który został zoptymalizowany metodą najmniejszego błędu absolutnego dla przypadku nr 4. ....	82
Tabela 5.5. Wartość odchylenia przeciętnego prądów w $I_0$ w poszczególnych polach dla przyjętego modelu doziemienia, który został zoptymalizowany metodą najmniejszego błędu absolutnego dla przypadku nr 5. ....	85
Tabela 5.6. Wartość odchylenia przeciętnego prądów w $I_0$ w poszczególnych polach dla przyjętego modelu doziemienia, który został zoptymalizowany metodą najmniejszego błędu absolutnego dla przypadku nr 5. ....	89
Tabela 5.7. Porównanie obliczonych wartości $Y_0$ dla zarejestrowanych przebiegów oraz zasymulowanych w programie ATP-EMTP i porównanie ich z $I_{0nast}$ . ....	96
<b>6. Analiza selektywności poprzecznej kryterium admitancyjnego <math>Y_0 &gt;</math> na podstawie modelowej sieci</b> .....	<b>99</b>
Tabela 6.1. Miejsca zwarcia dla rozdzielnic oddziałowej RO-1 p. 1.....	101
Tabela 6.2. Wartości rezystancji zwarcia.....	101
Tabela 6.3. Przyjęte parametry czasowe do wyznaczenia wartości skutecznych wybranych przebiegów. ....	101
Tabela 6.4. Dobór nastaw zabezpieczeń w wybranych polach zgodnie z kryterium $Y_0 >$ . ....	108
Tabela 6.5. Procentowy udział składowych wyższych harmonicznych przyjęty do analizy zwarć doziemnych. ....	110
Tabela 6.6. Różnica pomiędzy pulsacją przebiegu nietłumionego a pulsacją drgań tłumionych dla zwarcia doziemnego w sieci przedstawionej na rys. 6.1 dla różnych wartości rezystancji w miejscu zwarcia. ....	124
<b>7. Podsumowanie i wnioski</b> .....	<b>128</b>
<b>Załącznik nr 1 – Pozostałe dane zebrane w tabelach</b> .....	<b>147</b>
Tabela Z.1. Zestawienie kabli i przewodów oponowych występujących w KWK Zofiówka w analizowanych sytuacjach wraz z lokalizacją oraz parametrami technicznymi niezbędnymi do analizy z wykorzystaniem modelu $\Pi$ .....	147
Tabela Z.2. Zestawienie kabli i przewodów oponowych występujących w KWK Marcel w analizowanych sytuacjach wraz z lokalizacją oraz parametrami technicznymi niezbędnymi do analizy z wykorzystaniem modelu $\Pi$ .....	154
<b>Załącznik nr 2 – Inne przebiegi nieuwzględnione w części właściwej pracy</b> .....	<b>158</b>

## Załącznik nr 1 – Pozostałe dane zebrane w tabelach

Tabela Z.1. Zestawienie kabli i przewodów oponowych występujących w KWK Zofiówka w analizowanych sytuacjach wraz z lokalizacją oraz parametrami technicznymi niezbędnymi do analizy z wykorzystaniem modelu П.

Rozdzielnica	Pole	Linia do	Typ kabla/przewodu	S, mm <sup>2</sup>	l, m	R, Ω/km	L, mH/km	C, uF/km	I, A/km
RG-1z	10	R-3z p.2	2xYAKY	240	350	0,125	0,254	0,56	1,82
	20	R-10z p.6	YAKY	240	900	0,125	0,254	0,56	1,83
	25	R-8z p.10	YAKY	240	850	0,125	0,254	0,56	1,83
	29	R-9z p.1	YAKY	240	620	0,125	0,254	0,56	1,83
	31	RG-705 p.8	YHKGyEky	185	380	0,0991	0,262	0,87	2,83
			YHKGyFpy	185	710	0,0991	0,292	0,87	2,83
	35	RGD-1 900 p.10	2xYHKGyEky	185	350	0,0991	0,262	0,87	2,83
			2xYHKGyFpy	150	900	0,124	0,288	0,79	2,59
			2xYHKGyEky	185	400	0,0991	0,262	0,87	2,83
	38	RGD-2 900 p.14	2xYHKGXSekyn	185	300	0,0991	0,249	0,56	1,83
			2xYHKGXSFoyn	185	920	0,0991	0,276	0,56	1,83
			2xYHKGXSekyn	185	320	0,0991	0,249	0,56	1,83
	54	R-11z p.1	AKFt	240	870	0,125	0,289	0,98	3,19
YAKY			240	920	0,125	0,254	0,56	1,83	
R-3z	6	Tr nadsz. #2	YAKY	120	12	0,253	0,275	0,42	1,37
			AKFt	95	127	0,320	0,272	0,66	2,15
	7	-	YAKY	240	186	0,125	0,254	0,56	1,83
	8	-	YAKY	240	48	0,125	0,254	0,56	1,83
R-8z	7	Tr P.W.	YHAKXS	70	5	0,443	0,278	0,39	1,28
	9	Went. W-2	NAYYSY	240	30	0,125	0,254	0,79	2,58
R-9z	2	Tr nr IV	AKFt	120	27	0,253	0,264	0,73	2,38
	3	Tr nr II	AKFt	120	31	0,253	0,264	0,73	2,38
R-10z	7	Tr. 2	SZYNY	-	-	-	-	-	-
	10	Went. W-1	YAKY	240	32	0,125	0,254	0,56	1,83
R-11z	2	Tr P.W.	YAKY	185	15	0,164	0,249	0,50	1,64
	3	Tr T11	YAKY	185	35	0,164	0,249	0,50	1,64
	4	Tr T12	YAKY	185	30	0,164	0,249	0,50	1,64
RDG-1 900	1	Tr 219	YHKGXeky	50	110	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXSekyn	50	60	0,387	0,292	0,32	1,05
			YHKGXSekyn	50	170	0,387	0,292	0,32	1,05
			YHKGXeky	50	95	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXSekyn	50	16	0,387	0,292	0,32	1,05
		Tr 47 przez Tr 219	YHKGXSekyn	50	90	0,387	0,292	0,32	1,05
			YHKGXSekyn	50	200	0,387	0,292	0,32	1,05
			YHKGXSekyn	50	80	0,387	0,292	0,32	1,05
	2	EH-d03-W nr 10	YHKGyFpy	185	130	0,0991	0,288	0,87	2,83
			YHKGyEky	185	15	0,0991	0,262	0,87	2,83
			YHKGXSekyn	185	150	0,0991	0,249	0,56	1,83
			YHKGXSekyn	185	270	0,0991	0,249	0,56	1,83
			YHKGXSekyn	185	270	0,0991	0,249	0,56	1,83
YHKGXSekyn			185	270	0,0991	0,249	0,56	1,83	

Tabela Z.1. ciąg dalszy

Rozdzielnica	Pole	Linia do	Typ kabela/przewodu	S, mm <sup>2</sup>	l, m	R, Ω/km	L, mH/km	C, uF/km	I, A/km	
RDG-1 900	2	EH-d03-W nr 10	YHKGXSekyn	185	270	0,0991	0,249	0,56	1,83	
			YHKGXSekyn	185	330	0,0991	0,249	0,56	1,83	
			YHKGXSekyn	185	220	0,0991	0,249	0,56	1,83	
		H-900 p.10 przez EH-d03-W nr 10	YUHKGXSekyn	185	120	0,0991	0,249	0,56	1,83	
			YHKGXSekyn	185	110	0,0991	0,249	0,56	1,83	
			YHKGXSekyn	185	310	0,0991	0,249	0,56	1,83	
			YHKGXSekyn	185	250	0,0991	0,249	0,56	1,83	
			YHKGXSekyn	185	300	0,0991	0,249	0,56	1,83	
		Tr 260 przez EH-d03-W nr 10	YHKGXSekyn	120	250	0,153	0,261	0,47	1,52	
			YHKGXSekyn	120	250	0,153	0,261	0,47	1,52	
			YHKGXSekyn	120	250	0,153	0,261	0,47	1,52	
			YHKGXSekyn	120	250	0,153	0,261	0,47	1,52	
			YHKGXSekyn	120	236	0,153	0,261	0,47	1,52	
		Tr 229 przez Tr 260	YHKGXSekyn	120	14	0,153	0,261	0,47	1,52	
	3	Tr 246	YHKGXSekyn	50	30	0,387	0,292	0,32	1,05	
	8	EH-d03-W nr 8	YHKGXSekyn	185	50	0,0991	0,249	0,56	1,83	
			YHKGXSekyn	185	260	0,0991	0,249	0,56	1,83	
			YHKGXSekyn	185	250	0,0991	0,249	0,56	1,83	
			YHKGXSekyn	185	190	0,0991	0,249	0,56	1,83	
			YHKGXSekyn	185	300	0,0991	0,249	0,56	1,83	
			YHKGXSekyn	185	250	0,0991	0,249	0,56	1,83	
			YHKGXSekyn	185	245	0,0991	0,249	0,56	1,83	
			YHKGXSekyn	185	70	0,0991	0,249	0,56	1,83	
			Tr 223 przez EH-d03-W nr 8	YUHKGXSekyn	185	160	0,0991	0,249	0,56	1,83
				YHKGXSekyn	120	55	0,153	0,261	0,47	1,52
				YHKGXSekyn	120	70	0,153	0,261	0,47	1,52
				YHKGXSekyn	95	240	0,193	0,268	0,42	1,38
				YHKGXSekyn	95	270	0,193	0,268	0,42	1,38
				YHKGXSekyn	95	160	0,193	0,268	0,42	1,38
		YHKGXSekyn		95	115	0,193	0,268	0,42	1,38	
		Tr 200 przez EH-d03-W nr 8	NTSKCGECWOU	35	130	0,554	0,312	0,38	1,24	
			NTSKCGECWOU	35	90	0,554	0,312	0,38	1,24	
			NTSKCGECWOU	35	100	0,554	0,312	0,38	1,24	
Tr 175 przez Tr 200		NTSKCGECWOU	35	80	0,554	0,312	0,38	1,24		
		NTSKCGECWOU	35	50	0,554	0,312	0,38	1,24		
		NTSKCGECWOU	35	300	0,554	0,312	0,38	1,24		
		NTSKCGECWOU	35	70	0,554	0,312	0,38	1,24		
		NTSKCGECWOU	35	115	0,554	0,312	0,38	1,24		
Tr 44 przez Tr 15		NTSKCGECWOU	35	85	0,554	0,312	0,38	1,24		
		NTSKCGECWOU	35	200	0,554	0,312	0,38	1,24		
Tr 277 przez EH-d03-W nr 8		YHKGXeky	50	70	0,387	0,295	0,33	1,08		
		YHKGXeky	50	110	0,387	0,295	0,33	1,08		
		YHKGXeky	50	100	0,387	0,295	0,33	1,08		
		YHKGXSekyn	70	130	0,268	0,278	0,37	1,22		
		YHKGXeky	50	60	0,387	0,295	0,33	1,08		
		YHKGXeky	50	60	0,387	0,295	0,33	1,08		

Tabela Z.1. ciąg dalszy

Rozdzielnica	Pole	Linia do	Typ kabla/przewodu	S, mm <sup>2</sup>	l, m	R, Ω/km	L, mH/km	C, uF/km	I, A/km
RDG-1 900	8	Tr 277 przez EH-d03-W nr 8	YHKGXSekyn	70	40	0,268	0,278	0,37	1,22
			YHKGXSekyn	70	81	0,268	0,278	0,37	1,22
			YHKGXSekyn	70	82	0,268	0,278	0,37	1,22
RGD-2 900	16	F-900 p.19	YHKG Yeky	185	60	0,0991	0,262	0,87	2,83
			YHKG Yeky	185	130	0,0991	0,262	0,87	2,83
			YHKGXSekyn	185	70	0,0991	0,249	0,56	1,83
			YHKGXSekyn	185	351	0,0991	0,249	0,56	1,83
			YHKGXSekyn	185	240	0,0991	0,249	0,56	1,83
			YHKGXSekyn	185	368	0,0991	0,249	0,56	1,83
			YHKGXSekyn	185	305	0,0991	0,249	0,56	1,83
			YHKGXSekyn	185	297	0,0991	0,249	0,56	1,83
			YHKGXSekyn	185	186	0,0991	0,249	0,56	1,83
	17	F-900 p.20	YHKG Yeky	185	60	0,0991	0,262	0,87	2,83
			YHKG Yeky	185	130	0,0991	0,262	0,87	2,83
			YHKGXSekyn	185	70	0,0991	0,249	0,56	1,83
			YHKGXSekyn	185	351	0,0991	0,249	0,56	1,83
			YHKGXSekyn	185	240	0,0991	0,249	0,56	1,83
			YHKGXSekyn	185	368	0,0991	0,249	0,56	1,83
			YHKGXSekyn	185	305	0,0991	0,249	0,56	1,83
			YHKGXSekyn	185	297	0,0991	0,249	0,56	1,83
			YHKGXSekyn	185	186	0,0991	0,249	0,56	1,83
	18	N-900 p.10	YHKG Yeky	150	255	0,124	0,268	0,79	2,59
			YHKG Yeky	150	180	0,124	0,268	0,79	2,59
			YHKG Yeky	150	150	0,124	0,268	0,79	2,59
			YHKG Yeky	150	265	0,124	0,268	0,79	2,59
	21	Tr 128	YHKGXeky	50	100	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXeky	50	140	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXeky	50	150	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXeky	50	130	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXeky	50	120	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXSekyn	50	480	0,387	0,292	0,32	1,05
			YHKGXSekyn	50	220	0,387	0,292	0,32	1,05
	22	Tr 258	YHKGXSekyn	185	130	0,0991	0,249	0,56	1,83
			YHKGXSekyn	185	255	0,0991	0,249	0,56	1,83
			YHKGXeky	120	35	0,153	0,263	0,48	1,56
			YHKGXSekyn	95	75	0,193	0,268	0,42	1,38
YHKGXSekyn			70	40	0,268	0,278	0,37	1,22	
YHKGXSekyn			70	110	0,268	0,278	0,37	1,22	
YHKGXSekyn			70	45	0,268	0,278	0,37	1,22	
YHKGXSekyn			70	80	0,268	0,278	0,37	1,22	
YHKGXSekyn			70	80	0,268	0,278	0,37	1,22	
F-900	14	Tr 49	YHKGXSekyn	70	60	0,268	0,278	0,37	1,22
			YHKGXSekyn	50	280	0,387	0,292	0,32	1,05
			YHKGXeky	35	75	0,524	0,325	0,45	1,46
			YHKGXeky	50	70	0,387	0,295	0,33	1,08
			NYSEYFGby	35	70	0,524	0,358	0,51	1,67
			YHKGXSekyn	70	150	0,268	0,278	0,37	1,22
			YHKGXSekyn	70	85	0,268	0,278	0,37	1,22

Tabela Z.1. ciąg dalszy

Rozdzielnica	Pole	Linia do	Typ kabla/przewodu	S, mm <sup>2</sup>	l, m	R, Ω/km	L, mH/km	C, uF/km	I, A/km	
F-900	14	Tr 49	YHKGXSekyn	70	85	0,268	0,278	0,37	1,22	
			YHKGXseky	35	50	0,524	0,325	0,45	1,46	
	15	Tr 17	YHKGXSekyn	120	60	0,153	0,261	0,47	1,52	
			YHKGYekyn	150	306	0,124	0,268	0,79	2,59	
			YHKGYekyn	150	80	0,124	0,268	0,79	2,59	
			YHKGXSekyn	95	80	0,193	0,268	0,42	1,38	
			YHKGXSekyn	50	50	0,387	0,292	0,32	1,05	
			YHKGXSekyn	50	50	0,387	0,292	0,32	1,05	
			YHKGXSekyn	50	50	0,387	0,292	0,32	1,05	
			YHKGXSekyn	50	55	0,387	0,292	0,32	1,05	
			YHKGXSekyn	70	50	0,268	0,278	0,37	1,22	
			YHKGXSekyn	50	50	0,387	0,292	0,32	1,05	
			YHKGXSekyn	50	45	0,387	0,292	0,32	1,05	
	17	Tr 172	YHKGXeky	35	70	0,524	0,325	0,45	1,46	
			YHKGXeky	35	230	0,524	0,325	0,45	1,46	
			YHKGXSekyn	95	110	0,193	0,268	0,42	1,38	
			YHKGXSekyn	95	125	0,193	0,268	0,42	1,38	
			YHKGXSekyn	70	90	0,268	0,278	0,37	1,22	
			YHKGXSekyn	95	100	0,193	0,268	0,42	1,38	
			YHKGXSekyn	70	75	0,268	0,278	0,37	1,22	
			YHKGXSekyn	50	35	0,387	0,292	0,32	1,05	
			YHKGXseky	50	35	0,387	0,292	0,32	1,05	
			YHKGXeky	50	55	0,387	0,295	0,33	1,08	
			YHKGXSekyn	95	55	0,193	0,268	0,42	1,38	
			YHKGXSekyn	95	55	0,193	0,268	0,42	1,38	
			YHKGXSekyn	95	65	0,193	0,268	0,42	1,38	
			YHKGXSekyn	95	50	0,193	0,268	0,42	1,38	
			Tr 11 przez Tr 172	YHKGXSekyn	95	110	0,193	0,268	0,42	1,38
				YHKGXSekyn	95	85	0,193	0,268	0,42	1,38
		YHKGXSekyn		95	55	0,193	0,268	0,42	1,38	
		YHKGXSekyn		95	75	0,193	0,268	0,42	1,38	
		YHKGXSekyn		95	50	0,193	0,268	0,42	1,38	
		YHKGXSekyn		70	50	0,268	0,278	0,37	1,22	
		YHKGXSekyn		70	90	0,268	0,278	0,37	1,22	
		YHKGXSekyn		70	75	0,268	0,278	0,37	1,22	
		YHKGXSekyn		95	35	0,193	0,268	0,42	1,38	
		YHKGXSekyn		95	175	0,193	0,268	0,42	1,38	
		Tr 133 przez Tr 11	YHKGXSekyn	95	20	0,193	0,268	0,42	1,38	
			YHKGXSekyn	95	50	0,193	0,268	0,42	1,38	
		Tr 98 przez Tr 133	YHKGXSekyn	95	190	0,193	0,268	0,42	1,38	
			YHKGXSekyn	95	50	0,193	0,268	0,42	1,38	
			YHKGXSekyn	95	17	0,193	0,268	0,42	1,38	
			YHKGXSekyn	95	17	0,193	0,268	0,42	1,38	
Tr 105 przez Tr 98		YHKGXSekyn	95	17	0,193	0,268	0,42	1,38		
		YHKGXSekyn	95	17	0,193	0,268	0,42	1,38		
18		Tr 226	YHKGXSekyn	70	250	0,268	0,278	0,37	1,22	

Tabela Z.1. ciąg dalszy

Rozdzielnica	Pole	Linia do	Typ kabla/przewodu	S, mm <sup>2</sup>	l, m	R, Ω/km	L, mH/km	C, uF/km	I, A/km	
F-900	18	Tr 226	YHKGXSekyn	70	225	0,268	0,278	0,37	1,22	
			YHKGXSekyn	70	125	0,268	0,278	0,37	1,22	
			YHKGXSekyn	70	150	0,268	0,278	0,37	1,22	
			YHKGXSekyn	70	160	0,268	0,278	0,37	1,22	
			YHKGXSekyn	70	120	0,268	0,278	0,37	1,22	
			YHKGXSekyn	95	90	0,193	0,268	0,42	1,38	
			YHKGXSekyn	95	70	0,193	0,268	0,42	1,38	
			YHKGXSekyn	70	150	0,268	0,278	0,37	1,22	
			YHKGXSekyn	95	100	0,193	0,268	0,42	1,38	
	23	Tr 77	YHKGXSekyn	70	110	0,268	0,278	0,37	1,22	
			YHKGXSekyn	50	50	0,387	0,292	0,32	1,05	
			YHKGXeky	50	80	0,387	0,295	0,33	1,08	
			YHKGXeky	35	105	0,524	0,325	0,45	1,46	
			YHKGXeky	35	70	0,524	0,325	0,45	1,46	
	24	Tr 70	YHKGXeky	50	480	0,387	0,295	0,33	1,08	
			YHKGXeky	35	130	0,524	0,325	0,45	1,46	
		Tr 195 przez Tr 70	YHKGXeky	50	85	0,387	0,295	0,33	1,08	
			YHKGXSekyn	70	140	0,268	0,278	0,37	1,22	
		Tr 28 przez Tr 195	YHKGXSekyn	70	25	0,268	0,278	0,37	1,22	
			YHKGXSekyn	70	50	0,268	0,278	0,37	1,22	
			YHKGXSekyn	70	80	0,268	0,278	0,37	1,22	
			YHKGXSekyn	70	50	0,268	0,278	0,37	1,22	
			YHKGXSekyn	70	30	0,268	0,278	0,37	1,22	
	H-900	12	Tr 289	YHKGXSekyn	50	300	0,387	0,292	0,32	1,05
				YHKGXeky	50	60	0,387	0,295	0,33	1,08
				YHKGXeky	50	60	0,387	0,295	0,33	1,08
				YHKGXeky	50	115	0,387	0,295	0,33	1,08
				YHKGXeky	50	95	0,387	0,295	0,33	1,08
YHKGXeky				50	100	0,387	0,295	0,33	1,08	
YHKGXeky				50	100	0,387	0,295	0,33	1,08	
YHKGXeky				50	80	0,387	0,295	0,33	1,08	
YHKGXSekyn				70	50	0,268	0,278	0,37	1,22	
YHKGXeky				50	60	0,387	0,295	0,33	1,08	
YHKGXeky				50	40	0,387	0,295	0,33	1,08	
YHKGXSekyn				70	60	0,268	0,278	0,37	1,22	
YHKGXSekyn				70	110	0,268	0,278	0,37	1,22	
YHKGXeky				50	70	0,387	0,295	0,33	1,08	
13		Tr 112	YHKGXSekyn	70	93	0,268	0,278	0,37	1,22	
			YHKGXSekyn	70	135	0,268	0,278	0,37	1,22	
			YHKGXSekyn	95	190	0,193	0,268	0,42	1,38	
			YHKGXeky	35	60	0,524	0,325	0,45	1,46	
			YHKGXeky	50	90	0,387	0,295	0,33	1,08	
			YHKGXeky	50	70	0,387	0,295	0,33	1,08	
			YHKGXeky	50	70	0,387	0,295	0,33	1,08	
			YHKGXSekyn	70	90	0,268	0,278	0,37	1,22	
			YHKGXSekyn	70	80	0,268	0,278	0,37	1,22	

Tabela Z.1. ciąg dalszy

Rozdzielnica	Pole	Linia do	Typ kabla/przewodu	S, mm <sup>2</sup>	l, m	R, Ω/km	L, mH/km	C, uF/km	I, A/km
H-900	13	Tr 112	YHKGXeky	50	115	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXeky	50	110	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXeky	50	80	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXeky	50	30	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXSekyn	50	250	0,387	0,292	0,32	1,05
			YHKGXSekyn	50	120	0,387	0,292	0,32	1,05
			YHKGXSekyn	50	140	0,387	0,292	0,32	1,05
			YHKGXeky	50	80	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXeky	50	80	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXeky	50	100	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXeky	50	70	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXeky	50	30	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXeky	50	80	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXeky	50	50	0,387	0,295	0,33	1,08
		YHKGXSekyn	50	100	0,387	0,292	0,32	1,05	
		Tr 36 przez Tr 112	YHKGXSekyn	95	35	0,193	0,268	0,42	1,38
		Tr K44 przez Tr 36	YHKGXSekyn	50	120	0,387	0,292	0,32	1,05
			YHKGXSekyn	50	55	0,387	0,292	0,32	1,05
	Tr K46 przez Tr K44	YHKGFTy	35	45	0,524	0,357	0,45	1,46	
		YHKGXSekyn	50	35	0,387	0,292	0,32	1,05	
		YHKGXSekyn	50	70	0,387	0,292	0,32	1,05	
		YHKGXeky	35	65	0,524	0,325	0,45	1,46	
	Tr K34 przez Tr K46	YHKGXeky	35	60	0,524	0,325	0,45	1,46	
		YHKGXSekyn	50	250	0,387	0,292	0,32	1,05	
	Tr 245	YHKGXSekyn	70	140	0,268	0,278	0,37	1,22	
		YHKGXSekyn	70	180	0,268	0,278	0,37	1,22	
	Tr 207 przez Tr 245	YHKGXSekyn	50	210	0,387	0,292	0,32	1,05	
		YHKGXSekyn	50	70	0,387	0,292	0,32	1,05	
		YHKGXSekyn	50	190	0,387	0,292	0,32	1,05	
		YHKGXeky	50	80	0,387	0,295	0,33	1,08	
		YHKGXSekyn	50	50	0,387	0,292	0,32	1,05	
		YHKGXSekyn	50	80	0,387	0,292	0,32	1,05	
		YHKGXeky	50	80	0,387	0,295	0,33	1,08	
		YHKGXeky	50	80	0,387	0,295	0,33	1,08	
		YHKGXSekyn	50	80	0,387	0,292	0,32	1,05	
		YHKGXSekyn	95	120	0,193	0,268	0,42	1,38	
		YHKGXSekyn	70	130	0,268	0,278	0,37	1,22	
		YHKGXSekyn	70	55	0,268	0,278	0,37	1,22	
		YHKGXeky	50	65	0,387	0,295	0,33	1,08	
		YHKGXSekyn	50	50	0,387	0,292	0,32	1,05	
	Tr 158	YHKGXSekyn	50	60	0,387	0,292	0,32	1,05	
		YHKGXSekyn	50	25	0,387	0,292	0,32	1,05	
YHKGXSekyn		50	75	0,387	0,292	0,32	1,05		
YHKGXSekyn		50	65	0,387	0,292	0,32	1,05		
N-900	11	Tr 94	YHKGXeky	50	500	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXeky	50	70	0,387	0,295	0,33	1,08



Tabela Z.1. ciąg dalszy

Rozdzielnica	Pole	Linia do	Typ kabela/przewodu	S, mm <sup>2</sup>	l, m	R, Ω/km	L, mH/km	C, uF/km	I, A/km
N-900	11	Tr 94	YHKGXeky	50	70	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXeky	50	240	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXSekyn	50	470	0,387	0,292	0,32	1,05
			YHKGXeky	50	80	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXeky	50	50	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXSekyn	50	30	0,387	0,292	0,32	1,05
			YHKGXSekyn	50	70	0,387	0,292	0,32	1,05
		Tr 291 przez Tr 94	YHKGXSekyn	95	40	0,193	0,268	0,42	1,38
			YHKGXSekyn	95	130	0,193	0,268	0,42	1,38
			YHKGXSekyn	95	120	0,193	0,268	0,42	1,38
			YHKGXSekyn	95	25	0,193	0,268	0,42	1,38
			YHKGXSekyn	95	60	0,193	0,268	0,42	1,38
		Tr 307 przez Tr 291	YHKGXSekyn	95	60	0,193	0,268	0,42	1,38
			YHKGXSekyn	95	60	0,193	0,268	0,42	1,38
			YHKGXSekyn	95	120	0,193	0,268	0,42	1,38
	12	Tr 29	YHKGXSekyn	50	40	0,387	0,292	0,32	1,05
			YHKGXSekyn	70	140	0,268	0,278	0,37	1,22
			YHKGXSekyn	70	125	0,268	0,278	0,37	1,22
	13	Tr 23	YHKGXSekyn	50	90	0,387	0,292	0,32	1,05
			YHKGXeky	50	210	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXeky	50	60	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXeky	50	70	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXSekyn	50	220	0,387	0,292	0,32	1,05
			YHKGXeky	50	8	0,387	0,295	0,33	1,08
	14	Tr 169	YHKGXeky	35	110	0,524	0,325	0,45	1,46
			YHKGXeky	50	80	0,387	0,295	0,33	1,08
			NYCEYFGby	35	100	0,524	0,358	0,51	1,67
YHKGXekyn			50	290	0,387	0,295	0,33	1,08	
Tr 111 przez Tr 169		YHKGXSekyn	95	90	0,193	0,268	0,42	1,38	
17	Tr 75	YHKGXeky	35	83	0,524	0,325	0,45	1,46	
		YHKGXeky	35	186	0,524	0,325	0,45	1,46	
		YHKGXSekyn	50	50	0,387	0,292	0,32	1,05	

Tabela Z.2. Zestawienie kabli i przewodów oponowych występujących w KWK Marcel w analizowanych sytuacjach wraz z lokalizacją oraz parametrami technicznymi niezbędnymi do analizy z wykorzystaniem modelu  $\Pi$ .

Rozdzielnica	Pole	Linia do	Typ kabla/przewodu	S, mm <sup>2</sup>	l, m	R, $\Omega$ /km	L, mH/km	C, $\mu$ F/km	I, A/km	
RG-2	24	R-404	2xYAKY	240	420	0,125	0,254	0,56	1,82	
	25	R-604 (nieparzyste)	YHKGYPpy	185	130	0,0991	0,288	0,87	2,83	
			YAKY	240	420	0,125	0,254	0,56	1,82	
			YHKGYPpy	185	130	0,0991	0,288	0,87	2,83	
	26	R-605	YHKGXSekyn	120	15	0,153	0,261	0,47	1,52	
			YHKGYekyn	150	290	0,124	0,268	0,79	2,59	
			YHKGYPpy	185	230	0,0991	0,288	0,87	2,83	
			YHKGXSekyn	120	275	0,153	0,261	0,47	1,52	
			YHKGYPpy	185	210	0,0991	0,288	0,87	2,83	
			YHKGXSekyn	120	380	0,153	0,261	0,47	1,52	
			YHKGYekyn	150	55	0,124	0,268	0,79	2,59	
			YHKGYekyn	185	110	0,0991	0,288	0,87	2,83	
			YHKGXSekyn	120	490	0,153	0,261	0,47	1,52	
	27	Tr 80	YHKGXSekyn	120	5	0,153	0,261	0,47	1,52	
			YHKGYPpy	185	70	0,0991	0,288	0,87	2,83	
			YHKGYPpy	120	15	0,0991	0,288	0,87	2,83	
			YHKGYekyn	150	55	0,124	0,268	0,79	2,59	
			YHKGYPpy	185	285	0,0991	0,288	0,87	2,83	
			YHKGXeky	50	300	0,387	0,295	0,33	1,08	
		Tr 84 przez Tr 80	YHKGXeky	35	180	0,524	0,325	0,45	1,46	
	R-404	12	Tr 202	YHKGXeky	50	300	0,387	0,295	0,33	1,08
			Tr 53P przez Tr 202	YHKGXeky	35	143	0,524	0,325	0,45	1,46
			Tr 255P przez Tr 53P	YHKGXeky	50	230	0,387	0,295	0,33	1,08
		14	R-604 (parzyste)	YAKY	240	1505	0,125	0,254	0,56	1,82
		18	Tr 95	YHKGXeky	50	400	0,387	0,295	0,33	1,08
				YHKGXeky	35	80	0,524	0,325	0,45	1,46
				YHKGXeky	50	320	0,387	0,295	0,33	1,08
YHKGXeky				35	190	0,524	0,325	0,45	1,46	
YHKGXeky				50	285	0,387	0,295	0,33	1,08	
YHKGXeky				35	200	0,524	0,325	0,45	1,46	
YHKGXeky				50	186	0,387	0,295	0,33	1,08	
Tr 9 przez Tr 95			YHKGXeky	35	10	0,524	0,325	0,45	1,46	
20		Tr 161	YHKGXeky	50	215	0,387	0,295	0,33	1,08	
			NYCEYFGby	35	150	0,524	0,358	0,51	1,67	
			YHKGXekyn	50	305	0,387	0,295	0,33	1,08	
			NTSKCGECWOU	35	470	0,554	0,312	0,38	1,24	
		Tr 152 przez Tr 161	NTSKCGECWOU	35	20	0,554	0,312	0,38	1,24	
24		Tr 289	YHKGXekyn	50	490	0,387	0,295	0,33	1,08	
26		napęd	YHAKXS	70	490	0,443	0,278	0,39	1,28	

Tabela Z.2. ciąg dalszy

Rozdzielnica	Pole	Linia do	Typ kabla/przewodu	S, mm <sup>2</sup>	l, m	R, Ω/km	L, mH/km	C, uF/km	I, A/km
R-404	26	M1	O2nGcekż/w-GW	25	70	0,795	0,366	0,30	0,99
		M2	O2nGcekż/w-GW	25	65	0,795	0,366	0,30	0,99
R-604	5	Tr 291	YHKGXSekyn	120	150	0,153	0,261	0,47	1,52
			YHKGXeky	50	110	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHAKXS	70	110	0,443	0,278	0,39	1,28
			YHKGXeky	50	40	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHAKXS	70	110	0,443	0,278	0,39	1,28
			YHKGXeky	50	162	0,387	0,295	0,33	1,08
		Tr 290 przez Tr 291	YHKGXekyn	50	40	0,387	0,295	0,33	1,08
	7	Tr 31	YHKGXSekyn	50	60	0,387	0,292	0,32	1,05
		Tr 260 przez Tr 31	YHKGXeky	50	285	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXekyn	50	35	0,387	0,295	0,33	1,08
		Tr 29 przez Tr	YHKGXekyn	50	232	0,387	0,295	0,33	1,08
	9	Tr 18	YHKGXeky	50	310	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXeky	35	150	0,524	0,325	0,45	1,46
			YHKGXeky	50	305	0,387	0,295	0,33	1,08
		Tr 254 przez Tr 18	YHKGXeky	50	30	0,387	0,295	0,33	1,08
	11	Tr 238	YHKGXeky	35	100	0,524	0,325	0,45	1,46
			YHKGXeky	50	150	0,387	0,295	0,33	1,08
		Tr 96 przez Tr 238	YHKGXeky	50	14	0,387	0,295	0,33	1,08
		Tr 263 przez Tr 96	YHKGXeky	50	14	0,387	0,295	0,33	1,08
	13	Tr 41	YHKGXeky	50	120	0,387	0,295	0,33	1,08
			NYCEYFGby	35	165	0,524	0,358	0,51	1,67
			YHKGXeky	50	55	0,387	0,295	0,33	1,08
			NYCEYFGby	35	130	0,524	0,358	0,51	1,67
		Tr 201 przez Tr 41	YHKGXekyn	50	360	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXeky	35	85	0,524	0,325	0,45	1,46
			YHKGXeky	50	92	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXeky	35	60	0,524	0,325	0,45	1,46
			YHKGXeky	50	610	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXekyn	50	10	0,387	0,295	0,33	1,08
	15	Tr 157P	YHKGXeky	50	313	0,387	0,295	0,33	1,08
			YHKGXeky	35	135	0,524	0,325	0,45	1,46
		Tr 300 przez Tr 157P	YHAKXS	70	170	0,443	0,278	0,39	1,28
R-604	4	Tr 91	YHKGXSekyn	50	260	0,387	0,292	0,32	1,05
			YHKGXSekyn	50	65	0,387	0,292	0,32	1,05
		Tr 112 przez Tr 91	YHKGXSekyn	50	160	0,387	0,292	0,32	1,05
		Tr 35P przez Tr 112	YHKGXSekyn	50	18	0,387	0,292	0,32	1,05
	6	Tr 211	YHKGXeky	50	130	0,387	0,295	0,33	1,08
YHKGXeky			35	100	0,524	0,325	0,45	1,46	

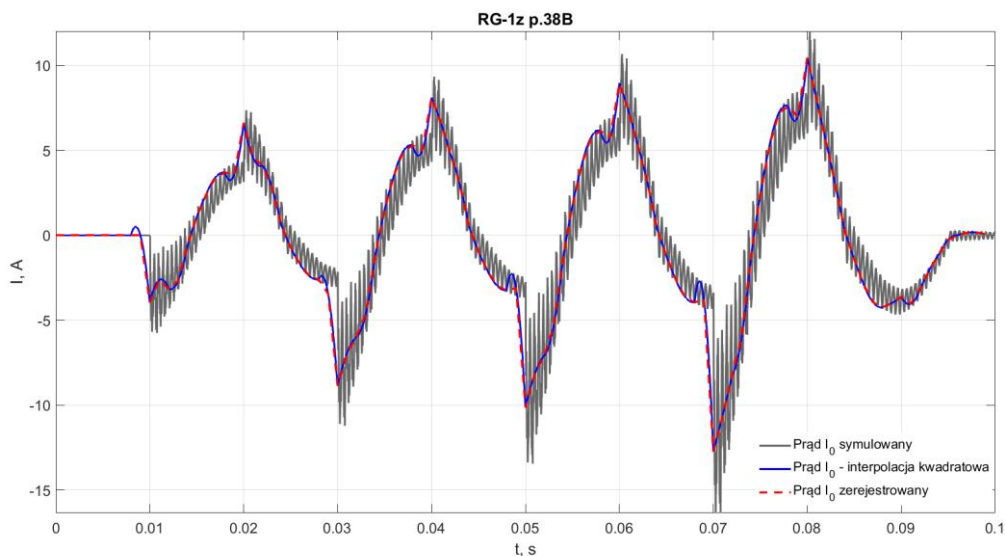
Tabela Z.2. ciąg dalszy

Rozdzielnica	Pole	Linia do	Typ kabla/przewodu	S, mm <sup>2</sup>	l, m	R, Ω/km	L, mH/km	C, uF/km	I, A/km	
R-604	6	Tr 211	YHKGXeky	50	150	0,387	0,295	0,33	1,08	
		Tr 240 przez Tr 211	YHKGXeky	50	515	0,387	0,295	0,33	1,08	
		Tr 55 przez Tr 240	YHKGXeky	35	35	0,524	0,325	0,45	1,46	
	8	Tr 208	YHKGXeky	50	70	0,387	0,295	0,33	1,08	
		Tr 78 przez Tr 208	YHKGXeky	50	720	0,387	0,295	0,33	1,08	
		Tr 233 przez Tr 233	YHKGXeky	35	6	0,524	0,325	0,45	1,46	
	10	Tr 183	YHKGXeky	50	618	0,387	0,295	0,33	1,08	
			NTSKCGECWOU	35	235	0,554	0,312	0,38	1,24	
			YHKGXeky	50	130	0,387	0,295	0,33	1,08	
			NTSKCGECWOU	35	60	0,554	0,312	0,38	1,24	
			YHKGXeky	50	450	0,387	0,295	0,33	1,08	
	12	Tr 2	YHKGXekyn	120	565	0,153	0,261	0,47	1,52	
			Tr 4 przez Tr 2	YHKGXekyn	120	13	0,153	0,261	0,47	1,52
	16	Tr 239	YHKGXekyn	50	485	0,387	0,295	0,33	1,08	
			Tr 38 przez Tr 239	YHKGXeky	50	245	0,387	0,295	0,33	1,08
		Tr 104 przez Tr 38	YHKGXeky	35	50	0,524	0,325	0,45	1,46	
			YHKGXeky	50	100	0,387	0,295	0,33	1,08	
			YHKGXeky	35	110	0,524	0,325	0,45	1,46	
	Tr 30 przez Tr 104	YHAKXS	70	20	0,443	0,278	0,39	1,28		
	R-605	1	Tr 116	YHKGXeky	50	10	0,387	0,295	0,33	1,08
			Tr 7 przez Tr 116	YHKGXekyn	50	480	0,387	0,295	0,33	1,08
		2	Tr 51	YHKGXeky	50	875	0,387	0,295	0,33	1,08
				YHKGXeky	35	80	0,524	0,325	0,45	1,46
3		Tr 114	YHKGXeky	50	200	0,387	0,295	0,33	1,08	
			YHKGXeky	35	70	0,524	0,325	0,45	1,46	
			YHKGXeky	50	230	0,387	0,295	0,33	1,08	
			YHKGXeky	35	75	0,524	0,325	0,45	1,46	
			YHKGXeky	50	725	0,387	0,295	0,33	1,08	
		Tr 217 przez Tr 114	YHKGXeky	50	360	0,387	0,295	0,33	1,08	
		Tr 203 przez Tr 114	YHKGXeky	35	215	0,524	0,325	0,45	1,46	
			YHKGXeky	50	100	0,387	0,295	0,33	1,08	
			YHKGXekyn	50	395	0,387	0,295	0,33	1,08	
		Tr 64 przez Tr 203	YHKGXekyn	50	310	0,387	0,295	0,33	1,08	
YHAKXS			70	70	0,443	0,278	0,39	1,28		
YHKGXeky			50	120	0,387	0,295	0,33	1,08		
YHKGXeky			35	85	0,524	0,325	0,45	1,46		
4		Tr 5	YHKGXekyn	120	100	0,153	0,261	0,47	1,52	
			YHKGXekyn	95	991	0,193	0,268	0,42	1,38	
			YHKGXekyn	50	144	0,387	0,292	0,32	1,05	

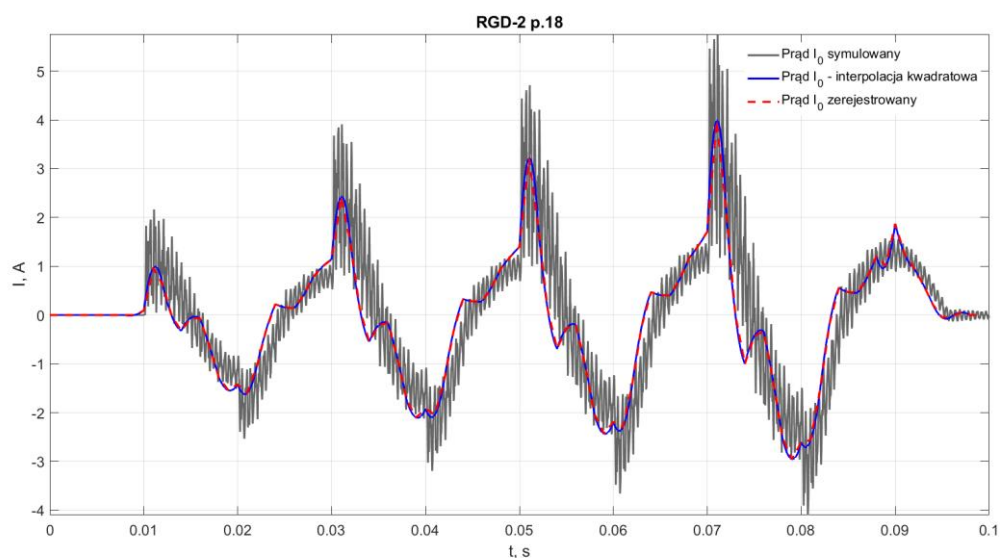
Tabela Z.2. ciąg dalszy

Rozdzielnica	Pole	Linia do	Typ kabela/przewodu	S, mm <sup>2</sup>	l, m	R, Ω/km	L, mH/km	C, uF/km	I, A/km
R-605	4	Tr 5	YHKGXSekyn	70	150	0,268	0,278	0,37	1,22
			YHKGXSekyn	50	55	0,387	0,292	0,32	1,05
		Tr 259 przez Tr 5	YHKGXSekyn	50	13	0,387	0,292	0,32	1,05
			YHKGXSekyn	50	144	0,387	0,292	0,32	1,05
			YHKGXeky	35	75	0,524	0,325	0,45	1,46

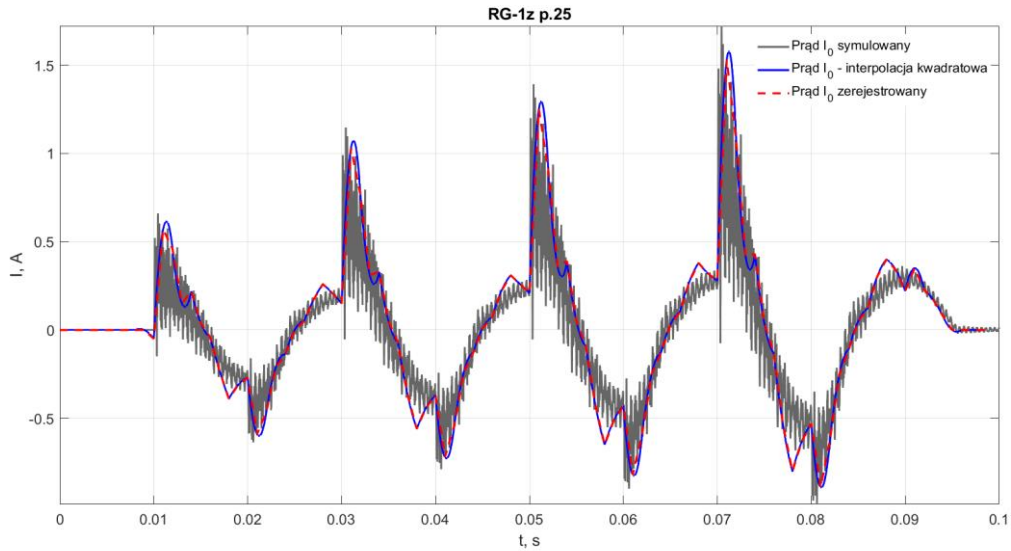
## Załącznik nr 2 – Inne przebiegi nieuwzględnione w części właściwej pracy



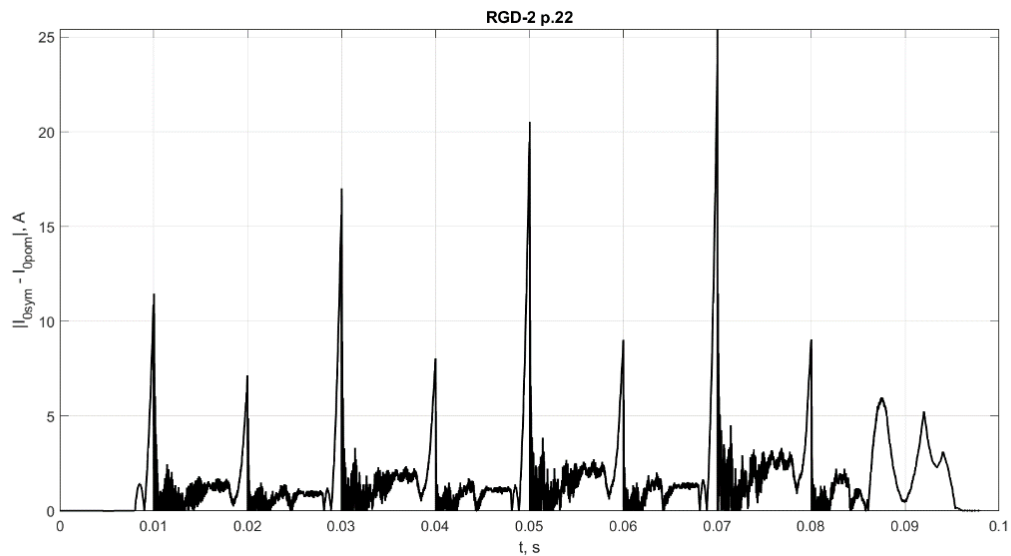
Rys. Z.1. Przebiegi prądu  $3I_0$  od czasu dla pola 38B (jedna z linii równoległych) w rozdzielni RG-1z dla zwarcia omawianego w przypadku nr 1. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.



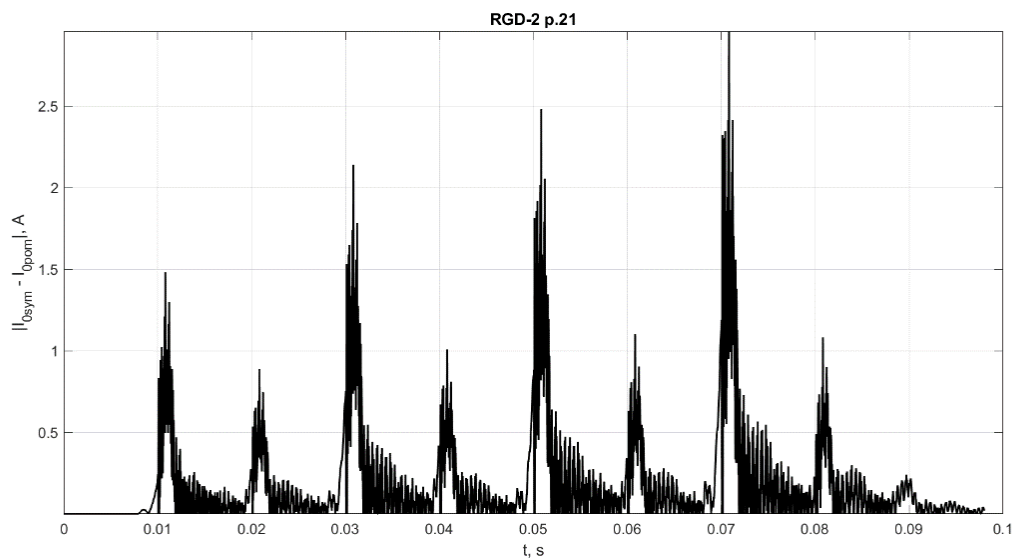
Rys. Z.2. Przebiegi prądu  $3I_0$  od czasu dla pola 18 w rozdzielni RGD-2 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 1. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.



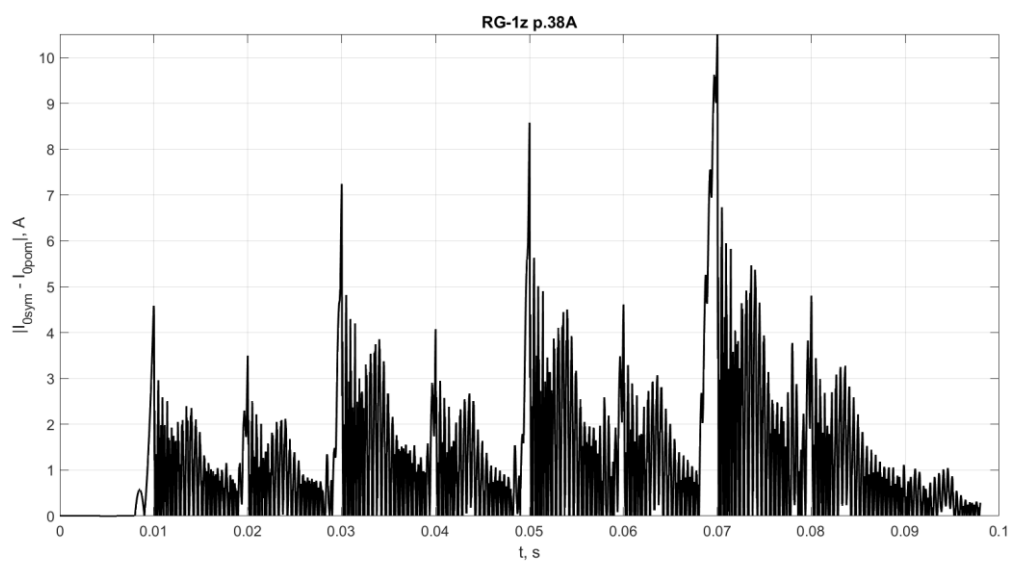
Rys. Z.3. Przebiegi prądu  $3I_0$  od czasu dla pola 25 w rozdzielnicy RG-1z dla zwarcia omawianego w przypadku nr 1. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.



Rys. Z.4. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonym (interpolowanym) dla pola 22 w rozdzielnicy RDG-2 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 1.

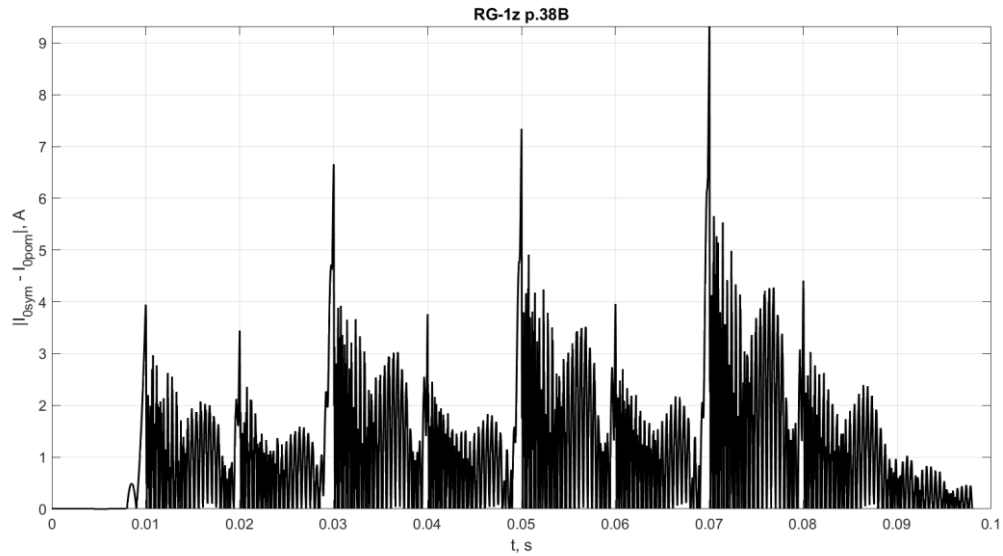


Rys. Z.5. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 21 w rozdzielnicy RDG-2 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 1.

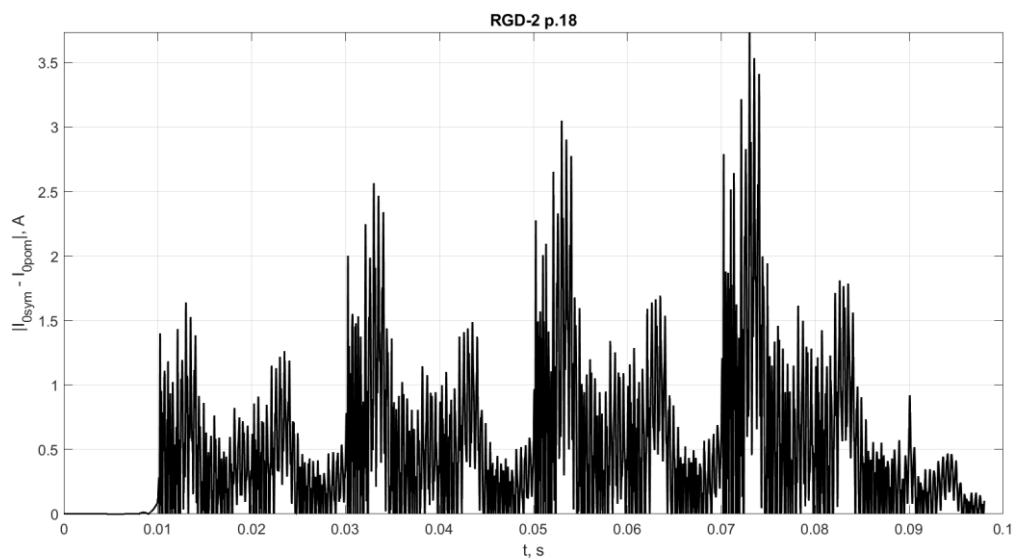


Rys. Z.6. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 38A (jedna z linii równoległych) w rozdzielnicy RG-1z dla zwarcia omawianego w przypadku nr 1.

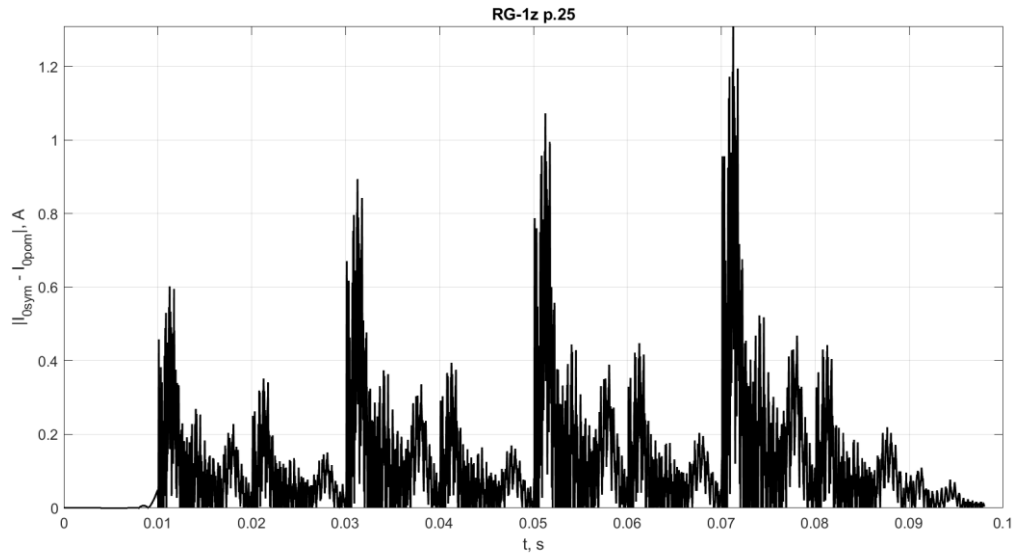




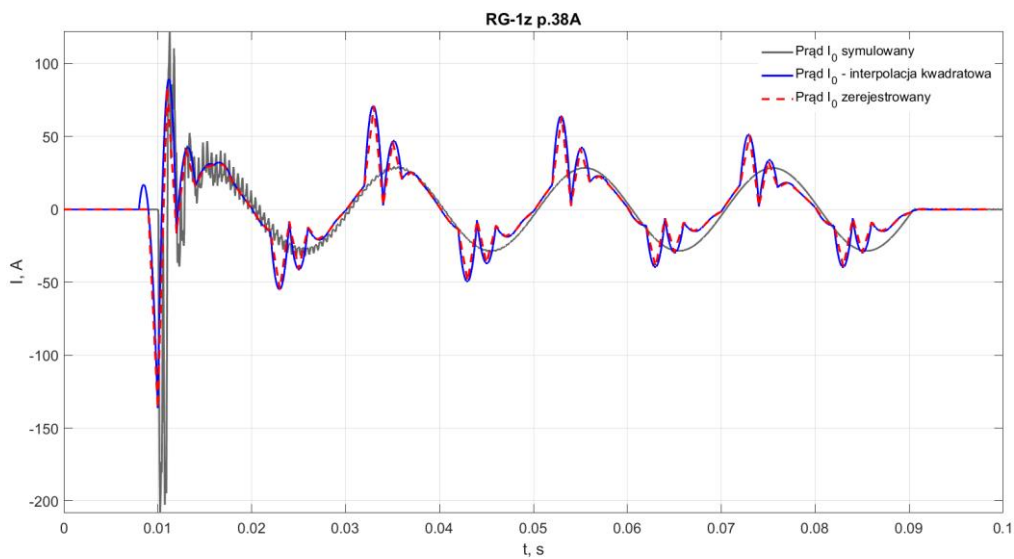
*Rys. Z.7. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 38B (jedna z linii równoległych) w rozdzielni RG-1z dla zwarcia omawianego w przypadku nr 1.*



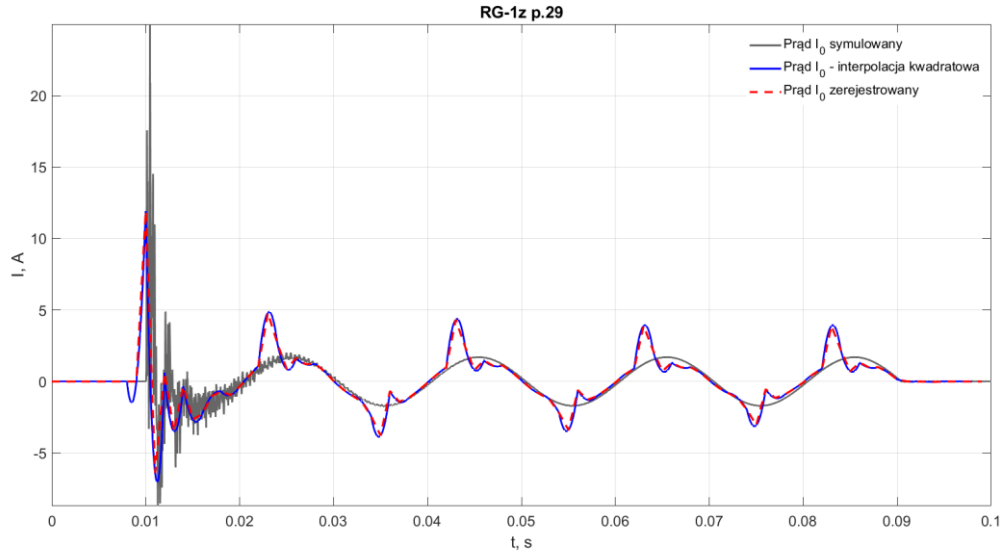
*Rys. Z.8. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 18 w rozdzielni RDG-2 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 1*



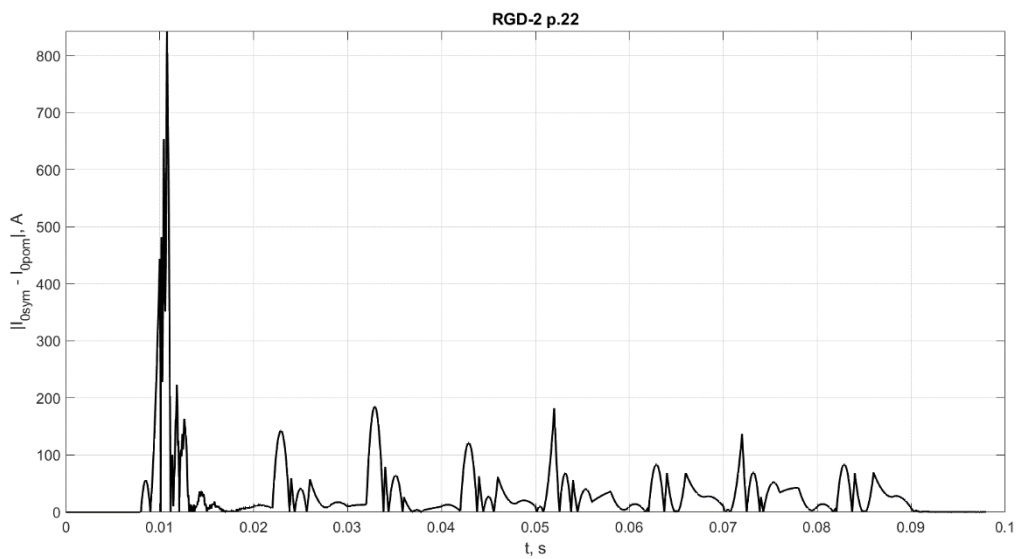
Rys. Z.9. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 25 w rozdzielnicy RG-1z dla zwarcia omawianego w przypadku nr 1.



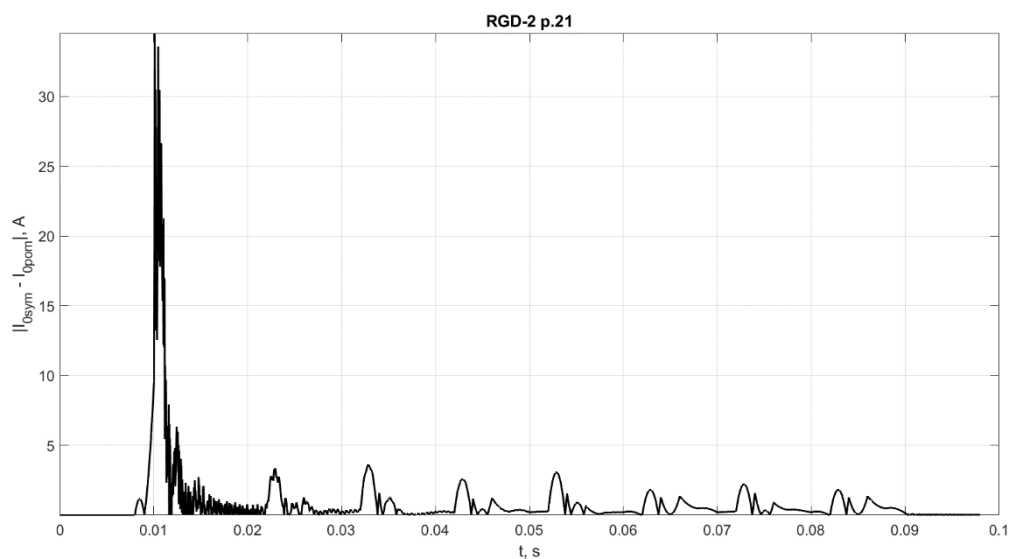
Rys. Z.10. Przebiegi prądu  $3I_0$  od czasu dla pola 38B (jedna z linii równoległych) w rozdzielnicy RG-1z dla zwarcia omawianego w przypadku nr 2. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.



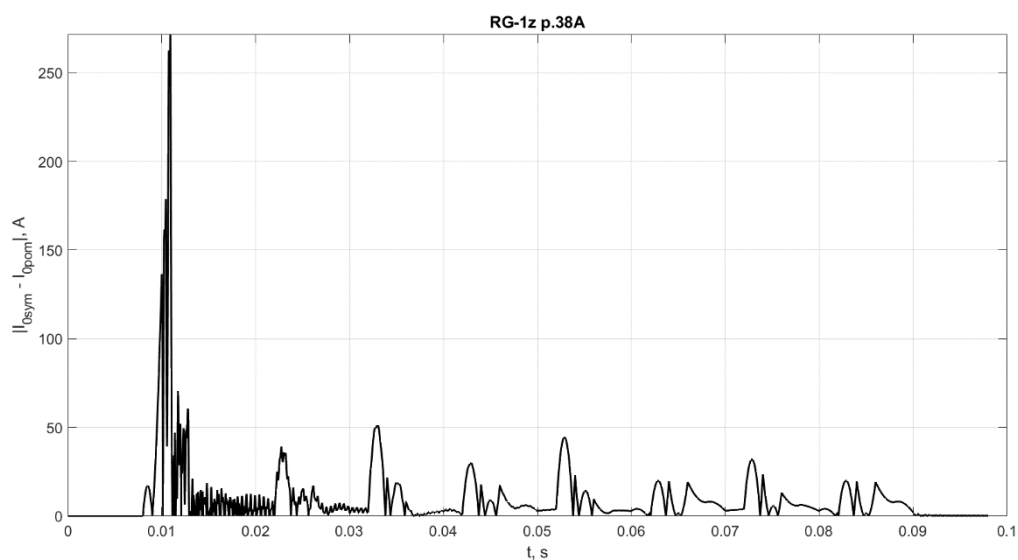
Rys. Z.11. Przebiegi prądu  $3I_0$  od czasu dla pola 29 w rozdzielnicy RG-1z dla zwarcia omawianego w przypadku nr 2. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.



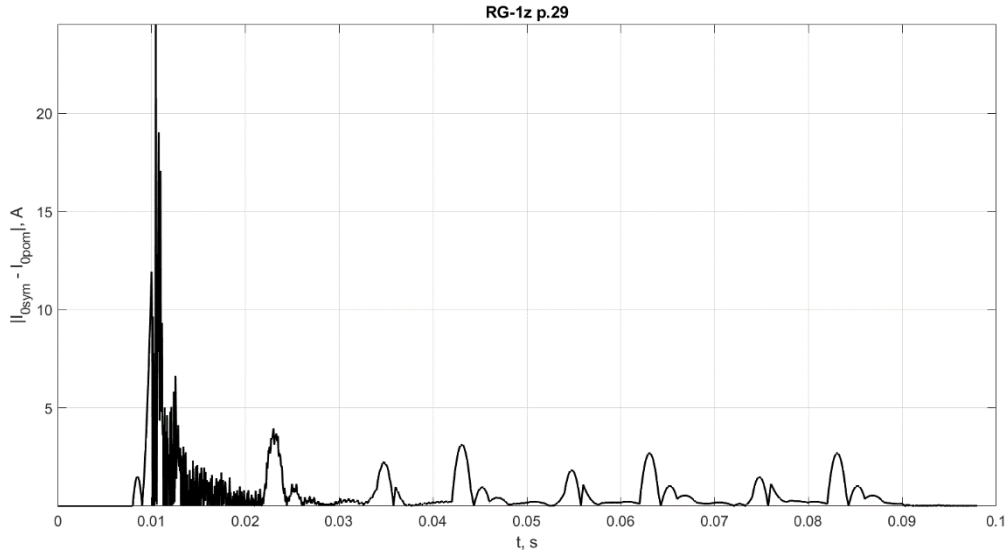
Rys. Z.12. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 22 w rozdzielnicy RDG-2 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 2.



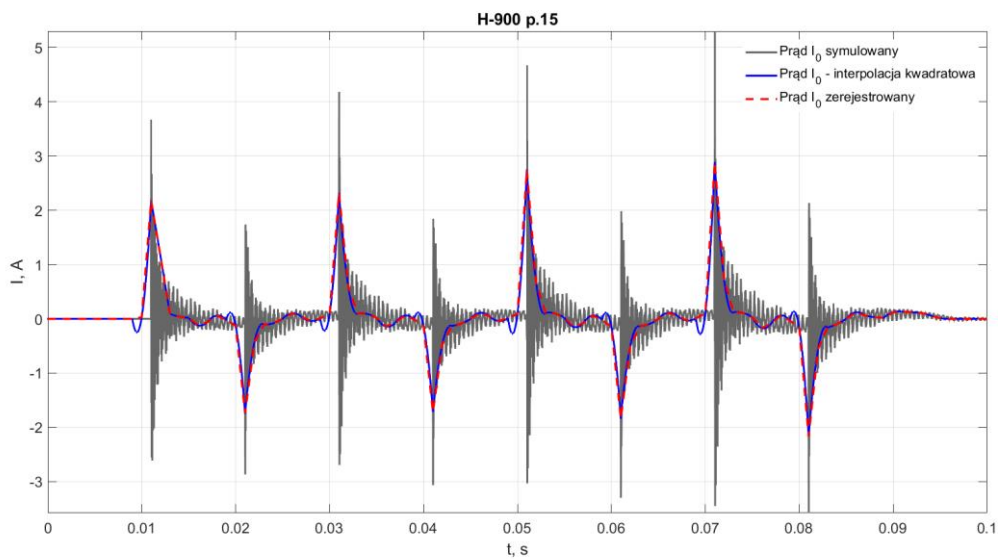
*Rys. Z.13. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 21 w rozdzielnicy RDG-2 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 2.*



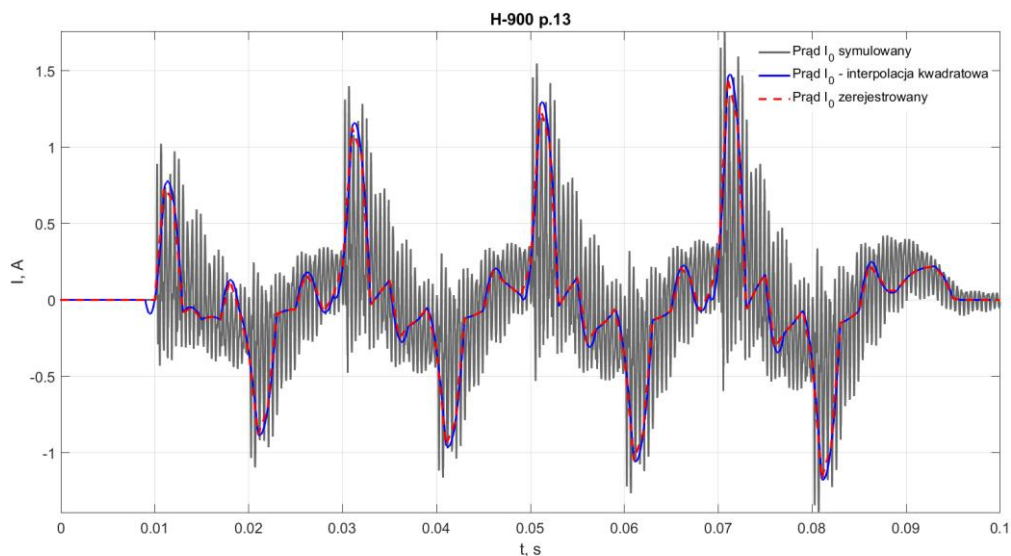
*Rys. Z.14. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 38A w rozdzielnicy RG-1z dla zwarcia omawianego w przypadku nr 2.*



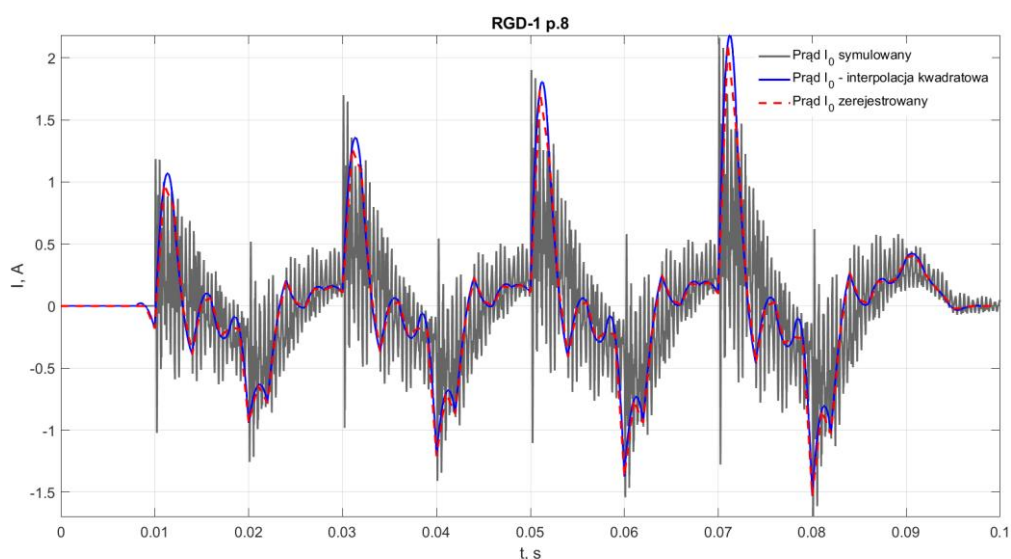
Rys. Z.15. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 29 w rozdzielnicy RG-1z dla zwarcia omawianego w przypadku nr 2



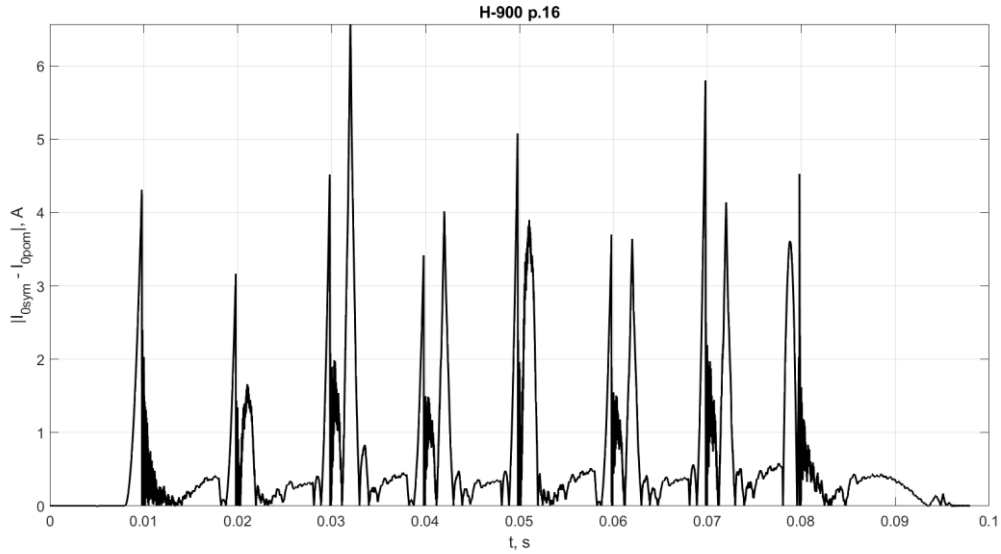
Rys. Z.16. Przebiegi prądu  $3I_0$  od czasu dla pola 15 w rozdzielnicy H-900 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 3. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.



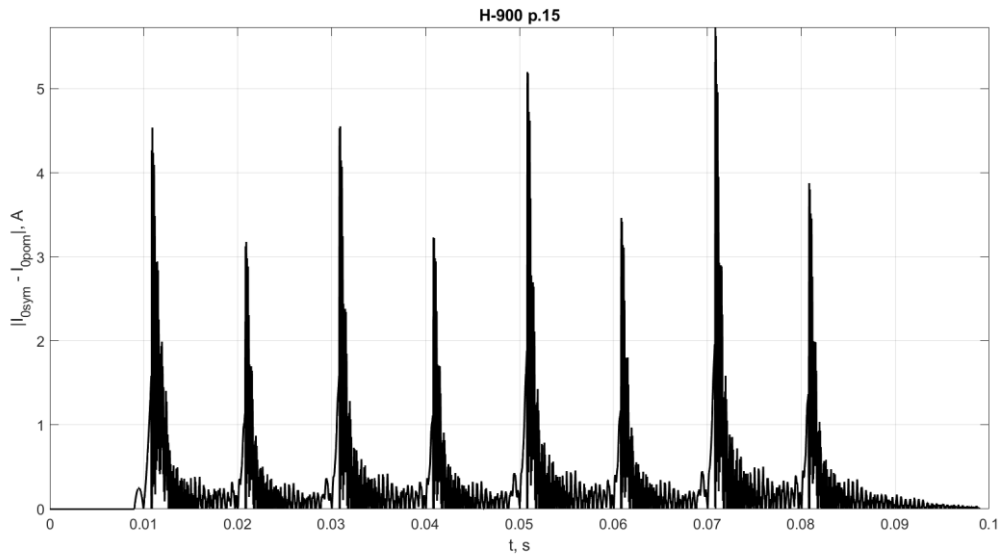
Rys. Z.17. Przebiegi prądu  $3I_0$  od czasu dla pola 13 w rozdzielnicy H-900 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 3. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.



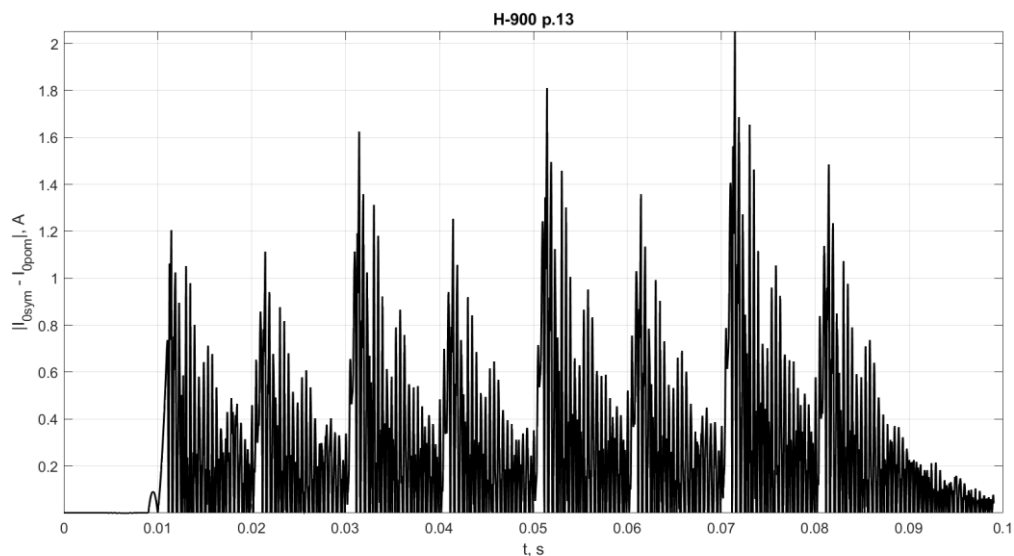
Rys. Z.18. Przebiegi prądu  $3I_0$  od czasu dla pola 8 w rozdzielnicy RGD-1 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 3. Na charakterystyce przedstawiono dane zarejestrowane, interpolację kwadratową zarejestrowanych danych oraz przebieg powstały w wyniku symulacji dla powstałego modelu rezystancji zwarcia.



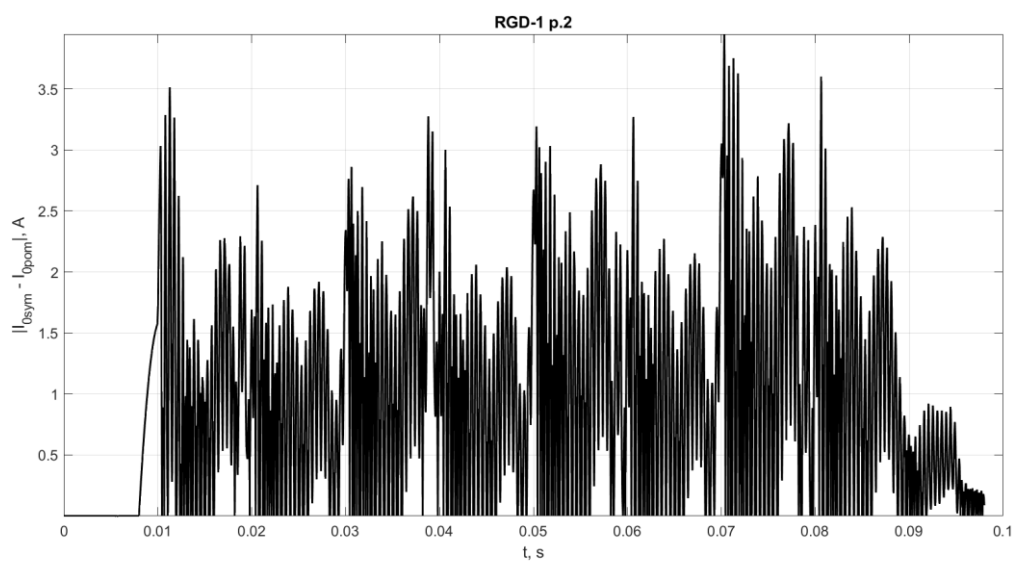
*Rys. Z.19. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 16 w rozdzielnicy H-900 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 3.*



*Rys. Z.20. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 15 w rozdzielnicy H-900 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 3*

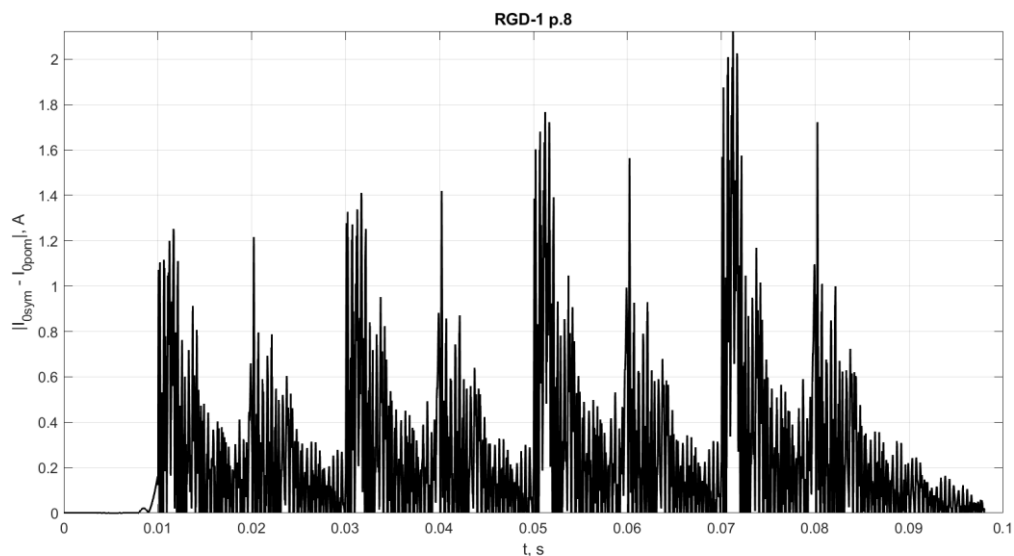


*Rys. Z.21. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 13 w rozdzielnicy H-900 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 3.*

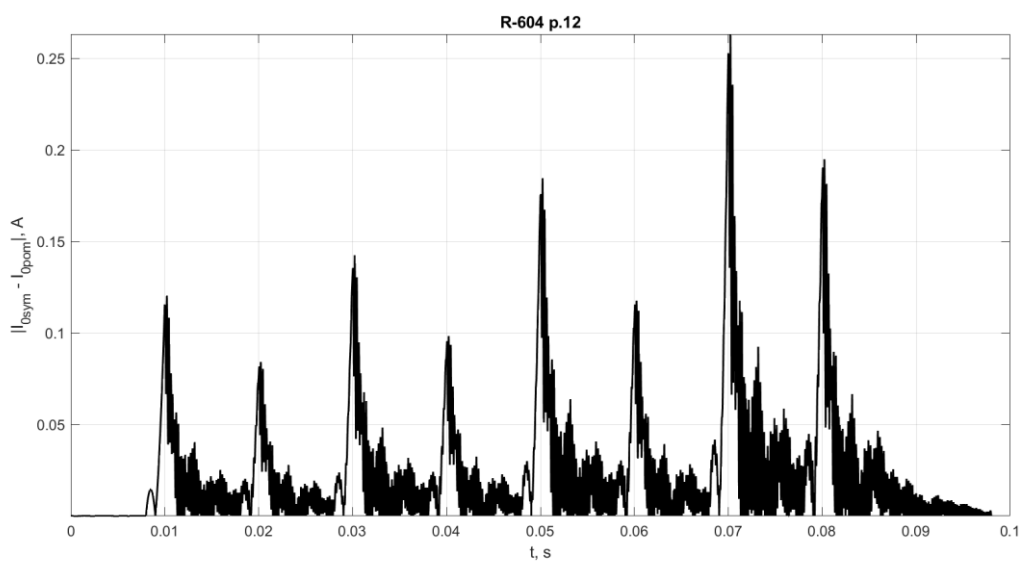


*Rys. Z.22. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 2 w rozdzielnicy RDG-1 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 3.*

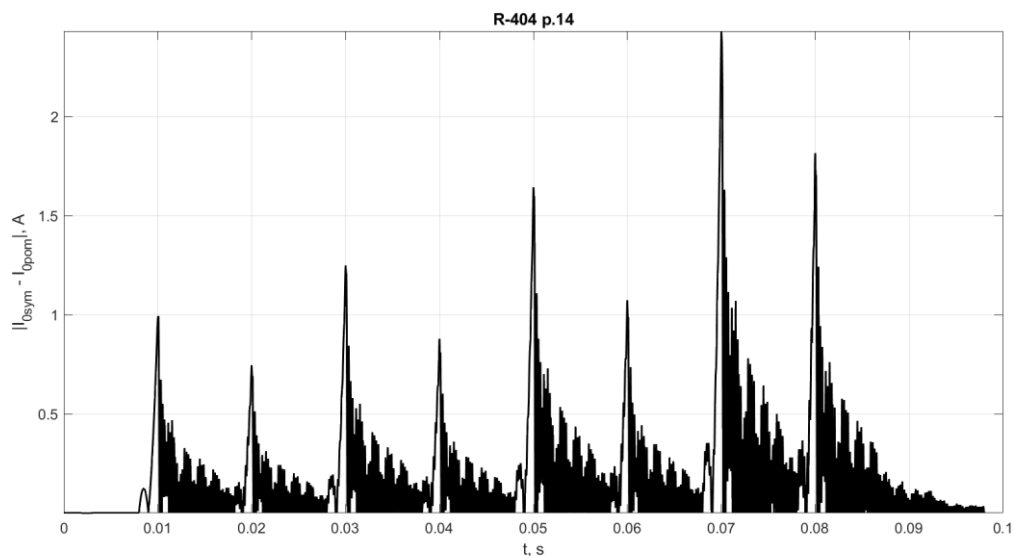




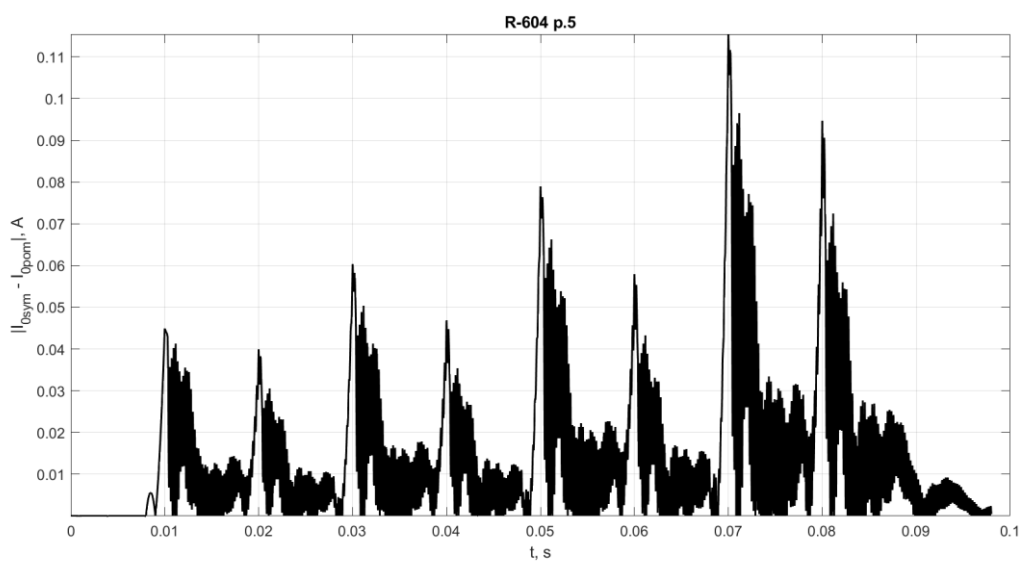
*Rys. Z.23. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 8 w rozdzielnicy RGD-1 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 3.*



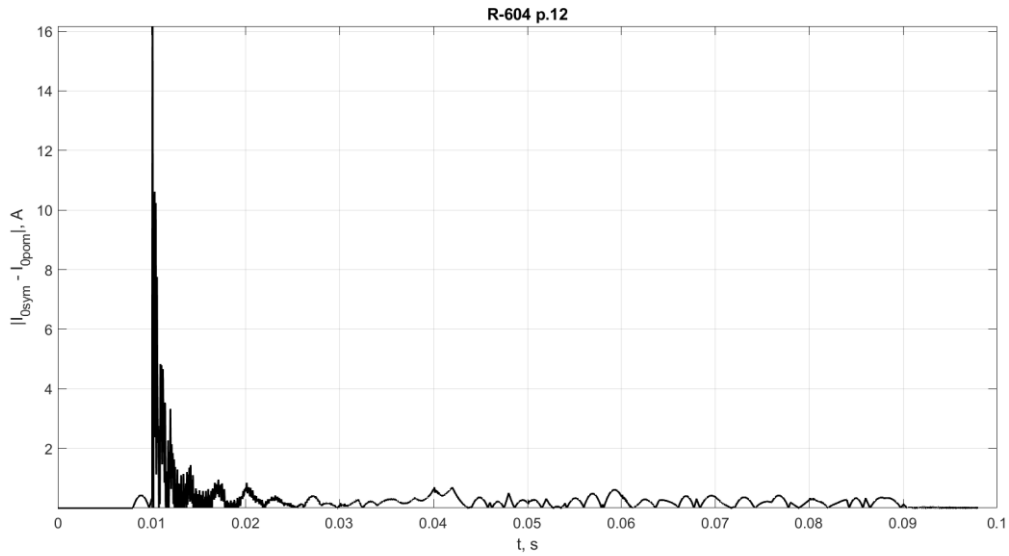
*Rys. Z.24. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 12 w rozdzielnicy R-604 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 4.*



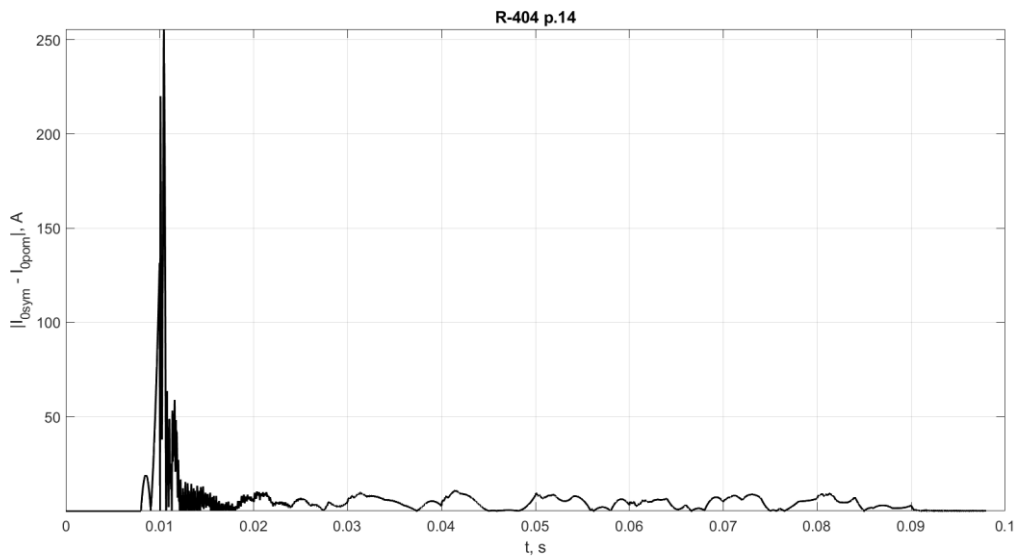
Rys. Z.25. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 14 w rozdzielnicy R-404 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 4.



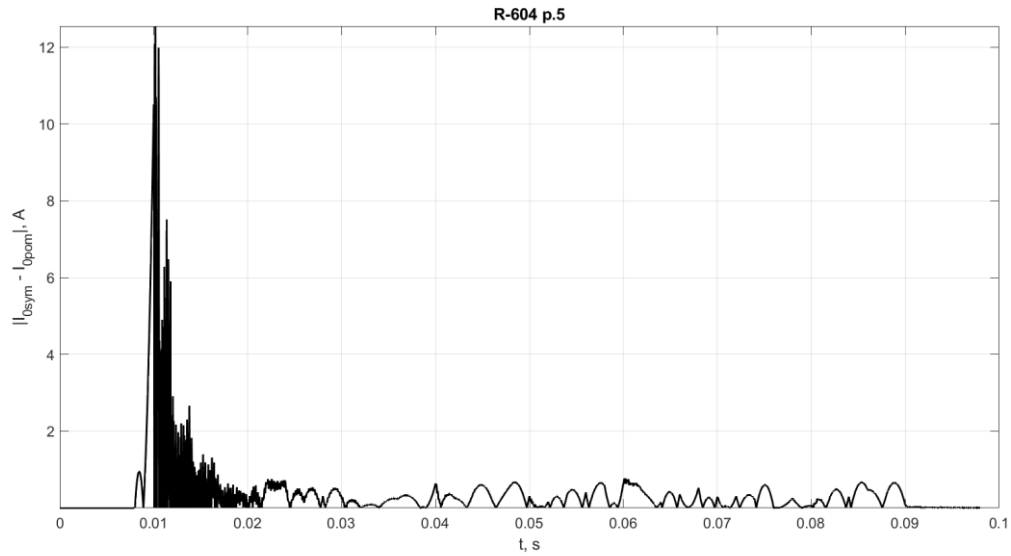
Rys. Z.26. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 5 w rozdzielnicy R-604 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 4.



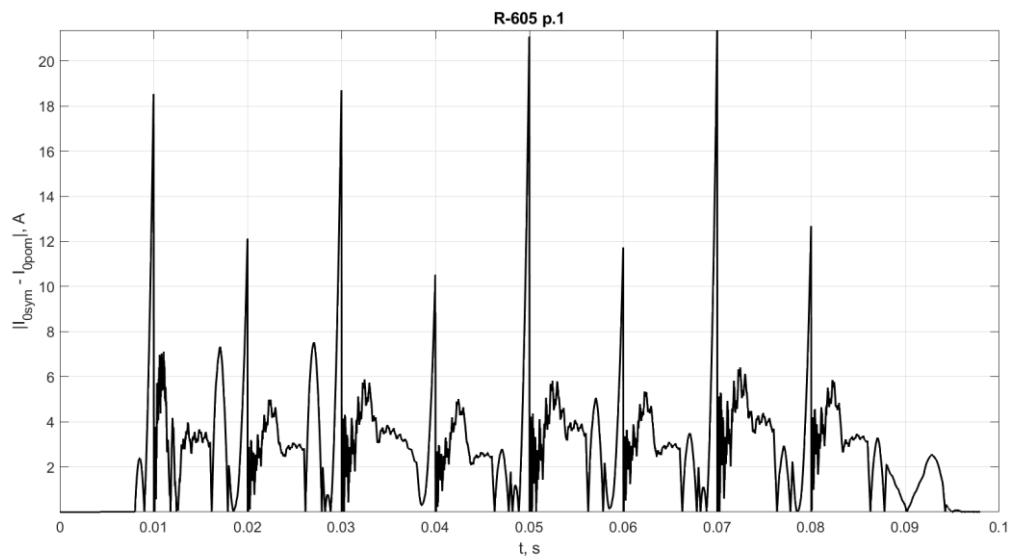
Rys. Z.27. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 12 w rozdzielnicy R-604 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 5.



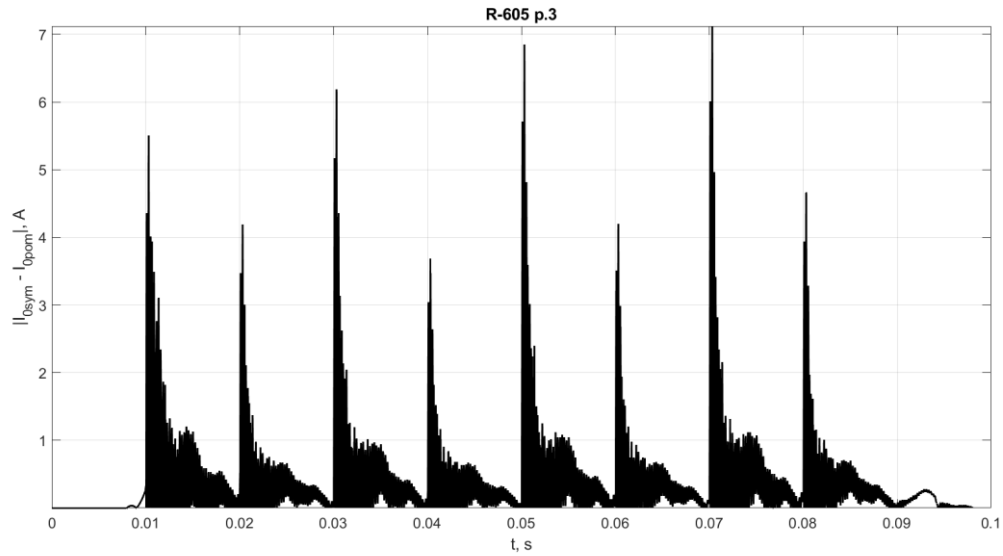
Rys. Z.28. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 14 w rozdzielnicy R-404 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 5.



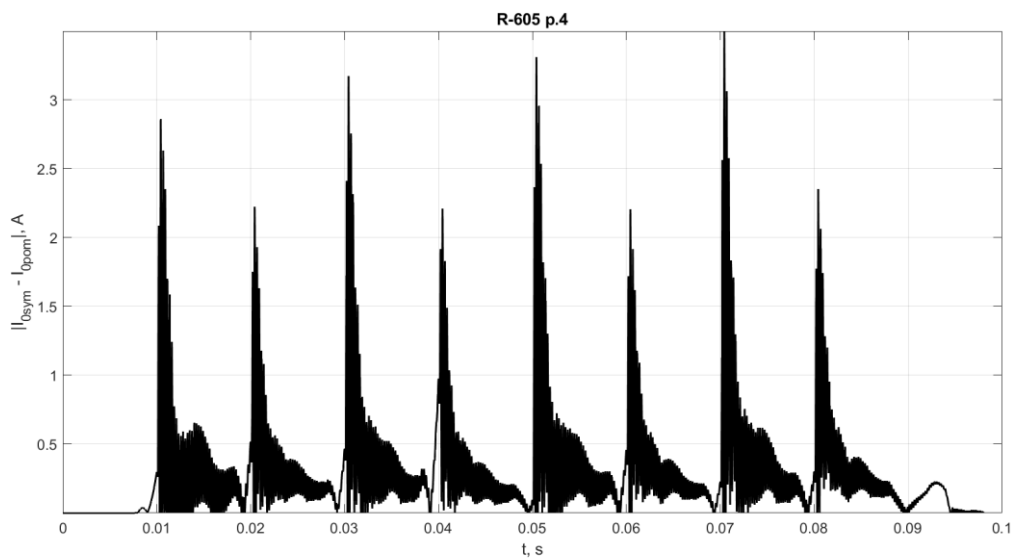
Rys. Z.29. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 5 w rozdzielni R-604 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 5.



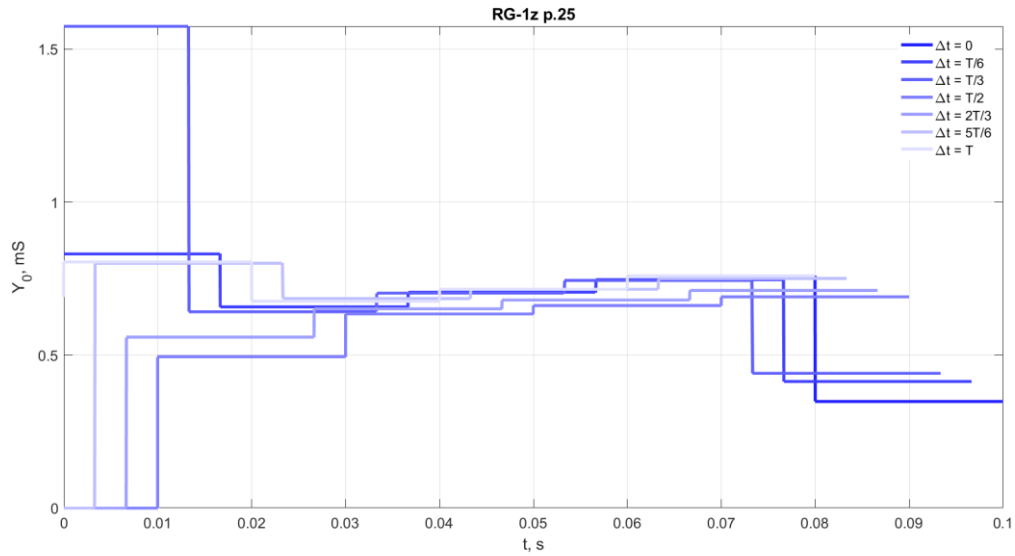
Rys. Z.30. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 1 w rozdzielni R-605 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 6.



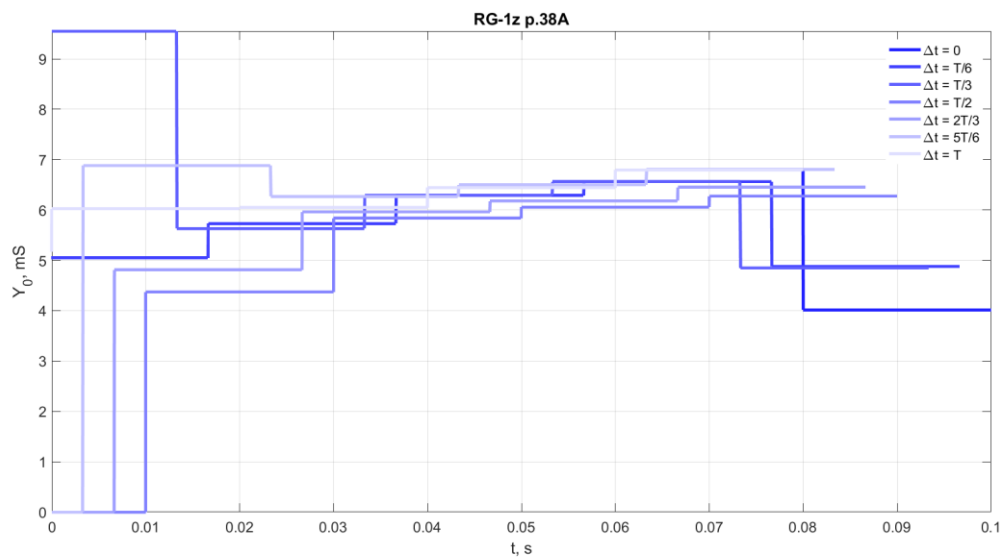
*Rys. Z.31. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 3 w rozdzielnicy R-605 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 6.*



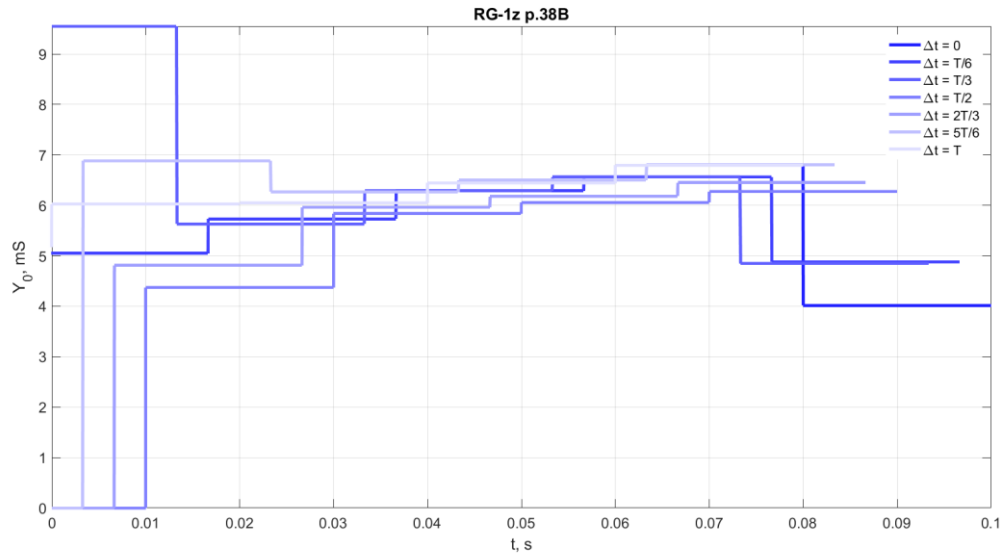
*Rys. Z.32. Charakterystyka przedstawiająca moduł różnicy pomiędzy składową zerową prądu symulowanego a zmierzonego (interpolowanego) dla pola 4 w rozdzielnicy R-605 dla zwarcia omawianego w przypadku nr 6.*



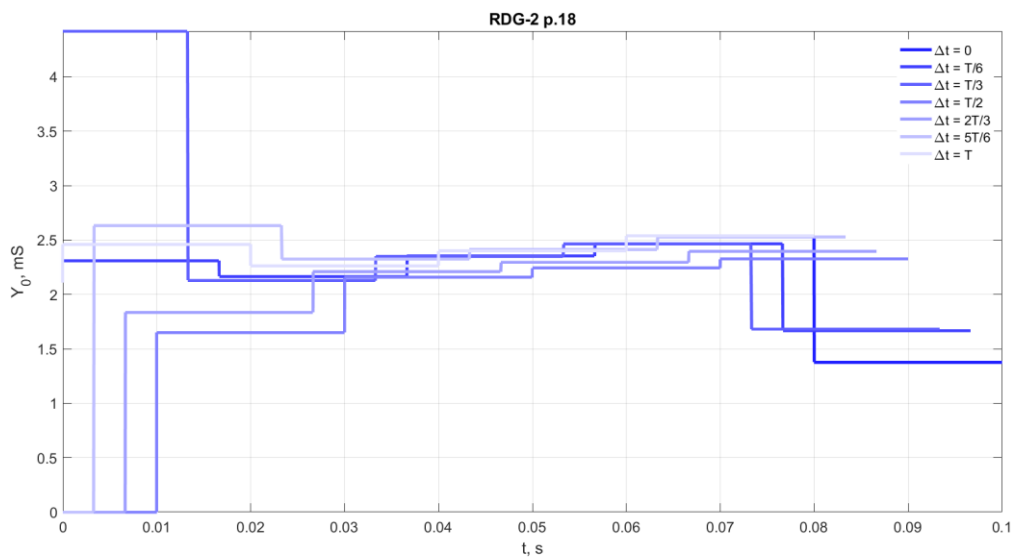
Rys. Z.33. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi  $Y_0$  dla czasu pomiaru  $t = 20$  ms dla pola 25 rozdzielnicy RG-1z dla sytuacji opisanej w przypadku nr 1.



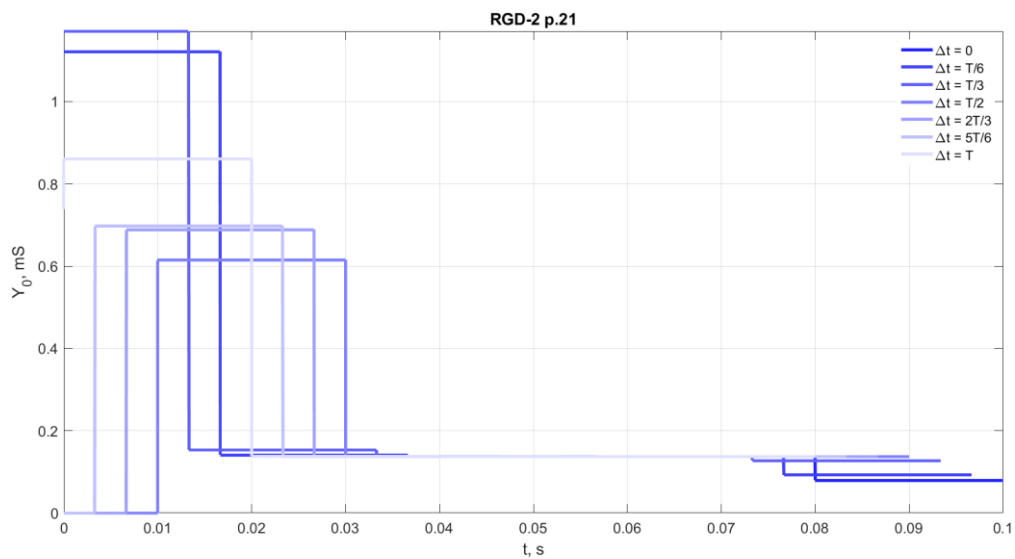
Rys. Z.34. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi  $Y_0$  dla czasu pomiaru  $t = 20$  ms dla pola 38A rozdzielnicy RG-1z dla sytuacji opisanej w przypadku nr 1.



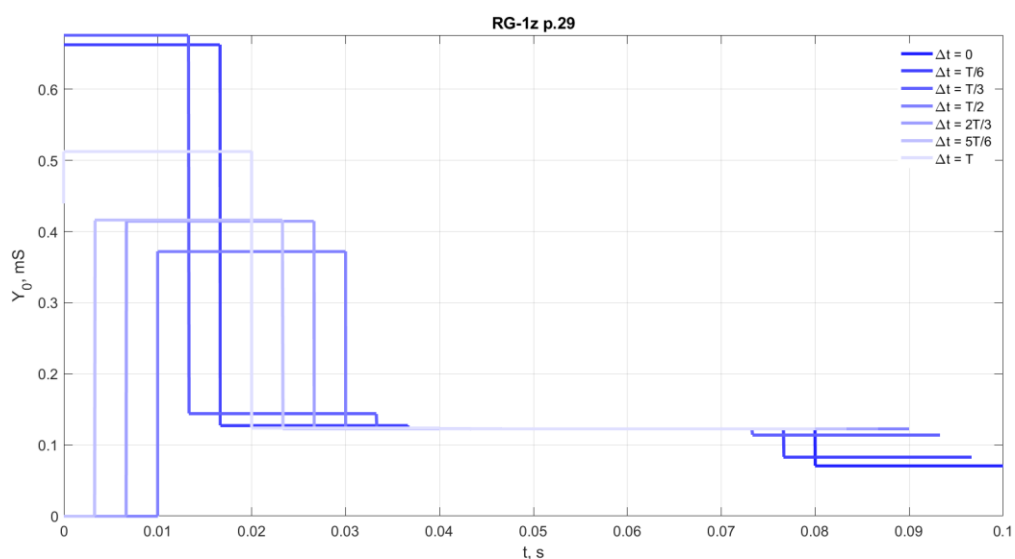
Rys. Z.35. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi  $Y_0$  dla czasu pomiaru  $t = 20$  ms dla pola 38B rozdzielnic RG-1z dla sytuacji opisanej w przypadku nr 1.



Rys. Z.36. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi  $Y_0$  dla czasu pomiaru  $t = 20$  ms dla pola 18 rozdzielnic RDG-2 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 1.

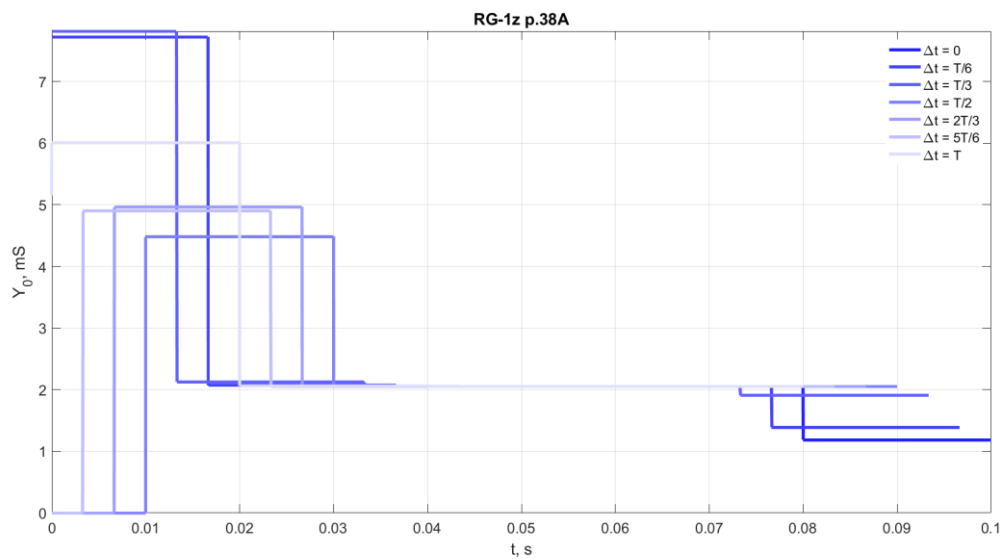


Rys. Z.37. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi  $Y_0$  dla czasu pomiaru  $t = 20$  ms dla pola 21 rozdzielnic RDG-2 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 2.

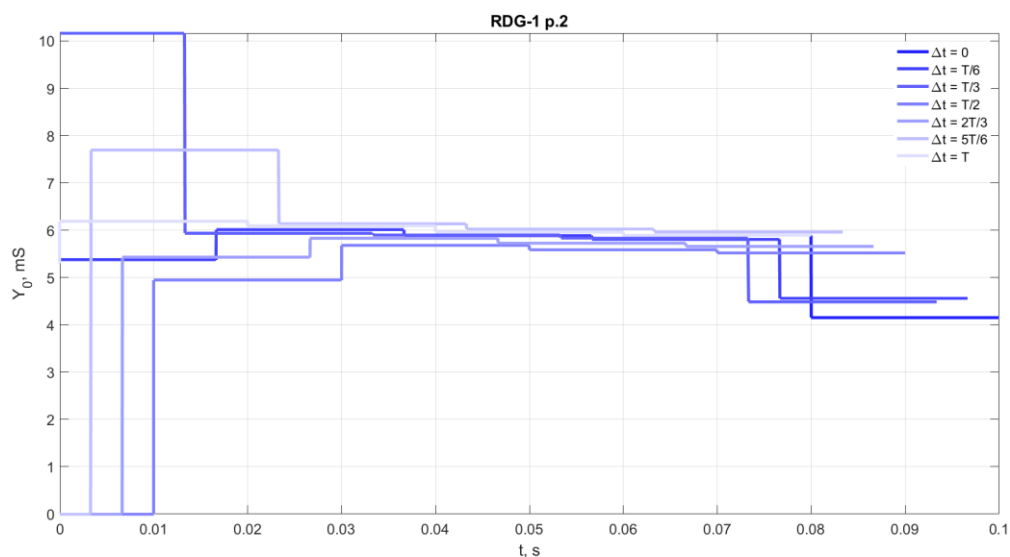


Rys. Z.38. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi  $Y_0$  dla czasu pomiaru  $t = 20$  ms dla pola 29 rozdzielnic RG-1z dla sytuacji opisanej w przypadku nr 2.

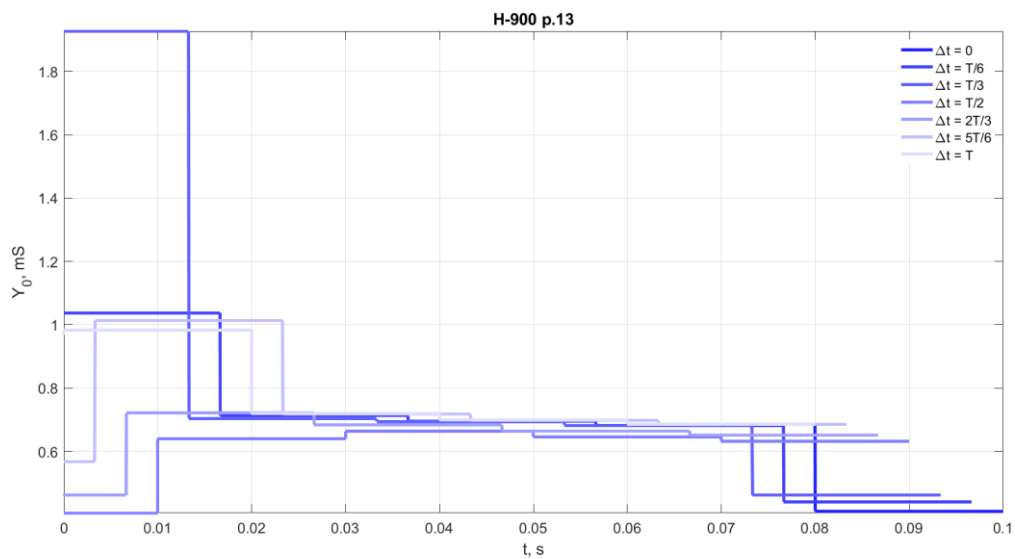




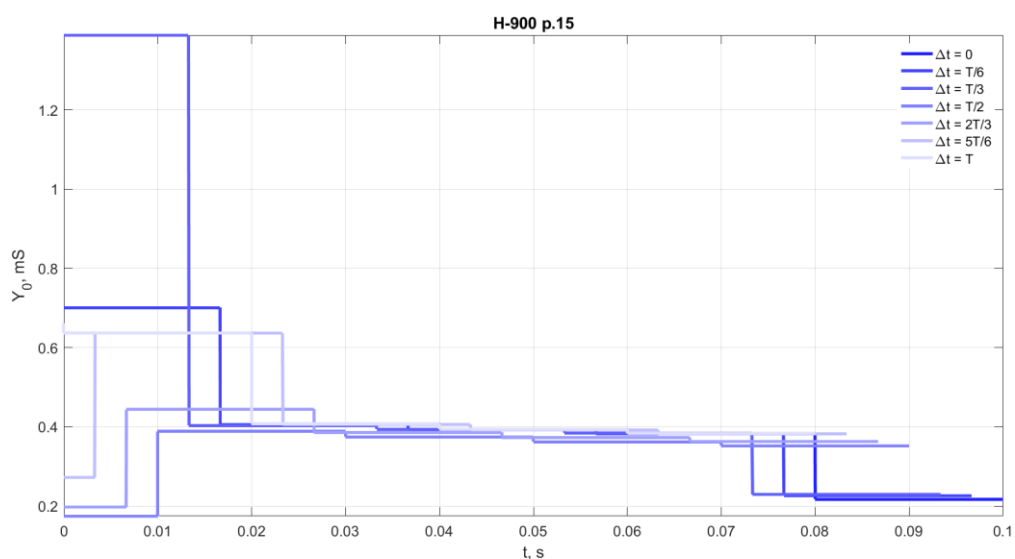
Rys. Z.39. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi  $Y_0$  dla czasu pomiaru  $t = 20 \text{ ms}$  dla pola 38A rozdzielnicy RG-1z dla sytuacji opisanej w przypadku nr 2.



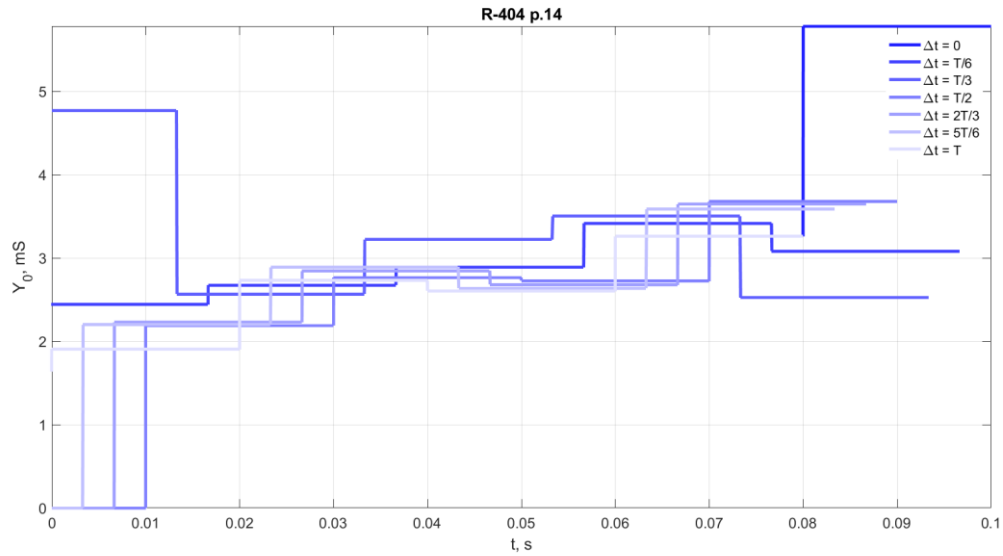
Rys. Z.40. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi  $Y_0$  dla czasu pomiaru  $t = 20 \text{ ms}$  dla pola 2 rozdzielnicy RGD-1 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 3.



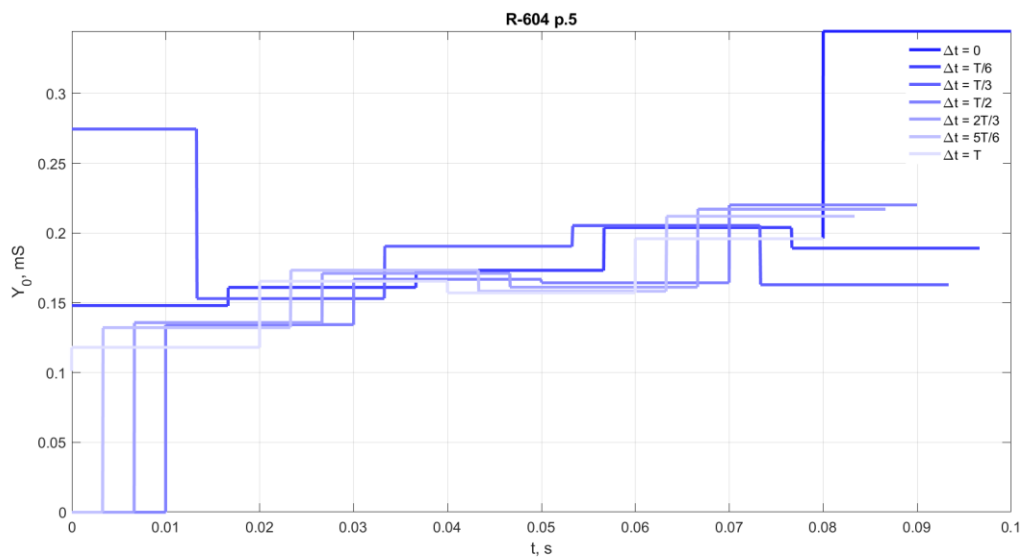
Rys. Z.41. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi  $Y_0$  dla czasu pomiaru  $t = 20$  ms dla pola 13 rozdzielnic H-900 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 3.



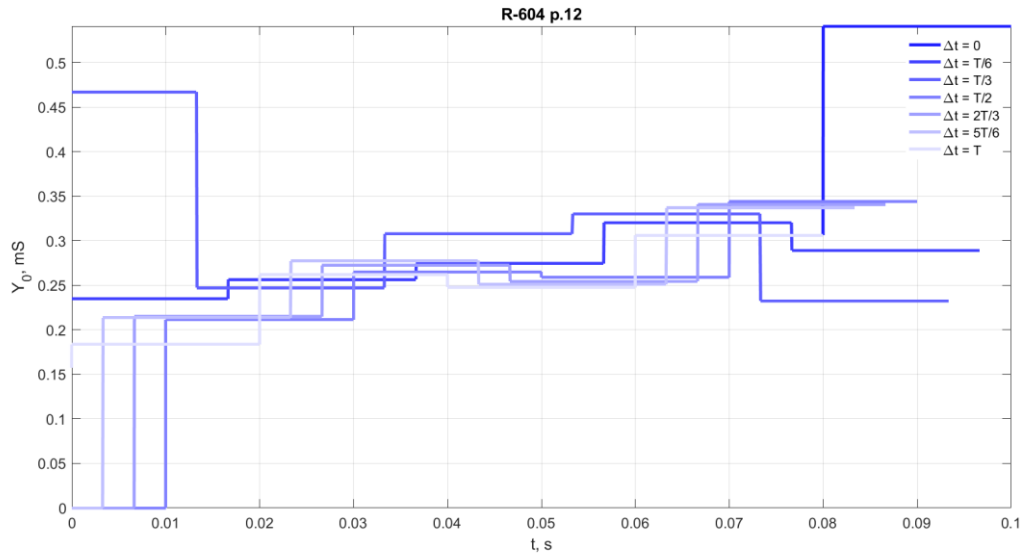
Rys. Z.42. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi  $Y_0$  dla czasu pomiaru  $t = 20$  ms dla pola 15 rozdzielnic H-900 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 3.



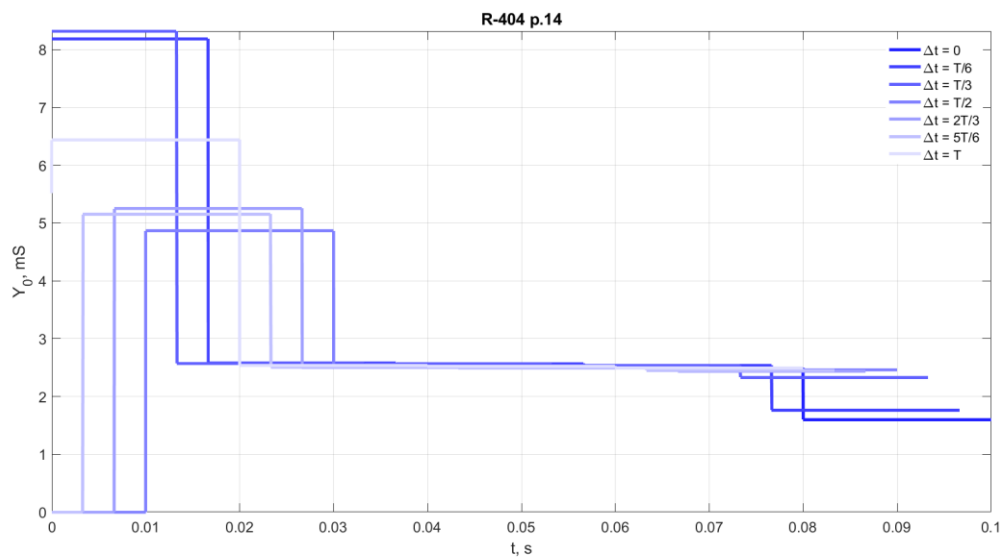
Rys. Z.43. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi  $Y_0$  dla czasu pomiaru  $t = 20$  ms dla pola 14 rozdzielnicy R-404 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 4.



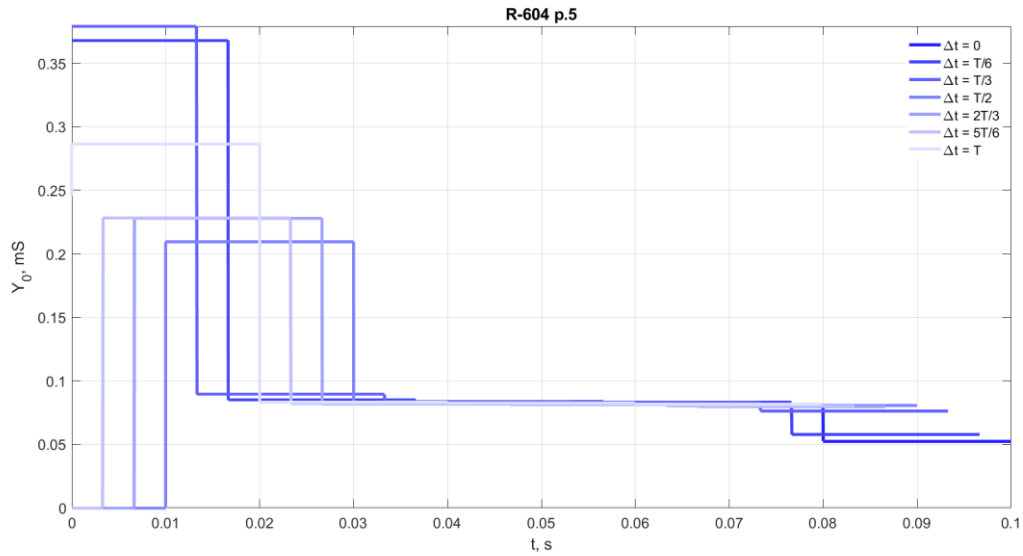
Rys. Z.44. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi  $Y_0$  dla czasu pomiaru  $t = 20$  ms dla pola 5 rozdzielnicy R-604 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 4.



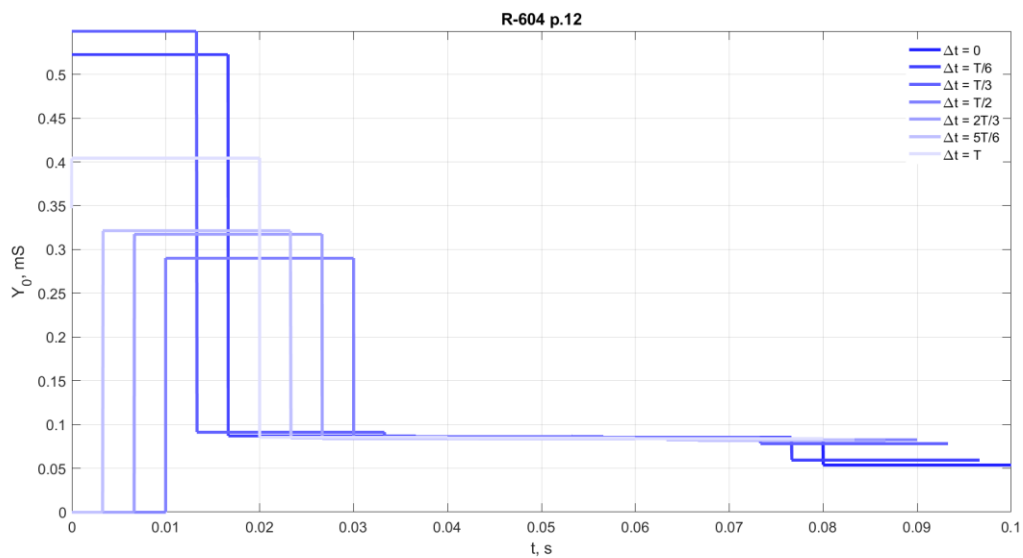
Rys. Z.45. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi  $Y_0$  dla czasu pomiaru  $t = 20$  ms dla pola 12 rozdzielnic R-604 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 4.



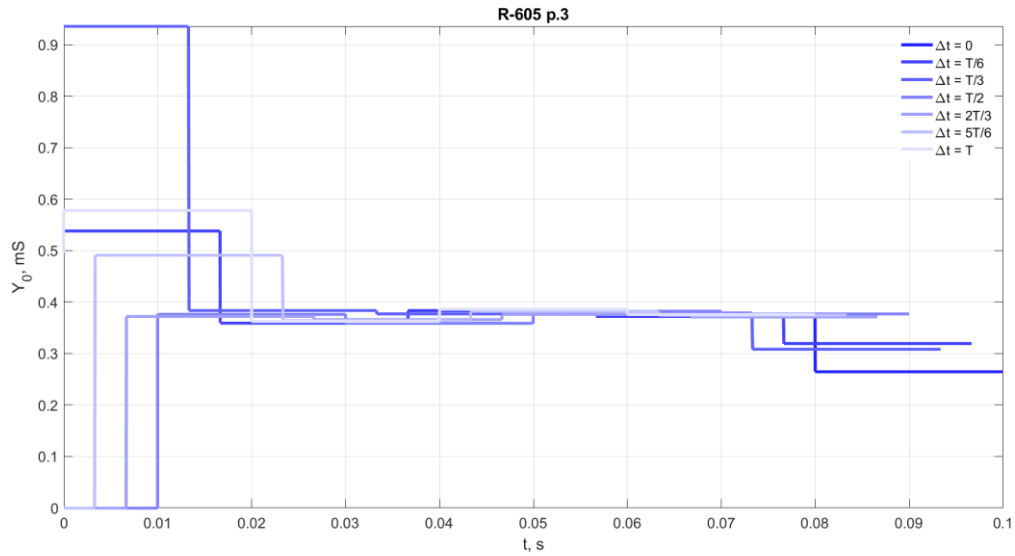
Rys. Z.46. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi  $Y_0$  dla czasu pomiaru  $t = 20$  ms dla pola 14 rozdzielnic R-404 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 5.



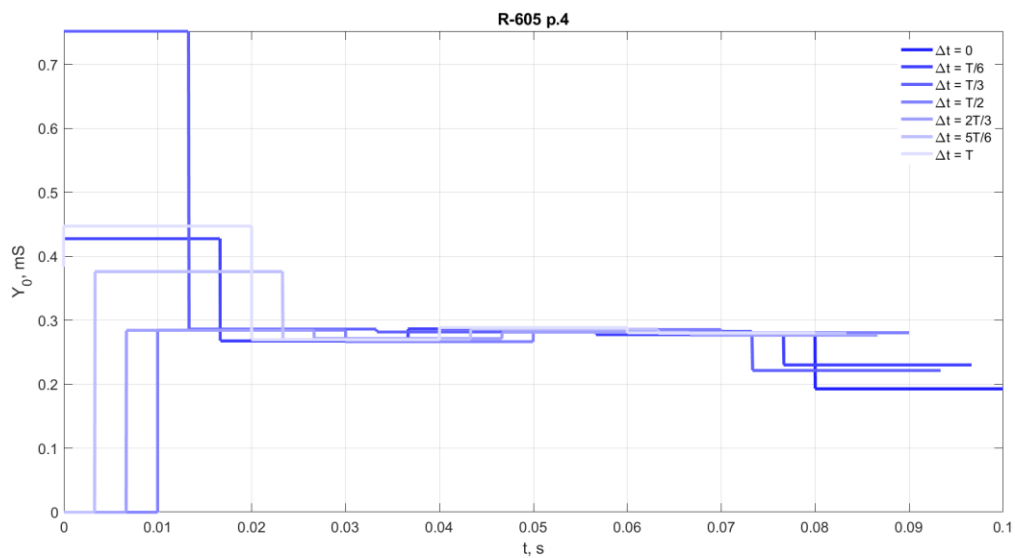
Rys. Z.47. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi  $Y_0$  dla czasu pomiaru  $t = 20$  ms dla pola 5 rozdzielnic R-604 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 5.



Rys. Z.48. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi  $Y_0$  dla czasu pomiaru  $t = 20$  ms dla pola 12 rozdzielnic R-604 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 5.



Rys. Z.49. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi  $Y_0$  dla czasu pomiaru  $t = 20$  ms dla pola 3 rozdzielnicy R-605 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 6.



Rys. Z.50. Charakterystyka przedstawiająca prawdopodobne przebiegi  $Y_0$  dla czasu pomiaru  $t = 20$  ms dla pola 4 rozdzielnicy R-605 dla sytuacji opisanej w przypadku nr 6.

## Streszczenie

Tematyka rozprawy doktorskiej skupia się na analizie wpływu konfiguracji sieci na warunki pracy zabezpieczeń ziemnozwarciowych w sieciach średnich napięć (6 kV) z izolowanym punktem neutralnym stosowanych w polskich kopalniach węgla kamiennego. Celem rozprawy było opracowanie modelu symulacyjnego kopalnianej sieci rozdzielczej SN umożliwiającego analizę złożonych zjawisk ziemnozwarciowych oraz koordynację charakterystyk stosowanych zabezpieczeń ziemnozwarciowych. Zwarcia doziemne są najczęściej występującymi zakłóceniami w kopalnianych sieciach rozdzielczych, pracujących w trudnych warunkach środowiskowych, w sytuacji wysokiego zagrożenia pożarowego i wybuchowego.

W badaniach wybrano środowisko programistyczne ATP-EMTP do symulacji sieci elektroenergetycznych, uwzględniając jego wieloletni rozwój i weryfikację, bogatą literaturę, szeroką funkcjonalność oraz aktywną społeczność użytkowników. Przeprowadzono analizę przydatności tego środowiska do modelowania rozległych sieci elektroenergetycznych, uwzględniając liczne kryteria techniczne.

Następnie opisano i szczegółowo przeanalizowano sześć przypadków zwarć doziemnych zarejestrowanych w kopalnianych sieciach średnich napięć. Podjęto próbę odtworzenia tych przypadków w programie ATP-EMTP, używając modelu linii kablowej  $\Pi$ . Zakres analizy obejmował zarówno zwarcia niskorezystancyjne jak i wysokorezystancyjne. Dla każdego przypadku przedstawiono odpowiedni model oraz zidentyfikowano jego parametry. Przeprowadzona analiza wykazała możliwość stosowania zabezpieczeń admitancyjnych w kopalnianych sieciach rozdzielczych SN, zarówno pod kątem niezawodności jak i selektywności poprzecznej.

W kolejnym etapie przedstawiono zastosowanie różnych kryteriów zabezpieczeń, w tym tradycyjnych zabezpieczeń zerowonapięciowych i zerowoprądowych, oraz nowoczesnych zabezpieczeń admitancyjnych. Określono optymalne wartości czasu całkowania stosowanego w przekaźnikach zabezpieczeniowych dla wyliczania wartości skutecznych wielkości kryterialnych, zapewniające zarówno szybkie wykrycie doziemienia, jak i odporność na odkształcenia przebiegów. Szczególną uwagę

zwrócono na odkształcenia rejestrowanych przebiegów związane ze stanami nieustalonymi oraz z pracą odbiorników dużej mocy generujących wyższe harmoniczne. Zawarte w pracy wnioski podkreślają znaczenie zastosowania różnych kryteriów zabezpieczeń w sieciach z izolowanym punktem neutralnym o średnim napięciu, aby zapewnić selektywność działania i uniknąć niepożądanych wyłączeń. Zaproponowano uzupełnienie aktualnie obowiązujących norm o możliwość stosowania zabezpieczeń admitancyjnych oraz zaproponowano konkretne zasady doboru nastaw dla tych zabezpieczeń. Wskazano również na potrzebę dalszych badań nad wpływem wartości czasu całkowania na wykrywalność krótkotrwałych zwarć doziemnych.



## Abstract

The subject of the dissertation focuses on the analysis of the influence of network layout on the operating conditions of earth fault protection relays in medium voltage (6 kV) networks with an isolated neutral point used in Polish coal mines. The aim of the dissertation was to develop a simulation model of a mine MV distribution network enabling the analysis of complex ground-fault phenomena and the coordination of characteristics of the applied ground-fault protection relay. Ground faults are the most common disturbances in mine distribution networks operating under harsh environmental conditions, in situations of high fire and explosion hazard.

In the study, the ATP-EMTP software environment for power network simulation was selected, taking into account its many years of development and verification, extensive literature, comprehensive functionality and active user community. An analysis of the suitability of this environment for modelling extended distribution power networks was carried out, considering numerous technical requirements.

Six cases of ground faults recorded in coal-mine medium voltage networks were subsequently described and analysed in detail. An attempt was made to reproduce these cases in ATP-EMTP using the  $\Pi$  cable line model. The scope of the analysis included both low-resistance and high-resistance short circuits. For each case, the relevant model was presented and its parameters were identified. The analysis demonstrated the feasibility of zero-sequence admittance protection in mine MV distribution networks, both in terms of reliability and transversal selectivity.

The application of different protection criteria, including traditional zero-sequence voltage and zero-sequence current protection and modern zero-sequence admittance protection, is presented in the next stage. The optimum values of the integration time used in protection relays for the calculation of the rms values of the criterion values, ensuring both rapid detection of ground faults and robustness against waveform distortion, were determined. Particular emphasis was placed on the distortion of the recorded waveforms associated with transients and the operation of high-power loads generating higher harmonics. The conclusions highlight the

importance of using different protection criteria in medium-voltage isolated neutral point networks to ensure operating selectivity and avoid unwanted tripping. It suggests supplementing the current standards with the possibility of using zero-sequence admittance protections and proposes specific principles for the selection of settings for these protection devices. The need for further research into the influence of integration time value on the detection of intermittent ground faults was also pointed out.