

INSTYTUT ENERGETYKI W WARSZAWIE  
ZAKŁAD WYSOKICH NAPIĘĆ

rozprawa doktorska

Marcin Maciej Mackiewicz

**ANALIZA ROZPŁYWÓW PRZEPIĘĆ W SIECIACH  
ELEKTROENERGETYCZNYCH W ASPEKCIE WYTRZYMAŁOŚCI  
UKŁADÓW IZOLACYJNYCH PRZY NIESTANDARDOWYCH  
NARAŻENIACH PRZEPIĘCIOWYCH**

PROMOTOR

prof. nzw. dr hab. inż. January Lech Mikulski

Warszawa 2017

## Spis treści

<b>1. Wprowadzenie</b>	Str. 4
<b>2. Narażenia napowietrznej izolacji wysokonapięciowej</b>	Str. 7
<b>2.1. Parametry rzeczywistych narażeń piorunowych</b>	Str. 7
2.1.1. Parametry przepięcia po przeskoku odwrotnym na izolacji słupa	Str. 9
2.1.2. Parametry napięciowe przepięć indukowanych	Str.15
2.1.3. Uderzenie pioruna w przewód roboczy linii	Str.18
<b>2.2. Układy izolacyjne badane w laboratoriach</b>	Str.21
<b>2.3. Badania izolacji wysokonapięciowej udarami o nieznormalizowanym kształcie innym niż standardowy 1,2/50 <math>\mu</math>s</b>	Str.25
<b>3. Podsumowanie przeglądu literatury</b>	Str.27
<b>4. Teza pracy</b>	Str.29
<b>5. Metodyka badań izolacji niestandardowymi udarami piorunowymi</b>	Str.30
5.1. Układ probierczo – pomiarowy	Str.33
5.2. Wytwarzanie udarów wysokiego napięcia	Str.35
5.3. Pomiaru wysokiego napięcia	Str.36
5.4. Wytwarzanie udarów niestandardowych innych niż normalizowane 1,2/50 $\mu$ s	Str.37
5.5. Analiza statystyczna wyników badań	Str.39
5.6. Szacowanie niepewności – analiza niepewności pomiarów	Str.41
<b>6. Podsumowanie analizy statystycznej wyników badań</b>	Str.46
<b>7. Obiekty badań</b>	Str.47
<b>7.1. Opis poszczególnych obiektów badanych w laboratorium IEn.</b>	Str.47
<b>7.1.1. Wyniki badań obiektów na napięcia 110 – 220 kV</b>	Str.48
7.1.1.1. Odłącznik stacyjny 145 kV	Str.48
7.1.1.2. Kolumna wsporcza izolatorów porcelanowych 220 kV	Str.51
7.1.1.3. Odłącznik stacyjny 220 kV	Str.54
7.1.1.4. Podwójny łańcuch przelotowy 220 kV	Str.57
<b>7.1.2. Wyniki badań obiektów na napięcia 400 kV</b>	Str.60
7.1.2.1. Odłącznik stacyjny 400 kV	Str.60
7.1.2.2. Łańcuch przelotowy pojedynczy 400 kV	Str.65
7.1.2.3. Łańcuch przelotowy podwójny 400 kV	Str.68
<b>7.1.3. Wyniki badań obiektów na napięcia niestandardowe</b>	Str.71

7.1.3.1. Kolumna wsporcza izolatorów porcelanowych o poziomie izolacji 1300 kV	Str.71
7.1.3.2. Kolumna wsporcza izolatorów porcelanowych na napięciu 500 kV	Str.74
7.1.3.3. Odłącznik stacyjny 500 kV	Str.77
<b>8. Podsumowanie badań rzeczywistych obiektów</b>	Str.80
<b>9. Badania symulacyjne programem EMTP – RV</b>	Str.81
<b>9.1. Wprowadzenie</b>	Str.81
9.1.1. Podstawowe modele używane w symulacjach	Str.81
<b>9.2. Dodatkowe modele służące do odwzorowania badanej stacji WN</b>	Str.83
<b>9.3. Badania symulacyjne programem EMTP – RV</b>	Str.101
9.3.1. Parametry symulowanego fragmentu stacji 110 – 400 kV	Str.101
<b>9.4. Wyniki badań symulacyjnych</b>	Str.105
9.4.1. Uderzenie pioruna w przewody odgromowe linii, w pierwszy słup przed stacją	Str.105
9.4.2. Uderzenie pioruna bezpośrednio w przewody robocze linii	Str.115
9.4.3. Uderzenie pioruna w otoczenie stacji	Str.122
<b>10. Podsumowanie badań symulacyjnych</b>	Str.126
<b>11. Przewidywane zastosowanie uzyskanych wyników badań w ochronie układów izolacyjnych</b>	Str.128
<b>12. Wnioski końcowe</b>	Str.130
<b>13. Wykaz symboli użytych w pracy</b>	Str.134
<b>14. Literatura</b>	Str.136
<b>ZAŁĄCZNIK A ALTERNATYWNE MODELOWANIE</b>	Str.146
<b>ZAŁĄCZNIK B ZAREJSTROWANE PRZEBIEGI UDARÓW NIESTANDARDOWYCH W LABORATORIUM WYSOKICH NAPIĘĆ</b>	Str.150

## 1. Wprowadzenie

Badania nad wytrzymałością izolacji linii i stacji w technice wysokich napięć stanowią bardzo istotną jej część. Najczęściej wymienianymi powodami podejmowania kolejnych prób badań poszczególnych obiektów stacyjno – liniowych jest brak jasno zdefiniowanej odpowiedzi jaki jest rzeczywisty kształt czasowo – napięciowy narażenia piorunowego. W celu ujednoczenia wyników badań tych samych obiektów w różnych laboratoriach udar znormalizowano do kształtu  $T_1 = 1,2 \mu s$  czasu trwania czoła i  $T_2 = 50 \mu s$  czasu trwania do półszczytu udaru [1]. Tak określony udar zawarty jest w metodzie deterministycznej koordynacji izolacji, która przedstawia różnice między napięciami obniżonymi na ogranicznikach stosowanych w ochronie, a napięciami wytrzymywanymi przy udarach znormalizowanych 1,2/50  $\mu s$ . W uproszczonym pojęciu koordynacji izolacji, nie uwzględnia ona możliwości wystąpienia innego udaru niż standardowy 1,2/50  $\mu s$  [101]. Przyjęty jednak margines koordynacyjny, którego rząd szacuje się na 30% może, jak wykazuje analiza literaturowa [91,92,93,89], być niewystarczający, w przypadku wystąpienia wielu niekorzystnych zjawisk obniżenia wytrzymałości izolacji w tym samym momencie. Najistotniejsze z nich to :

- obniżenie wytrzymałości izolacji na skutek wydłużenia czasu trwania czoła udaru  $T_1$ ,
- zwiększenie przepięcia poprzez przepływ prądu pioruna na połączeniach stacyjnych i linii.

Poznanie zjawisk odpowiedzialnych za istotę wytrzymałości elektrycznej jest konieczne, jeżeli dokonywana analiza koordynacji izolacji wysokich napięć ma być właściwa. W szczególności pojęcie to, nabiera znaczenia w dobie optymalizacji kosztów projektowania stacji i linii. W związku z lepszym poznaniem zjawisk, obniżania poziomów izolacji, istnieje uzasadniona potrzeba pogłębienia badań nad wytrzymałością izolacji przy niestandardowych udarach probierczych, zbliżonych do rzeczywistych narażeń piorunowych, ze szczególnym uwzględnieniem nowoczesnej techniki probierczo – pomiarowej oraz aktualnie stosowanych metod statystycznych mających na celu właściwe określenie wiarygodności wyników badań.

Technika wysokich napięć zawiera w swoich podstawowych założeniach wytwarzanie i pomiar udarów laboratoryjnych. W dziedzinie tej brak jest jednak informacji o bezpośrednich pomiarach napięć rzeczywistego wyładowania piorunowego. Wykonanie takiego pomiaru jest technicznie bardzo trudne, ponieważ nie można praktycznie określić, jakiej wartości napięcia możemy się spodziewać.

Temat większości publikacji dotyczących szacowania parametrów napięciowych rzeczywistego pioruna, sprowadza się do metod:

- symulacji napięcia indukowanego w linii w sytuacji uderzenia pioruna w pobliże stacji,
- pomiarów fal przepięciowych w stacjach w przypadku uderzenia pioruna w przewód odgromowy linii wchodzącej do stacji oraz rzadkiego uderzenia pioruna w przewód roboczy linii [72].

Tylko nieliczne prace publikowane w latach 1950 – 2010 [2,3,4,5] przedstawiają w sposób istotny pomiary napięć indukowanych w liniach.

Pewnego rodzaju alternatywą badań zjawisk przepięciowych, w szczególności obserwacji rozplądów prądów i napięć w stacji, są szeroko pojęte metody numeryczne. Są to prace zmierzające do stworzenia uniwersalnego modelu symulacyjnego, pozwalającego na szczegółową obserwację fal przepięciowych i ich późniejszą analizę.

Niniejsza praca poświęcona jest problematyce wytrzymałości izolacji przy zastosowaniu niestandardowych udarów probierczych, zbliżonych do rzeczywistych narażeń piorunowych. Treść pracy podzielono na kilka części.

W pierwszej części (rozdział 2 i 3) szczególną uwagę poświęcono na przegląd literatury z zakresu parametrów prądu i napięcia pioruna rzeczywistego. Dane te mają decydujące znaczenie dla przeprowadzanych obliczeń i symulacji komputerowych. Omówiono metody obserwacji przepięć indukowanych w stacji i linii. Przedstawiono również przykładowe charakterystyki pomiarowe ze szczególnym uwzględnieniem czasu trwania czoła udaru napięciowego.

W kolejnych częściach pracy (rozdział 5 i 6) omówiono stosowany układ probierczo – pomiarowy, którym dokonywano badań. Wyniki przeprowadzanych prób podlegały również analizie statystycznej mającej na celu właściwie określenie niepewności pomiarowej. Przedstawiono, także obiekty badań linii i stacji 110 – 500 kV takie jak:

- odłączniki stacyjne 110 – 500 kV,
- łańcuchy izolatorów w układach odciągowych oraz przelotowych, jedno rzędowych jak i dwurzędowych dla napięć od 110 – 400 kV, aktualnie stosowanych w energetyce polskiej oraz zagranicznej,
- izolatory wsporcze na napięcia zróżnicowane 220 kV i wyższe.

Badane układy łańcuchów izolatorów składały się z izolatorów porcelanowych, kompozytowych jak i kołpakowych szklanych z pełnym osprzętem łuko ochronnym.

Siódma część (rozdział 7) przedstawia wyniki badań układów izolacyjnych linii i stacji 110 – 400 kV przy zastosowaniu niestandardowych uderzeń piorunowych innych niż  $1,2/50 \mu\text{s}$ . Przedstawiono również wnioski dotyczące analizy wytrzymałości izolacji w aspekcie uzyskanych wyników badań oraz obserwacji symulacyjnych w programie EMTP – RV.

Dziewiąta część pracy (rozdział 9) poświęcona jest metodom numerycznym. Do symulacji wykorzystano program EMTP – RV, który swoim interfejsem umożliwia dowolną konfigurację metod badawczych. Pozwala, również na tworzenie modeli stacji wysokich napięć z zaimplementowanymi pod-modelami dostępnymi w programie. W przedstawianej pracy zaprojektowano fragment stacji 400 kV, na podstawie danych technicznych [6]. Sporą część poświęcono na omówienie poszczególnych modeli np. słupa, połączeń stacji czy modelu przeskoaku odwrotnego.

## 2. Narazenia napowietrznej izolacji wysoko napięciowej

### 2.1. Parametry rzeczywistych narażeń piorunowych

W obszarach, w których występuje zagrożenie uderzeniem pioruna najbardziej zagrożone są linie o napięciach 110 – 400 kV i wyższych, wynika z wysokiej ich konstrukcji oraz długości linii. Ilość uderzeń pioruna w linię lub słup jest celem obserwacji wielu ośrodków badawczych. Jedną z ostatnich publikacji prezentujących obserwację z lat 2000 – 2007 [7], przedstawia liczbę przeskoków na izolacji linii 220 kV oraz 500 kV. W ciągu tego okresu wystąpiły aż 425 przeskoki na 10 słupach.

Istotnym również zagadnieniem są rejestracje uderzeń pioruna w wysokie konstrukcje wież telewizyjnych [8,9] lub też naturalne wzniesienia [10].

Podstawową metodą określania parametrów prądu pioruna są to pomiary bezpośrednie. Zagadnienie jest szeroko omówione w przytoczonej literaturze [10,11,12,13,14,15], szczególnie zagranicznej.

W niniejszej pracy przedstawiono przegląd literatury z zakresu parametrów prądowych pioruna. Z literatury z lat 1970 do 2010, wynika, że najbardziej aktywne ośrodki badań nad prądem pioruna znajdują się w Chinach i Japonii. Prezentowane wartości maksymalnych amplitud wahają się od 20 kA do 250 kA [16].

Wartości te bardzo często porównuje się z pomiarami dokonywanymi na górze Mont Salvatore przez Bergera [10].

Pomiary na wysokich konstrukcjach dokonywane przez autorów pracy [9] przedstawiają wartości prądów oraz ich stromości, których wartości notowali na poziomie 50 kA, a stromości od 3,8 kA/ $\mu$ s do 62,78 kA/ $\mu$ s. Ci sami Autorzy artykułu [9] dokonywali pomiarów na wysokich konstrukcjach na Florydzie. Uzyskane wyniki poddano analizie i roku 2008 przedstawiają oni analizę matematyczną zarejestrowanych przebiegów prądowych pioruna [8].

Więcej informacji o wartościach prądów pioruna wraz z ich prawdopodobieństwem występowania do linii w latach, wskazuje autor Udo T. IEEE Members (Japonia), gdzie wartości prądu pioruna rejestruje na poziomie do 60 kA. Autor pracy wskazuje, że są to wartości, które występują najczęściej.

Dla przykładu w linii o nazwie Kawane Sh. o długości 126,7 km zanotowano aż 14 uderzeń, w ciągu roku, pioruna o wartości prądu 70 kA [5].

Prezentowane wyniki pomiarów prądów pioruna, począwszy od historycznie najstarszych po najnowsze, przedstawiają obraz jakim narażeniom poddawane są rzeczywiste obiekty elektroenergetyczne, w tym instalacje odgromowe. Omawiane rzeczywiste parametry narażeń piorunowych w szczególności wartości prądów pioruna, przedstawiane są w dokumentach [92,93,94,95], które są podstawą do oceny zagrożeń piorunowych w budownictwie i nie tylko.

Przedstawiony przegląd literatury z zakresu rzeczywistych narażeń piorunowych z którego wynika, że rejestrowane parametry pioruna:

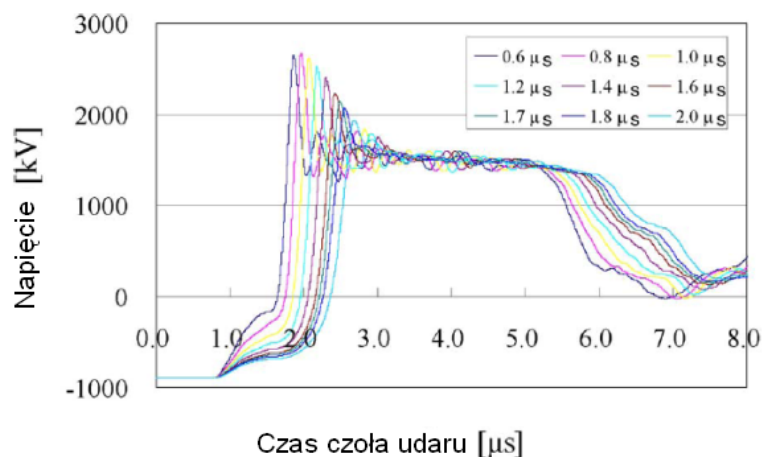
- metodą pomiarów bezpośrednich (pomiar prądu pioruna),
- metodą pomiarów bezpośrednich przepięć w liniach i stacjach w sytuacji przeskoku odwrotnego (dotyczy to szczególnie parametrów napięciowych),
- metodą pomiarów bezpośrednich składowych pola elektromagnetycznego w pobliżu miejsca uderzenia pioruna (dzięki którym szacuje się parametry czasowe prądu oraz napięcia pioruna),

wykazują się niejednorodnością w zakresie czasów trwania czoła przepięcia  $T_1$ . Dotyczy to charakterystyk napięciowych jak i prądowych. Najczęstsze wartości czasów trwania czoła udaru mieszczą się od  $T_1 = 2 \mu\text{s}$  do  $T_1 = 10 \mu\text{s}$  [22]. Przegląd literatury wskazuje również na wpływ czasu trwania czoła  $T_1$  na wytrzymałość izolacji linii i stacji wysokich napięć. Badania przeprowadzone przez Autorów prac [34,30,4,29] oraz [28] potwierdzają obniżenie wytrzymałości, które można oszacować do 20% wartości znamionowej wytrzymałości.



### 2.1.1. Parametry przebiegu po przeskoku odwrotnym na izolacji słupa

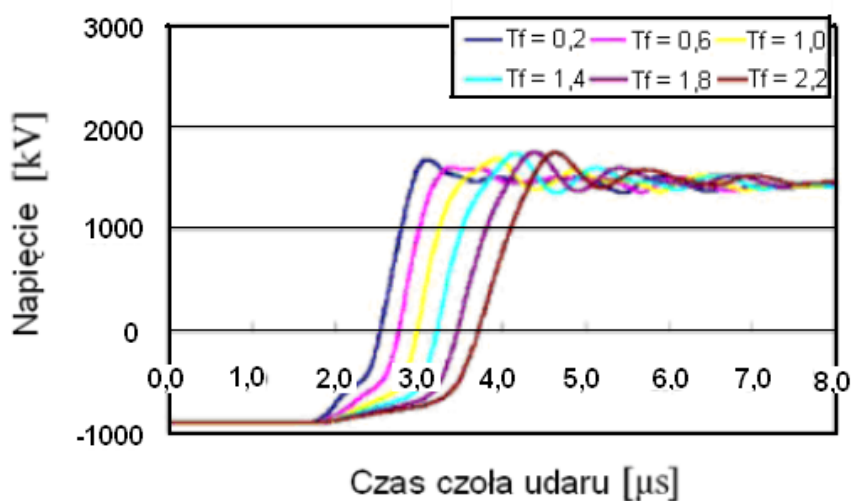
Źródłem informacji o czasie trwania czoła pioruna  $T_1$ , są sytuacje uderzenia pioruna w przewód odgromowy linii wysokiego napięcia i wystąpienia przeskoku odwrotnego na izolacji słupa. Przykładowe dane zawierają publikacje [20,21,22,23]. Autorzy tych prac opierają się głównie na symulacjach numerycznych. Podobne analizy, programem EMTP – RV, prowadzone są dla przypadku rzadkiego uderzenia pioruna bezpośrednio w przewód roboczy linii [72]. W większości przypadków analizy symulacyjnej wartości maksymalnych amplitud prądu pioruna zaczerpnięto z pozycji przykładowych prac [24,25,10]. Do obliczeń symulacyjnych przyjmowano wartości  $I_{\max} = 200$  kA oraz czas trwania czoła udaru prądowego  $T_1 = 1,7$   $\mu$ s. Analizowany był fragment linii oraz stacja wysokich napięć 400 kV z zainstalowanymi ogranicznikami przepięć oraz modelami izolacji stacji. Ograniczniki przyjęto jak dla prądu pioruna  $I_{\max} = 20$  kA oraz napięcia obniżonego  $U_{zno} = 1620$  kV, dane zaczerpnięto z pozycji literaturowej [66]. Na rysunku 1 przedstawione są przebiegi napięciowe na pierwszym terminalu stacji GIS (Gas Insulating Switchgear). Autorzy prac [17,20] wskazują, że przebieg ten jest zarejestrowany w sytuacji przeskoku odwrotnego na izolacji słupa przed stacją. Zwracają uwagę na informację, że maksymalne wartości czasów trwania czoła wynoszą  $T_1 = 2.0$   $\mu$ s, a wynika to z wartości czasów trwania czoła prądu pioruna oraz wartości rezystancji uziemienia słupa. Na uwagę zasługuje informacja wynikająca z analizy wpływu działania ograniczników przepięć na kształt czoła przepięcia w stacji, których wpływ Autorzy oceniają na  $T_1 = 0,2$   $\mu$ s.



Rys. 1. Charakterystyka przepięć na pierwszym terminalu stacji GIS [20].

Podobne przebiegi prezentowane są w przedstawianej pracy z tą różnicą, że fragment stacji wysokiego napięcia jest zamodelowany poprzez poszczególne elementy wynikające z rzeczywistego projektu [6] oraz z głębokiej analizy parametrów elektrycznych struktury słupa, na którym następuje przeskok odwrotny [26].

Autorzy pracy [20] analizują również wytrzymałość izolacji przepustów transformatora, którego pojemność przyjęli jako  $C_{\text{trafo}} = 8000 \text{ pF}$ . Przebiegi napięciowe przedstawione na rysunku 2 pokazują przebiegi symulowane w sytuacji przeskoku odwrotnego na słupie przed pierwszą bramką GIS stacji.

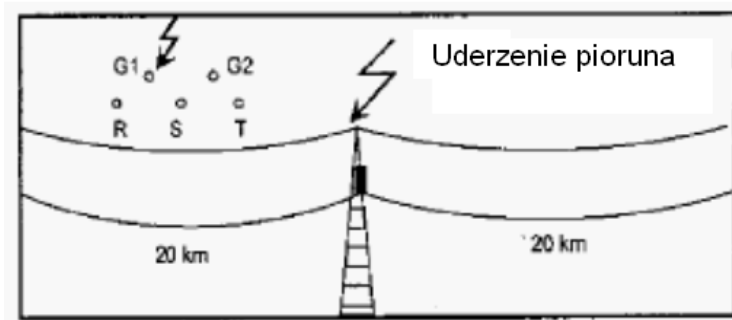


Rys. 2. Charakterystyka przebiegów napięciowych przepięć na przepustach trafo [20].

Wartości czasów trwania czoła szacuje się na  $T_1 = 2,2 \mu\text{s}$ . Przebiegi takie, ściśle powiązane z koncepcją koordynacji izolacji stacji, mają istotne znaczenie z punktu właściwej oceny dobru środków ochrony przeciw-przebiegiowej linii i stacji.

Tematem większości przedstawianych publikacji z zakresu analizy przepięć w sytuacji przeskoku odwrotnego, jest analiza samego zjawiska przeskoku odwrotnego, jak i zagrożeń wynikających z dalszej transformacji przepięcia w stacji.

Tylko niektóre prace sprzed 2000 roku [22], poruszają w sposób kompleksowy temat symulacji przeskoku odwrotnego. W większości przypadków Autorzy skupiają się na pomiarze napięcia na izolacji słupa po przeskoku odwrotnym. Prezentowany przykładowy układ symulacyjny pokazany jest na rysunku 3. Ilustracja pokazuje w jakie miejsce uderza piorun (przewód odgromowy).



Rys. 3. Symulacja modelu przeskoku odwrotnego, w sytuacji uderzenia pioruna w przewód odgromowy linii [22].

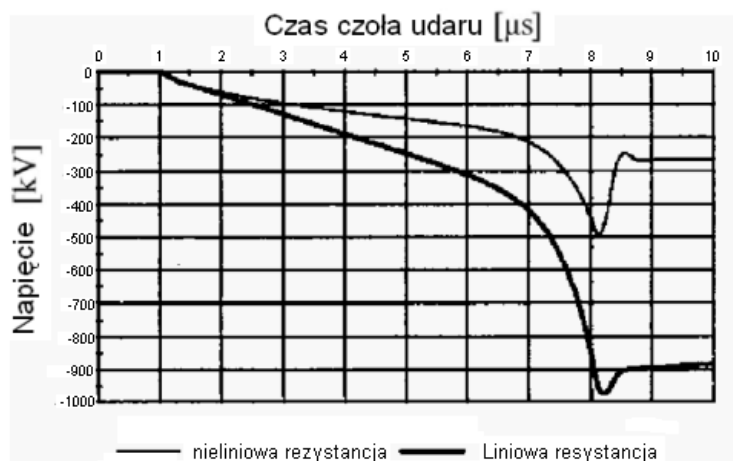
Przedstawiony proces symulacji opiera się na sytuacji pojedynczego słupa oraz fragmentu linii z obu stron. Piorun uderza w przewód odgromowy, a następnie występuje przeskok odwrotny na izolacji słupa. Parametry pioruna jakie zostały przyjęte w obliczeniach przedstawione są w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry prądu pioruna przyjęte do symulacji [22].

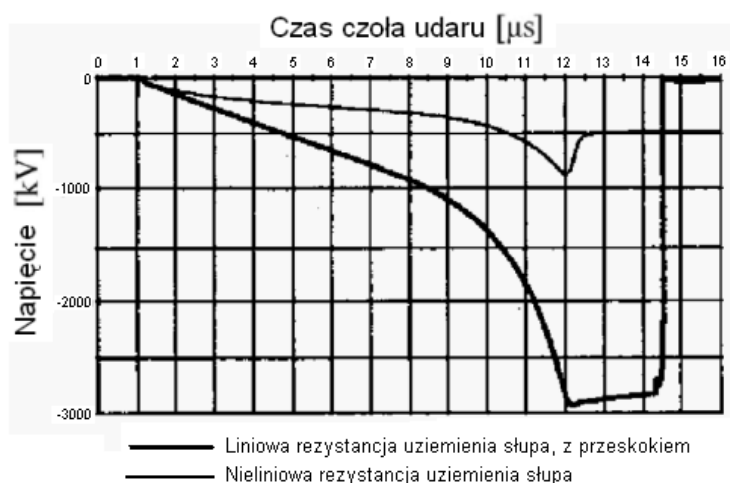
Kształt charakterystyki	Maksymalna wartość prądu [kA]	Czas czoła udaru [ $\mu$ s]	Czas trwania do półszczytu udaru [ $\mu$ s]	Maksymalna stromość udaru [kA/ $\mu$ s]
Wklęsły	-31	4,198	91,537	27,562
	-100	6,794	91,537	42,812
Podwójnie ekspotencjalny	-31	4,198	91,537	---
	-100	6,794	91,537	---
Trójkątny	-31	1,125	91,537	27,562
	-100	2,336	91,537	42,812

Zarejestrowane przebiegi symulacyjne przedstawione są na rysunkach 4 oraz 5.

Pierwszy przypadek pokazuje różnice w przyjętych wartościach rezystancji uziemienia słupa  $R = 50 \Omega$ , dla rezystancji liniowej i nieliniowej. Wartości mierzone prądu pioruna  $I_{\max} = -31 \text{ kA}$  oraz  $I_{\max} = 100 \text{ kA}$ .



Rys. 4. Przebiegi symulacyjne napięć na izolacji słupa dla prądu  $I_{\max} = -31$  kA [22].



Rys. 5. Przebiegi symulacyjne napięć na izolacji słupa dla prądu  $I_{\max} = -100$  kA [22].

Analiza przedstawianych przebiegów napięciowych w sytuacji różnej wartości rezystancji uziemienia słupa wskazuje jedynie na różnice w maksymalnej wartości napięcia, przy którym występuje przeskok. Czas czoła udaru szacuje się na  $T_1 = 10 \mu\text{s}$ . Uwzględniając potrzebę analizy rezystancji uziemienia słupa autor niniejszej pracy przeprowadził wiele symulacji mających na celu porównanie wyników symulacyjnych modelu fragmentu stacji [6], z wynikami publikowanymi przez światowe ośrodki naukowe.

Rezystancja uziemienia jak wynika z praw fizyki oraz danych literaturowych [21] zmienia swoją wartość pod wpływem przepływającego prądu pioruna. Istnienie zagadnienia charakteru zmian rezystancji i jej wpływu na kształt napięciowy przepięcia po przeskoku odwrotnym na słupie WN przedstawia wielu Autorów. Na uwagę zasługuje praca [21], w której dokonuje się obliczeń matematycznych

mających na celu uzyskanie funkcji matematycznej zmian rezystywności uziemienia słupa. Do obliczeń tych przyjęto standardowe wzory matematyczne opisujące charakter funkcji prądowej pioruna [27]. Poprzez symulacje w programie EMPT- RV, badań przeskoku odwrotnego, badano również wytrzymałości przerw izolacyjnych, które można podzielić na kilka grup. W pracach [od 76 do 82] Autorzy omawiają charakter zmian wytrzymałości przerwy iskiernikowej przy różnych czasach trwania czoła udaru  $T_1$ . Publikacje z tego zakresu przedstawiają jedynie zakres zmian wytrzymałości przy zmiennym czasie trwania czoła udaru. Najczęściej wartości te mieszczą się w krótkich czasach, rzędu mikrosekundy lub jej ułamku. Obszary te stanowią jedynie informację potwierdzającą, iż czym krótszy czas trwania czoła udaru  $T_1$ , tym wyższa jest wytrzymałość badanej izolacji. Wynika to, z samego procesu fizycznego przeskoku. Przesłanką empiryczną, potwierdzającą sensowność badań rzeczywistych układów izolacyjnych jest przedstawiony przegląd literatury w niniejszej pracy. Jednakże wielu Autorów [83,84] ponawia badania nad poszczególnymi układami izolacyjnymi w aspekcie badań udarowych o czasie trwania czoła  $T_1 = 1,2 \mu s$  i obserwacji czasu do ucięcia. Ciekawymi z punktu widzenia techniki wykonywanych badań, są publikacje [85,86], w których Autorzy prowadzą obserwacje wytrzymałości izolacji na poszczególnych słupach wysokiego napięcia [88]. W literaturze można spotkać również analizy przeskoków na słupach drewnianych [87]. Badania wytrzymałości izolacji wykazują jednak, że nie zawsze czasy do ucięcia następują na szczycie udaru. Często znajdują się na jego grzbiecie lub w pobliżu szczytu. W związku z tym nie można przyjąć analogii między informacją o czasach do ucięcia z czasami trwania czoła udaru  $T_1$ . Można zakładać jedynie podobieństwo ich charakterystyk napięciowych.

W literaturze można odnaleźć również bardzo rzadkie rejestracje uderzeń pioruna w metalowe konstrukcje słupów [105,72] w szczególności rejestracji fotograficznej (rysunki 6,7 oraz 14).



Rys. 6. Uderzenie pioruna w przewody odgromowe linii [105].

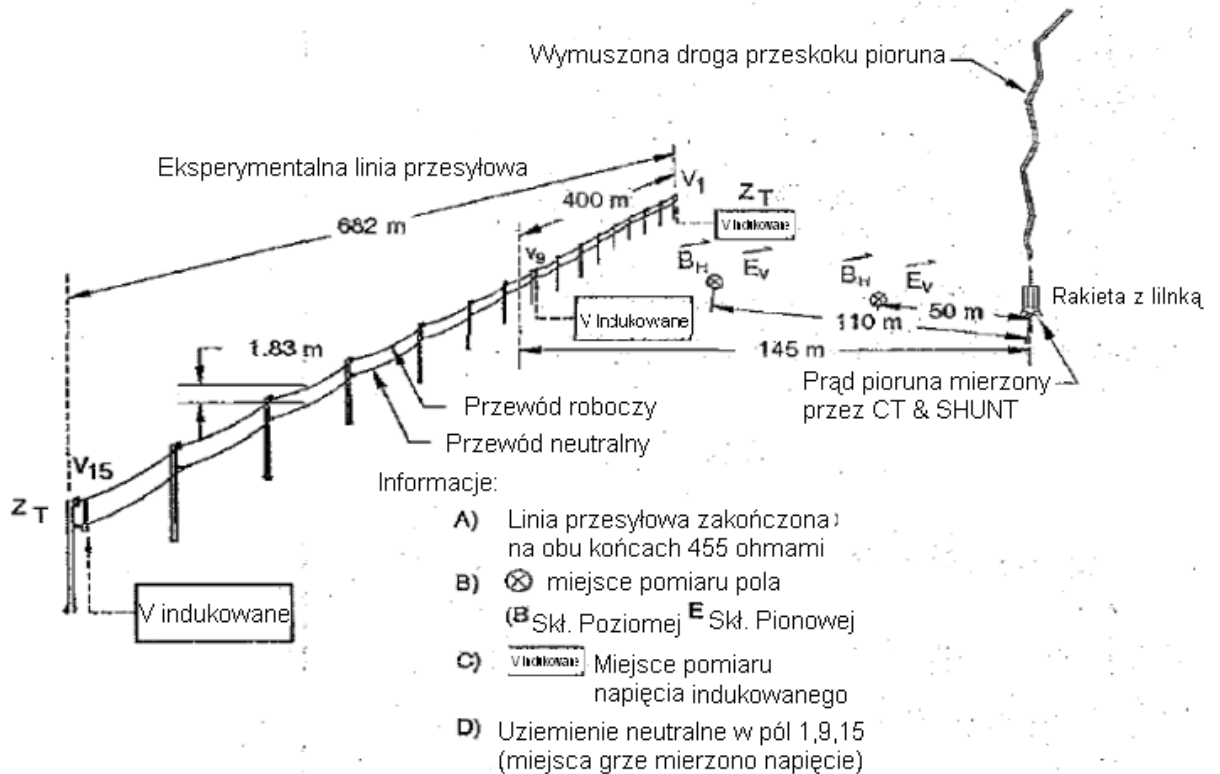


Rys. 7. Zarejestrowany przeskok odwrotny na izolacji słupa [105].

Interesującą z punktu widzenia autora literaturą omawiającą przykładowe uderzenie pioruna w słup wysokiego napięcia, gdzie w następstwie występuje przeskok odwrotny, jest pozycja [105]. Autorzy pracy dokonują badań symulacyjnych przepięć w każdej z faz narażonej linii. Na rysunkach 6 oraz 7 przedstawione są zdjęcia uderzenia pioruna w przewody odgromowe oraz przeskok odwrotny na izolacji słupa.

## 2.1.2. Parametry napięciowe przepięć indukowanych

W przypadku rejestrowanych napięć indukowanych w liniach lub stacjach, w sytuacji uderzeń pioruna w pobliże stacji, na uwagę zasługuje literatura [3,17,18,19]. Autorzy tych publikacji dokonują symulacji oraz pomiarów przebiegów napięć w liniach i stacjach w taki sposób, że piorun jest ściągany poprzez wystrzeloną rakietę z cienką linką uziemioną w pobliże linii (rysunek 8).



Rys.8. Układ pomiarowy wymuszonego uderzenia pioruna w pobliżu linii [3].

Na podstawie analizy przestrzennej miejsca uderzenia oraz analizy wartości rezystancji uziemienia i impedancji linii, Autorzy pracy [3] dokonują symulacji napięć indukowanych. Rysunek 9 przedstawia ich przebieg na końcu linii oraz w jej środku (rysunek 10).

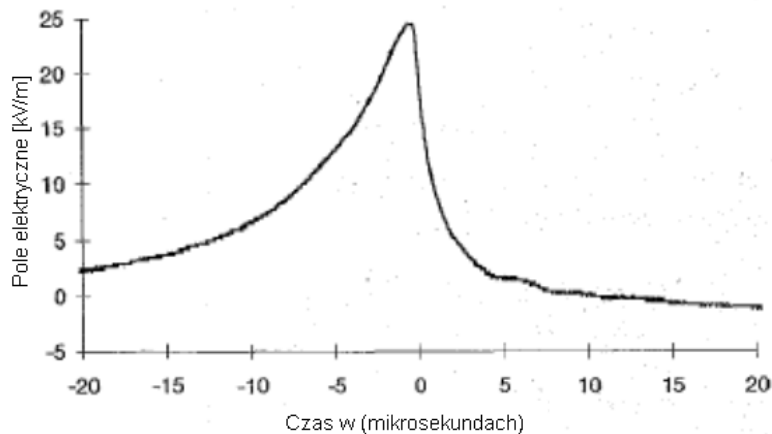


Rys.9. Napięcie indukowane na końcu linii.



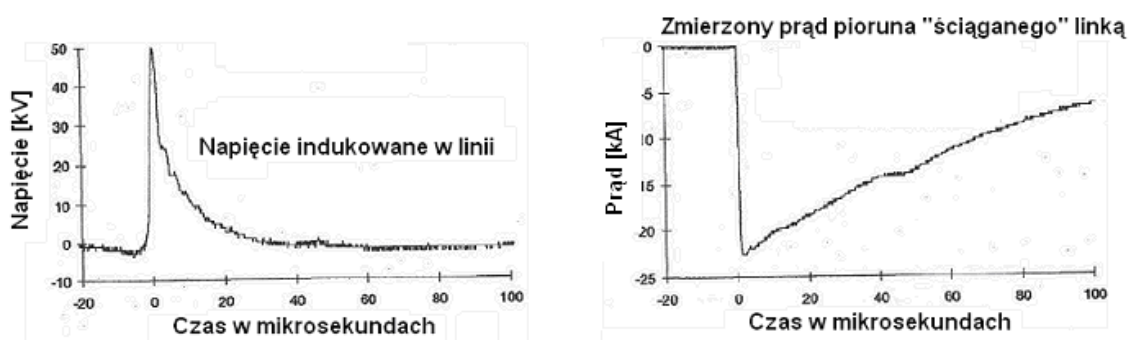
Rys.10. Napięcie indukowane na środku linii.

Autorzy szacowali, że indukowane napięcia w liniach są zdecydowanie większe niż wynika to z obliczeń symulacyjnych, co może powodować zwiększenie narażenia badanej izolacji. Dokonywano również pomiarów składowych pionowych pola elektrycznego w odległości 100 m od „ściąganego” pioruna. Rejestrowany przebieg pokazano na rysunku 11.



Rys.11. Charakterystyka składowej pionowej pola elektrycznego w przypadku uderzenia pioruna w pobliże linii [3].

Autorzy przedstawiają również ciekawe porównanie charakterystyk: napięcia indukowanego w linii oraz prądu pioruna ściąganego przez linkę. Porównanie takie przedstawia rysunek 12.



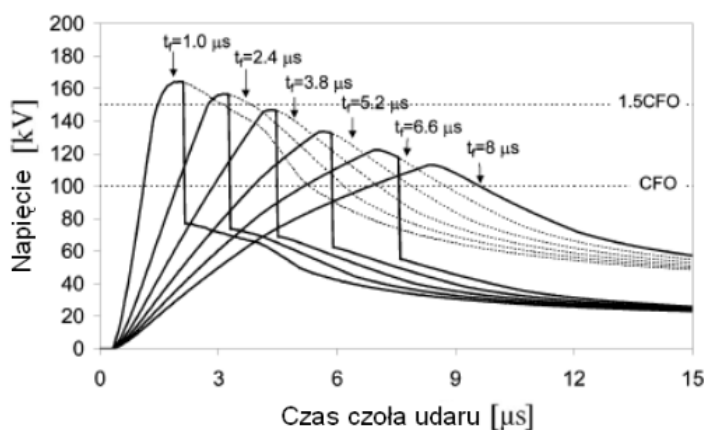
Rys.12. Typowe przebiegi napięcia indukowanego w linii oraz odpowiadająca charakterystyka prądu ściąganego pioruna [3].

Wielu Autorów, na przykład prac [3,19] szacowało, że przedstawione przebiegi rzeczywistych narażeń przepięciowych, na podstawie pomiarów składowej pionowej pola elektrycznego oraz pomiarów napięć indukowanych, mieszczą się w granicach



czasu trwania czoła udaru napięciowego od  $T_1 = 2 \mu\text{s}$  do  $T_1 = 3 \mu\text{s}$ . Natomiast wartości napięć indukowanych są zmienne w zależności od parametrów linii, jej długości oraz rezystywności gruntu miejsca wymuszonego uderzenia pioruna. Bardzo interesującą pozycją jest praca [53], w której przedstawiono przebiegi napięć indukowanych w linii oraz ich matematyczną interpretację.

Przedstawiona metoda szacowania kształtu napięciowego pioruna jest nadal modyfikowana i testowana. W grudniu 2010 grupa brazylijskich naukowców przeprowadziła podobny eksperyment mający na celu dokładniejszą ocenę czasów trwania czoła przepięcia  $T_1$  w linii, w sytuacji wymuszonego uderzenia pioruna i składowych elektrycznych pola w pobliżu miejsca uderzenia. W publikacji [17] zamieszczono ciekawą charakterystykę napięć indukowanych, rejestrowanych w środku linii, rysunek 13 przedstawia te przebiegi. Zmierzony parametr "ściąganego" pioruna to  $I_{\text{max}} = 31,1 \text{ kA}$ .



Rys. 13. Charakterystyka napięć indukowanych w środku linii wysokiego napięcia [17].

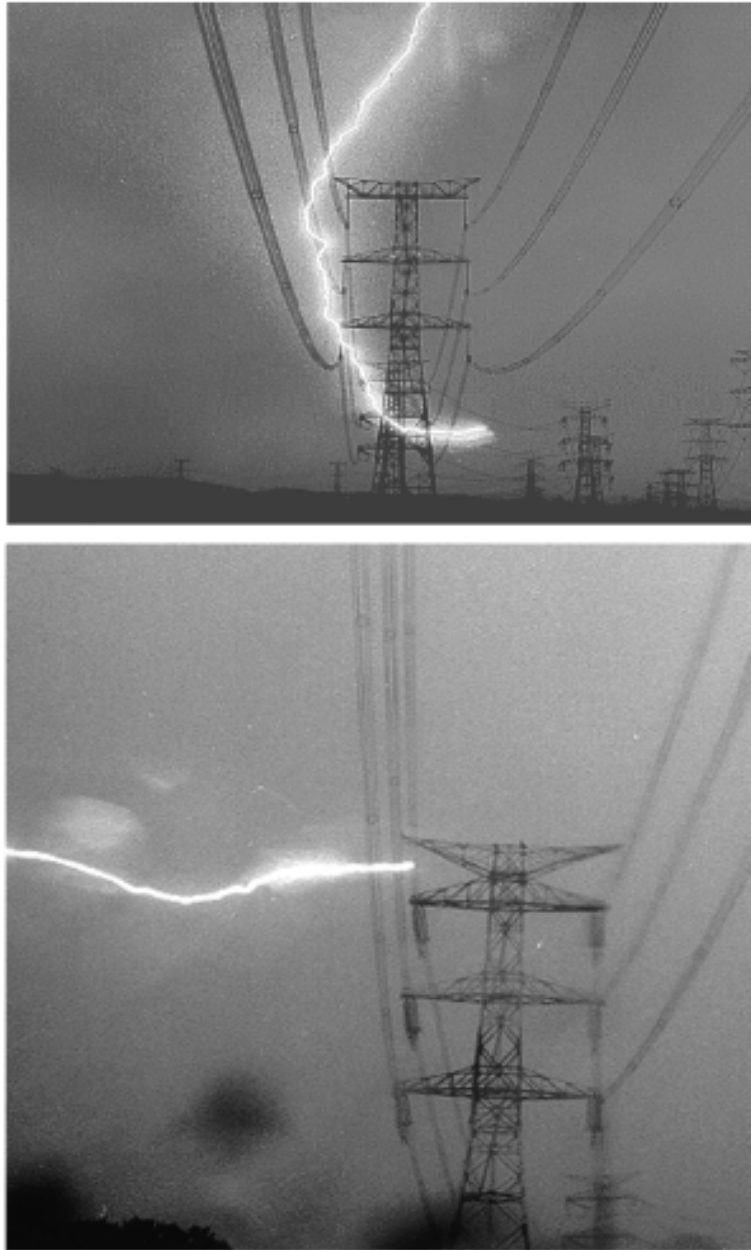
Wielu Autorów wskazuje na bardzo zróżnicowane czasy trwania czoła udarów  $T_1$ . Na uwagę zasługuje informacja, że przeskoki na izolacji linii 400 kV występują nawet przy wartościach  $T_1 = 6,6 \mu\text{s}$  [31,32]. Różny charakter przebiegów napięć indukowanych, jak sugeruje literatura, wynika ze zmiennego charakteru rezystancji gruntu. Nie wyklucza to jednak informacji o charakterze rzeczywistego przepięcia piorunowego, który jak wskazują badania zdecydowanie różni się od znormalizowanego  $1,2/50 \mu\text{s}$ .

Przedstawiony przegląd literatury z zakresu napięć indukowanych w liniach jak i stacjach, w sytuacji uderzenia pioruna w ich pobliże, wykazuje jednoznacznie, iż narażenia nie cechują się parametrami, których występowanie może istotnie wpłynąć na zagrożenie izolacji wysokich napięć 110 – 400 kV. W szczególności dotyczy to sytuacji uderzenia pioruna w pobliże stacji. Występujące wtedy mierzone przepięcia, a w szczególności ich czas trwania czoła, są rzędu do  $T_1 = 8 \mu\text{s}$ . Jednak maksymalna wartość napięcia  $V_s$  sięga do 200 kV, co w sytuacji analizy koordynacyjnej np.: dla stacji 400 kV praktycznie nie ma wpływu na wytrzymałość izolacji stacji. Warto zauważyć jednak, że wartość  $V_s$  w linii lub stacji jest silnie uzależniona od wartości ściąganego prądu pioruna oraz odległości od miejsca uderzenia.

**Wniosek** z przeprowadzonej analizy literatury z zakresu napięć indukowanych w przedstawionej pracy doktorskiej ma istotne znaczenie tylko dla napięć 110 kV i niższych. W związku z tym, że praca ma charakter eksperymentalny autor uważa za istotne przytoczenie tych danych literaturowych.

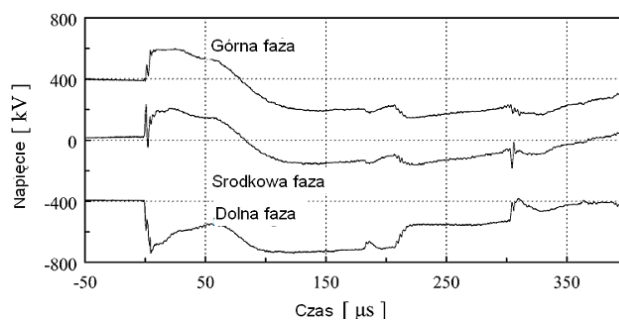
### 2.1.3. Uderzenie pioruna w przewód roboczy linii

Wystąpienie wyładowania piorunowego do linii 400 kV jest często opisywane w literaturze. Pomiar prądów pioruna i jego parametrów omawiają Autorzy pracy [72]. Potwierdzają oni występowanie wyładowania piorunowego bezpośrednio w przewód roboczy linii wysokiego napięcia, pomimo poprowadzonego przewodu odgromowego linii. Ponadto Autorzy przeprowadzili również analizę statystyczną pomiarów prądu pioruna  $I_{\text{max}}$ . Rysunek 14 przedstawia uderzenie pioruna w przewód roboczy linii.



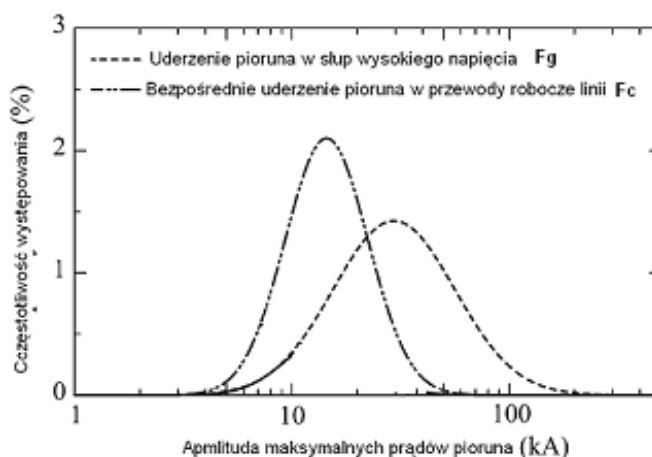
Rys. 14. Uderzenie pioruna w górną fazę zdjęcie a) zrobione 22 lipca 2000, zdjęcie b) zrobione 9 lipca 1998 [72].

Autorzy pracy [72] badają przebiegi rejestrowane w sytuacji uderzenia pioruna w przewody robocze linii. Rysunek 15 przedstawia przebiegi na wszystkich fazach uzyskane na drodze symulacji programem EMTP.



Rys. 15. Zasymulowane przebiegi przepięć w trzech fazach linii, w sytuacji uderzenia pioruna w przewód roboczy linii. Przeskok na fazie środkowej. [72].

Autorzy dokonali również obliczeń statystycznych pozwalających na ocenę jakie wartości prądów pioruna występują w zależności od charakteru uderzenia. Rysunek 16 przedstawia omawianą zależność.



Rys. 16. Częstotliwość występowania uderzeń pioruna w funkcji maksymalnej jego wartości [72].

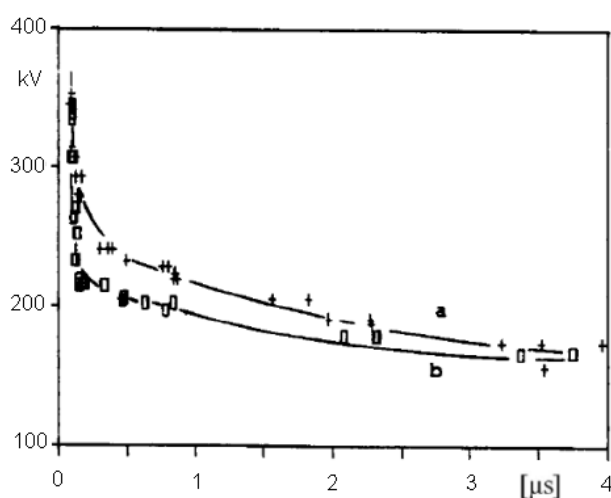
Zdaniem Autorów [72] charakterystyka (rysunek16), przedstawia znormalizowany rozkład częstotliwości wszystkich wyładowań atmosferycznych  $F_g(i)$  i znormalizowany rozkład częstotliwości występowania wyładowań piorunowych bezpośrednio do przewodów roboczych linii  $F_c(i)$ . Autorzy dokonują również określenia średniej częstotliwości występowania wyładowań atmosferycznych określonych zależnością:  $f_r(i) \underset{=}{<} F_g(i)$ .

**Wnioskiem** z przytoczonych rozważań jest fakt, że najistotniejsze oraz najczęstsze zagrożenie występowania wyładowania piorunowego występuje do słupów wysokiego napięcia.

## 2.2. Układy izolacyjne badane w laboratoriach

Badania laboratoryjne na rzeczywistych obiektach, takich jak izolatory, przeprowadzają Autorzy wielu publikacji. Ze względu na techniczne możliwości laboratoriów oraz nowoczesną technikę probierczą – pomiarową ważniejsze prace [28,4,29,30] publikowane są w większości po 1990 roku.

W pracy [28] opisano badania laboratoryjne izolatorów porcelanowych typu NEMA 55 -6, przy zastosowaniu standardowych znormalizowanych uderów napięciowych 1,2/50  $\mu$ s. Badania polegały na zwiększaniu napięcia przyłożonego do obiektu i obserwacji czasów do ucięcia, rysunek 17

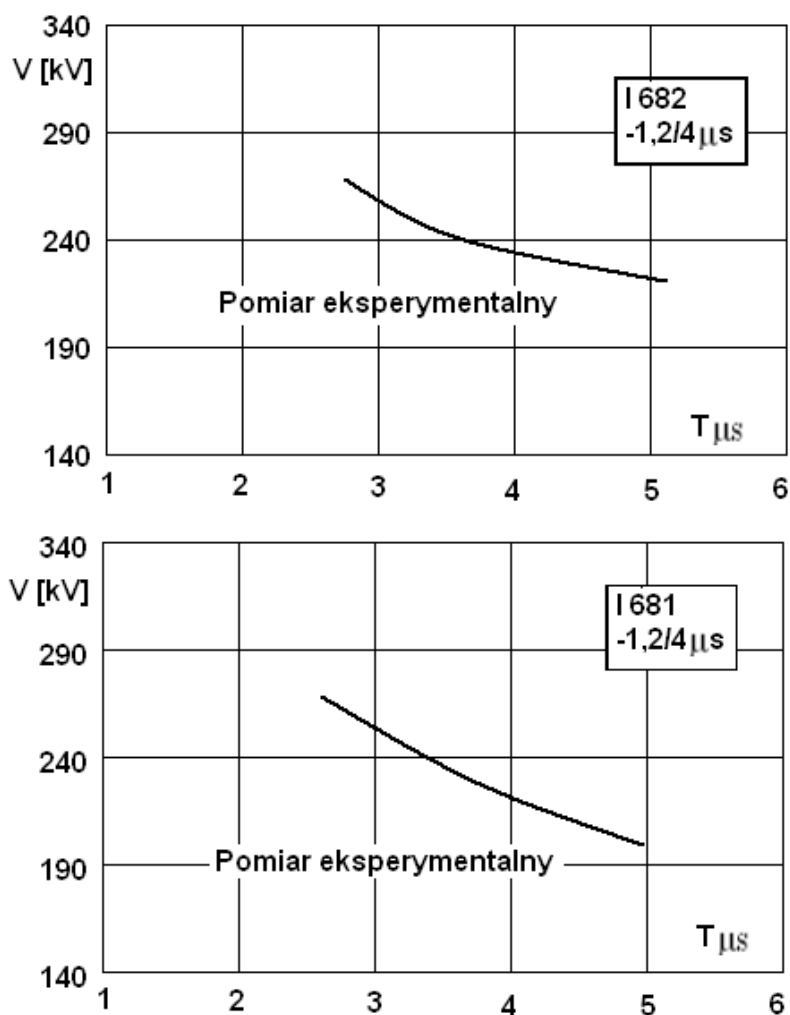


Rys. 17. Napięcie do przeskoku na izolatorze porcelanowym typu NEMA 55-6, a) udar dodatni, b) udar ujemny [28].

Pojęcie wytrzymałości elektrycznej izolacji wysokonapięciowej jest tematem bardzo szerokim i nie zależy jedynie od charakteru przyłożonego napięcia. W szczególności, dotyczy to rozwiązań koordynacji izolacji, w której bierze się pod uwagę odległości między poszczególnymi obiektami na stacji, czy odległościami między fazowymi na liniach WN. Informacja na temat maksymalnej wartości przepięcia ma decydujące znaczenie z punktu widzenia wytrzymałości. Badania prowadzone przez Autorów prac [28,4,29], prowadzone na poszczególnych izolatorach porcelanowych różnego typu, pokazują charakterystyki czasowo napięciowe w sytuacji różnych rodzajów warunków atmosferycznych. Badania te pokrywają się z wynikami prowadzonych badań [31,32,38,39,41] oraz [89,90] w Instytucie Energetyki w latach 2005 – 2011 nad rzeczywistymi obiektami

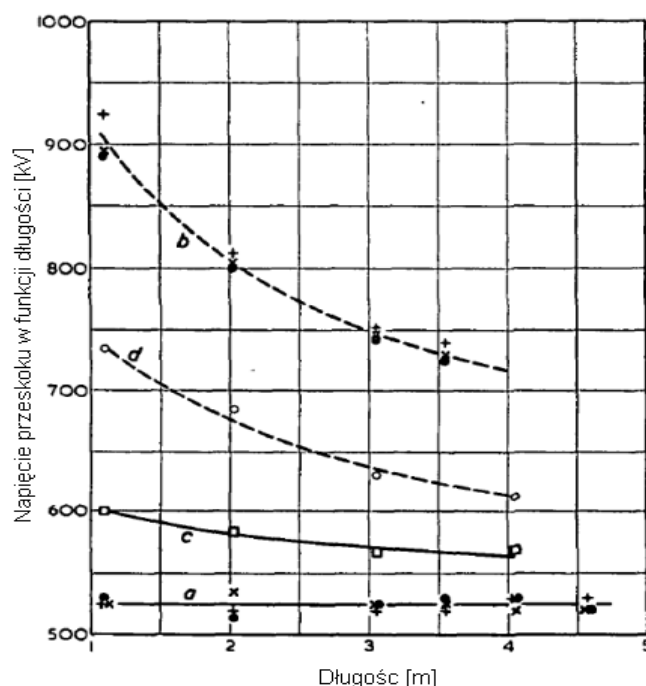
stacijnymi. W pracy [4] opisano badania łańcuchów izolatorów stosując niestandardowe narażenia piorunowe, inne niż 1,2/50  $\mu\text{s}$ . W publikacji przedstawione są charakterystyki wytrzymałościowe badanego łańcucha w aspekcie zmieniającego się czasu trwania czoła. Autorzy przeprowadzali badania udarami napięciowymi, których  $T_1$  mieści się od 2  $\mu\text{s}$  do 22  $\mu\text{s}$ . Autorzy porównywali przebiegi eksperymentalne z obliczonymi, wzory oraz metoda obliczeniowa przedstawiona jest w [4].

Kolejnymi Autorami badań rzeczywistej izolacji są Autorzy pracy [29]. Literatura ta przedstawia badania nad wytrzymałością izolacji przy zmiennym czasie do pół szczytu zachowując czas czoła znormalizowany standardowy  $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ . Rysunek 18 przedstawia charakterystykę zmian wytrzymałości omawianych badań z pracy [29].



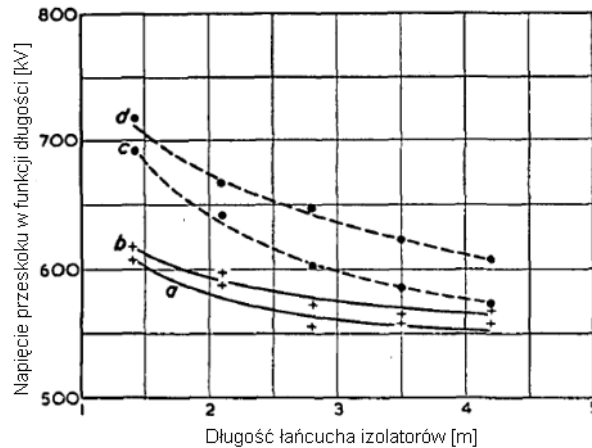
Rys. 18. Wytrzymałość badanych izolatorów ze względu na zmienny czas trwania do półszczytu [29].

W publikacji [29] opisano badania, którym poddano dwa rodzaje izolatorów trakcyjnych o numerach I – 682 oraz I – 621 [102,103]. Badania prowadzono dwoma udarami 1,2/50  $\mu$ s oraz 1,2/4  $\mu$ s. Wyniki wskazują, że wpływ zmiany czasu do półszczytu na wytrzymałość jest niewielki, ponieważ mieści się on w granicach do 10% (rysunek 18). Wartości te pokrywają się z badaniami autora niniejszej pracy opisanymi w [31,32]. Natomiast w przypadku badań przerw iskiernikowych na uwagę zasługuje publikacja [30], w której Autorzy badają wytrzymałość odstępu iskierników przy znormalizowanym udarze 1,2/50  $\mu$ s i zwiększeniu odstępu między iskiernikami (rysunek 19).



Rys. 19. Wytrzymałość iskiernika w funkcji jego odległości. a – udar dodatni, b – udar ujemny, c – udar dodatni z ingerencją obiektu uziemionego, d – udar ujemny z ingerencją obiektu uziemionego [30].

Przedstawione przebiegi napięciowe zawierają istotną informację o wytrzymałości przerwy iskiernikowej. Wartość ta, ma znaczący wpływ na informację o zróżnicowaniu wytrzymałości napięć między 110 kV a 400 kV. Dlatego też przeprowadzono badania mające na celu określenie maksymalnej drogi przeskoku dla poszczególnych układów izolacyjnych, poprzez wydłużanie izolacji. Zależność taką przedstawiono na rysunku 20.

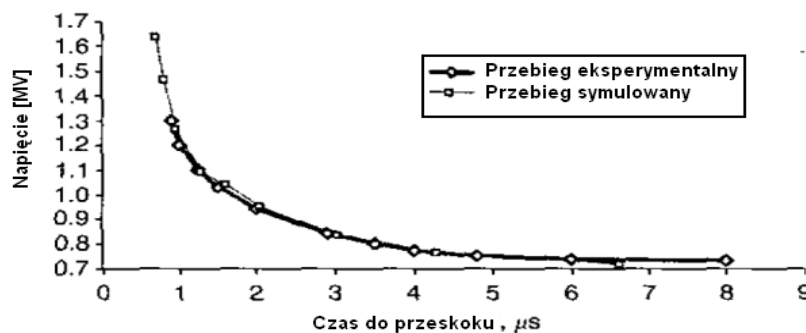


Rys. 20. Wytrzymałość łańcucha odciągowego w sytuacji zwiększania jego długości. a – udar dodatni  $U_{10\%}$ , b – udar dodatni  $U_{90\%}$ , c – udar ujemny  $U_{10\%}$ , d – udar ujemny  $U_{90\%}$  [30].

Na rysunkach 19 i 20 przedstawione krzywe, to przebiegi napięciowe obu biegunowości. Najniżej położone krzywe odpowiadają układom z ingerencją obiektu uziemionego w pobliżu badanego układu. Z punktu widzenia tematyki obniżenia wytrzymałości, krzywe najwyższej ułożone dowodzą, że czym dłuższy odstęp izolacyjny, tym większy wpływ obniżenia wytrzymałości przy skróceniu czasu trwania czoła udaru  $T_1$ .

Autorzy Dudrych I.M. i współpracownicy w publikacji [34] z roku 2003 pokazują jakie różnice występują między przebiegami symulowanymi a wynikami eksperymentalnymi. Badania przeprowadzają na izolacji linii 110 kV i sytuacji uderzenia pioruna bezpośrednio w przewód roboczy linii.

Omawiane przebiegi napięć przeskoku pokazane są na rysunku 21. Jak można zauważyć, różnice w przebiegach wyznaczonych przy pomocy programu EMTP a rzeczywistymi przebiegami są bardzo małe.

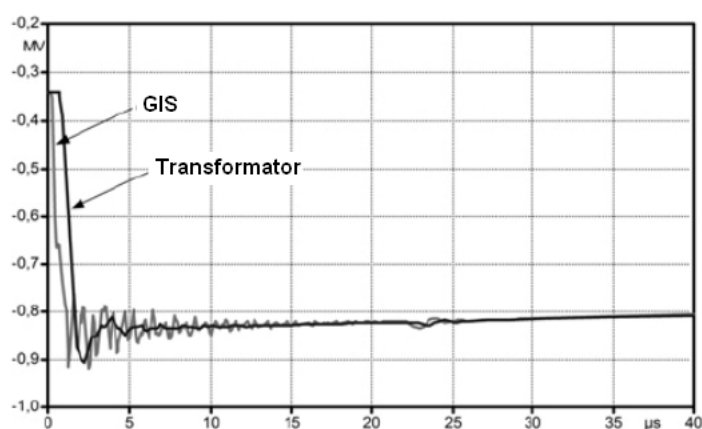




Rys. 21. Charakterystyka napięciowa czasu do przeskoku dla modelu symulowanego w EMTP oraz wyników badań eksperymentalnych [34].

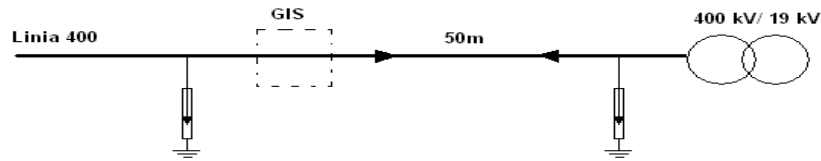
### 2.3. Badania izolacji wysokonapięciowej udarami o nieznormalizowanym kształcie, innym niż standardowy 1,2/50 $\mu$ s.

W naturalnych warunkach prawdopodobieństwo występowania udarów piorunowych o znormalizowanych kształtach jest prawie niemożliwe. Spowodowane jest to brakiem możliwości przewidzenia miejsca uderzenia pioruna oraz parametrów RLC elementu, w który uderzy piorun. Pomiar kształtu przepięcia wchodzącego do stacji oraz wędrującego są tematem wielu publikacji. W szczególności po roku 1990. Autorzy pracy [69] przeprowadzili analizę przepięć w stacjach 150 kV oraz 400 kV. Przedstawili oni zależność czasów czoła udaru napięciowego w stosunku do maksymalnej wartości przepięcia. Zależność, taką pokazano na rysunku 22.



Rys. 22. Charakterystyka przepięć na pierwszym terminalu stacji GIS oraz na transformatorze w stacji 400 kV [69].

Ciekawą z punktu widzenia analizy koordynacyjnej jest rejestracja kształtu napięcia na pierwszym terminalu GIS obserwowanej stacji oraz na transformatorze za ogranicznikami przepięć. Autorzy pracy [69] dowodzą, że różnice w przebiegach wynikają ze spadków na indukcyjności połączeń stacji. Wartości indukcyjności szacują na około 1  $\mu$ H/m [70,35]. Omawiany schemat stacji przedstawiony jest na rysunku 23.

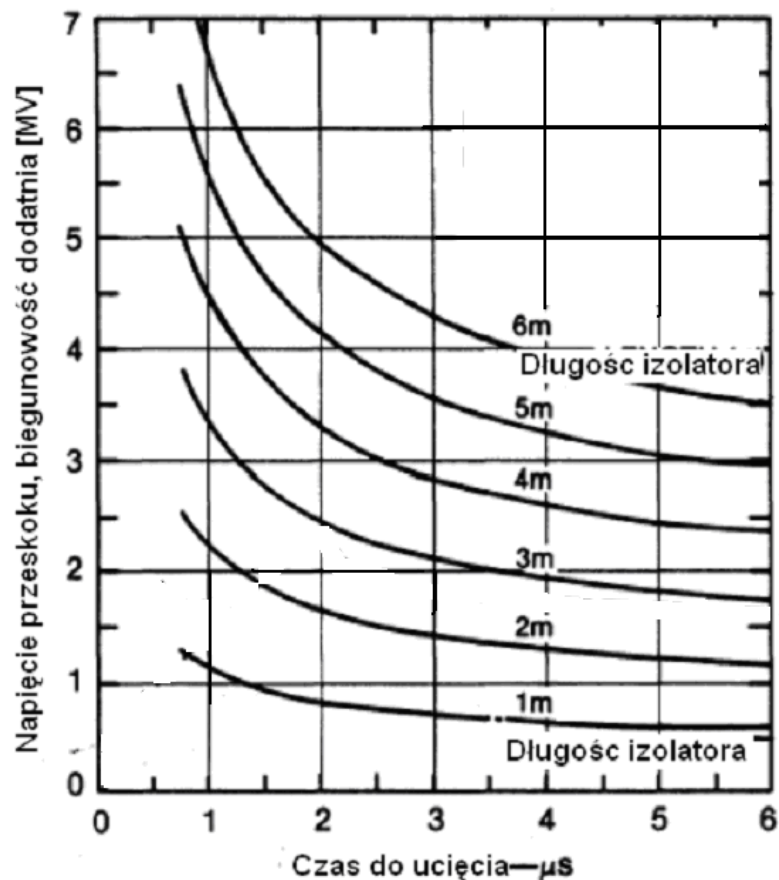


Rys. 23. Schemat badanej stacji 400 kV [69].

Badania nad wytrzymałością izolacji prowadzone są od wielu lat. Literatura tego tematu sięga lat 50-tych. Dokonany przegląd literatury z okresu od 1980 do 2011 wskazuje na tendencję do trzech różnych typów badań:

- badania napięcia do przeskoku w funkcji długości izolacji;
- badania przerw iskiernikowych;
- badania pojedynczych izolatorów, bez osprzętu ochronnego.

W pierwszym przypadku, Autorzy pracy [71] wskazują na charakterystykę (rysunek 24) wytrzymałościową łańcucha izolatorów przy badaniach udarem standardowym znormalizowanym 1,2/50  $\mu$ s.



Rys. 24. Czasy do przeskoku w funkcji długości łańcucha izolatorów [71].

Analiza wykresu z rysunku 24 pozwala na potwierdzenie istoty zależności obniżenia wytrzymałości od długości izolacji, co pokrywa się z badaniami Autorów [30] iskierników modelowych.

### 3. Podsumowanie przeglądu literatury

Przedstawiony w tej części pracy przegląd literatury wskazuje, że istotnie zagrażające wytrzymałości izolacji, są zjawiska przebiegające w liniach oraz stacjach wysokich napięć pochodzące od:

- uderzenia pioruna w przewód odgromowy – przeskok odwrotny na izolacji,
- uderzenia bezpośrednie w przewód roboczy linii,
- uderzenia pioruna w otoczenie obserwowanego obiektu.

W przypadku ostatniego czynnika należy zwrócić uwagę, iż po uderzeniu pioruna w otoczenie linii lub stacji, powstałe zjawiska nie odgrywają istotnego znaczenia z punktu widzenia oceny koordynacji izolacji linii 400 kV i wyższych. Zagrożenie takie, jak wykazuje literatura [3,19,17,31,32,77], w postaci maksymalnych amplitud przebiegów sięga wartości  $U_{\max} = 200$  kV z czasami trwania czoła do  $T_1 = 8$   $\mu$ s.

W każdym kolejnym przytoczonym czynniku wykazano występowanie przebiegów napięciowych o czasach trwania czoła znacznie różniących się od znormalizowanego  $T_1 = 1,2$   $\mu$ s. Dokonywano również badań empirycznych na pojedynczych izolatorach oraz na modelach iskiernikowych. Przeprowadzono również szerokie badania symulacyjne programem EMTP na modelach linii oraz modelach odwzorowujących powstawanie przebiegów indukowanych w wyniku uderzenia pioruna w pobliże stacji. Niektórzy Autorzy podejmowali, próby porównania wyników badań eksperymentalnych oraz symulacyjnych mające na celu stwierdzenie przydatności programu EMTP do prowadzenia badań i obserwacji rozplądów prądów i napięć.

Wszystkie przedstawione dowody wykazują jednoznacznie, że:

- występujące przebiegi piorunowe napięciowe, w szczególności, czas trwania czoła udaru mieści się w granicach od  $T_1 = 2,0$   $\mu$ s do  $T_1 = 10$   $\mu$ s,

- występujące najczęstsze wartości maksymalnych amplitud prądu pioruna, mieszczą się w granicach do  $I_{\max} = 20$  kA oraz w rzadkich przypadkach do  $I_{\max} = 100$  kA, przy stromościach mieszczących się w zakresach od  $3,8$  kA/ $\mu$ s do  $62,7$  kA/ $\mu$ s oraz rzadkiego prądu  $I_{\max} = 250$  kA.

Przyjęte wartości czasów trwania czoła  $T_1$  oraz maksymalnych wartości prądu  $I_{\max}$  pioruna zostały przyjęte jako najczęściej występujące. Prawdopodobieństwo występowania poszczególnych parametrów przedstawia literatura [72]. Parametry są również przedstawione na rysunku 16.

Z dokonanego przeglądu literatury wynika brak kompleksowych badań nad rzeczywistą izolacją wysokonapięciową w szczególności aparatów elektrycznych takich jak odłączników, kolumn izolatorów na napięcia 110 – 400 kV oraz łańcuchów izolatorów liniowych. Trudno również odnaleźć szczegółowe informacje na tematy przeprowadzanych badań symulacyjnych. Takich jak: wpływ stromości prądu pioruna, przepływającego przez połączenia stacji, na zwiększenie narażeń przepięciowych.

#### 4. Teza pracy

- W literaturze nie ujęto jednoznacznie prowadzonych badań nad rzeczywistą izolacją wysokonapięciową aparatów elektrycznych przy niestandardowych narażeniach piorunowych w szczególności czasów trwania czoła innych niż standardowy  $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ . W prawdzie Autorzy [4,28,29] prowadzą badania nad pojedynczymi izolatorami, jednak w rezultacie autor niniejszej rozprawy proponuje rozszerzenie wiedzy o informację dotyczącą badań układów izolacyjnych wraz z osprzętem ochronnym oraz aparatach elektrycznych montowanych bezpośrednio na stacjach wysokich napięć.
- Przedstawiony przegląd literatury pozwala na sformułowanie procesu badań nad rzeczywistymi układami izolacji mając na celu potwierdzenie występującego obniżenia wytrzymałości, od lat 50-tych, które obserwowano jedynie na obiektach modelowych, które nie wykazują tych samych właściwości co rzeczywiste obiekty izolacyjne wraz z pełnym osprzętem łuko - ochronnym.
- Aktualnie stosowany zapas koordynacyjny, który zdecydowanie był określany w czasach, kiedy nie było możliwości przeprowadzania analiz komputerowych szczególnie tak zaawansowanych jak programem EMTP – RV. Zawiera w prawdzie na tyle dużo zapasu bezpieczeństwa, w którym powinny mieść się wszystkie zjawiska nieskorzystanie wpływające na obniżenie wytrzymałości izolacji. Jednak jak wykazuje analiza literaturowa oraz wyki badań rzeczywistych obiektów jak i wyniki symulacji komputerowych, wskazują na możliwość występowania sytuacji niedoszacowania aktualnie stosowanego zapasu koordynacyjnego.

Przytoczone fakty pozwalają na sformułowanie tezy:

**Właściwa ocena współczesnych rozwiązań ochrony odgromowej stacji 110 – 400 kV wymaga uwzględnienia przebiegów czasowych rzeczywistych narażeń piorunowych występujących w tych stacjach oraz zmian wytrzymałości układów izolacyjnych stosowanych w nich urządzeń, poddanych niestandardowym udom napięciowym.**

Ocena tej tezy pozwoli również na ocenę wpływu powszechnie stosowanego osprzętu ochronnego na obniżenie badanej wytrzymałości.

## 5. Metodyka badań izolacji niestandardowymi udarami piorunowymi

W opisie metod badawczych zjawisk wysoko-napięciowych, w szczególności do określenia wartości napięcia wytrzymywanego, stosuje się metodę Dixona i Mooda [40]. Metoda ta opiera się bezpośrednio na analizie rozkładu napięć wytrzymywanych badanego obiektu.

Charakterystykę tą tworzy się na podstawie obserwacji obiektu w trakcie badań. Do badanego obiektu przykładana się napięcie, które orientacyjnie odpowiada jego wytrzymałości. W przypadku, gdy wystąpi przeskok „X” napięcie obniża się o nie więcej niż 2% wartości średniej wytrzymywanej. Obniżenia dokonuje się do momentu, gdy nie wystąpi przeskok „O”. Od tego momentu zaczyna się proces podnoszenia napięcia. Każdorazowa próba jest rejestrowana, a efektem jest powstanie charakterystyki napięć wytrzymywanych. Przykładowa charakterystyka jest przedstawiona w tabeli 2.

Tabela 2. Przykładowa charakterystyka napięć wytrzymywanych badanego izolatora

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Poziomy napięciowe Wyzwalania generatora.																															
																									X				X		
			X				X		X		X				X				X		X		O			X		O		X	
		O		X		O		O		O		X		O		X		O		O		O				O				O	
														O				O													
Biegunowość +	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV	kV		
	1101	1122	1140	1120	1101	1120	1140	1119	1138	1119	1139	1117	1098	1119	1138	1117	1098	1117	1137	1117	1136	1117	1138	1156	1135	1115	1140	1156	1134	1115	
	Wartości napięć, przy których występuje przeskok na badanym obiekcie.																														

Dokonuje się 30 prób, które umożliwiają statystyczną obróbkę danych. Dixon i Mood opracowali metodę obliczeniową, która pozwala na ocenę napięcia, przy którym z prawdopodobieństwem 50% wystąpi przeskok. Podstawowy wzór, który używany jest w praktyce to /1/:

$$U_{50} = U_0 + \Delta U \left( \frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right) \quad /1/$$

gdzie:

$$A = \sum_{i=1}^k i n_i \quad N = \sum_{i=1}^k n_i$$

$n$  – oznacza ilość zdarzeń na danym poziomie napięciowym

$i$  – oznacza obserwowany poziom napięciowy

$U_0$  - oznacza najmniejszy poziom napięciowy z branego pod uwagę zdarzeń

$\Delta U$  - oznacza krok napięciowy między poziomami wyzwania generatora

Znak + lub – stawia się przy obliczeniach pochodzących z liczby przeskoków lub braku przeskoków

Do obliczeń konieczne jest użycie poprawki atmosferycznej  $K$  która może istotnie zmienić wartość obliczonego napięcia  $U_{50}$ , wówczas wzór /1/ wygląda następująco:

$$U_{50\%} = \frac{U_0 + \Delta U \left( \frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right)}{K} \quad /2/$$

Do badań nad wytrzymałością izolacji linii i stacji 110 – 400 kV, w Laboratorium Instytutu Energetyki, używa się dzielnika wysokonapięciowego firmy Haefely 4,5 MV. W związku z tym, że przeprowadzenie kalibracji tego dzielnika jest w praktyce trudne do wykonania, w Laboratorium dokonano badań porównawczych z dzielnikiem referencyjnym Siemens 700 kV w pełnym jego zakresie, przy zachowaniu liniowości obu dzielników. Wyniki tych badań są przedstawione w pracach statutowych [31,41]. Powyższe prace pozwoliły na określenie błędu jaki występuje podczas pomiarów dzielnikiem 4,5 MV, który wynosi  $\Delta U_B = -8,4$  kV, co stanowi około  $-1,4\%$  średniego napięcia mierzonego dzielnikiem 4,5MV, przy zachowaniu liniowości obu dzielników. Wyznaczona niepewność błędu systematycznego wynosi  $u = 5,4$  kV, przy założeniu rozkładu trójkątnego.

W związku z tym, konieczne jest uwzględnienie błędu w zależności /2/.

$$U_{50\%} = \frac{U_0 + \Delta U \left( \frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right) + \Delta U_B}{K} \quad /3/$$

Tak sformułowany wzór na obliczanie  $U_{50\%}$  jest wykorzystywany w ramach niniejszej pracy.

Obliczania wartości napięcia wytrzymywanego dokonuje się na podstawie przekształcenia wyniku  $U_{50\%}$  za pomocą wzoru:

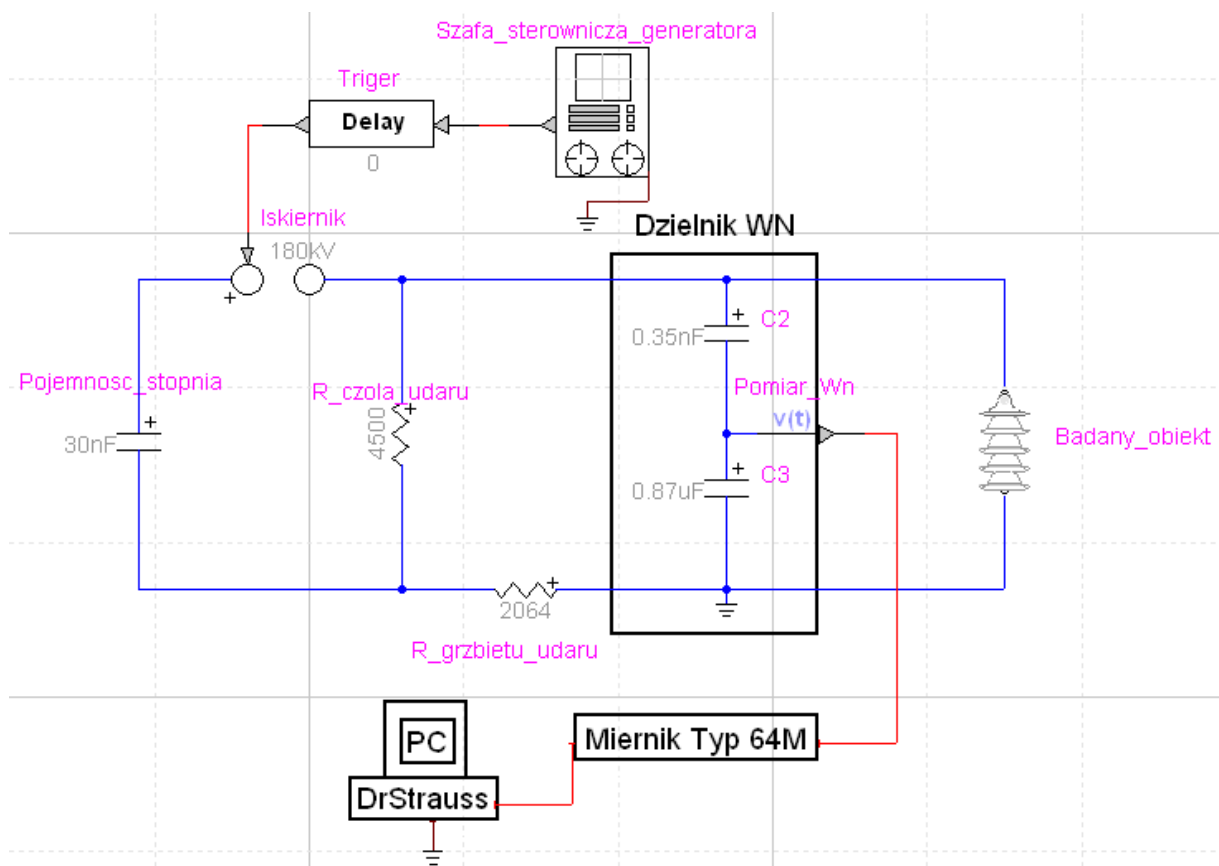
$$U_w = U_{50\%} (1 - 1,3\sigma) \quad /4/$$

gdzie wartość  $\sigma$  określona jest normatywnie [1] i wynosi 3% dla badań napięciami piorunowymi.



## 5.1. Układ probierczo – pomiarowy

Układ do prób napięciowych składał się z 25 stopni generatora udarowego 5 MV, 375 kJ firmy HAEFELY. Pomiar napięcia wykonano dzielnikiem pojemnościowym, tłumionym CR 4500, 350 pF o przekładni  $\vartheta=3019$  (+) i  $\vartheta=3030$  (-), współpracującym z miernikiem wartości szczytowej udarów firmy HAEFELY typ 64M o numerze fabrycznym WO 603681 oraz z rejestratorem cyfrowym DrStrauss. Schemat ideowy układu probierczo-pomiarowego przedstawia Rysunek 25.



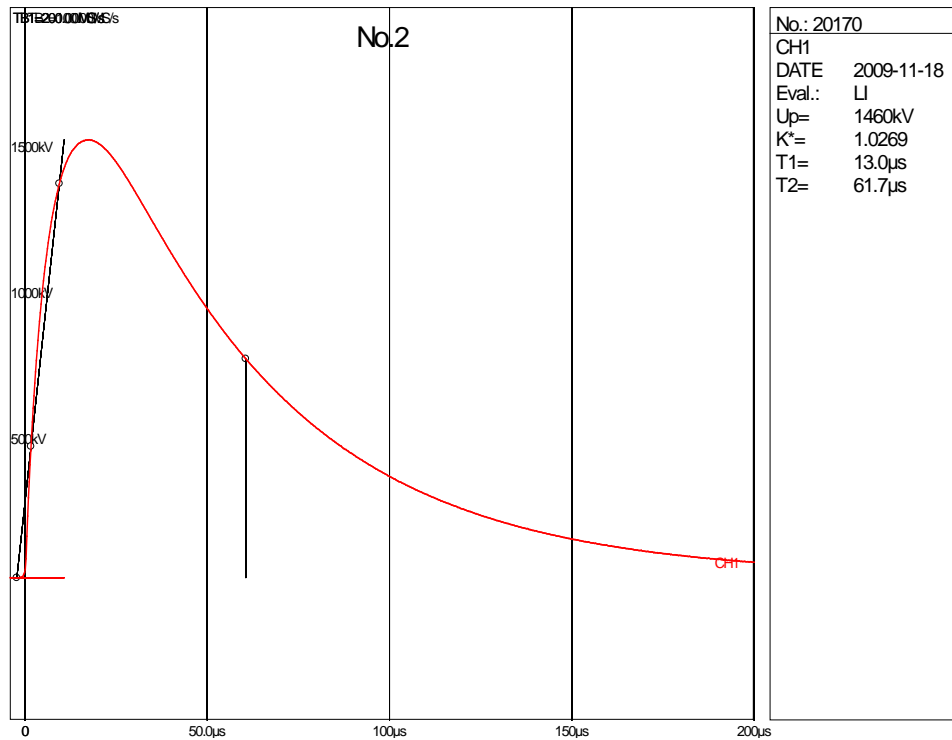
Rys. 25. Przykładowy schemat układu probierczo-pomiarowego.

Konstrukcja generatora w układzie Marksa umożliwia dokonywanie zmian w czasach odpowiedzi rezystancji, odpowiadających za kształt generowanego napięcia.

Układ probierczy składał się z:

- Generatora 5MV firmy Haefely;
- Dzielnika udarowego Haefely 4,5 MV;
- Kabli pomiarowych;
- Rejestratora cyfrowego przebiegów nieustalonych DrStrauss.

Dzięki przedstawionemu układowi pomiarowemu możliwe było wytwarzanie udarów znormalizowanych 1,2/50  $\mu\text{s}$  jak również znacznie odbiegających od znormalizowanych jak przedstawiono na rysunku 26.



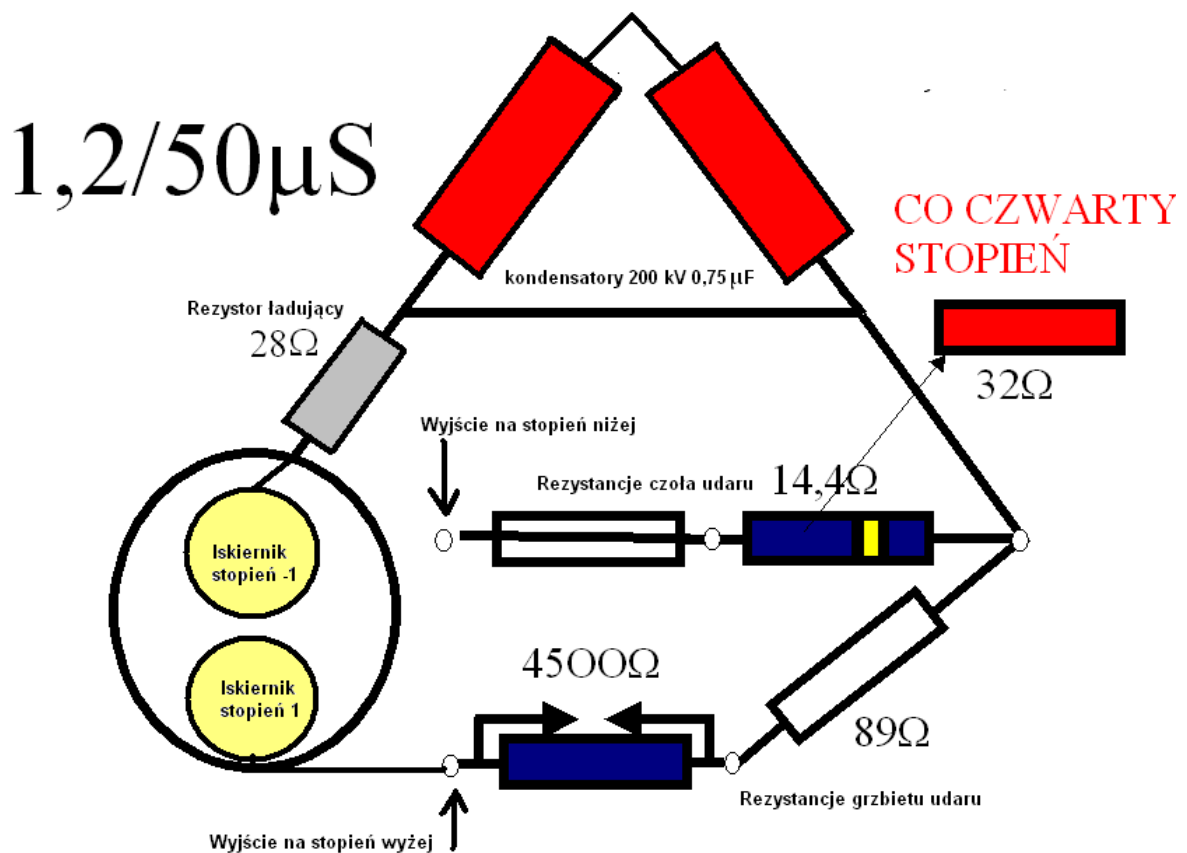
Rys. 26. Przykładowy przebieg napięciowy udaru o kształcie 13/61  $\mu\text{s}$ .

Rzeczywiste narażenia piorunowe występujące w liniach i stacjach będące, efektem również indukowanych przepięć, charakteryzują się znaczną niejednorodnością pod względem występowania czasu trwania czoła udaru  $T_1$ . W większości przypadków są to udary, które znacznie odbiegają od znormalizowanych kształtów 1,2/50  $\mu\text{s}$ . Dane literaturowe, przedstawione w rozdziale 2, potwierdzają doniesienia, że kształty napięciowe wyładowań występujących do linii jak i indukowanych różnią się od znormalizowanych podanych w normie [1].

## 5.2. Wytwarzanie udarów wysokiego napięcia

Przeprowadzone badania układów izolacyjnych wysokich napięć niestandardowymi udarami piorunowymi wymagały każdorazowej ingerencji w konfigurację generatora udarowego. Niestandardowe udary, których czasy czoła zmieniano od  $1,2 \mu\text{s}$  do  $12 \mu\text{s}$  można było uzyskać poprzez zmianę wartości rezystancji generatora udarowego. Dostępne rezystancje przedstawiono w załączniku B.

Podstawowy układ generatora udarowego dla jednego stopnia przedstawia schemat 1.



Schemat 1. Jeden stopień generatora udarowego skonfigurowany dla udaru  $1,2/50 \mu\text{s}$

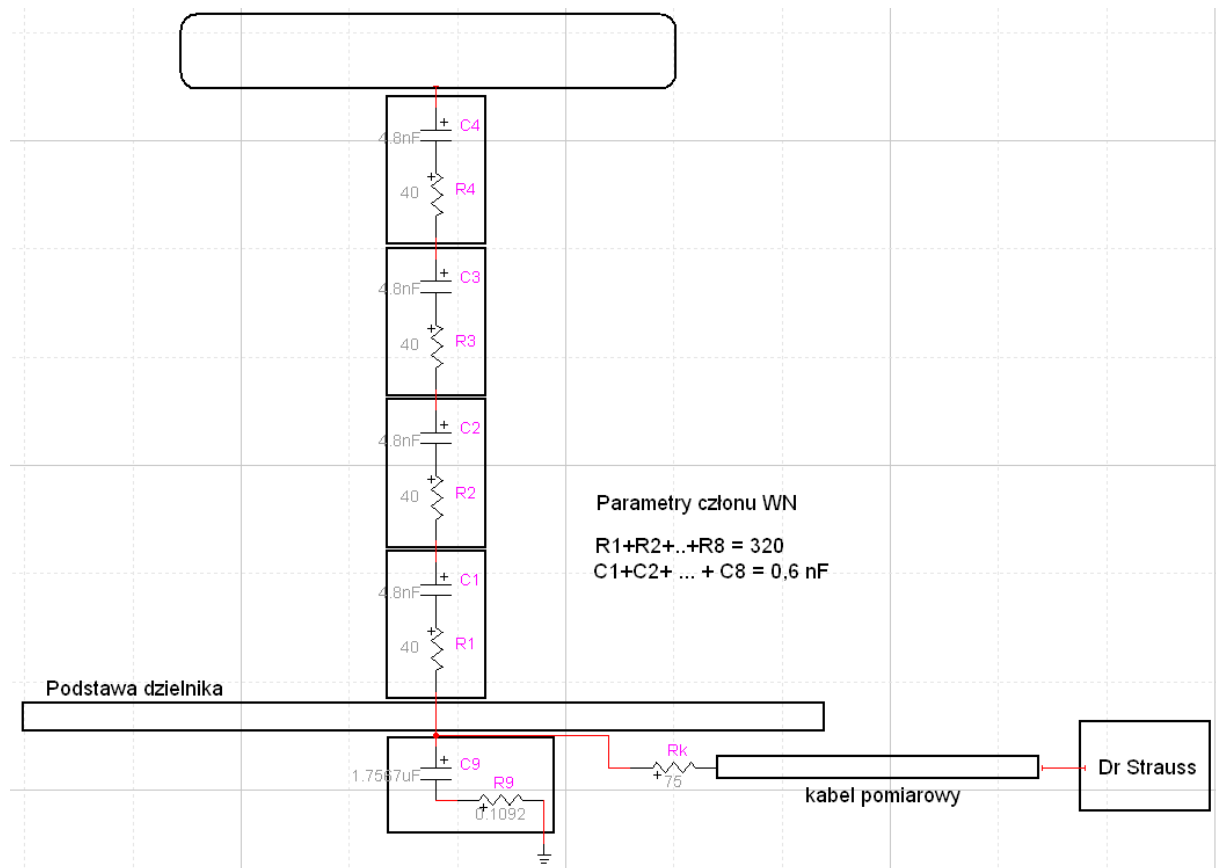
Generator składa się z 25 stopni połączonych ze sobą w taki sposób aby ładowanie kondensatorów odbywało się równolegle, natomiast w momencie przeskoku na iskierniku następuje rozładowanie wszystkich kondensatorów szeregowo. Producent generatora Haefely dostarczył odpowiednio dużo rezystorów różnego typu.

### 5.3. Pomiary Wysokiego napięcia

Pomiaru dokonywano układem, w którego skład wchodziły następujące elementy:

- dzielnik wysokiego napięcia Haefely
- rejestrator stanów nieustalonych Dr Strauss
- kabel pomiarowy

Układ pomiarowy przedstawiony jest na schemacie 2.



Schemat 2. Schemat układu pomiarowego wysokich napięć

Przekładnia dzielnika: 3389

Napięcia znamionowe gwarantowane przez producenta:

Napięcia znamionowe członu wysokiego napięcia:

- Udar piorunowy 1,2/50  $\mu\text{s}$  4500 kV
- Udar łączeniowy 250/2500  $\mu\text{s}$  2800 kV
- Napięcie przemiennie 50 Hz  $\sqrt{2} \cdot 950 \text{ kV}$

Napięcia znamionowe członu niskiego napięcia

- udar piorunowy 1,2/50  $\mu\text{s}$  1,4 kV
- napięcie przemiennie 50 Hz  $\sqrt{2} \cdot 0,3 \text{ kV}$

#### Własności przenoszenia

- długość doprowadzenia wysokiego napięcia 7m
- czas odpowiedzi  $T_r = 16,6 \text{ ns}$
- czas czoła  $T_1 = 103 \text{ ns}$
- oscylacja 43%

#### Inne dane

- zakres temperatur  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $40 \text{ }^\circ\text{C}$
- wysokość całego dzielnika 14,3 m
- ciężar całego dzielnika 5 Ton

#### 5.4. Wytwarzanie udarów niestandardowych innych niż znormalizowane 1,2/50 $\mu\text{s}$

W celu uzyskania udaru innego niż standardowy znormalizowany, dokonuje się fizycznej zmiany konfiguracji oporników w generatorze. Cały proces można podzielić na etapy:

- teoretyczne obliczenia rezystancji jakie trzeba użyć w generatorze, aby uzyskać określony udar.
- Praktycznego dobrania dostępnych rezystorów

#### Przykład

Określony udar to 5/50  $\mu\text{s}$

Obliczenia rezystancji czoła i grzbietu dokonuje się za pomocą wzorów praktycznych stałych czasowych  $\tau_1 = 3R_1C_2$  oraz  $\tau_2 = 0,7R_2(C_1+C_2)$ , których na podstawie literatury  $\tau_1$  jest proporcjonalne do  $T_1$  oraz  $\tau_2$  jest proporcjonalne do  $T_2$  [110].

$$\tau_1 = 3 \cdot R_1 C_2$$

$$R_1 = \frac{\tau_1}{3 \cdot C_2} = \frac{5 \mu}{3 \cdot 0,6n} = 2777 \Omega$$

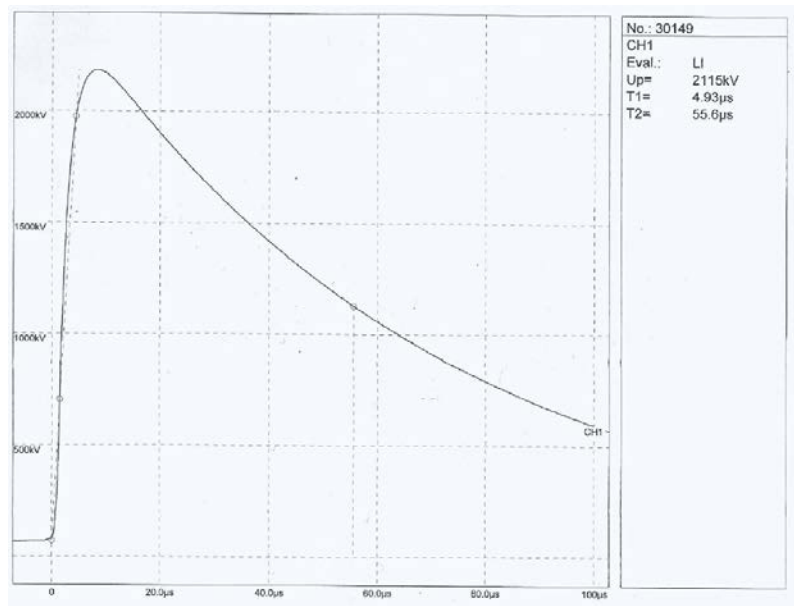
na jeden stopień 111,1  $\Omega$

$$\tau_2 = 0,7 \cdot R_2 \cdot (C_1 + C_2)$$

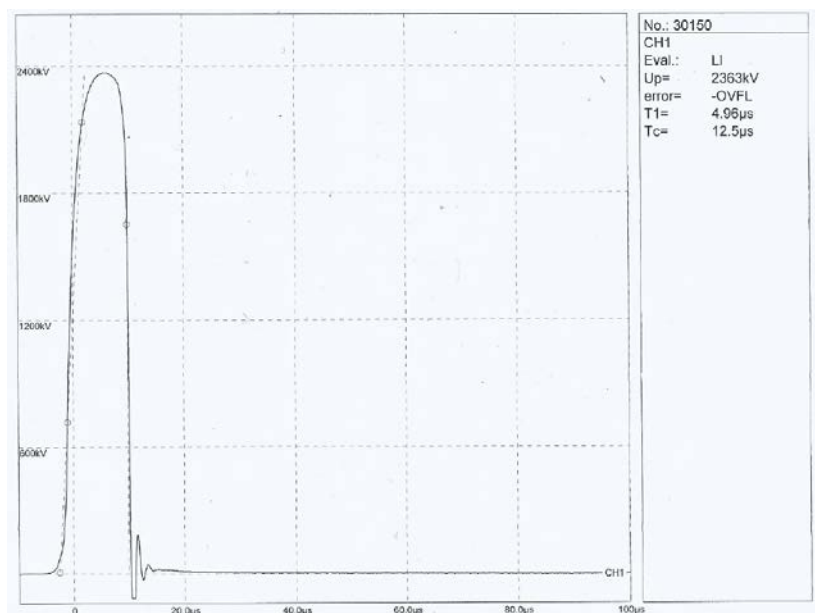
$$R_2 = \frac{\tau_2}{0,7 \cdot (C_1 + C_2)} = \frac{50 \mu}{0,7 \cdot (30n + 0,6n)} = 2334,2 \Omega$$

na jeden stopień 93,3  $\Omega$

W praktyce zostały zastosowane rezystancje  $R_1 = 89 \Omega$  oraz  $R_2 = 65 \Omega$  na poszczególnym stopniu generatora, wygenerowany kształt udaru to **4,93/55,6  $\mu\text{s}$** , który przedstawiony jest na przykładowych przebiegach A oraz B



Przebieg A. Zarejestrowany udar pełny  $U_{\max} = 2,1 \text{ MV}$



Przebieg B. Zarejestrowany udar ucięty  $U_{\max} = 2,3 \text{ MV}$

Większość udarów zarejestrowanych podczas badań w Laboratorium Wysokich Napięć zamieszczono w załączniku B.

## 5.5. Analiza statystyczna wyników badań

Istotnym czynnikiem, wpływającym na określenie jakości wyniku, jest określenie jego niepewności całkowitej złożonej  $u_2$ .

W ostatniej dekadzie lat 20-tych nastąpił znaczny rozwój dziedziny określania niepewności pomiarowej. Dane literaturowe [42,43,44,45,46], oraz [47] wykazują że najważniejszym określeniem niepewności złożonej podstawowej jest określenie budżetu niepewności całego procesu pomiarowego.

Podstawową daną na podstawie, której można określić dalsze działanie jest równanie pomiarowe. W przypadku badań przedstawionych w niniejszej pracy, równanie to jest zawartym wzorem /5/.

$$U_{50\%} = \frac{U_0 + \Delta U \left( \frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right) + \Delta U_B}{K} \quad /5/$$

Gdzie:

- $U_0$       zmierzona wartość napięcia na najniższym wybranym poziomie napięciowym
- $\Delta U$       obliczony krok napięciowy między poziomami
- $\Delta U_B$     błąd systematyczny wynikający z użycia dzielnika Haefely
- $K$         współczynnik poprawki atmosferycznej podany w normie
- $A, N$     omówione przy wzorze /1/

Odchylenia standardowe wartości napięć oraz odchylenie standardowe z próby  $U_{50\%}$ , czyli wartości  $\sigma_U$  oraz  $\sigma_S$  z szacuje z zależności /6, 7/.

$$\sigma_U = \frac{G}{\sqrt{N}} \sigma \quad /6/$$

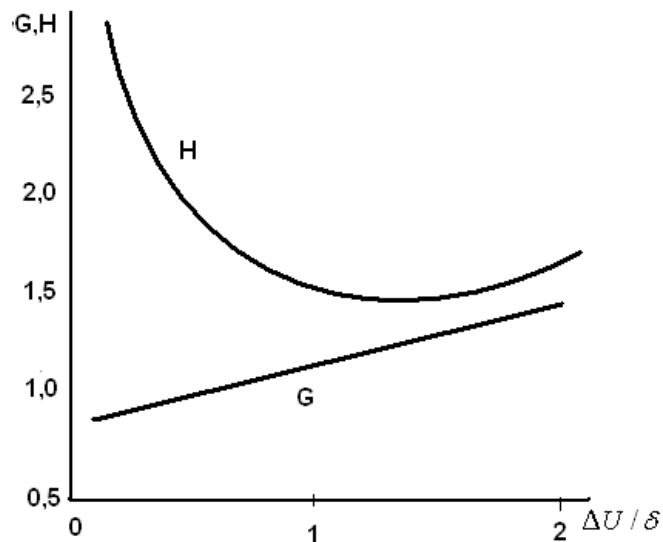
$$\sigma_S = \frac{H}{\sqrt{N}} s \quad /7/$$

Wartości  $G$  oraz  $H$ , zależne od stosunku  $\Delta U/\sigma$ , które podano w postaci wykresów na Rysunku 27. Praktycznie, według metody Dixona i Mooda, wartości  $\sigma$  zastępuje się szacowaną wartością  $S$  odchylenia standardowego /8/

$$S = 1,620 \Delta U \cdot \left( \frac{NB - A^2}{N^2} + 0,029 \right) \quad /8/$$

Gdzie:

- $B$         omówione przy wzorze /1/



Rys. 27. Wykresy podane przez Dixona i Mooda do obliczania współczynników G i H w metodzie „góra – dół” [40].

Istotą zrozumienia właściwego podejścia do obliczenia niepewności podstawowej  $u$  jest właściwe zrozumienie pojęcia metody otrzymywania wyniku oraz błędów i niepewności urządzeń pomiarowych. W przypadku pierwszego pojęcia problem, ten jest określony przez metodę Dixona i Mooda w pracy [40]. Natomiast w przypadku drugiego pojęcia należy kierować się nie tyle danymi technicznymi urządzeń pomiarowych, ale doświadczeniem i wiedzą z tego zakresu. Istotnym problemem jest również wpływ czynników zewnętrznych na niepewność pomiarową podstawową  $u$  [98]. Do tych czynników należy zaliczyć:

- pomiar temperatury,
- pomiar ciśnienia,
- pomiar wilgotności.

Całkowita niepewność podstawowa pomiarowa  $u$  jest pierwiastkiem kwadratowym z sumy kwadratów niepewności systematycznej  $u_s$  i niepewności losowej  $u_r$ , zatem podstawowy wzór określający całkowitą niepewność podstawową jest zawarty zależnością /9/.

$$u = \sqrt{u_r^2 + u_s^2} \quad /9/$$



Oszacowanie wszystkich niepewności standardowych przypadkowych (losowych) i systematycznych jest warunkiem koniecznym dla obliczenia niepewności całkowitej badanego układu pomiarowego. Przygotowując raport dotyczący wyników pomiaru należy podać możliwie dużo informacji na temat metod stosowanych do obliczania wyniku pomiaru i jego niepewności na podstawie danych eksperymentalnych i danych przyjętych z zewnątrz. Należy wymienić wszystkie składniki niepewności i opisać dokładnie sposób ich wyliczenia. Ponadto trzeba przedstawić szczegółowo analizę danych – w taki sposób, aby możliwe było odtworzenie wyniku pomiarów i jego niepewności - podać wszystkie poprawki oraz źródła wartości stałych stosowanych w obliczeniach. Jeżeli istnieje konieczność należy podać względne wartości niepewności standardowych lub całkowitych.

## **5.6. Szacowanie niepewności – analiza niepewności pomiarów**

Każdorazowe obliczanie niepewności elementu wpływającego na pomiar całkowity wymaga podania poszczególnych informacji o tym pomiarze, a mianowicie:

- oszacowania niepewności standardowej,
- obliczenia współczynnika wrażliwości,
- obliczenia udziału w niepewności całkowitej.

W przypadku obliczeń wysokonapięciowych czynnikami dodatkowymi (losowymi), niepewności typu B, są pomiary wielkości nieelektrycznych, których oszacowanie niepewności jest konieczne by właściwie oszacować niepewność wyniku badań.

Dla obliczeń niepewności typu A brane są pod uwagę metody statystyczne, które używane są do podstawowej obróbki danych eksperymentalnych. Zaliczyć można do nich wzór na obliczanie  $U_{50\%}$  oraz odchylenie standardowe  $S$  według Dixona i Mooda.

Schematyczny przykład obliczania niepewności podstawowej  $u$  ilustruje poniższy przykład badań układu łańcucha przelotowego ŁP na napięciu 400 kV z dnia 5 – 09 – 2008.

**Parametry atmosferyczne:**Ciśnienie  $b = 1017 \text{ hPa}$ Temperatura  $t_s = 19,9 \text{ }^\circ\text{C}$  $t_m = 11,7 \text{ }^\circ\text{C}$ Wilgotność  $\varphi = 78\%$  $w = 9,3 \text{ [g / m}^3\text{]}$ 

Poprawka atmosferyczna

 $K = 1,004$ **Parametry udaru:**

Kształt rejestrowanego udaru

 $0,9/50 \text{ } \mu\text{s}$ 

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
111										X																X				
110									O		X		X		X						X		X		O		X		X	
109		X		X		X		O				O		O		X		X		O		O		O					O	O
108	O		O		O		O										O		O											
107																														
Biegunowość	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	
<b>+</b>	2,27	2,30	2,27	2,31	2,27	2,30	2,27	2,31	2,32	2,49	2,31	2,33	2,33	2,32	2,32	2,30	2,27	2,31	2,27	2,30	2,34	2,34	2,31	2,31	2,32	2,50	2,32	2,32	2,34	2,30

**Obliczenia  $U_{50\%}$  oraz  $U_w$  z próby** $N = 14$       Wartość zdarzeń, która wykazała najmniejszą częstość [40] $A = 11$  $\Delta U \approx 3 \text{ kV}$  $U_0 = 2270 \text{ kV}$ 

$$U_{50\%} = U_0 + \Delta U \left( \frac{A}{N} + \frac{1}{2} \right) = 2308 \text{ kV}$$

$$U_w = U_{50\%} (1 - 1,3 \cdot \delta) = 2218 \text{ kV}$$

Gdzie  $\delta = 3\%$  dla uderów piorunowych zgodnie z normą [1].

Wartości po przeliczeniu na warunki atmosferyczne oraz z uwzględnieniem błędu systematycznego

$$U_{50\%} = \frac{U_0 + \Delta U \left( \frac{A}{N} + \frac{1}{2} \right) + \Delta U_B}{K}, \text{ wynoszą:}$$

$$U_{50\%} = 2266,6 \text{ kV}$$

$$U_w = 2178,2 \text{ kV}$$

### **Obliczanie niepewności całkowitej podstawowej dla pomiarów obiektu ŁP**

$$u = \sqrt{u_s^2 + u_r^2}$$

#### **Niepewność typu A**

- odchylenie standardowe wg. Dixona i Mooda [40]

$$S_A = 1,20 \Delta U \left( \frac{N \cdot B - A^2}{N^2} + 0,029 \right) = 1,739 \text{ kV}$$

- współczynnik wrażliwości  $C_i$

$$C_i = \frac{\delta U_{50\%}}{\delta U_0} = \frac{1}{K} = 0,9960$$

- udział w niepewności całkowitej

$$\sigma_A = C_i \cdot S_A = 1,73 \text{ kV}$$

- odchylenie standardowe kroku napięciowego  $\Delta U$

$$S_{\Delta U} = 5,133 \text{ kV}$$

- współczynnik wrażliwości  $C_i$

$$C_i = \frac{\delta U_{50\%}}{\delta \Delta U} = \frac{\left( \frac{A}{N} + \frac{1}{2} \right)}{K} = 1,28$$

- udział w niepewności całkowitej

$$\sigma_{\Delta U} = C_i \cdot S_{\Delta U} = 6,54 \text{ kV}$$

## Niepewność typu B

### Niepewność błędu systematycznego $\Delta U_B$

- niepewność standardowa

$$S_{\Delta U_B} = \frac{1,4\% \cdot 5,4}{\sqrt{6}} = 0,03kV$$

- współczynnik wrażliwości

$$C_i = \frac{1}{K} = 0,996$$

- udział w niepewności całkowitej

$$\sigma_{\Delta U_B} = C_i \cdot S_{\Delta U_B} = 0,0298kV$$

### Niepewność pomiaru temperatury

- niepewność standardowa dla  $\Delta t$ : to jest  $\Delta t = \frac{273+t_0}{273+t} \left[ \frac{^{\circ}C}{^{\circ}C} \right]$

$$S_{\Delta t} = \frac{0,05}{\sqrt{3}} = 0,028$$

- współczynnik wrażliwości

$$C_i = \frac{\delta U_{50\%}}{\delta \Delta t} = -\frac{m}{2} \cdot \left( \frac{U_{50\%}}{k_2^w} \cdot \left( \frac{b}{b_0} \right)^{-\frac{m}{2}} \right) \cdot \Delta t^{-\frac{m+2}{2}} = -3,61 [kV]$$

- udział w niepewności całkowitej

$$\sigma_{\Delta t} = C_i \cdot S_{\Delta t} = -0,1kV$$

### Niepewność pomiaru ciśnienia

- niepewność standardowa dla  $\Delta b$ : to jest  $\Delta b = \frac{b}{b_0} \left[ \frac{kPa}{kPa} \right]$

$$S_{\Delta b} = \frac{0,05}{\sqrt{3}} = 0,028$$

- współczynnik wrażliwości

$$C_i = \frac{\delta U_{50\%}}{\delta \Delta b} = -\frac{m}{2} \cdot \left( \frac{U_{50\%}}{k_2^w} \cdot \Delta t^{-\frac{m}{2}} \right) \cdot \Delta b^{-\frac{m+2}{2}} = -11,45 [kV]$$

- udział w niepewności całkowitej

$$\sigma_{\Delta b} = C_i \cdot S_{\Delta b} = -0,32kV$$

### Niepewność pomiaru wilgotności

- niepewność standardowa dla  $\Delta k$  : jest bezwymiarowa

$$S_{\Delta k} = \frac{0,05}{\sqrt{3}} = 0,028$$

- współczynnik wrażliwości

$$C_i = \frac{\delta U_{50\%}}{\delta \Delta k} = -w \cdot k^{-w-1} \cdot \left( U_{50\%} \cdot \Delta t^{-\frac{m}{2}} \cdot \Delta b^{-\frac{m}{2}} \right) = -9,99 \cdot 10^{-3} \text{ [kV]}$$

- udział w niepewności całkowitej

$$\sigma_{\Delta k} = C_i \cdot S_{\Delta k} = -2,79 \cdot 10^{-4} \text{ kV}$$

### Niepewność pomiaru wartości $U_0$ (obliczenia uwzględniają wyznaczony systematyczny błąd pomiaru oraz jego niepewność)

- niepewność standardowa dla  $\Delta U_0$

$$S_{\Delta k} = \frac{U_{\text{miernika\%}} \cdot 5,4}{2\sqrt{3}} = 0,046 \text{ kV}$$

- współczynnik wrażliwości

$$C_i = \frac{\delta U_{50\%}}{\delta U_0} = \frac{1}{K} = 0,99$$

- udział w niepewności całkowitej

$$\sigma_{\Delta U_0} = C_i \cdot S_{U_0} = 0,045 \text{ kV}$$

### Niepewność pomiaru wartości (dla obliczeń numerycznych) została pominięta

Obliczanie niepewności całkowitej podstawowej

$$u = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_{\Delta U}^2 + \sigma_{\Delta U_B}^2 + \sigma_{\Delta t}^2 + \sigma_{\Delta b}^2 + \sigma_{\Delta k}^2 + \sigma_{\Delta U_0}^2}$$

$$u = 6,77 \text{ kV}$$

### Obliczanie niepewności całkowitej rozszerzonej

$$u_2 = u \cdot 2 = 13,5 \text{ kV}$$

Wyznaczono napięcie  $U_{50\%}$  oraz obliczono napięcie  $U_w$  dla badanego układu ŁP z niepewnością całkowitą rozszerzoną  $u_2 = 13,5 \text{ kV}$ , na poziomie ufności nie niższym niż 95%. W zapisie statystycznym wytrzymałość badanego obiektu mieści się w granicach ufności  $U_{w-} = 2164,7 \text{ kV}$  oraz  $U_{w+} = 2191,7 \text{ kV}$ .

## 6. Podsumowanie analizy statystycznej wyników badań

Przeprowadzone analizy statystyczne, oceny jakości wyników badań rzeczywistych obiektów, pozwalają stwierdzić, że uzyskana wartość niepewności rozszerzonej podstawowej  $u_2$  na poziomie ufności 95% proporcjonalna do wartości obliczonego napięcia  $U_{50\%}$ .

Oznacza to że:

- Obniżenia wytrzymałości elektrycznej badanego obiektu nie są wynikiem błędów pomiarowych ani niepewności pomiarowej,
- układ pomiarowy stosowany do badań, przy założeniu, że nie dokonuje się zmian w jego konfiguracji, nie wykazuje rozrzutów w postaci błędów przypadkowych.

Istotną informacją jest fakt, że obliczanie niepewności podstawowej standardowej kroku napięciowego generatora, może istotnie wpłynąć na zwiększenie szacowanej niepewności wyniku badań, ponieważ krok napięciowy nigdy nie jest taki sam w całym procesie 30-stu uderzeń. W przypadku przedstawianej pracy autor dokonując obliczeń niepewności dla wszystkich przedstawianych obiektów szacuje, że standardowa niepewność pomiarowa  $u$  mieści się w granicach od  $u = 6$  kV do  $u = 13$  kV.

## **7. Obiekty badań**

### **7.1. Opis poszczególnych obiektów badanych w laboratorium IEn**

Badania nad wytrzymałością izolacji linii i stacji napięć 110 – 400 kV w Instytucie Energetyki prowadzone były z udziałem autora w latach 2005 do 2012. Badania te miały na celu wyznaczenie rzeczywistej wytrzymałości obecnie stosowanych układów izolacyjnych. Badane obiekty można pogrupować ze względu na poszczególne poziomy napięć.

#### **Dla napięć 110 kV – 220 kV badane były następujące obiekty:**

- Odłącznik stacyjny na napięciu 145 kV – rysunek 28.
- Kolumna wsporcza izolatorów porcelanowych 220 kV – rysunek 30,
- Odłącznik stacyjny na napięciu 220 kV – rysunek 32,
- Podwójny łańcuch przelotowy izolatorów kompozytowych 220 kV RODUR-FELX CS 225 CC – rysunek 34.

#### **Dla napięć 400 kV badane były następujące obiekty:**

- Odłącznik stacyjny na napięciu znamionowe 420 kV – rysunek 37,
- Pojedynczy łańcuch przelotowy 400 kV izolatorów kołpakowych szklanych 25xU160 Sediver – rysunek 41.
- Podwójny łańcuch przelotowy 400 kV – rysunek 43.

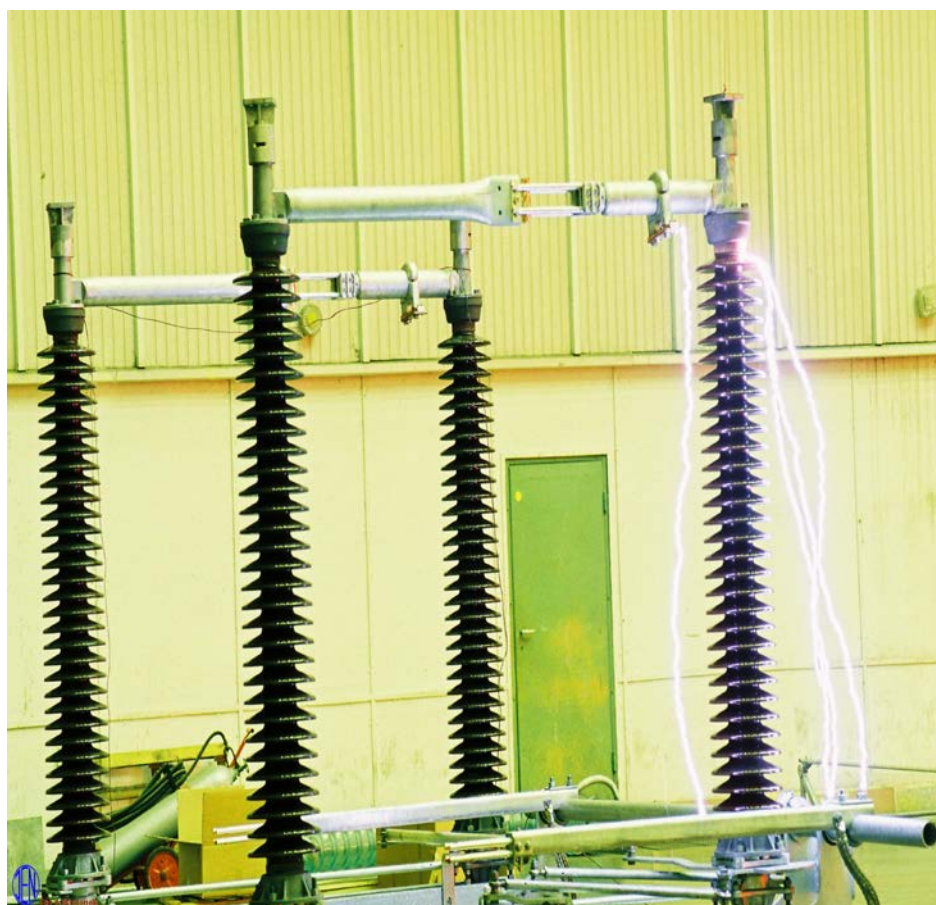
#### **Badane były również obiekty na niestandardowe napięcia takie jak:**

- Kolumna wsporcza izolatorów porcelanowych C6 – 1300 o znamionowym poziomie izolacji 1300 kV – rysunek 45,
- Układ kolumny izolatora wsporczego o poziomie izolacji 500 kV – rysunek 47,
- Odłącznik stacyjny na napięciu 500 kV, jeden biegun – rysunek 49.

## 7.1.1. Wyniki badań obiektów na napięcia 110 – 220 kV

### 7.1.1.1. Odłącznik stacyjny 145 kV

Badaniom udarowym poddano odłącznik na napięcie  $U = 145 \text{ kV}$ , który przedstawiono na rysunku 28. Składał się on z dwóch biegunów z zamontowanymi nożami. Odłącznik umieszczono na izolowanej podstawie o wysokości około 50 mm. Każda kolumna bieguna odłącznika składała się z jednego izolatora, na końcu którego zamontowano ramię noża. Wszystkie bieguny umiejscowiono na obrotowej metalowej ramie umożliwiającej zamykanie i otwieranie się obu biegunów jednocześnie. Odłącznik 145 kV został wyposażony w napędy elektryczne sterujące zamykaniem i otwieraniem noży biegunów oraz uziemników. Jednak w trakcie przeprowadzanych prób odłącznik otwierano i zamykano ręcznie. Wysokość obiektu od metalowej ramy wynosiła 1500 mm. Na rysunku 29 przedstawiono charakterystykę wytrzymałościową badanego obiektu. Wyniki szczegółowych badań przedstawia tabela 3.



Rys. 28 . Przykładowy przeskok na izolacji kolumny odłącznika 145 kV.

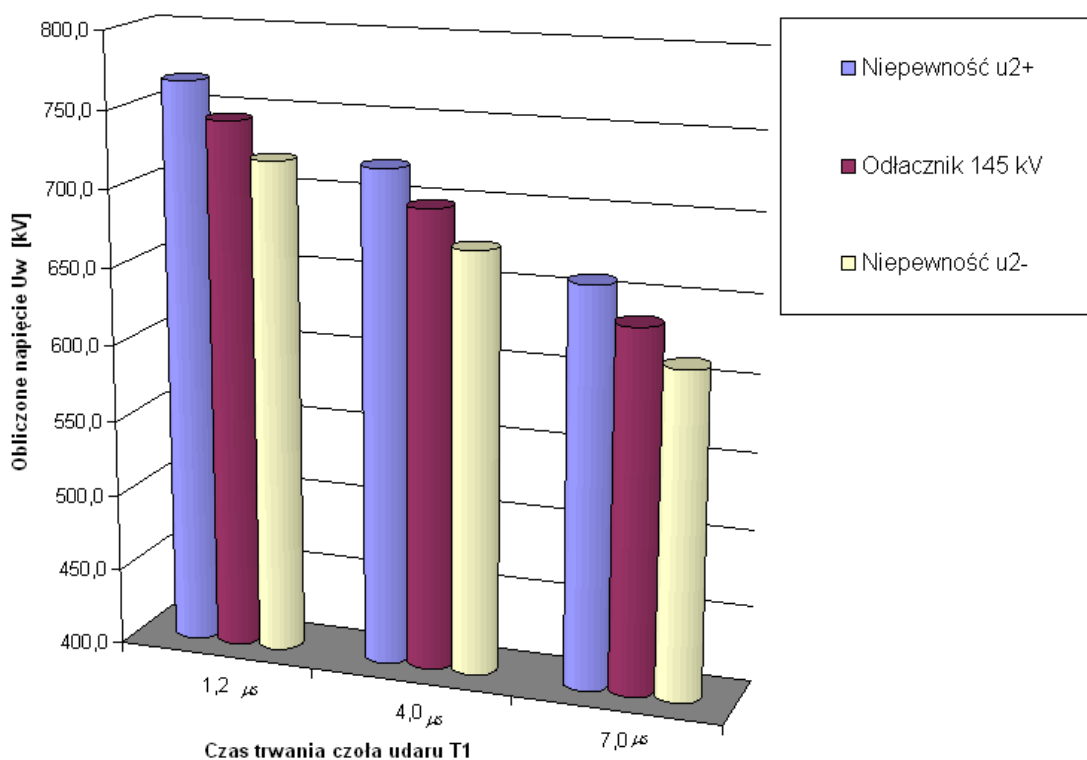


Tabela 3 Szczegółowe dane wyników badań odłącznika 145 kV.

		Kształt udaru $T_1/50 \mu s$		
Czas trwania czoła udaru	$[\mu s]$	1,2	4,0	7,0

Napięcie wyznaczone $U_{50\%}$	$[kV]$	773,9	725,9	661,2
Napięcie wytrzymywane $U_w$	$[kV]$	743,8	697,6	635,5
Niepewność $u_2$	$[kV]$	23,4	23,4	23,4
Napięcie $U_w$ skorygowane o $u_{2-}$	$[kV]$	720,4	674,2	612,1
Napięcie $U_w$ skorygowane o $u_{2+}$	$[kV]$	767,2	721,0	658,9

Wytrzymałości izolacji odłącznika 145 kV w zależności od zmiany czasu trwania czoła udaru  $T_1$



Rys. 29. Poglądowa charakterystyka wytrzymałościowa odłącznika na napięcie 145 kV w zależności od zmiany czasu trwania czoła udaru  $T_1$ .

### Ocena badawcza

Z przytoczonego przykładu badań odłącznika na napięciu 145 kV obserwuje się zależność obniżenia wytrzymałości elektrycznej doziemnej w zależności od zmieniającego się czasu czoła udaru  $T_1$ .

- Obniżenie znamionowej wytrzymałości  $U_w$  szacuje się na około 15%.
- Wartość zapasu wytrzymałości w odniesieniu do wartości przyjmowanej

$$U_n = 650 \text{ kV}$$

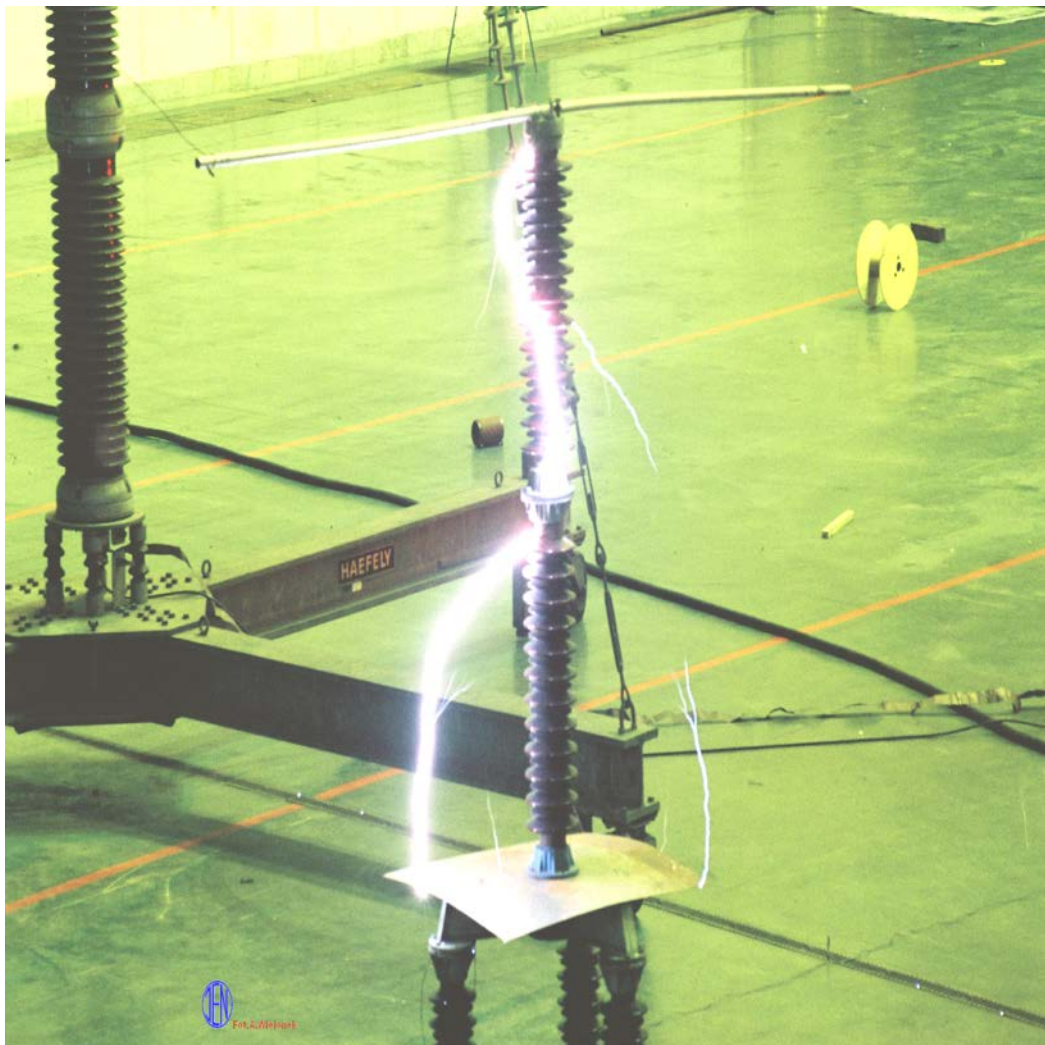
i. Przy czasie czoła  $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$        $U_z = + 123,9 \text{ kV}$

ii. Przy czasie czoła  $T_1 = 7,0 \mu\text{s}$        $U_z = + 11,2 \text{ kV}$

Różnica w wyznaczonych wartościach napięć wytrzymywanych jest znacząca dopiero przy czasie czoła  $T_1 = 7 \mu\text{s}$ . Z praktycznej oceny inżynierskiej wpływ określonej niepewności nie ma znaczenia w ocenie procesu zjawiska obniżenia wytrzymałości badanej izolacji.

### 7.1.1.2. Kolumna wsporcza izolatorów porcelanowych 220 kV

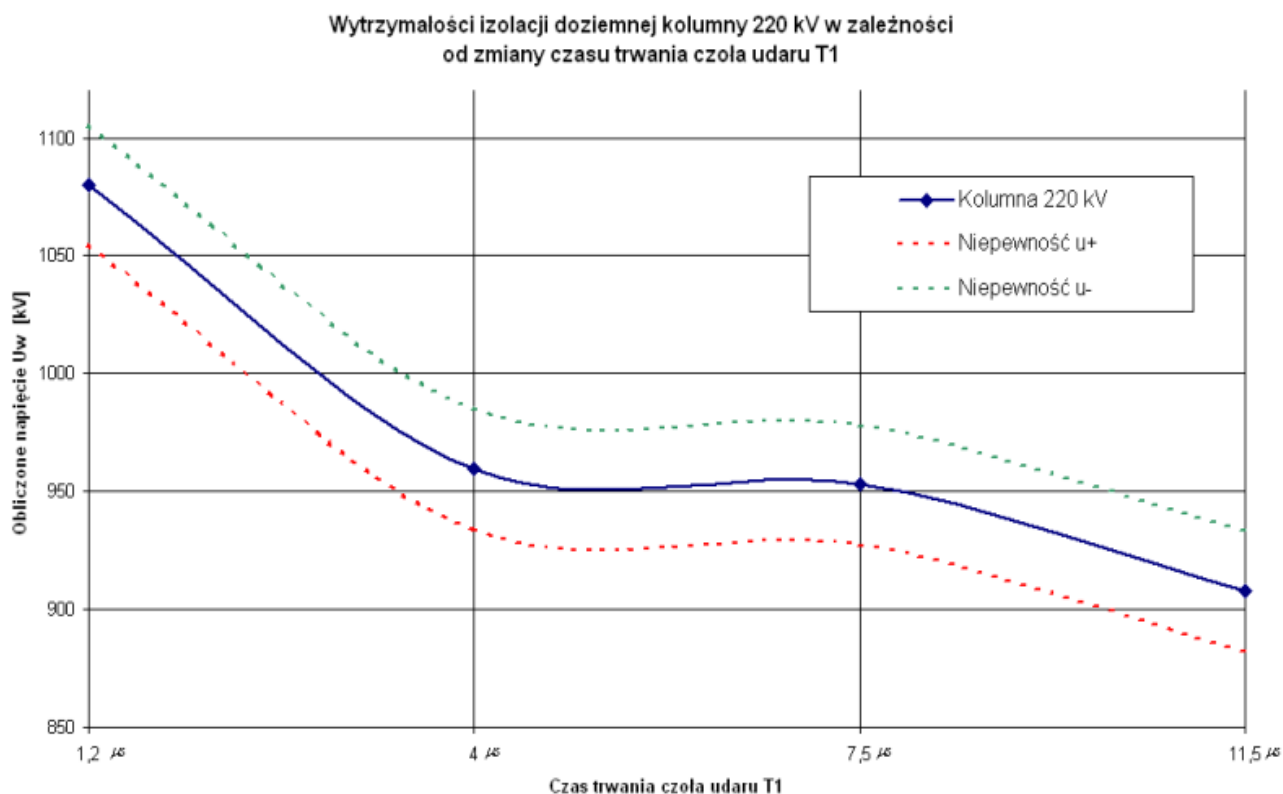
Badany obiekt to kolumna wsporcza izolatorów o łącznej wysokości 2000 mm, który przedstawiony jest na rysunku 30. Na obiekt składały się dwa izolatory porcelanowe połączone ze sobą szeregowo. Kolumnę umieszczono na izolowanej podstawie o wysokości około 3000 mm. U podstawy kolumny mieszono uziemioną metalową płytę. W celu uniknięcia wystąpienia zjawisk brzegowych płyta posiadała odpowiednie wymiary. Na wierzchołku badanego obiektu umieszczono metalową rurę, o długości odpowiadającej wymaganiom normy do badań wytrzymałości izolacji wysokonapięciowej. Dane wyników badań przedstawiono w tabeli 4, natomiast przebiegi zależności wytrzymałości badanej izolacji przedstawiono rysunku 31.



Rys. 30 . Przykładowy przeskok na izolacji kolumny 220 kV.

Tabela 4 Szczegółowe dane wyników badań kolumny izolatorów porcelanowych na napięcie 220 kV.

		Kształt udaru $T_1/50 \mu s$			
Czas trwania czoła udaru	$[\mu s]$	1,2	4,0	7,5	11,5
Napięcie wyznaczone $U_{50\%}$	[kV]	1124,4	998,6	991,4	944,5
Napięcie wytrzymałwane $U_w$	[kV]	1080,3	959,7	952,8	907,7
Niepewność $u_2$	[kV]	25,6	25,6	25,6	25,6
Napięcie $U_w$ skorygowane o $u_{2-}$	[kV]	1054,7	934,2	927,3	882,2
Napięcie $U_w$ skorygowane o $u_{2+}$	[kV]	1105,7	985,2	978,3	933,2



Rys. 31. Charakterystyka wytrzymałości doziemnej kolumny izolatorów na napięcie 220 kV w zależności od zmiany czasu trwania czoła udaru  $T_1$  wraz z zaznaczonymi obszarami wyznaczonej niepewności pomiarowej

### Ocena badawcza

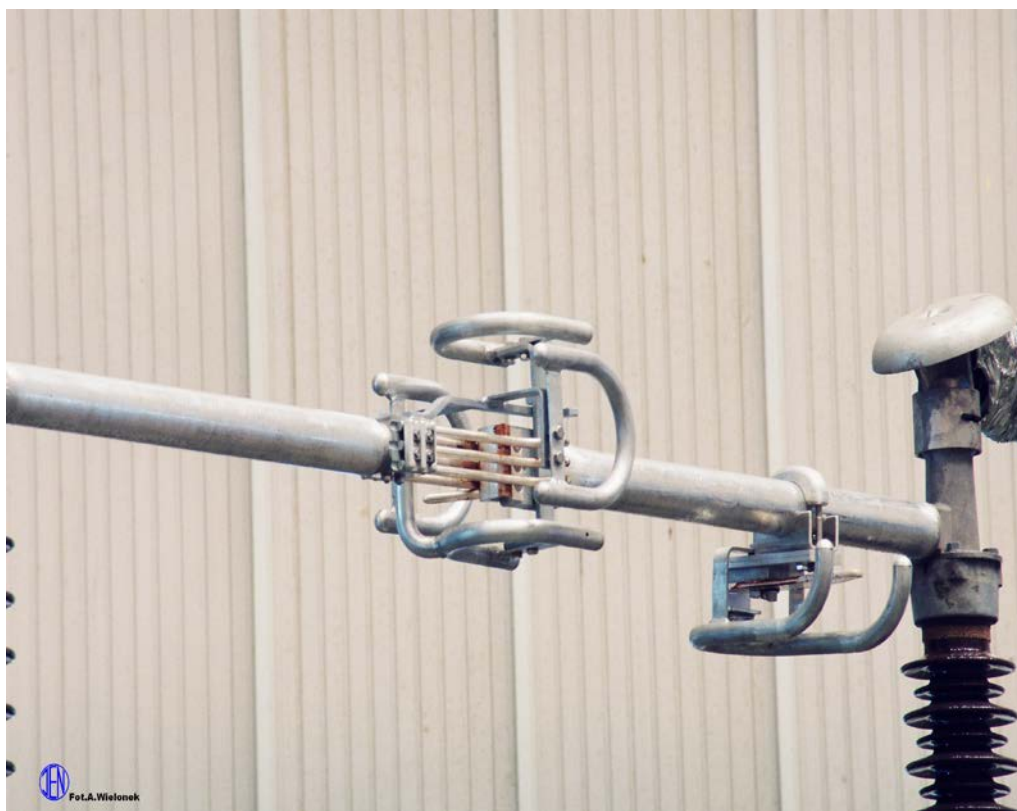
Badany obiekt na znamionowe napięcie 220 kV, stosowany praktycznie w każdej stacji rozdzielczej jako element podpierający, wykazuje zmienność wytrzymałości badanej izolacji.

- Obniżenie znamionowej wytrzymałości  $U_w$  szacuje się na około 16 %.
- Wartość wyznaczonej niepewności standardowej rozszerzonej wynosi  $u_2 = 25,5$  kV.
- Wartość zapasu wytrzymałości w odniesieniu do wartości przyjmowanej  $U_n = 1050$  kV
  - i. Przy czasie czoła  $T_1 = 1,2$   $\mu$ s  $U_z = + 30,3$  kV
  - ii. Przy czasie czoła  $T_1 = 11,5$   $\mu$ s  $U_z = -142,3$  kV

W żadnym z przedstawionych punktów pomiarowych nie odnotowano zakrzywienia obszaru niepewności, który by zawężył lub poszerzał obszar niepewności pomiarowej. Sparametryzowany przebieg obniżenia można określić wzorem  $y = -25,307x^3 + 208,64x^2 - 569,25x + 1466,2$ .

### 7.1.1.3. Odłącznik stacyjny 220 kV

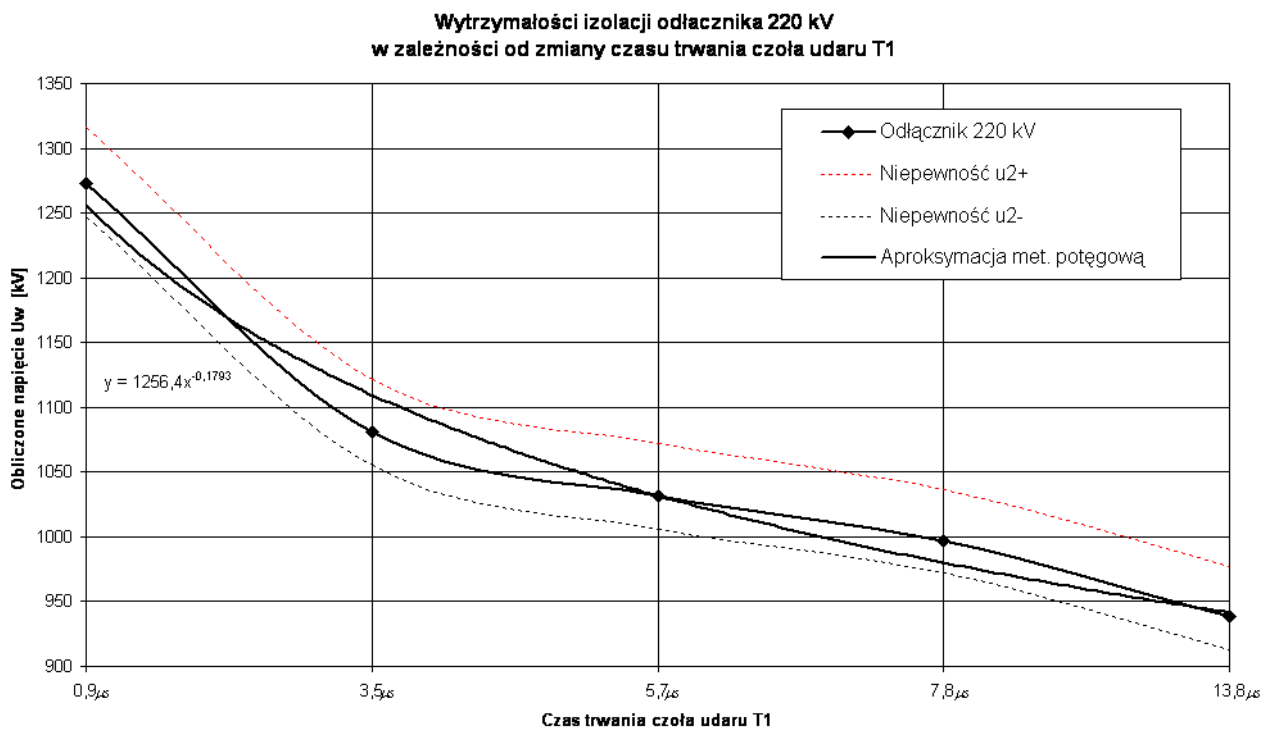
Kolejnym obiektem badań jest odłącznik na napięcie znamionowe 220 kV, który składał się z dwóch biegunów wsporczych izolatorów porcelanowych. Obiekt dostarczono do laboratorium w osobnych częściach. Montażu dokonał personel laboratorium zgodnie z dokumentacją dostarczoną przez producenta. Podczas badań odłącznik był zamknięty. Poprzez to, badana była izolacja doziemna i między-biegunowa. Badany obiekt przedstawiony jest na rysunku 32. Dane obliczeniowe napięcia wytrzymywanego  $U_w$  oparte są na metodzie opisanej w rozdziale 5.2. oraz 5.3. Wyniki przedstawia tabela 5. Charakterystyka napięciowa przedstawiona jest na rysunku 33.



Rys. 32. Odłącznik na napięcie 220 kV w trakcie badań. Stan zamknięty.

Tabela 5. Zestawienie wartości wyników badań odłącznika 220 kV

Czas trwania czoła udaru [μs]	Kształt udaru T <sub>1</sub> /50 μs				
	0,9	3,5	5,7	7,8	13,8
Napięcie wyznaczone U <sub>50%</sub> [kV]	1324,1	1124,4	1085,7	1037,8	976,1
Napięcie wytrzymywane U <sub>w</sub> [kV]	1272,5	1080,6	1031,7	997,4	938,1
Niepewność u <sub>2</sub> [kV]	25,4	25,4	25,4	22,2	23,0
Napięcie U <sub>w</sub> skorygowane o u <sub>2+</sub> [kV]	1315,9	1121,3	1057,1	1019,6	961,1
Napięcie U <sub>w</sub> skorygowane o u <sub>2-</sub> [kV]	1247,1	1055,2	1006,3	975,2	915,1



Rys. 33. Charakterystyka wytrzymałości doziemnej odłącznika na napięciu 220 kV w zależności od zmiany czasu trwania czoła udaru T<sub>1</sub> wraz z zaznaczonymi obszarami wyznaczonej niepewności pomiarowej

### Ocena badawcza

Badany obiekt to odłącznik na znamionowe napięcie 220 kV. Badana izolacja wykazuje zmienność wytrzymałości.

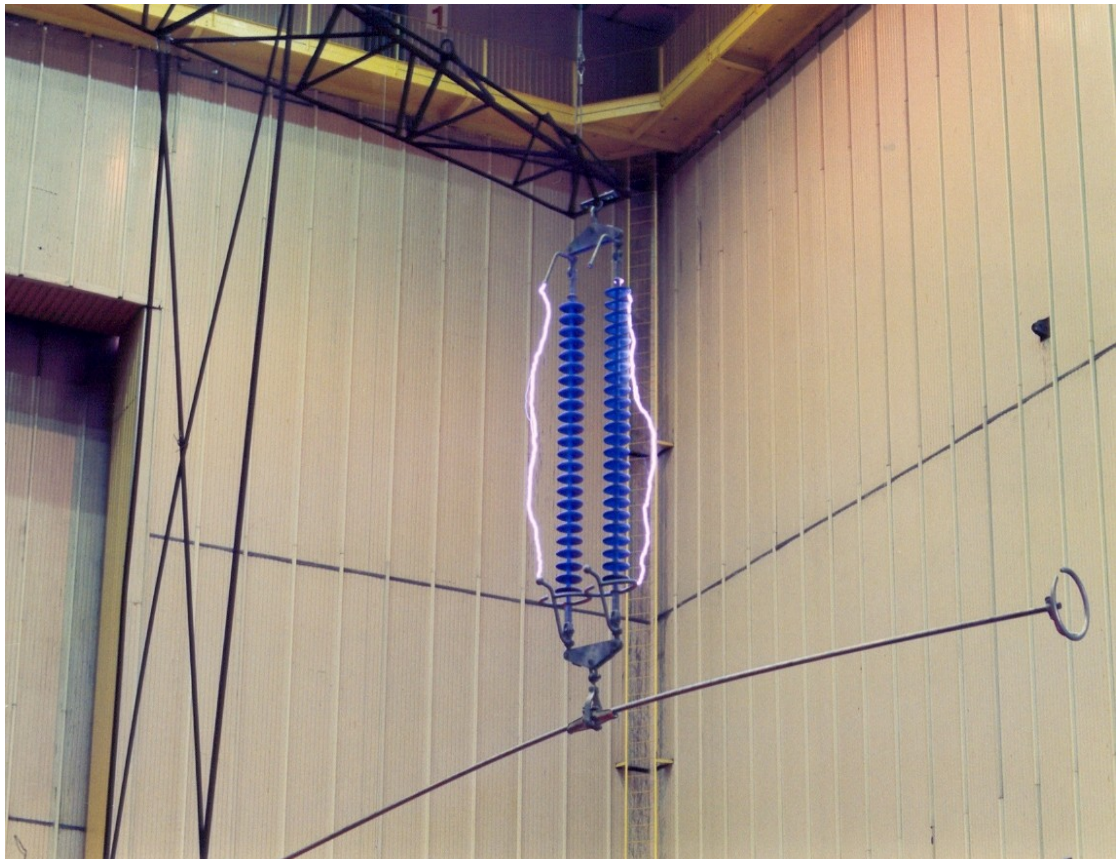
- Obniżenie znamionowej wytrzymałości  $U_w$  szacuje się na około 26 %.
- Wartość wyznaczonej niepewności standardowej rozszerzonej wynosi  $u_2 = 25,4$  kV.
- Odnotowana wysoka wartość obniżenia badanej wytrzymałości.
- Wartość zapasu wytrzymałości w odniesieniu do wartości przyjmowanej  $U_n = 1050$  kV
  - i. Przy czasie czoła  $T_1 = 0,9 \mu\text{s}$        $U_z = + 222,5$  kV
  - ii. Przy czasie czoła  $T_1 = 13,8 \mu\text{s}$        $U_z = - 111,9$  kV

Na przedstawionym rysunku 33, pokazano równanie matematyczne krzywej regresji w odniesieniu do wartości wytrzymywanej badanego obiektu.



#### 7.1.1.4. Podwójny łańcuch przelotowy 220 kV

Kolejnym obiektem badań był łańcuch przelotowy na napięcie: 220 kV izolatorów kompozytowych typu RODURFELX CS 225/CC, który składał się z dwóch izolatorów liniowych połączonych ze sobą szeregowo. Obiekt dostarczono do laboratorium w osobnych częściach. Montażu dokonał personel laboratorium zgodnie z dokumentacją dostarczoną przez producenta. Podczas badań łańcuch wyposażony został w osprzęt łuko – ochronny znanej polskiej firmy. Badany obiekt podczas badań przedstawiony jest na rysunku 34. Dane obliczeniowe napięcia wytrzymywanego  $U_w$  zawarte są w tabeli 6.

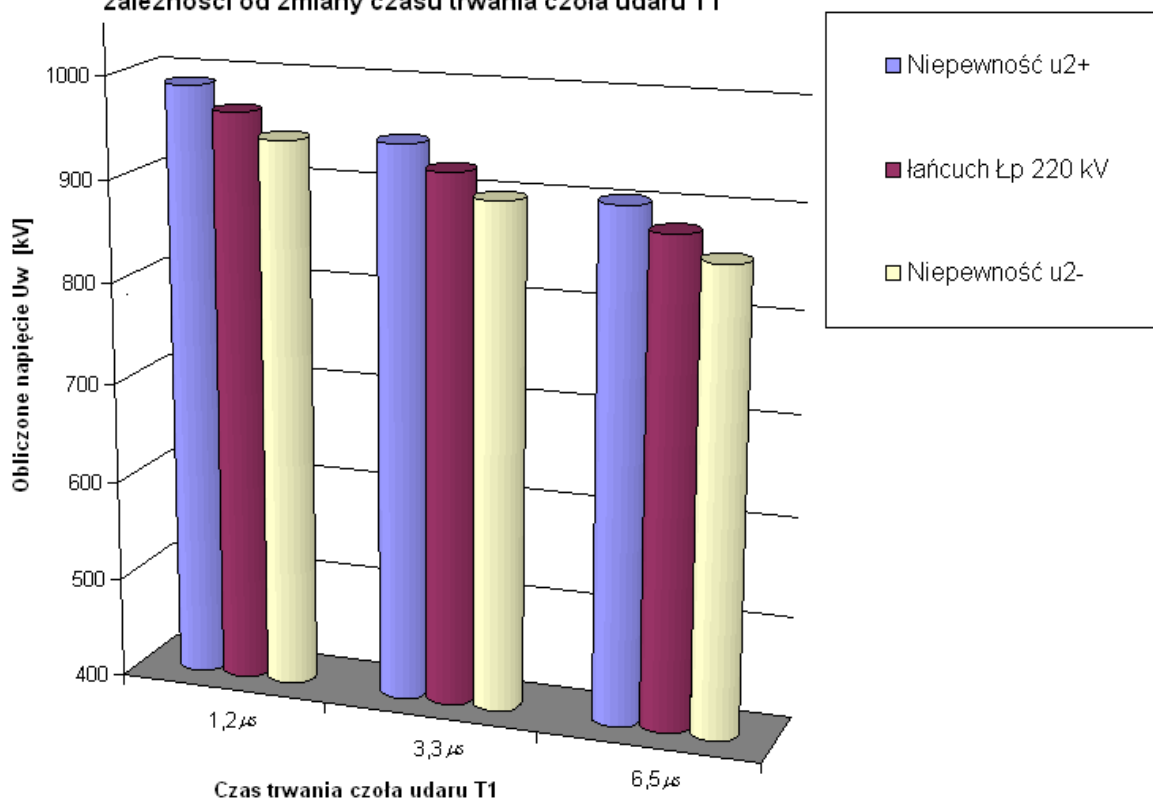


Rys. 34. Przeskoki na łańcuchu przelotowym ŁP – 220, izolatorów kompozytowych

Tabela 6 Szczegółowe dane badań łańcucha przelotowego ŁP 220 kV

		Kształt udaru $T_1/50 \mu s$		
Czas trwania czoła udaru	$[\mu s]$	1,2	3,3	6,5
Napięcie wyznaczone $U_{50\%}$	[kV]	1004,6	960,0	915,9
Napięcie wytrzymywane $U_w$	[kV]	965,5	922,6	880,2
Niepewność $u_2$	[kV]	23,5	23,5	23,5
Napięcie $U_w$ skorygowane o $u_{2-}$	[kV]	942,0	899,1	856,7
Napięcie $U_w$ skorygowane o $u_{2+}$	[kV]	989,0	946,1	903,7

Wytrzymałości izolacji łańcucha przelotowego ŁP 220 kV izolatorów kompozytowych w zależności od zmiany czasu trwania czoła udaru  $T_1$



Rys. 35. Poglądowa charakterystyka wytrzymałościowa łańcucha przelotowego ŁP 220 kV izolatorów kompozytowych w zależności od zmiany czasu trwania czoła udaru  $T_1$ .

### Ocena badawcza

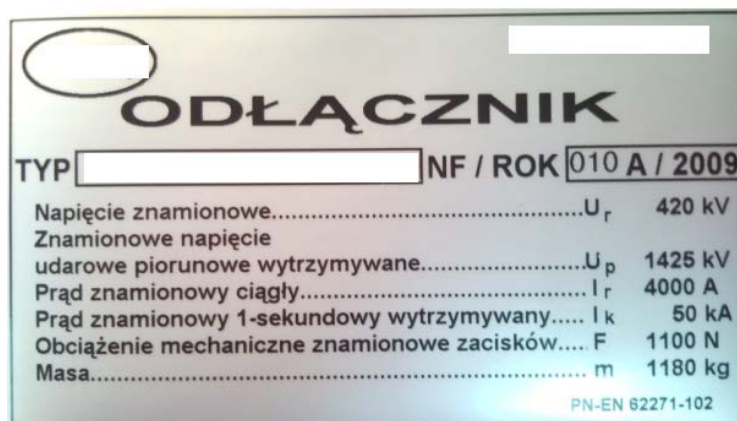
Badany łańcuch przelotowy ŁP 220 kV na napięcie 220 kV, skonstruowany z połączenia równoległego dwóch izolatorów kompozytowych wykazuje następujące właściwości:

- Obniżenie znamionowej wytrzymałości  $U_w$  szacuje się na około 13 %.
- Wartość wyznaczonej niepewności standardowej rozszerzonej wynosi  $u_2 = 23,5$  kV.
- Wartość zapasu wytrzymałości w odniesieniu do wartości przyjmowanej  $U_n = 1050$  kV
  - i. Przy czasie czoła  $T_1 = 1,2$   $\mu$ s  $U_z = + 84,5$  kV
  - ii. Przy czasie czoła  $T_1 = 6,5$   $\mu$ s  $U_z = - 169,8$  kV

## 7.1.2. Wyniki badań obiektów na napięcia 400 kV

### 7.1.2.1. Odłącznik stacyjny 420 kV

Badania porównawcze, które prowadzono w roku 2009 dotyczyły odłącznika na napięcie znamionowe 420 kV. Był to odłącznik produkcji polskiej. Dane techniczne uwidocznione są na tabliczce znamionowej odłącznika rysunek 36. Ze względu na prawa autorska nazwa odłącznika oraz producent zostały zamazane.



Tabliczka znamionowa odłącznika 420 kV. W górnej części znajduje się logo i tytuł "ODŁĄCZNIK". Poniżej podano dane techniczne w formie tabeli. W prawym górnym rogu tabliczki znajduje się zamazany numer seryjny. W tabeli dane techniczne są rozdzielone kolumnami: nazwa parametru, symbol i jednostka, oraz wartość. W prawym dolnym rogu znajduje się odwołanie do normy PN-EN 62271-102.

ODŁĄCZNIK	
TYP	NF / ROK 010 A / 2009
Napięcie znamionowe.....	$U_r$ 420 kV
Znamionowe napięcie	
udarowe piorunowe wytrzymywane.....	$U_p$ 1425 kV
Prąd znamionowy ciągły.....	$I_r$ 4000 A
Prąd znamionowy 1-sekundowy wytrzymywany....	$I_k$ 50 kA
Obciążenie mechaniczne znamionowe zacisków....	F 1100 N
Masa.....	m 1180 kg
PN-EN 62271-102	

Rys. 36. Tabliczka znamionowa badanego odłącznika 420 kV.

Odłącznik składał się z dwóch biegunów, wyposażony był w uziemniki oraz odpowiednie ekrany sterujące polem elektromagnetycznym. Izolacja odłącznika to kolumny wsporcze izolatorów porcelanowych. Na rysunku 37 pokazano obiekt w Hali Laboratorium Wysokich Napięć IEN.

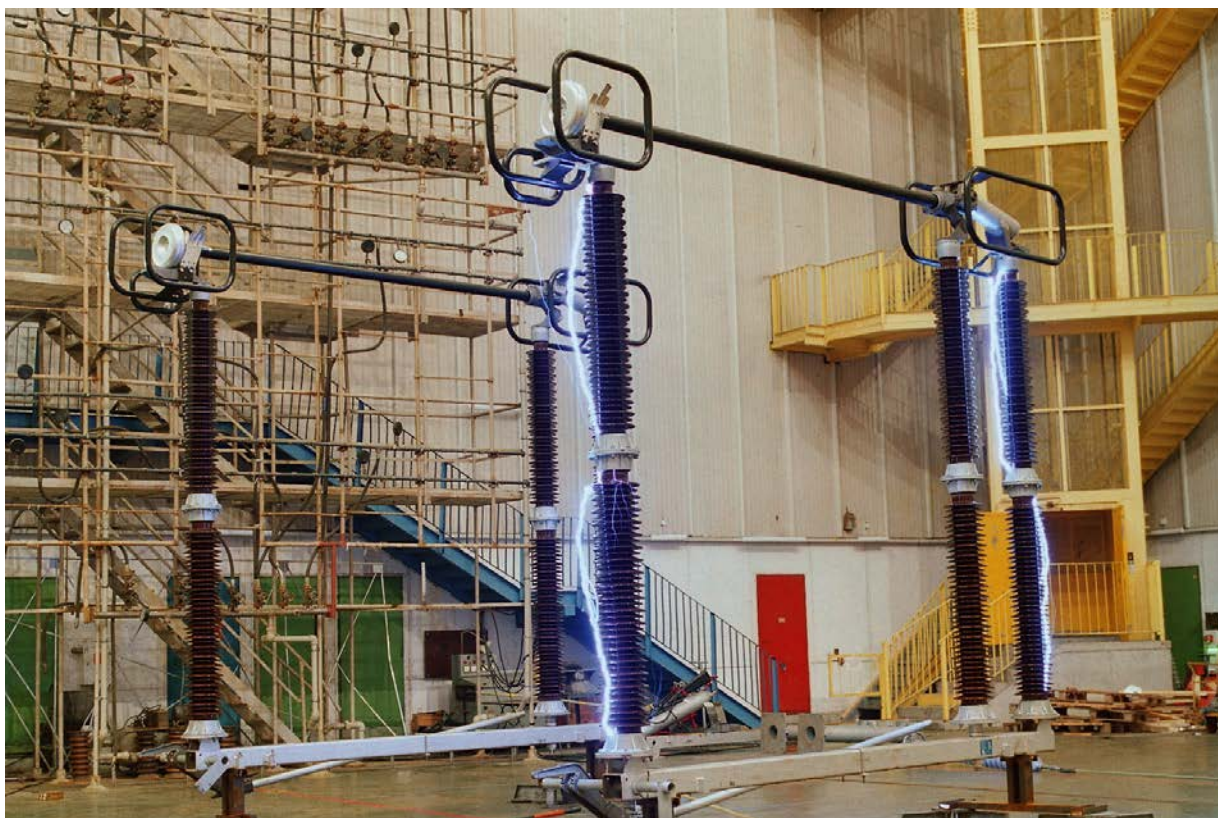
Odłącznik w trakcie badań był umieszczony na odpowiedniej izolowanej wysokości „I” w stanie zamkniętym. Miał uziemioną podstawę „F” oraz otwarty uziemnik „U” dla jednego pola. Taka konfiguracja pozwala na przeprowadzanie badań wytrzymałości izolacji doziemnej. Obserwowane przeskoki miały miejsce między ekranami „A”, a uziemioną podstawą „F”. Obiekt w trakcie badań, z zarejestrowanymi przeskokami przedstawiono na rysunku 38. W tabeli 7 przedstawiono szczegółowe wyniki badań dla odłącznika.



Rys. 37. Odłącznik 420 kV w Laboratorium Wysokich Napięć IEN.

Tabela 7 Szczegółowe dane wartości wyników badań odłącznika 420 kV.

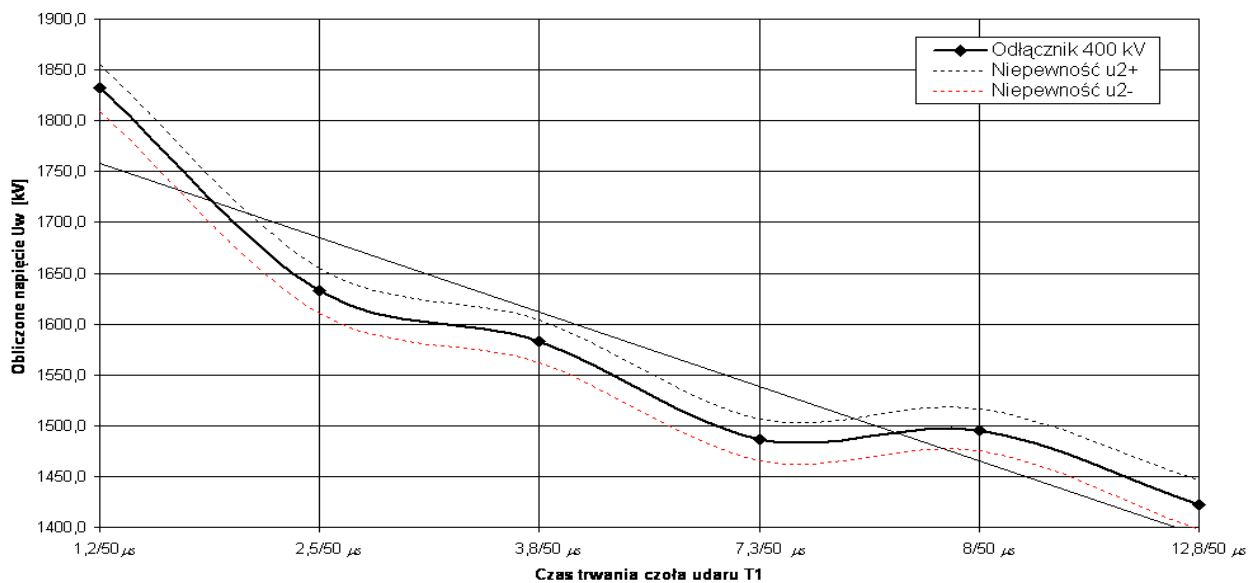
		Kształt udaru $T_1/50 \mu s$					
Czas trwania czoła udaru	$[\mu s]$	1,2	2,5	3,8	7,3	8,0	12,8
Napięcie wyznaczone $U_{50\%}$	[kV]	1906,7	1699,0	1647,5	1546,5	1556,2	1479,9
Napięcie wytrzymywane $U_w$	[kV]	1832,4	1632,8	1583,3	1486,2	1495,5	1422,2
Niepewność $u_2$	[kV]	23,0	22,0	21,2	20,6	20,6	24,0
Napięcie $U_w$ skorygowane o $u_{2+}$	[kV]	1855,4	1654,8	1604,5	1506,8	1516,1	1446,2
Napięcie $U_w$ skorygowane o $u_{2-}$	[kV]	1809,4	1610,8	1562,1	1465,6	1474,9	1398,2



Rys.38. Obiekt badań w laboratorium Wysokich Napięć IEN. Zdjęcie pokazujące przeskoki

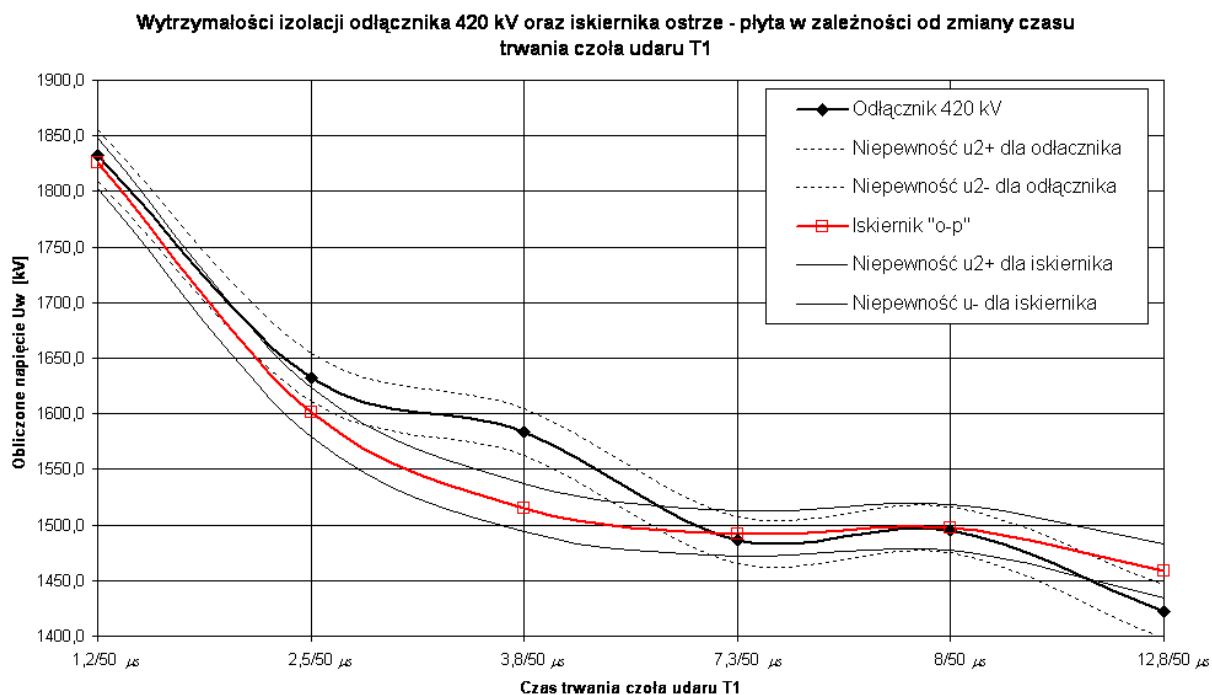
Wykres zależności wytrzymałości od zmiennego trwania czasu czoła przedstawia rysunek 39. Cienką linią czarną poprowadzono aproksymację wykresu metodą liniową.

**Zależność wytrzymałości izolacji doziemnej odłącznika 420 kV do zmiany czasu trwania czoła udaru T<sub>1</sub>**



Rys. 39. Charakterystyka wytrzymałościowa odłącznika na napięcia 420 kV w zależności od zmiany czasu trwania czoła udaru T<sub>1</sub>.

Jak wykazuje przegląd literatury, wielu Autorów wykonywało próby na modelach iskiernikowych mające na celu odwzorowanie rzeczywistego obiektu [30,29,28]. W przypadku omawianego odłącznika 420 kV dokonano również takiego porównania. Na rysunku 40 przedstawiono charakterystykę wytrzymałości iskiernika ostrze – płyta (z zachowaniem odstępów izolacyjnych odłącznika 420 kV) wraz z przebiegiem napięciowym badanego odłącznika 420 kV.



Rys. 40. Charakterystyka wytrzymałościowa odłącznika na napięcia 420 kV. w zależności od zmiany czasu trwania czoła udaru T<sub>1</sub>

Porównując rysunki 39 i 40 łatwo zauważyć podobieństwa w niektórych punktach pomiarowych. Jednakże warto zwrócić uwagę na „łagodny” przebieg charakterystyki iskiernika, w stosunku do rzeczywistego obiektu. Różnice te mogą wynikać z rozkładu pola sterowanego przez osprzęt łuko ochronny.

### Ocena badawcza

Badany odłącznik na napięciu 420 kV wykazuje następujące właściwości:

- Obniżenie znamionowej wytrzymałości  $U_w$  szacuje się na około 22,3 %.
- Wartości wyznaczonej niepewności standardowej rozszerzonej są różne i mieszczą się w granicach  $u_2 = 20,6 \div 24,0$  kV.
- Wartość zapasu wytrzymałości w odniesieniu do wartości przyjmowanej  $U_n = 1425$  kV

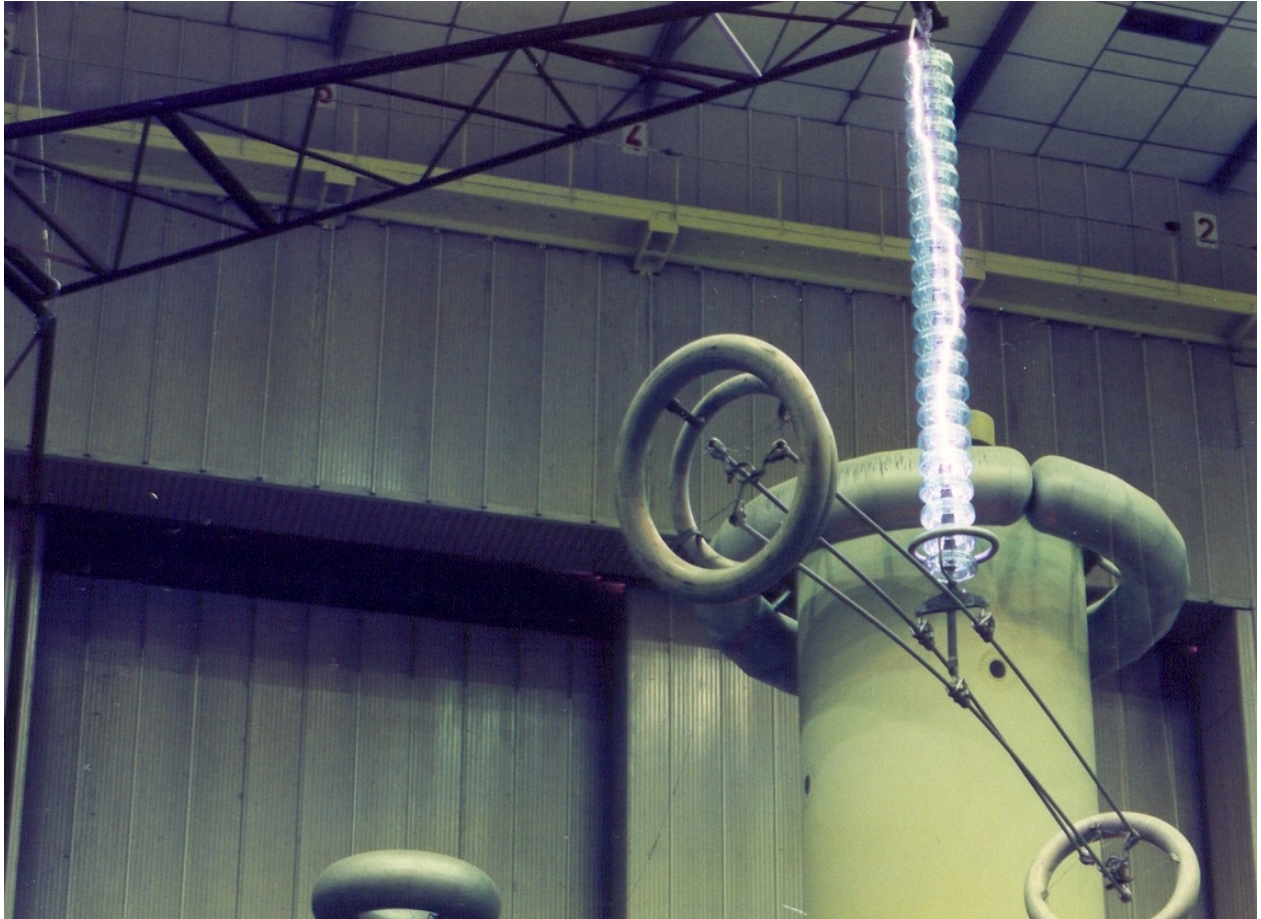
i. Przy czasie czoła  $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$        $U_z = + 407,4$  kV

ii. Przy czasie czoła  $T_1 = 12,8 \mu\text{s}$        $U_z = - 2,8$  kV



### 7.1.2.1. Łańcuch przelotowy pojedynczy 400 kV

Kolejną grupą obiektów badań były łańcuchy liniowe na napięcia 400 kV. Pierwszy z nich był łańcuch przelotowy ŁP – 400 kV izolatorów kołpakowych szklanych 25xU160 Sediver. Omawiany obiekt przedstawiony został na rysunku 41. Wyniki badań łańcucha zestawiono w tabeli 8.

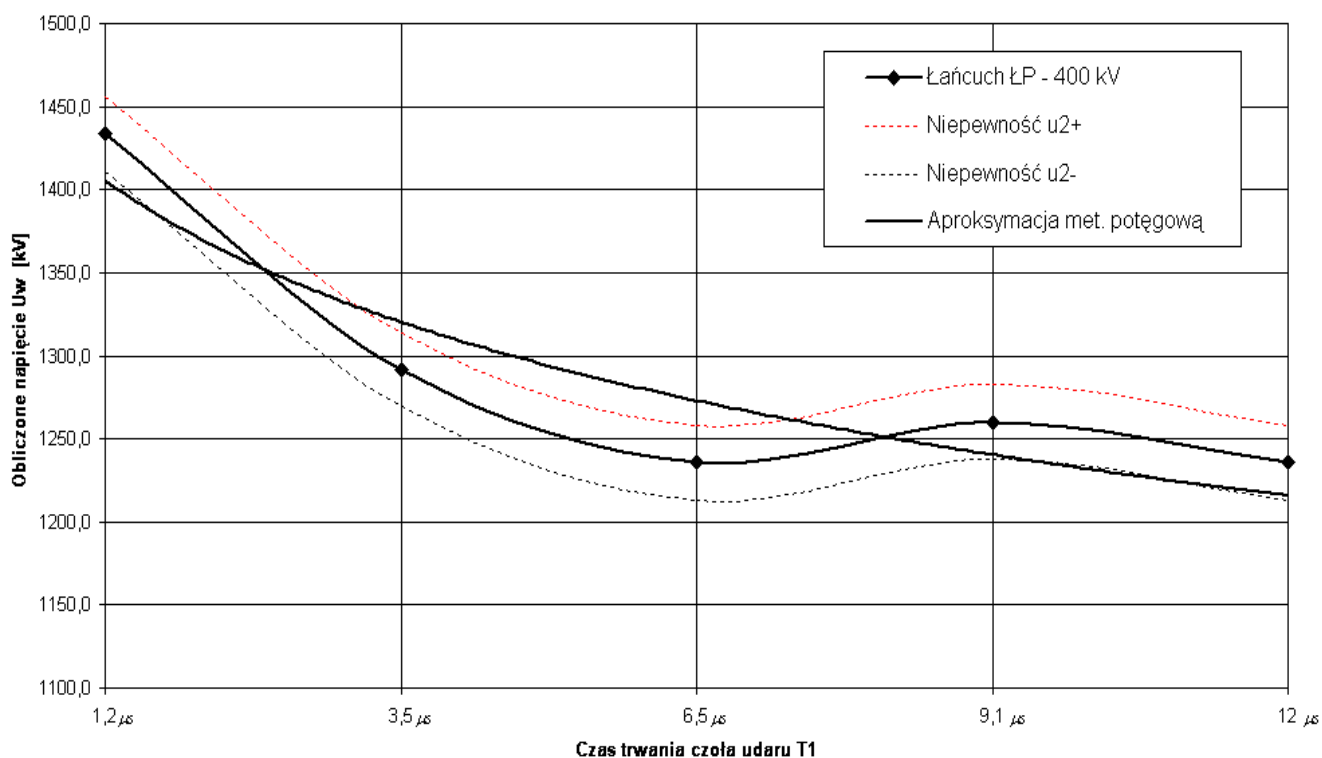


Rys. 41. Przeskoki na łańcuchu ŁP – 400, izolatorów kołpakowych szklanych

Tabela 8 Szczegółowe dane wyników badań łańcucha przelotowego ŁP – 400 kV

Czas trwania czoła udaru [μs]	Kształt udaru $T_1/50 \mu s$				
	1,2	3,5	6,5	9,1	12,0
Napięcie wyznaczone $U_{50\%}$ [kV]	1491,6	1344,0	1285,8	1311,0	1285,5
Napięcie wytrzymywane $U_w$ [kV]	1433,5	1291,6	1235,7	1259,9	1235,7
Niepewność $u_2$ [kV]	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5
Napięcie $U_w$ skorygowane o $u_{2+}$ [kV]	1456,0	1314,1	1258,2	1282,4	1258,2
Napięcie $U_w$ skorygowane o $u_{2-}$ [kV]	1411,0	1269,1	1213,2	1237,4	1213,2

Wytrzymałości izolacji łańcucha przelotowego ŁP - 400 kV  
w zależności od zmiany czasu trwania czoła udaru  $T_1$



Rys. 42. Charakterystyka wytrzymałości doziemnej łańcucha przelotowego 400 kV w zależności od zmiany czasu trwania czoła udaru  $T_1$  wraz z zaznaczonymi obszarami wyznaczonej niepewności pomiarowej

### Ocena badawcza

Badany łańcuch przelotowy na napięciu 400 kV wykazuje następujące właściwości:

- Obniżenie znamionowej wytrzymałości  $U_w$  szacuje się na około 14 %.
- Wartości wyznaczonej niepewności standardowej rozszerzonej są jednakowe i wynoszą  $u_2 = 22,5$  kV.
- Wartość zapasu wytrzymałości w odniesieniu do wartości przyjmowanej  $U_n = 1425$  kV

i. Przy czasie czoła  $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$        $U_z = + 8,5$  kV

ii. Przy czasie czoła  $T_1 = 12,0 \mu\text{s}$        $U_z = -189,3$  kV

Warto zwrócić uwagę na możliwą istotną rolę wpływu imitacji konstrukcji słupa zamontowanego podczas badań oraz zamontowanego osprzętu łuku ochronnego.

### 7.1.2.3. Łańcuch przelotowy podwójny 400 kV

Do badań wybrano układ liniowy ŁP2 400 kV. Obiekt składał się izolatorów szklanych kołpakowych. Podczas badań do obiektu podłączono imitację ramienia słupa o odpowiednich wymiarach, zgodnych z dostarczoną dokumentacją techniczną. Omawiany obiekt charakteryzuje się ograniczonym marginesem bezpieczeństwa wytrzymałości izolacji, który wynika z założeń projektowych. Badany łańcuch producenci przeznaczają do stosowania w energetyce europejskiej. Obiekt przedstawiony jest na rysunku 43. Wyniki badań przedstawia tabela 9. Charakterystyka wytrzymałościowa przedstawiona jest na rysunku 44.

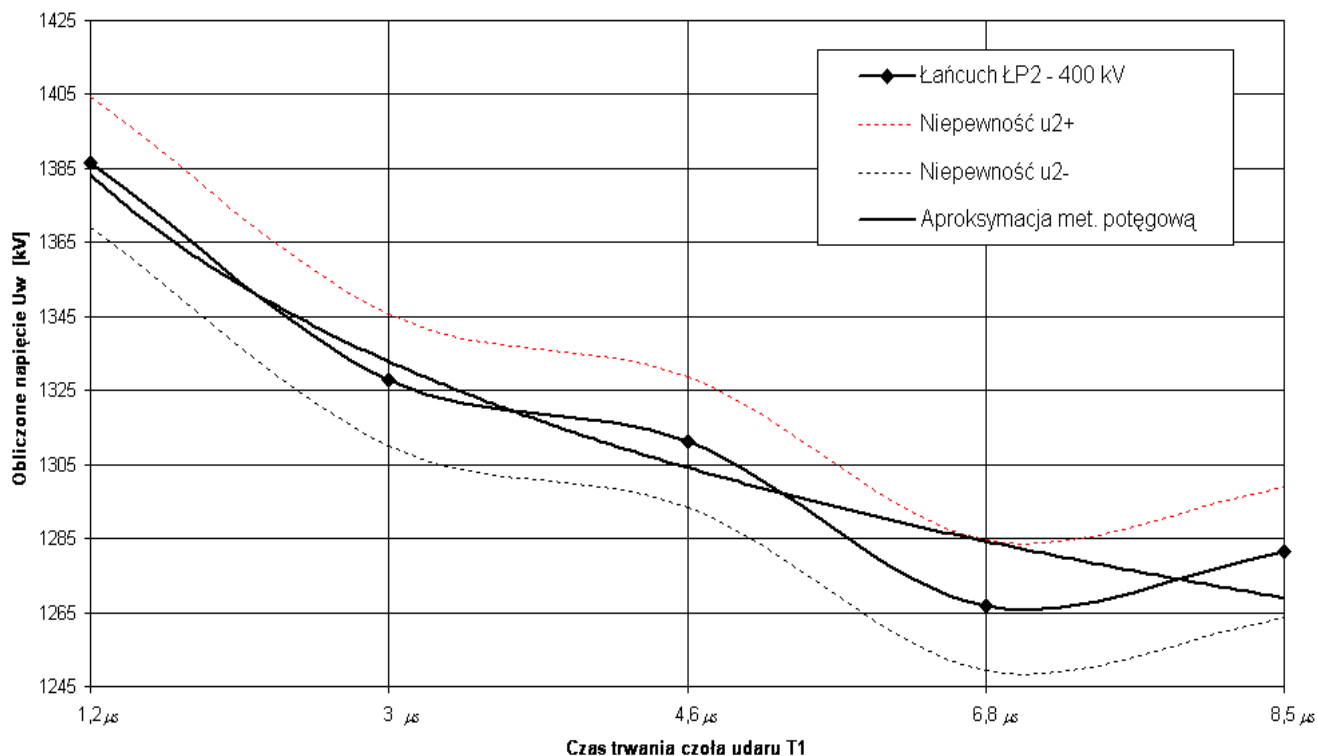


Rys. 43. Podwójny łańcuch przelotowy izolatorów szklanych kołpakowych

Tabela 9 Szczegółowe dane wyników badań podwójnego łańcucha przelotowego  
 ŁP2 – 400 kV

		Kształt udaru $T_1/50 \mu s$				
Czas trwania czoła udaru	$[\mu s]$	1,2	3,0	4,6	6,8	8,5
Napięcie wyznaczone $U_{50\%}$	[kV]	1442,8	1381,8	1364,3	1318,3	1333,3
Napięcie wytrzymywane $U_w$	[kV]	1386,6	1327,9	1311,1	1266,9	1281,3
Niepewność $u_2$	[kV]	17,7	17,7	17,7	17,7	17,7
Napięcie $U_w$ skorygowane o $u_{2+}$	[kV]	1404,3	1345,6	1328,8	1284,6	1299,0
Napięcie $U_w$ skorygowane o $u_{2-}$	[kV]	1368,9	1310,2	1293,4	1249,2	1263,6

Wytrzymałości izolacji łańcucha przelotowego ŁP2 - 400 kV  
 w zależności od zmiany czasu trwania czoła udaru  $T_1$



Rys. 44. Charakterystyka wytrzymałości doziemnej podwójnego łańcucha przelotowego 400 kV  
 w zależności od zmiany czasu trwania czoła udaru  $T_1$  wraz z zaznaczonymi obszarami  
 wyznaczonej niepewności pomiarowej

### Ocena badawcza

Badany łańcuch przelotowy ŁP2 400 kV wykazuje następujące właściwości:

- Obniżenie znamionowej wytrzymałości  $U_w$  szacuje się na około 8 %.
- Wartości wyznaczonej niepewności standardowej rozszerzonej są podobne i wynoszą  $u_2 = 17,7$  kV.
- Wartość zapasu wytrzymałości w odniesieniu do wartości przyjmowanej  $U_n = 1425$  kV

i. Przy czasie czoła  $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$        $U_z = -38,0$  kV

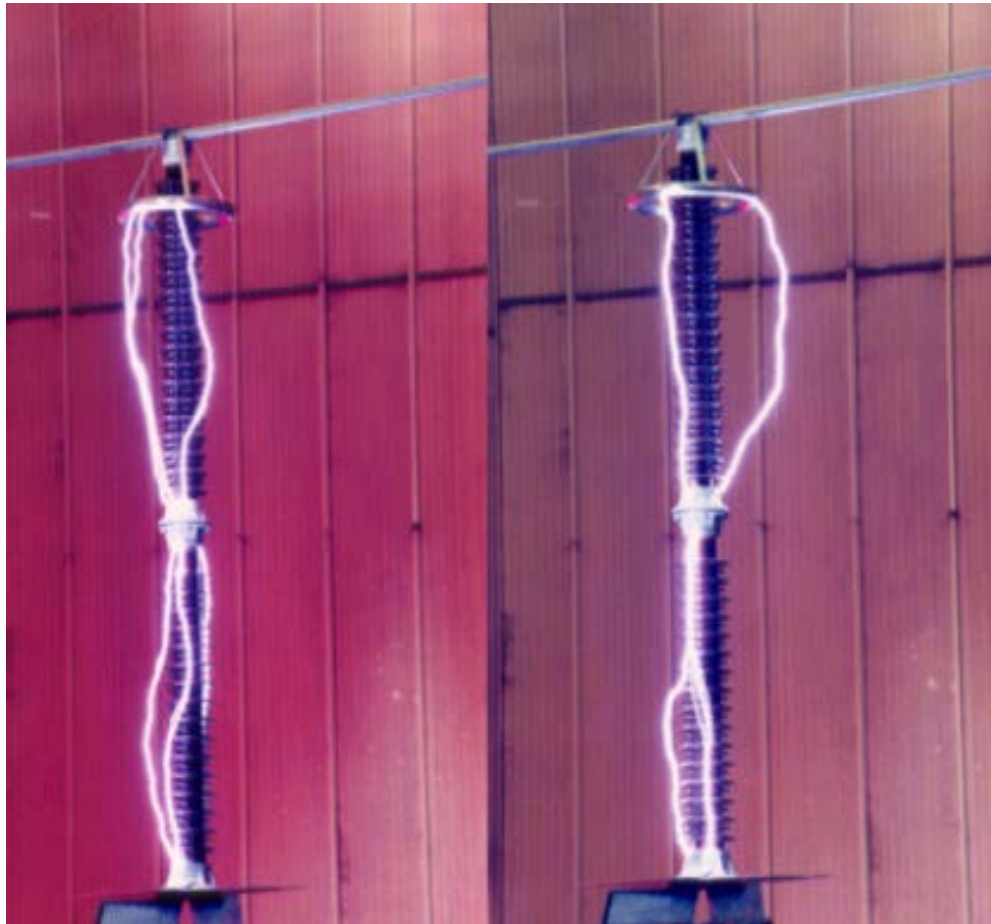
ii. Przy czasie czoła  $T_1 = 8,5 \mu\text{s}$        $U_z = -144,0$  kV

Warto zwrócić uwagę na możliwą istotną rolę wpływu imitacji konstrukcji słupa zamontowanego podczas badań oraz zamontowanego osprzętu łuko-ochronnego.

### 7.1.3. Wyniki badań obiektów na napięcia niestandardowe

#### 7.1.3.1. Kolumna wsporcza izolatorów porcelanowych o poziomie izolacji 1300 kV

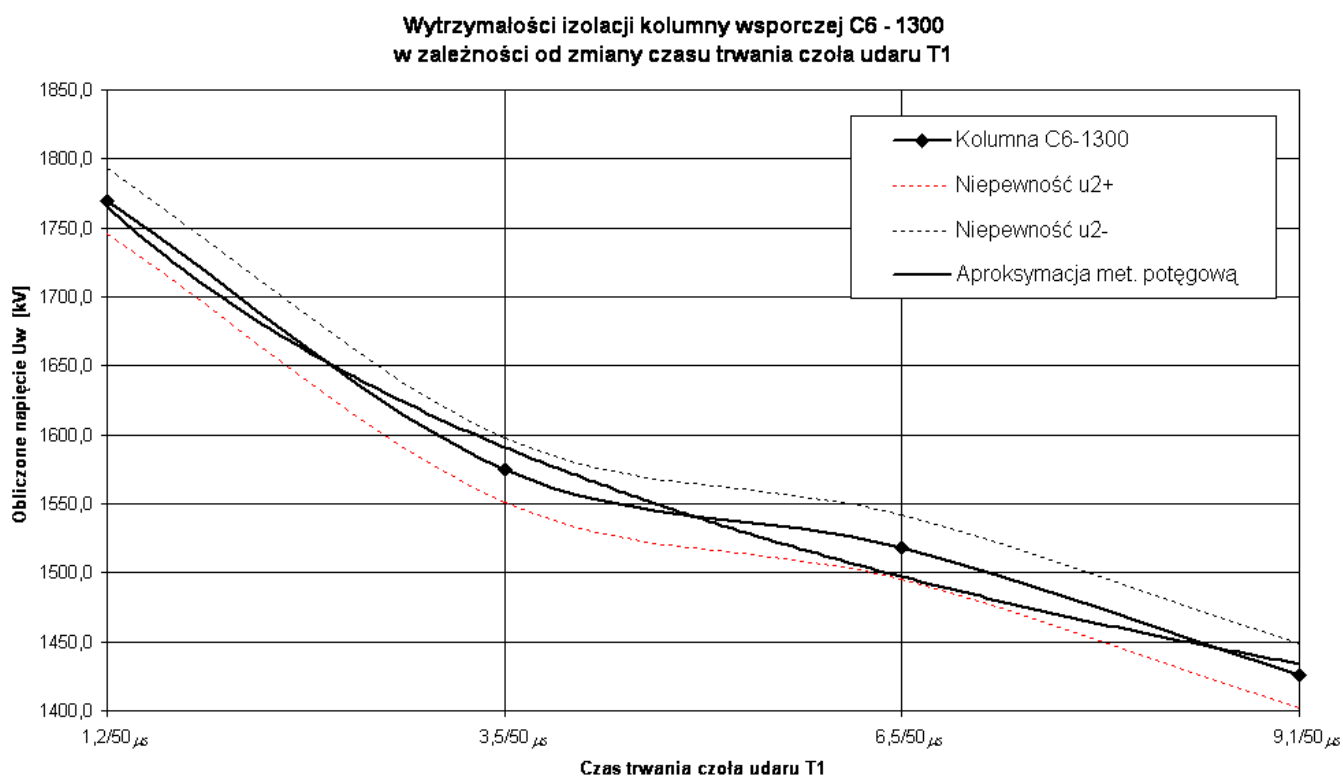
Następnym obiektem badań była kolumna wsporcza izolatorów C6 – 1300, która składała się z dwóch izolatorów porcelanowych produkcji rodzimej, połączonych ze sobą szeregowo. Obiekt przedstawiono na rysunku 45. Na szczycie kolumny zamontowano pierścień sterujący, mający na celu zapewnienie odpowiedniego rozkładu pola elektromagnetycznego. Ma to istotne znaczenie w szczególnym przypadku stosowania kolumny na stacjach, w których obiekt spełnia rolę podpory przewodu roboczego. Szczegółowe wyniki badań kolumny C6 – 1300 przedstawiono w tabeli 10. Charakterystykę wytrzymałościową przedstawia rysunek 46.



Rys. 45. Przeskoki na kolumnie izolatorów wsporczych C6 – 1300.

Tabela 10 Szczegółowe dane wyników badań kolumny izolatorów C6 – 1300 kV

		Kształt udaru $T_1/50 \mu s$			
		1,2	3,5	6,5	9,1
Czas trwania czoła udaru	[ $\mu s$ ]				
Napięcie wyznaczone $U_{50\%}$	[kV]	1869,4	1638,4	1580,0	1483,3
Napięcie wytrzymywane $U_w$	[kV]	1796,5	1574,5	1518,4	1425,5
Niepewność $u_2$	[kV]	23,5	23,5	23,5	23,5
Napięcie $U_w$ skorygowane o $u_{2-}$	[kV]	1773,0	1551,0	1494,9	1402,0
Napięcie $U_w$ skorygowane o $u_{2+}$	[kV]	1820,0	1598,0	1541,9	1449,0



Rys. 46. Charakterystyka wytrzymałościowa Kolumny izolatorów C6 – 1300 w zależności od zmiany czasu trwania czoła udaru  $T_1$ , wraz z zaznaczonymi obszarami niepewności pomiarowej.



### Ocena badawcza

Badana kolumna wsporcza na napięcie 1300 kV wykazuje następujące właściwości:

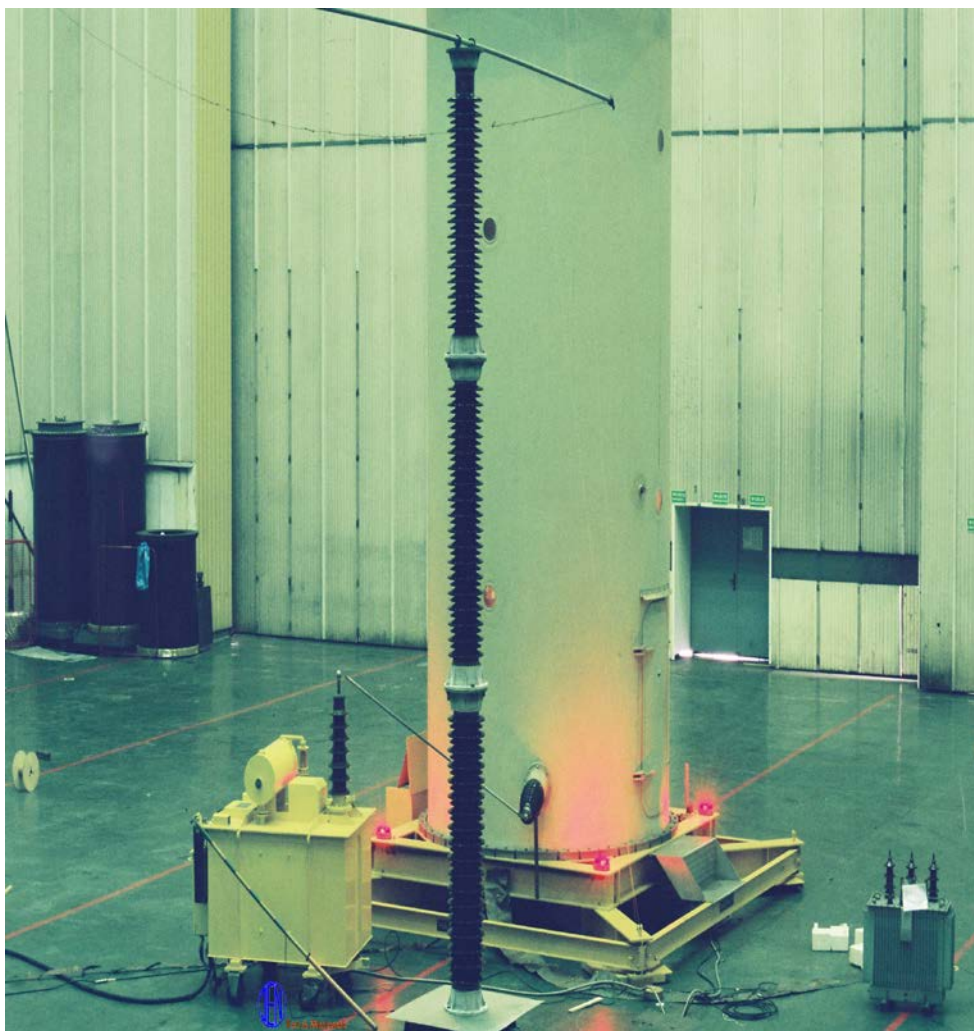
- Obniżenie znamionowej wytrzymałości  $U_w$  szacuje się na około 20,6 %.
- Wartości wyznaczonej niepewności standardowej rozszerzonej mieszczą się w granicach  $u_2 = 23,5$  kV.
- Wartość zapasu wytrzymałości w odniesieniu do wartości przyjmowanej  $U_n = 1425$  kV

i. Przy czasie czoła  $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$        $U_z = +246,5$  kV

ii. Przy czasie czoła  $T_1 = 9,1 \mu\text{s}$        $U_z = +124,5$  kV

### 7.1.3.2. Kolumna wsporcza izolatorów porcelanowych na napięciu 550 kV

Kolejnym obiektem badań była kolumna wsporcza izolatorów porcelanowych 550 kV o łącznej wysokości 5000 mm, przedstawiona na rysunku 47. Na obiekt składały się trzy izolatory połączone ze sobą szeregowo. Za pomocą elektrowciągów kolumnę umieszczono na izolowanej podstawie o wysokości 3500 mm. U podstawy kolumny umieszczono metalową płytę imitującą ziemię. Ze względu na duży ciężar badanego obiektu, umieszczono go na podstawie izolatorowej skonstruowanej z trzech nóg. Wyniki badań kolumny przedstawiono w tabeli 11, natomiast charakterystykę wytrzymałościową przedstawia rysunek 48.

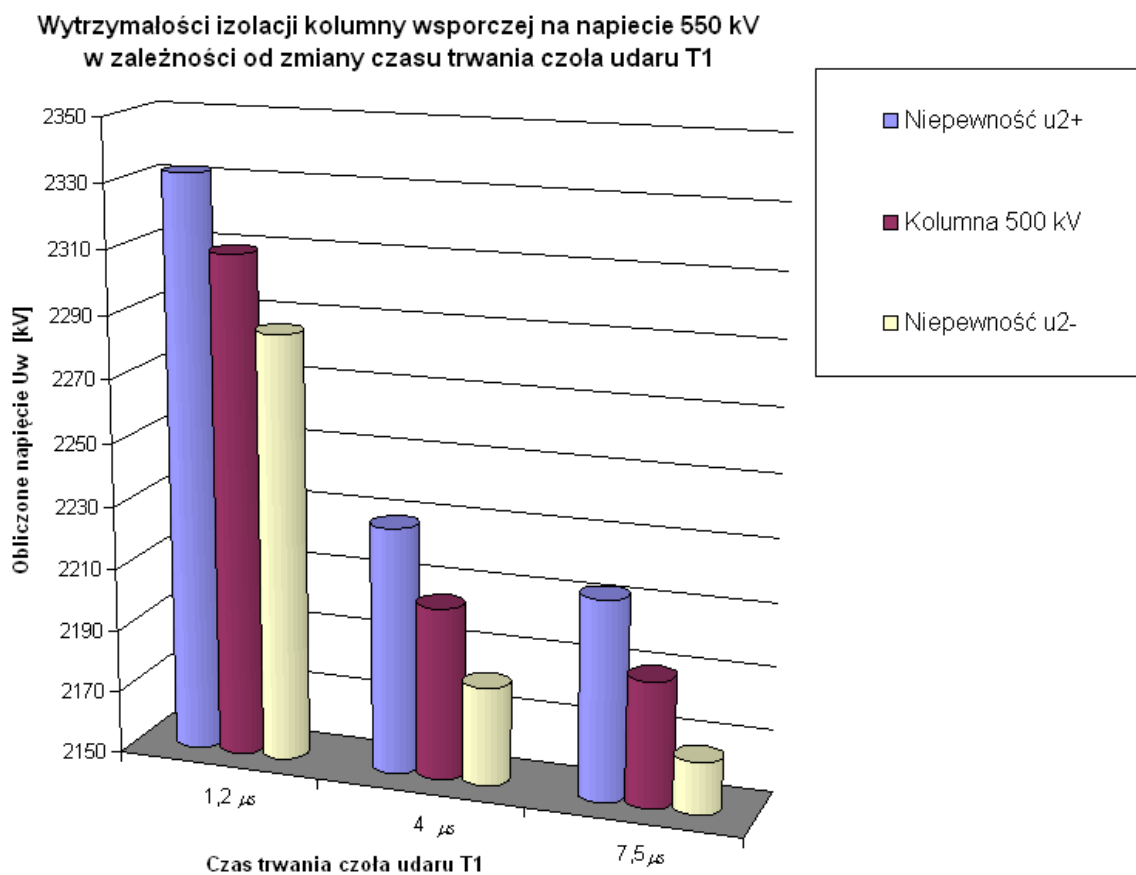


Rys. 47. Kolumna izolatorów 550 kV na izolowanej podstawie na tle generatora udarowego 5 MV

Tabela 11 Szczegółowe dane wyników badań kolumny izolatorów porcelanowych na napięcie 550 kV.

		Kształt udaru $T_1/50$ $\mu s$		
Czas trwania czoła udaru	[ $\mu s$ ]	1,2	4,0	7,5

Napięcie wyznaczone $U_{50\%}$	[kV]	2402,7	2294,5	2278,8
Napięcie wytrzymałwane $U_w$	[kV]	2309,0	2205,0	2190,0
Niepełność $u_2$	[kV]	23,5	23,5	23,5
Napięcie $U_w$ skorygowane o $u_{2-}$	[kV]	2285,5	2181,5	2166,5
Napięcie $U_w$ skorygowane o $u_{2+}$	[kV]	2332,5	2228,5	2213,5



Rys. 48. Charakterystyka wytrzymałościowa Kolumny izolatorów na napięcie 550 kV w zależności od zmiany czasu trwania czoła udaru  $T_1$ .

### Ocena badawcza

Badana kolumna wsporcza na napięcie 550 kV wykazuje następujące właściwości:

- Obniżenie znamionowej wytrzymałości  $U_w$  szacuje się na około 5 %.
- Wartości wyznaczonej niepewności standardowej rozszerzonej mieszczą się w granicach  $u_2 = 23,5$  kV.
- Wartość zapasu wytrzymałości w odniesieniu do wartości przyjmowanej

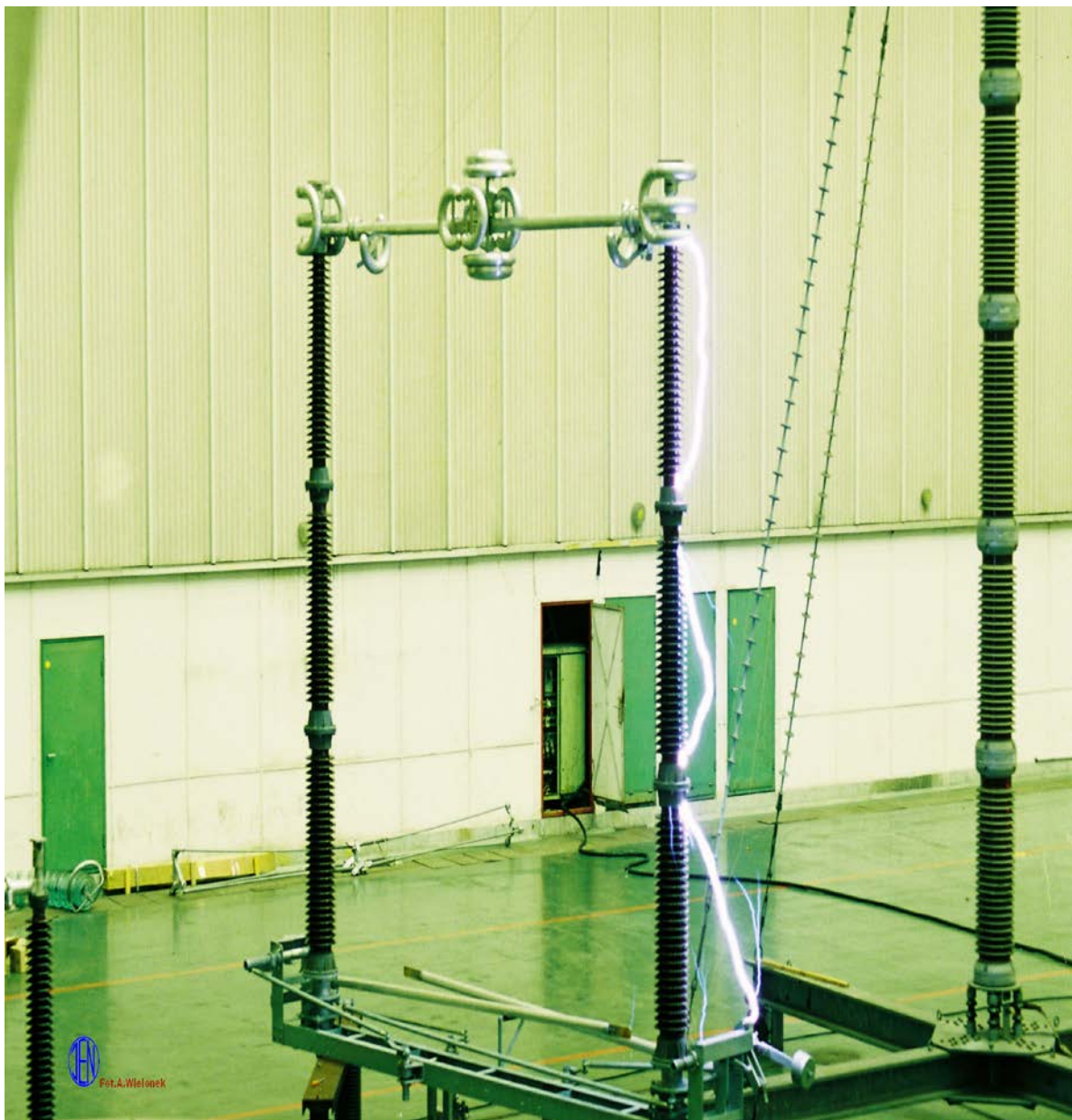
$$U_n = 2100 \text{ kV}$$

i. Przy czasie czoła  $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$        $U_z = +209,0 \text{ kV}$

ii. Przy czasie czoła  $T_1 = 7,5 \mu\text{s}$        $U_z = +90,0 \text{ kV}$

### 7.1.3.3. Odłącznik stacyjny 550 kV

Następnym obiektem badań był odłącznik na napięcie 550 kV. Obiekt przedstawiony jest na rysunku 49. Odłącznik składał się z jednego bieguna z zamontowanymi ruchomymi nożami. Całość umieszczona była na odpowiedniej izolowanej wysokości. Stan odłącznika podczas badań był zamknięty co pozwoliło na badania izolacji doziemnej. Szczegółowe wyniki badań przedstawia tabela 12, natomiast charakterystykę wytrzymałościową przedstawia rysunek 50.

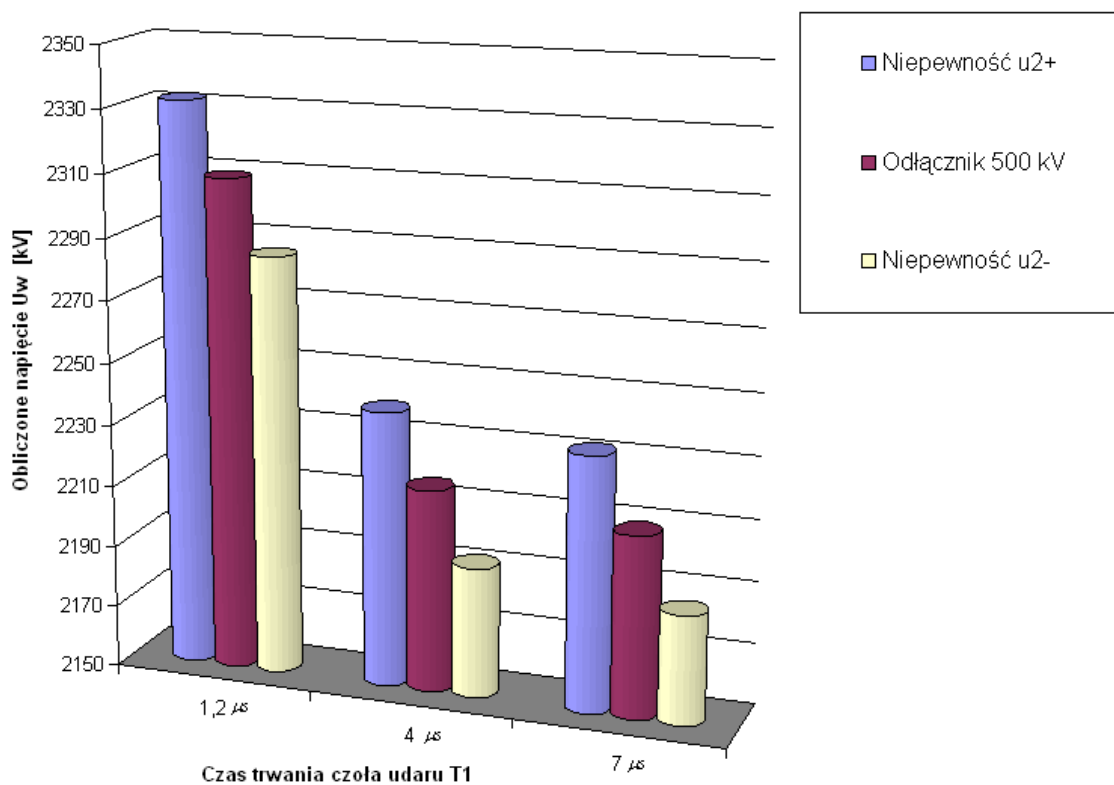


Rys. 49. Przykładowe przeskoki na odłączniku 550 kV , stan zamknięty , uziemiona metalowa rama.

Tabela 12 Szczegółowe dane wyników badań odłącznika 550 kV.

Czas trwania czoła udaru [μs]	Kształt udaru T <sub>1</sub> /50 μs		
	1,2	4,0	7,0
Napięcie wyznaczone U <sub>50%</sub> [kV]	2402,4	2305,7	2298,5
Napięcie wytrzymałwane Uw [kV]	2308,8	2215,8	2208,9
Niepewność u <sub>2</sub> [kV]	23,5	23,5	23,5
Napięcie Uw skorygowane o u <sub>2+</sub> [kV]	2332,3	2239,3	2232,4
Napięcie Uw skorygowane o u <sub>2-</sub> [kV]	2285,3	2192,3	2185,4

Wytrzymałości izolacji odłącznika 500 kV w zależności od zmiany czasu trwania czoła udaru T<sub>1</sub>



Rys. 50. Charakterystyka wytrzymałościowa odłącznika na napięcie 550 kV w zależności od zmiany czasu trwania czoła udaru T<sub>1</sub>.

### Ocena badawcza

Badany jeden biegun odłącznika na napięcie 550 kV wykazuje następujące właściwości:

- Obniżenie znamionowej wytrzymałości  $U_w$  szacuje się na około 4,3 %.
- Wartości wyznaczonej niepewności standardowej rozszerzonej mieszczą się w granicach  $u_2 = 23,5$  kV.
- Wartość zapasu wytrzymałości w odniesieniu do wartości przyjmowanej  $U_n = 2100$  kV
  - i. Przy czasie czoła  $T_1 = 1,2$   $\mu$ s  $U_z = +208,8$  kV
  - ii. Przy czasie czoła  $T_1 = 7,0$   $\mu$ s  $U_z = +108,9$  kV

## 8. Podsumowanie badań rzeczywistych obiektów

Prowadzone od lat badania nad rzeczywistą izolacją linii i stacji potwierdzają występowanie znacznego obniżenia wytrzymałości skorelowanego z czasem trwania czoła udaru  $T_1$ . Przedstawione rzeczywiste obiekty wyposażone były w osprzęt łuku ochronny, który swoimi rozmiarami skracał drogę przeskoku na izolacji. Wszystkie badania prowadzone były na sucho i zgodnie z metodą Dixona i Mooda wyznaczania  $U_{50\%}$ . Obniżenia napięć rejestrowane na poszczególnych obiektach są następujące:

- Dla napięć 110 – 220 kV
  - i. Odłącznik 145 kV – obniżenie 15%
  - ii. Kolumna wsporcza 220 kV – obniżenie 16%
  - iii. Odłącznik 220 kV – obniżenie 26%
  - iv. Łącuch przelotowy 220 kV – obniżenie 13%
- Dla napięć 400 kV
  - i. Odłącznik 400 kV – obniżenie 22%
  - ii. Pojedynczy łańcuch przelotowy 400 kV – obniżenie 14%
  - iii. Podwójny łańcuch przelotowy 400 kV – obniżenie 8%
- Dla napięć niestandardowych
  - i. Kolumna wsporcza o poziomie izolacji 1300 kV – obniżenie 20%
  - ii. Kolumna wsporcza 550 kV – obniżenie 24%
  - iii. Odłącznik 550 kV – obniżenie 5%



## 9. Badania symulacyjne programem EMTP – RV

### 9.1. Wprowadzenie

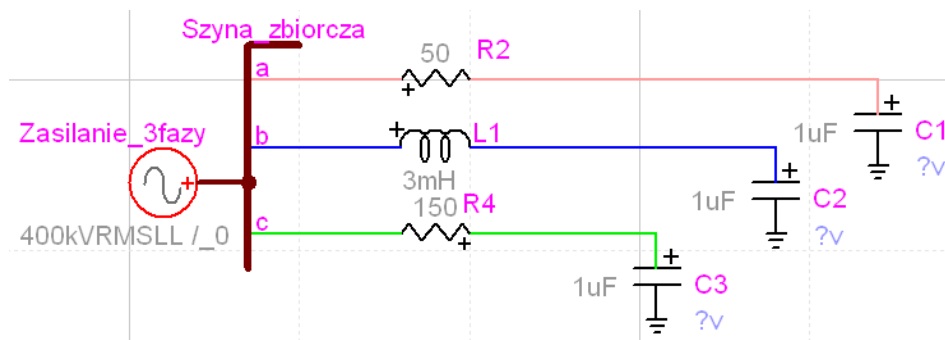
W niniejszej pracy do badań symulacyjnych używano programu EMTP – RV z rodziny programów POWERSYS. Program posiada wbudowany interfejs EMTP – Works, który w prosty sposób umożliwia łączenie poszczególnych elementów dostępnych w programie. Baza dostępnych podstawowych modeli, takich jak kondensatory, rezystancje oraz indukcyjności, pozwala na budowanie nowych własnych modeli. W omawianym dziale przedstawiono kilka nowych rozwiązań [26,55], które zostały użyte bezpośrednio do badań. W celu obserwacji przebiegów napięć oraz prądów służy moduł „View Sopes”.

Istotny wpływ na właściwą ocenę koordynacji izolacji jest dokładne zbadanie i zrozumienie sposobu zabezpieczania stacji przed przepięciami [57]. Aktualne rozmieszczanie ograniczników przepięć na wejściu stacji jak i przy transformatorach, może okazać się niewystarczające lub nieodpowiednio zaprojektowane. Tematem wielu publikacji [od 48 do 54] są analizy przebiegów przepięć w liniach oraz stacjach. Wielu też Autorów [56], prowadziło wieloletnie badania mające na celu potwierdzenie jakości wyników uzyskiwanych na drodze symulacji programem EMTP – RV. Badania te potwierdzają zgodność wyników uzyskiwanych metodą symulacji oraz w badaniach rzeczywistych obiektów.

#### 9.1.1. Podstawowe modele używane w symulacjach

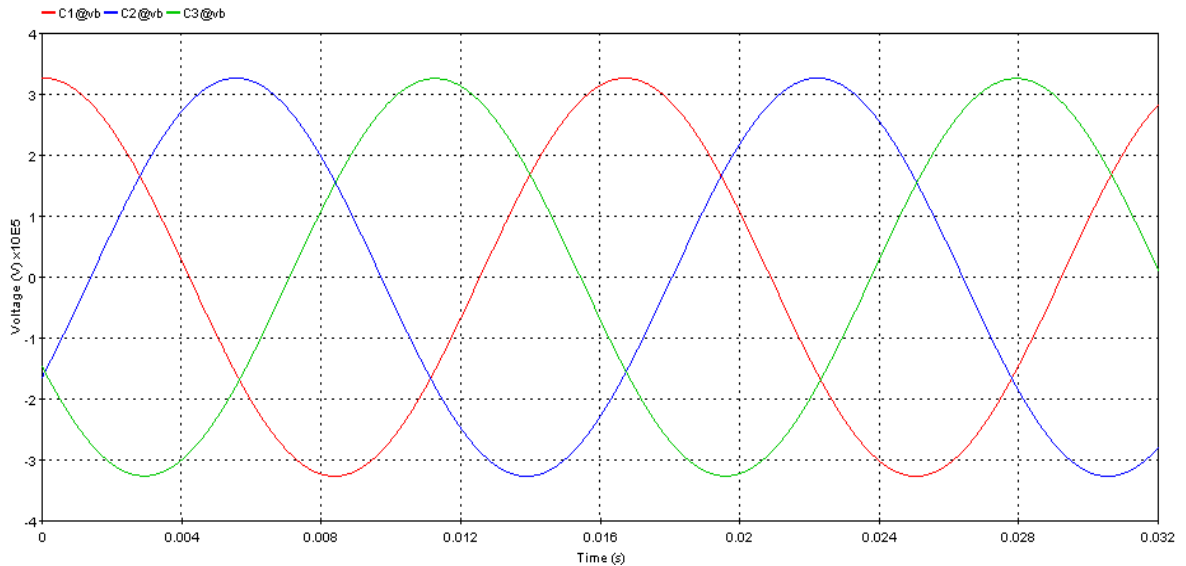
W związku z tym, że program posiada około stu modeli różnego typu, w tym dziale zostaną przedstawione tylko te które zostały użyte do stworzenia modelu fragmentu stacji przedstawianej w niniejszej pracy.

Podstawowe elementy R,L,C, których modele dają się łączyć w obwody pokazuje rysunek poglądowy 51.



Rys. 51. Przykładowy model układu 3-fazowego.

Przedstawiony prosty model układu 3-fazowego z rezystancją, indukcyjnością oraz pojemnością doziemną ilustruje łatwość oraz możliwości łączenia elementów w sposób dowolny. Obserwacji napięć można dokonywać bezpośrednio na elementach jak i w dowolnym miejscu fazy. Na rysunku 52 pokazano przykładowe przebiegi napięć na kondensatorach C1, C2, oraz C3.



Rys. 52. Przebiegi napięciowe na pojemności doziemnej układu 3-fazowego.

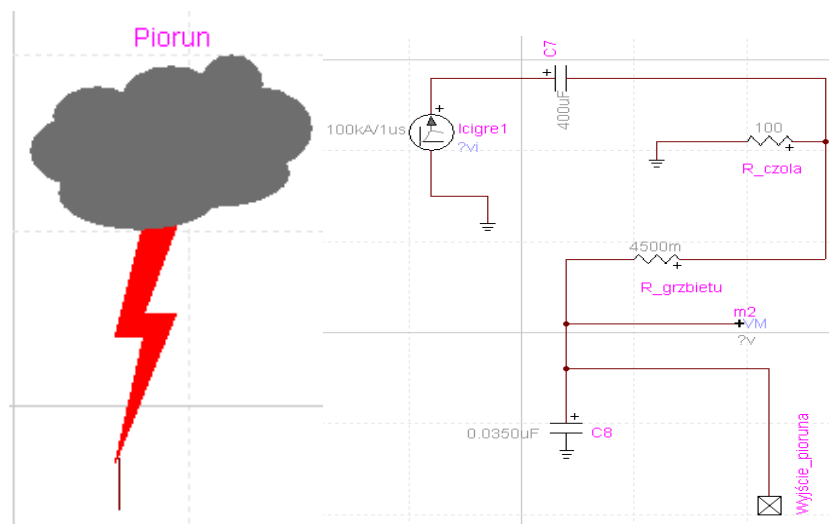
Program umożliwia również zadawanie czasu symulacji oraz ustawienie kroku obliczeniowego. Do rozbudowanych modeli stosuje się również dodatkowe opcje dostępne w programie jak, *simulations option*, które pozwalają wybrać metodę obliczeniową. W niniejszej pracy autor używał metody trapezoidalnej i Eulera. Przykładem zobrazowania stacji wysokich napięć 400 kV jest publikacja [74], w której Autorzy używają podstawowych elementów RLC do zbudowania stacji.

## 9.2. Dodatkowe modele służące do odwzorowania badanej stacji WN

W celu zaprojektowania fragmentu modelu stacji [6], konieczne było zaprojektowanie nowych układów modelowych, nazywanych potocznie pod-modelami takich jak:

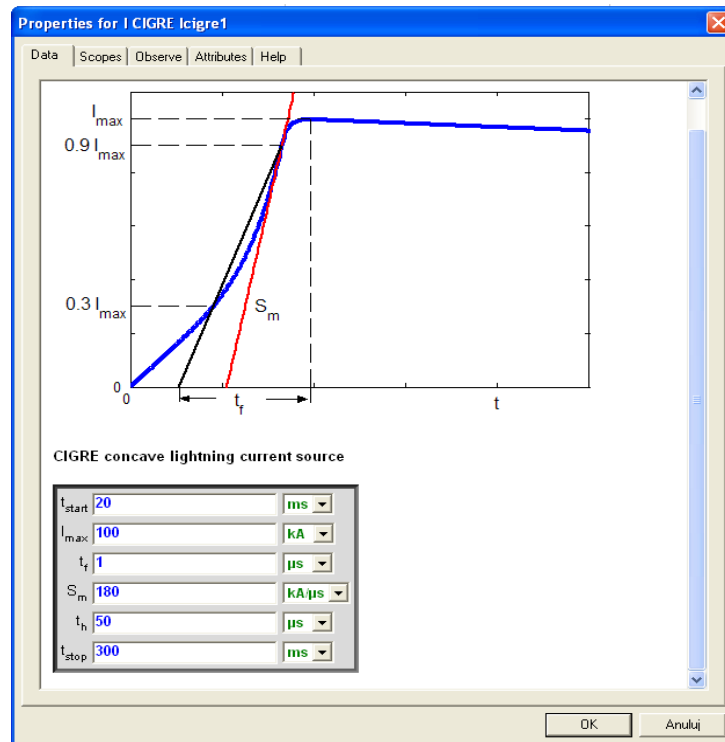
- udar piorunowy,
- słup wysokiego napięcia
- mechanizm przeskoiku odwrotnego,
- zjawisko spadków na indukcyjności linii oraz połączeń stacyjnych,
- odłącznik stacyjny,
- ogranicznik przepięć ZnO.

Twórcy programu EMTP – RV, udostępniłi model udaru piorunowego *Icigre*, który posłużył do stworzenia pod-modelu mającego na celu wytworzenie zadanego kształtu napięciowego. Zastosowanie takiego pod-modelu ma istotne znaczenie w sytuacji uderzenia pioruna w otoczenie stacji lub linii, gdzie pojawiające się przepięcie w stacji lub linii jest efektem indukcji elektromagnetycznej. W tym przypadku stosuje się zamodelowanie bezpośredniego uderzenia w środek stacji, korzystając z modelu przedstawionego na rysunku 53.



Rys. 53. Model udaru piorunowego. Ogólny i szczegółowy.

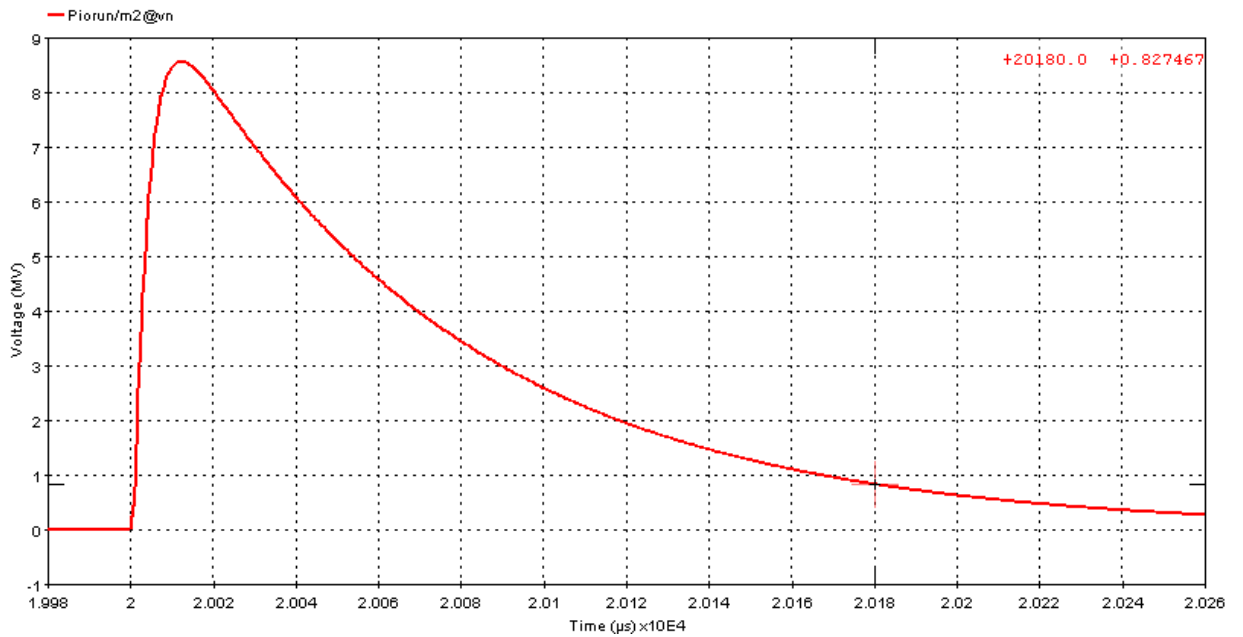
Odpowiedź układu, mierzona w punkcie  $m_2$ , przedstawiona jest na rysunku 55. Zadane parametry prądowe w modelu *Icigre* obrazuje rysunek 54.



Rys. 54. Parametry udaru prądowego pioruna.

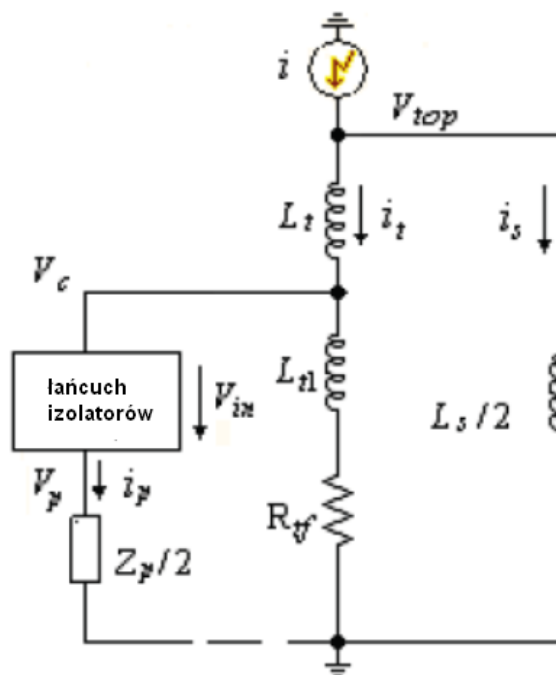
Odpowiedź pod-modelu pokazana jest na rysunku 55. Program *View Scope* umożliwia także pomiary poszczególnych fragmentów przebiegu napięciowego. Parametry przykładowo uzyskanego przebiegu napięciowego to  $U_x = 8,5$  MV, czas trwania czoła udaru  $T_1 = 8,5$   $\mu$ s, natomiast czas trwania grzbietu udaru  $T_2 = 67,5$   $\mu$ s. Tak skonstruowany pod-model umożliwia swobodną zmianę i zadawanie kształtu napięcia indukowanego, co z punktu widzenia obniżenia wytrzymałości izolacji linii i stacji 110 – 400 kV ułatwia zadanie symulowania i daje pewność, że udar nie zmienia swojego kształtu podczas jego wytwarzania.

Przedstawione narażenie piorunowe pozwala na prowadzenie również symulacji badań rzeczywistych obiektów jako osobne urządzenia. W przypadku symulacji fragmentu stacji [6] konieczne było zastosowanie tylko modelu *Icigre* jako udaru piorunowego, ponieważ kształt napięcia jaki powstaje po uderzeniu pioruna zależy od parametrów słupa oraz poszczególnych składowych stacji. Model przedstawiony na rysunku 53 stosowany był tylko wyłącznie do symulacji uderzenia pioruna w otoczenie stacji, gdzie konieczne było zastąpienie parametrów rezystancji gruntu oraz linii.



Rys. 55. Przebieg napięciowy udaru piorunowego.

Kolejnym istotnym etapem w modelowaniu stacji wysokich napięć oraz linii jest odpowiednie odwzorowanie modelu słupa wysokiego napięcia. Autorzy prac [51,73] podjęli próby stworzenia takiego pod-modelu na bazie fizycznych pomiarów właściwości słupa. Dokonali również porównania wyników z zasymulowanym pod-modelem z danymi literaturowymi. Słup podzielony został na poszczególne fragmenty i został odwzorowany w programie przy użyciu indukcyjności, rezystancji i impedancji. Rysunek 56 pokazuje omawiany model.



Rys. 56. Model elektryczny słupa wysokiego napięcia [51].

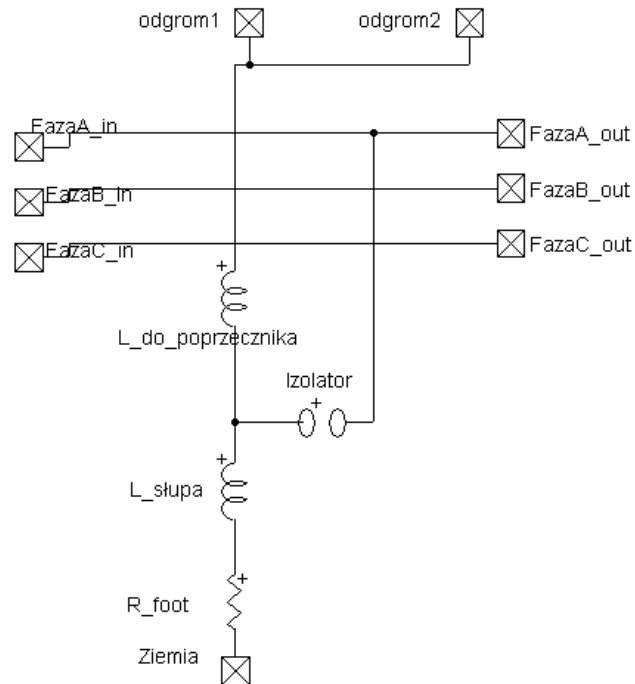
Przedstawiony schemat nie został zastosowany jako model słupa w procesie symulacji fragmentu stacji [6], ponieważ podczas symulacji przeskoku odwrotnego na izolacji kierowano się zastosowaniem elementów skupionych RLC. Dokładne wyjaśnienie zagadnienia zawarto w załączniku A.

W ramach niniejszej pracy przeprowadzono wiele symulacji mających na celu właściwe rozwiązanie problemu. Efektem tego są dwie publikacje [55,26], w których zaproponowano nowe rozwiązanie modelu słupa.

Podstawowymi elementami jakie należy brać pod uwagę analizując słup wysokiego napięcia jest jego indukcyjność oraz rezystancja uziemienia. Słup został podzielony na poszczególne elementy:

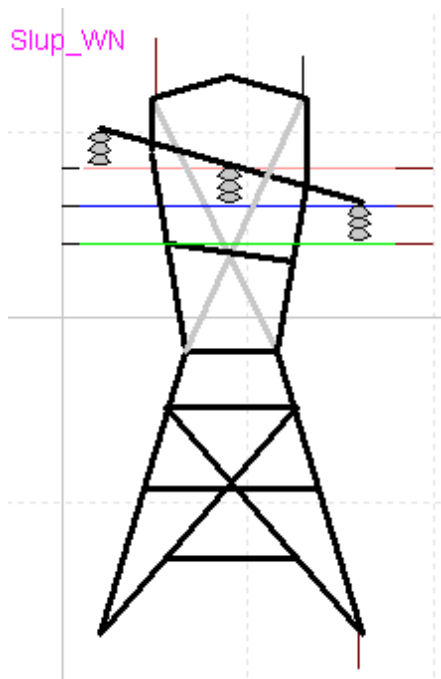
- odległość od punktu maksymalnej wysokości słupa do pierwszego poprzecznika,
- odległość od poprzecznika do ziemi,
- rezystancję uziemienia słupa.

W większości pozycji literaturowych [51,52] występuje dodatkowa indukcyjność, zastępująca wysokość, całości słupa. Konstrukcja własna [26] przedstawiona na rysunku 57 pozwala na wystąpienie przeskoku odwrotnego na izolatorach, zaimplementowanych poprzez iskierniki *Air gap*.



Rys. 57. Model elektryczny słupa wysokiego napięcia umożliwiający przeskok odwrotny dla jednej fazy.

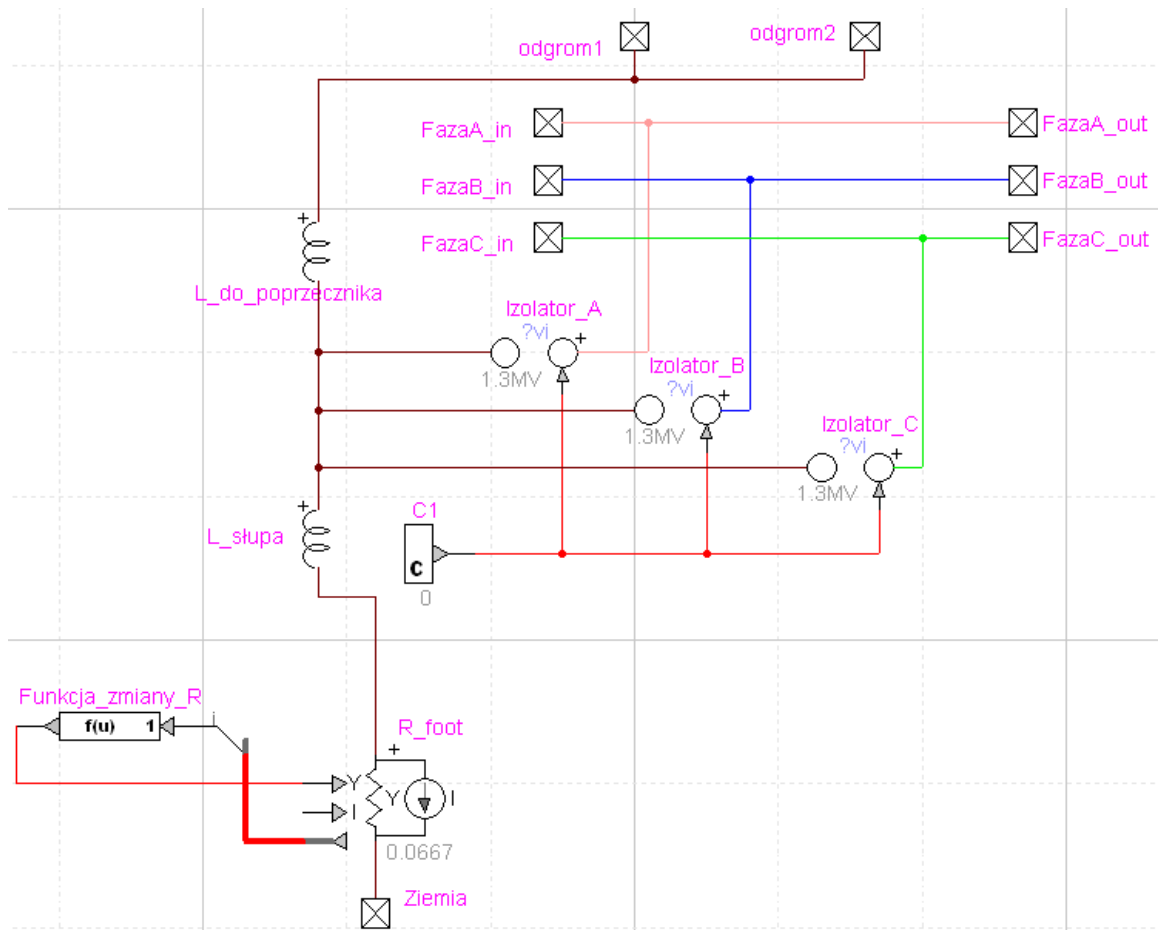
Istotne jest to, że w przypadku tworzenia modelu fragmentu stacji [6] program umożliwia selektywną obserwację poszczególnych trzech faz linii. Co w przypadku analizy koordynacyjnej ma znaczenie, ponieważ wystąpienie przeskoku na jednej fazie indukuje przebieg w dwóch pozostałych. Program EMTP – RV umożliwia taką obserwację rozkładu przepięć w stacji na wszystkich fazach jednocześnie. Poglądowy schemat, który zastępuje schemat szczegółowy przedstawiony na rysunku 57 pokazany jest na rysunku 58.



Rys. 58. Wizualny model słupa, który zastępuje szczegółowy model przedstawiony na rys. 57.

Omawiany program zasługuje na szczególną uwagę właśnie ze względu na łatwość w modelowaniu. W przypadku tworzenia nowych pod-modeli jest istotne, żeby nie tracić czytelności całej zamodelowanej stacji [6]. W przypadku omawiania napięć 3-fazowych, odpowiednio rozbudowanym modelem słupa jest przykład zilustrowany na rysunku 59.





Rys. 59. Szczegółowy model słupa dla trzech faz z zaimplementowaną funkcją zmiennej rezystancji.

Funkcja przeskoku na modelu izolatora *air gap* jest realizowana za pomocą wzoru:

$$\int_{t_0}^t \left( \left| V_{gap}(t) \right| - V_0 \right)^K dt \geq D \quad /9/$$

Gdzie:

$t_0$  – jest momentem do kiedy wartość  $V_{gap}$  zaczyna być większa niż wartość  $V_0$ .

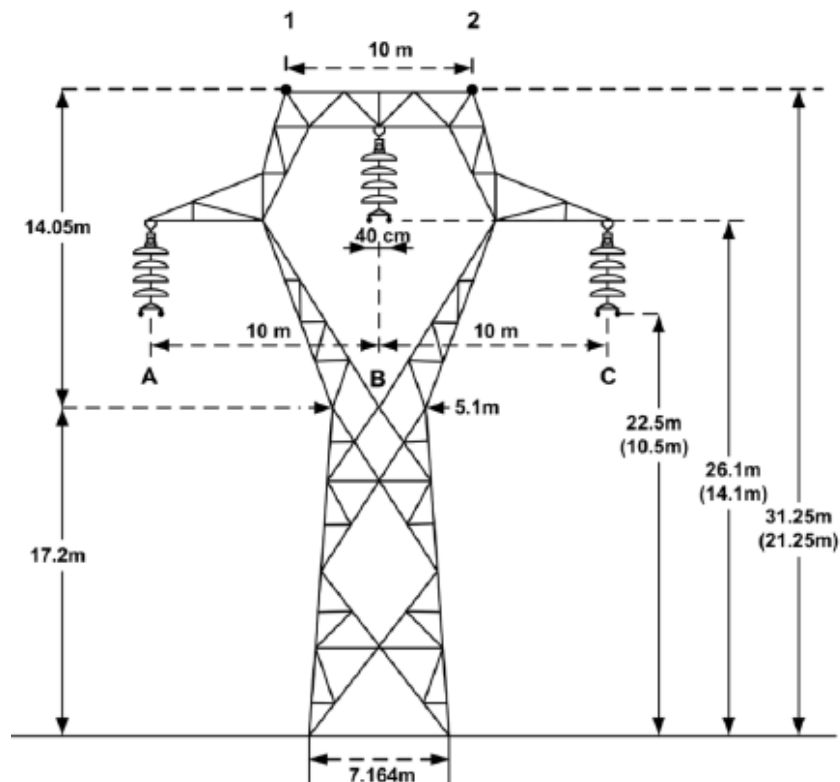
$K$ ,  $D$  oraz  $V_0$  – parametry wyznaczone z charakterystyki napięciowej iskiernika kulowego [106].

Autorzy pracy [53] prezentują szczegółową analizę geometryczną słupa wysokich napięć 400 kV. Rysunek 60 obrazuje słup przelotowy linii wysokich napięć z poszczególnymi rozkładami odległości. Przyjęcie określonych odległości pozwala na zdefiniowanie indukcyjności między poszczególnymi elementami słupa.

W przykładzie omawianego fragmentu stacji [6], poszczególne odległości i indukcyjności przedstawione zostały w tabeli 13.

Tabela 13. Wartości odległości i wartości indukcyjności słupa w modelu stacji [6].

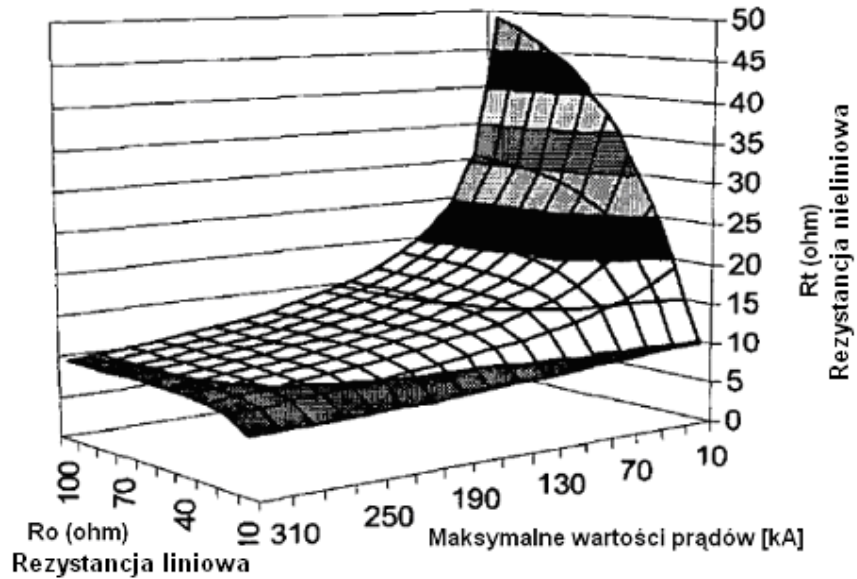
Element słupa	Odległość [m]	Indukcyjność [ $\mu\text{H}$ ]
Od góry do 1 ramienia	4-5	5
Od ramienia do ziemi	35-40	35



Rys. 60. Słup wysokiego napięcia 400 kV z zaznaczonymi odległościami [53].

Istotny wpływ na szczytową wartość napięcia przeskoku odwrotnego ma rezystancja uziemienia słupa. W przypadku zastosowania stałej wartości rezystancji, fala przepięciowa po przeskoku odwrotnym zmniejsza swoją maksymalną wartość. Jak wskazuje analiza przedstawiona w pracach [22,58,60,75], istnieje ścisła zależność między rezystancją uziemienia słupa, a kształtem napięcia po przeskoku. Można również zaobserwować różne czasy trwania czoła  $T_1$  przepięcia.

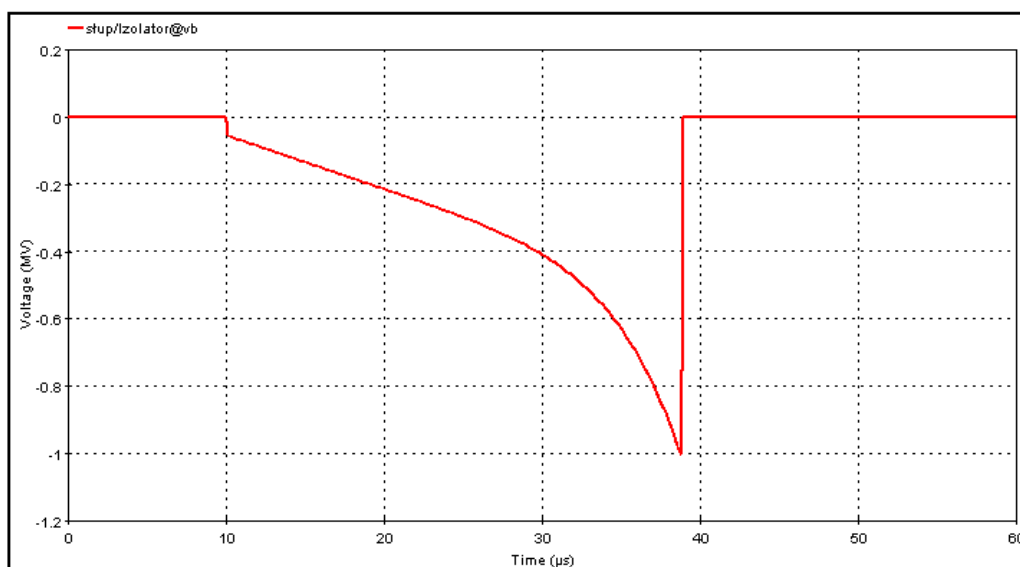
Badania symulacyjne mające na celu porównanie wartości rezystancji nieliniowej oraz liniowej ilustruje przykład rysunku 61.



Rys. 61. Wariacje rezystancji uziemienia słupa [59].

Jak można zaobserwować, zależność między  $R_0$  (rezystancją liniową) a  $R_t$  (rezystancją nieliniową), w obszarze prądów od 310 kA do 70 kA, zachowuje proporcjonalność. Zakrzywienie następuje dopiero przy bardzo małych wartościach prądu, ale wysokich wartościach rezystancji  $R_0$  oraz  $R_t$ . Fizyczna interpretacja zależności rezystancji od przepływającego prądu pioruna jest powiązana z konduktywnością ziemi. Nierównomierna gęstość gruntu oraz jego często nieznana zwięzłość stanowi utrudnienie dla właściwego określenia rezystancji uziemienia słupów wysokiego napięcia. Bardzo często do symulacji numerycznych przyjmuje się wartości podawane w publikacjach CIGRE [60,22,61]. Wielkości te są stopniowane i wynoszą: (5,10,20,100)  $\Omega$ .

Wnioskiem z badań opisanych pracach [32,38,39,41] jest interesujący obszar wartości prądów pioruna, który, mieści się w granicach od 40 kA do 200 kA. Zatem stosowanie modelu liniowej rezystancji w modelowanym fragmencie stacji [6] jest właściwe. Do symulacji przyjęto wartość uziemienia słupa  $R_{\text{słupa}} = 10 \Omega$ . Odpowiedź modelu słupa dla jednej fazy przedstawiona jest na rysunku 62. Przyjęte parametry prądowe pioruna  $I_{\text{max}} = 100 \text{ kA}$ , stromość  $12 \text{ kA}/\mu\text{s}$ . Odpowiedź napięciowa dotyczy modelu jedno fazowego przedstawionego na rysunku 57 zawierający wbudowany izolator, który zastąpiono idealnym iskiernikiem *Ideal Flashover Swith*.

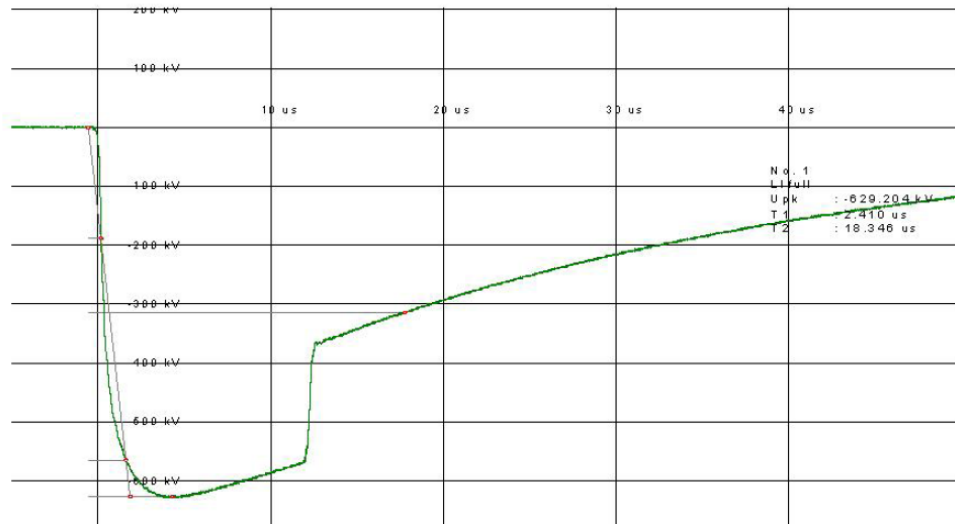


[EMT1] Circuit1m - Mon Jul 04 18:16:42 CEST 2011 - C:\Documents and Settings\maca\Fulpit\knowy\Circuit1\_pj

Rys. 62. Odpowiedź modelu (z rysunku 57) na impuls prądowy pioruna.

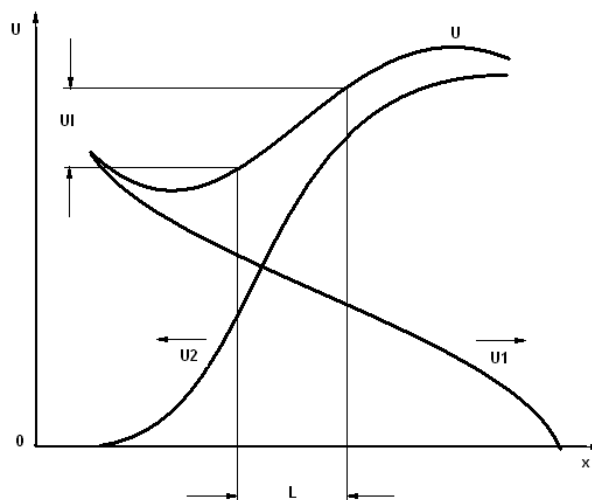
Prezentowany kształt fali napięciowej układu modelowego, przedstawionego na rysunku 57, pozbawiony jest zaokrążeń, które w rzeczywistych udarach często występują. Jest to wynikiem zastosowania idealnego iskiernika jako modelu izolatora [55] oraz brakiem impedancji linii na wyjściu modelu słupa. Zastosowany model słupa stosują Autorzy pracy [60]. Właściwy jednak obraz izolatora składa się z modelu *Air gap* [61]. Wynikiem jego stosowania jest przebieg pokazany na rysunku 63. Zastosowanie dostępnych w programie modeli ograniczników napięć również znaczenie wpływa na kształt napięcia tuż po przeskoku odwrotnym [62].

Model *air gap*, którego funkcja przeskoku jest opisana przez zależność /9/, jest zastosowany w modelu fragmentu stacji [6], tak jak w prezentowanym modelu słupa 3-fazowego na rysunku 59.



Rys. 63. Odpowiedź modelu przeskoku odwrotnego z zastosowaniem modelu izolatora Air gap [61].

Kolejnym istotnym zjawiskiem, wpływającym na zwiększenie przepięcia w połączeniach stacyjnych i liniowych, są spadki na indukcyjności. Fizyczna interpretacja zjawiska opiera się na wzorze /10/. Można jednak znaleźć w literaturze [35,36] również inne wyjaśnienie, gdzie spadek indukcyjny rozpatruje się na krótkim odcinku linii jako wynik nakładania się fal  $U_1$  oraz  $U_2$ , przemieszczających się w przeciwnych kierunkach oraz zwrotach. Fale te traktuje się jako sumę składowych fal poruszających się w jednym kierunku i jednym zwrocie. Efekt ten wynika z odbić falowych. Rysunek 64 ilustruje sumowanie fal przepięciowych.



Rys. 64. Spadek napięcia  $U_1$  na odcinku linii  $L$  jako wynik nakładania się fal  $U_1$  oraz  $U_2$  [35].

Zależność ma postać:

$$U_i = L \frac{di}{dt} \approx l \left( \frac{du_1}{dx} + \frac{du_2}{dx} \right) \quad /10/$$

Gdzie:

L – indukcyjność około 1  $\mu\text{H}/\text{m}$  [35,37]

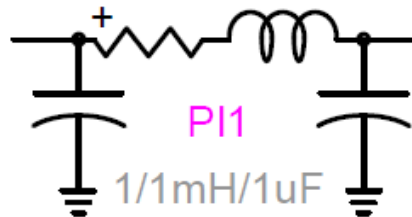
$di/dt$  – stromość prądu płynącego przez odcinek przewodu

l- rozpatrywany odcinek przewodu

$du_{1,2}/dx$  – stromości napięciowe fal: biegnącej i odbitej

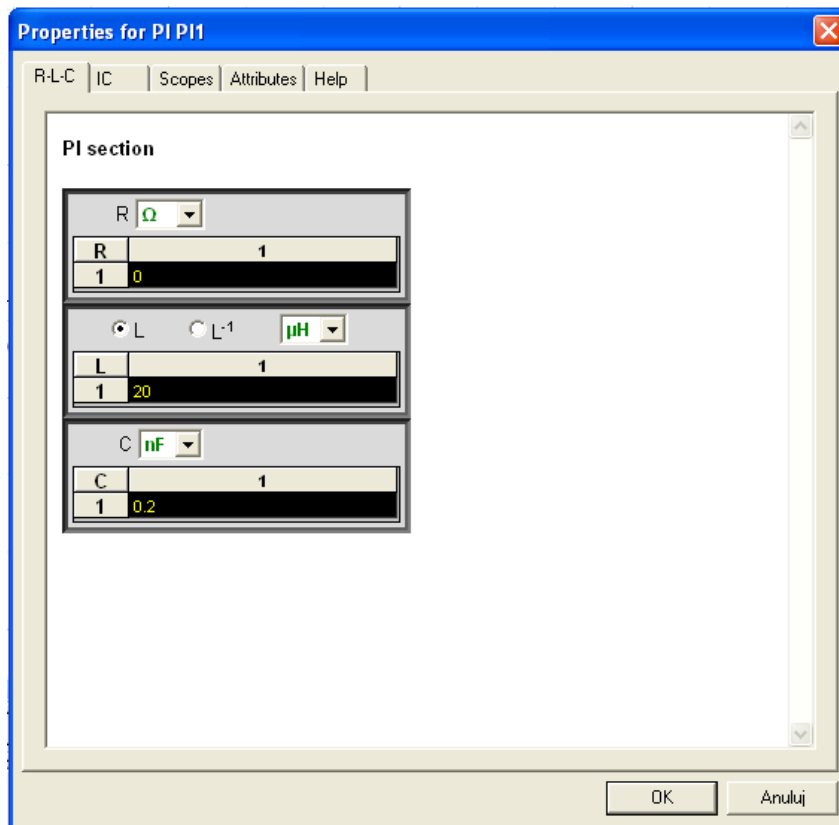
Indukcyjny spadek napięcia  $U_i$  można obliczyć używając wzoru /10/. W praktyce obliczeniowej bierze się pod uwagę jednak tylko pierwszą część zależności, która odpowiada stromości fali prądowej pioruna oraz indukcyjności.

W przykładzie fragmentu stacji [6] oraz w symulacjach numerycznych, do obserwacji zjawiska spadku na indukcyjności, zamiast fragmentu linii stosuje się model *PI*, przedstawiony na rysunku 65



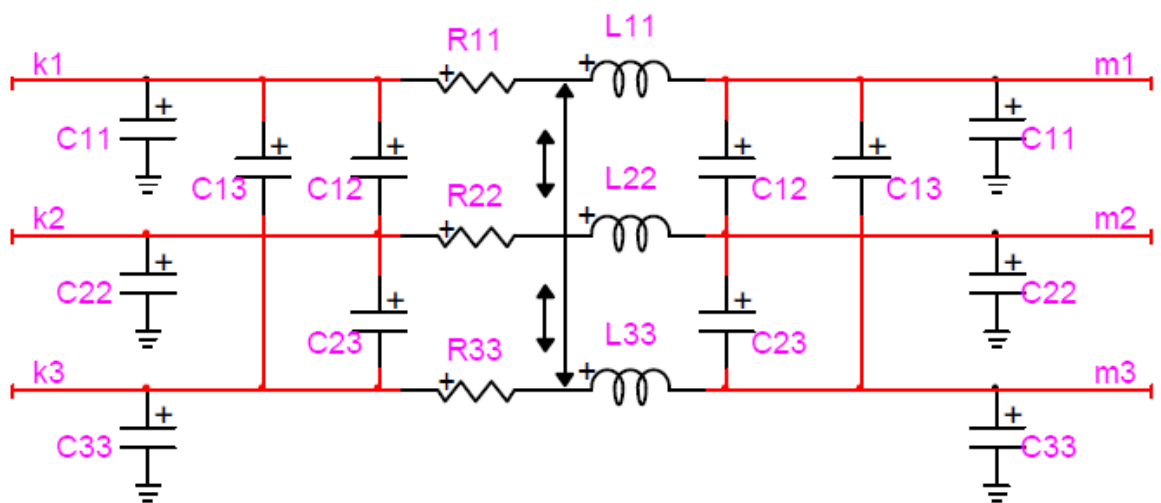
Rys. 65. Model odwzorowujący indukcyjność połączeń stacji.

Przedstawiany model posiada „niedoskonałość”, wynikającą z braku możliwości uwzględnienia impedancji połączeń jako wartości numerycznej. Poszczególne wartości pojemności doziemnej, indukcyjności przewodu oraz jego rezystancji wprowadza się jak pokazano na rysunku 66.



Rys. 66. Przykład zadawania parametrów modelu PI.

W przypadku modelowania stacji 3-fazowych istotne są również pojemności i indukcyjności wzajemne, między przewodami poszczególnych faz. Do realizacji modelu stacji 3-fazowej [6] zastosowano model PI dla trzech faz, którego konstrukcja zilustrowana jest na rysunku 67.



Rys. 67. Schemat modelu PI dla trzech faz przyjęty do symulacji.

Właściwa stacja, której fragment był zamodelowany w przedstawianej pracy zawiera następujące elementy:

- odwzorowanie linii przesyłowej 400 kV;
- model ostatniego słupa linii, tuż przed pierwszą bramką stacji;
- zespół ograniczników ZnO na wejściu do stacji;
- model przekładnika napięciowego 3-fazowego;
- model przekładnika prądowego 3-fazowego;
- model odłącznika 3-fazowego;
- zespół ograniczników ZnO przed transformatorem.

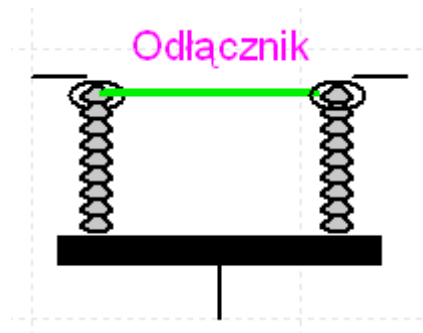
Modelowanie przekładników w programie EMTP-RV ogranicza się jedynie do modeli umożliwiających pomiary wielkości elektrycznych oraz umiejscowienia modelu *Air gap*, odwzorowującego izolację doziemną. W związku z tym, że analiza stacji pod względem najbardziej narażonych miejsc, w których może wystąpić przepięcie zagrażające izolacji, skupia się na obserwacji napięć na izolacji urządzeń w szczególności odłączników. Pomiaru napięć dokonuje się na modelach *Air gap*.

Należy zwrócić uwagę na istotny problem braku możliwości wprowadzenia modelu *inteligentnego izolatora*, który jak wynika z prac [31,26] powinien zmienić swoją wartość wytrzymywaną podczas trwania symulacji. Niestety, w obecnej sytuacji nie jest możliwe zastosowanie takiego modelu, ponieważ nie został jeszcze zaprojektowany. Autor podjął współpracę z twórcami programu EMTP-RV, która ma na celu wprowadzenie takiego modelu do programu. Wartości wytrzymałości rzeczywistych obiektów, prezentowane w tej pracy, będą podstawą do opracowania nowego modelu *dynamic gap*.

W związku z tym, że brakuje możliwości zastosowania potrzebnego modelu, ostateczną ocenę symulacji prowadzi się poprzez obserwację napięć pojawiających się na dostępnych modelach *air gap*, na których dokonuje się przeskok przy maksymalnej wartości napięcia, a nie jak w rzeczywistości jest to realizowane, pod wpływem obniżonego czasu trwania czoła udaru  $T_1$ . W tej sytuacji konieczna jest dogłębna analiza wszystkich miejsc stacji, w których wystąpi przepięcie.

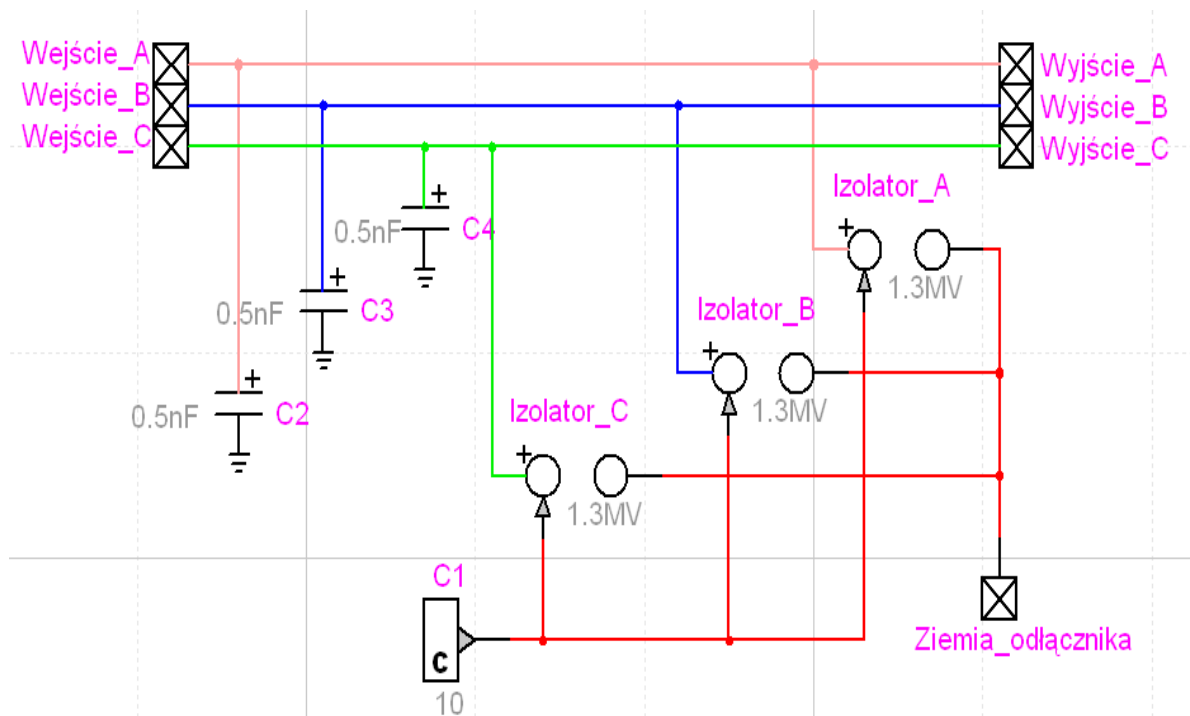


Model odłącznika jest realizowany tak jak ilustrują to rysunki 68 i 69. Pojemność doziemną odłącznika 400 kV szacuje się na poziomie 0,5 nF. Głównymi elementami są modele izolatorów, których wartość napięcia wytrzymywanego jest zadana przez producenta, a zbadana w laboratorium Instytutu Energetyki przy zastosowaniu standardowego uderu piorunowego 1,2/50  $\mu$ s.



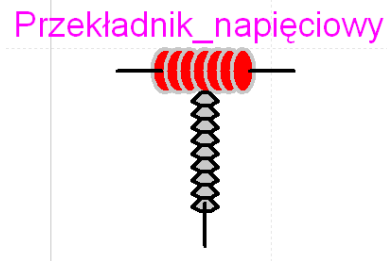
Rys. 68. Poglądowy model odłącznika.

Na podstawie pierwszych szacunkowych symulacji można ocenić jakie wystąpią parametry napięciowe przebiegu w stacji. Pozwala to na właściwy dobór wartości napięć wytrzymywanych doziemnych oraz bezpiecznej przerwy.

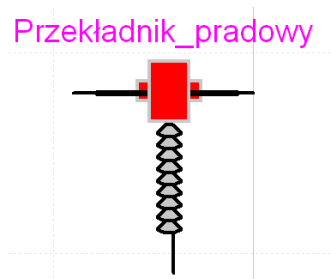


Rys. 69. Model odłącznika 400 kV 3-fazowego stosowanego w modelu fragmentu stacji [6].

Modele przekładników napięciowych oraz prądowych realizowane są w ten sam sposób, jak przedstawiono na przykładzie rysunku 69. Dodatkowym elementem, który różni modele są punkty pomiarowe prądów oraz napięć sieci. Rysunki 70 oraz 71 ilustrują poglądowe modele przekładników.



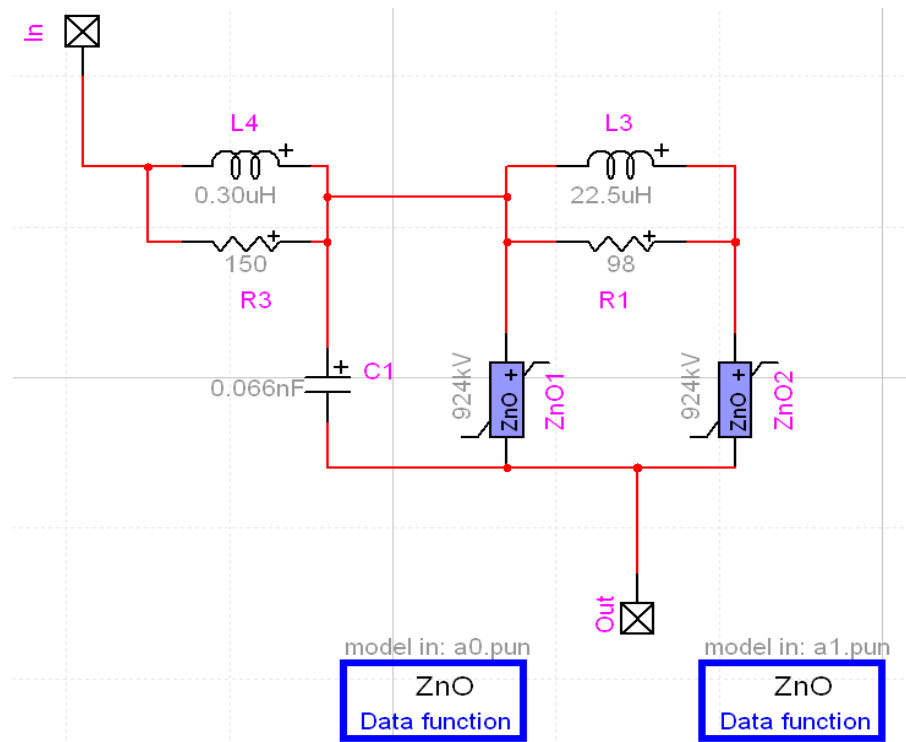
Rys. 70. Poglądowy model przekładnika napięciowego.



Rys. 71. Poglądowy model przekładnika prądowego.

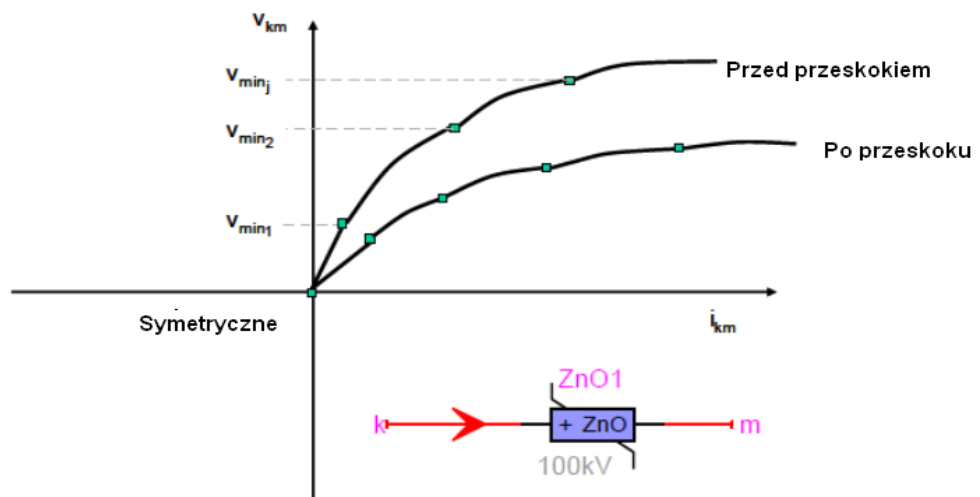
Zastosowanie modeli ograniczników jest bardzo szeroko omawiane w literaturze [63,64,65,66,67,68,97]. Tematem wielu publikacji jest wartość energii pochłanianej przez modelowane ograniczniki przepięć. W szczególności Autorzy pracy [63] przedstawiają taką analizę.

Zastosowany do symulacji fragmentu stacji [6] model ogranicznika przepięć został zaprojektowany przez twórców programu EMTP-RV, a jego szczegółowy model ilustruje rysunek 72.



Rys. 72. Model ogranicznika przepięć przyjęty do symulacji.

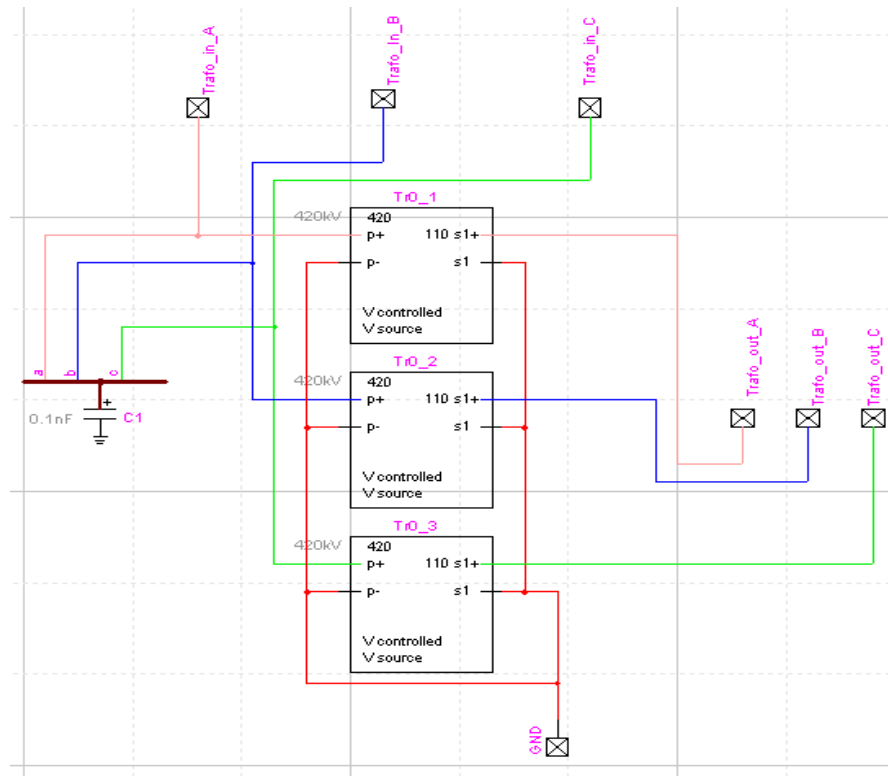
Parametry ograniczników zostały pobrane z pracy [104], przyjęty do symulacji ogranicznik to EXLIM T120-AH145. Do prawidłowego działania modeli ograniczników istnieje konieczność wprowadzenia danych numerycznych charakterystyki napięciowej. Przyjęty standardowy ogranicznik przepięć ZnO i jego charakterystyka pracy wygląda następująco – rysunek 73.



Rys. 73. Charakterystyka napięciowa ogranicznika przepięć ZnO.

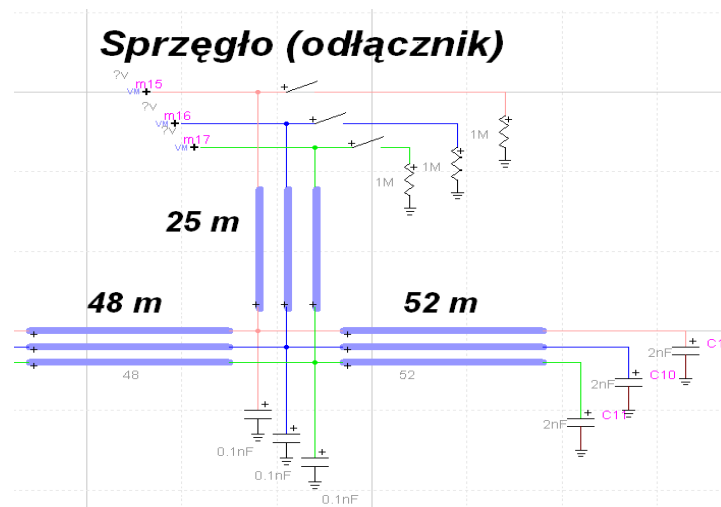
Właściwe dane, pozwalające na określenie numeryczne charakterystyk, są zawarte w dodatkowych opcjach *ZnO Data Function*.

W pracy zastosowano również model transformatora wysokich napięć, którego szczegółowy model został zaprojektowany przez autora niniejszej pracy i jest pokazany jest na rysunku 74



Rys. 74. Szczegółowy schemat elektryczny modelu transformatora 400 kV na 110 kV w symulowanej stacji [6].

Natomiast modelowany koniec stacji w przypadku odłączników zamkniętych przed transformatorem zamodelowany został przykładem z programu EMTP – RV jako sprzęgło stacji. W przypadku odłączników otwartych w trakcie symulacji sprzęgło pełni rolę jedynie obciążenia pojemnościowego, rysunek 75.



Rys. 75. Poglądowy model odłącznika na końcu stacji, połączenie z drugim systemem.

### 9.3. Badania symulacyjne programem EMTP – RV

#### 9.3.1. Parametry symulowanego fragmentu stacji 110 – 400 kV

Parametry techniczne modelowanego fragmentu stacji zostały zaczerpnięte z projektu [6]. Odległości oraz obiekty zostały dostosowane do stacji 400 kV

##### Zasilanie

Określone jest przez model *Ideal voltage source: cosine waveform*, dla napięć 3-fazowych. Napięcie fazowe RMS  $V_m = 420$  kV, częstotliwość  $f = 50$  Hz, kąt przesunięcia fazowego  $\Theta (0, -120, 120)^\circ$ , czas startu działania modelu  $t_{\text{start}} = -1$  s, czas końca pracy  $t_{\text{stop}} = 1e^{15}$  s.

##### Linia – do pierwszego słupa przed stacją

Symulowane jest przez model *Frequency dependent (FD) line*, którego wartości RLC zostały zaimplementowane przez moduł *Line Data*. Przyjęta długość linii  $L = 30$  km. Model *FD*, posiada również możliwość włączenia do modelu przewodów odgromowych, których początki przed modelem *FD* zostały uziemione, a z drugiej strony podłączone do modelu słupa wysokich napięć.

##### Słup wysokiego napięcia

Określony jak na rysunku 59, podstawa słupa została uziemiona. Na szczycie połączone przewody odgromowe z modelem linii *FD*.

##### Odległość między pierwszą bramką stacji a ogranicznikami na wejściu

Zastąpiona indukcyjnością linii  $L = 5 \mu\text{H}$  (~5 m)

##### Odległość między ostatnim słupem linii wejściowej a bramką stacji

Zastąpiona modelem *FD*, fragment ten został zaczerpnięty z rzeczywistych stacji 400 kV, w których odległość między bramką stacji, a słupem może wynosić nawet 200 m.

### Pary ograniczników przepięć

Zamodelowane przez połączenia indukcyjne  $L = 2 \mu\text{H}$  ( $\sim 2 \text{ m}$ ), oraz połączenia pojemności doziemnej  $C = 2 \text{ nF}$ , dla każdej fazy. Modele ograniczników przyjęte jak na rysunku 72.

### Przekładniki napięciowe oraz prądowe oraz odłączniki

Zamodelowane jak na rysunkach 70, 71 oraz 69. Wartości napięć wytrzymywanych doziemnych  $U_w$  zostały przyjęte według normy [91] i wynoszą  $U_n = 1425 \text{ kV}$ .

### Odległości między przekładnikami i odłącznikiem

Ujęte modelem pokazanym na rysunku 65. Parametry pojemności doziemnej  $C = 1 \text{ nF}$ , indukcyjności połączeń  $L = 50 \mu\text{H}$  ( $\sim 50 \text{ m}$ ), rezystancja jednostkowa na metr  $R = 0.001 \Omega$ .

### Sumaryczna droga od słupa do obserwowanego odłącznika

W zależności od rodzaju symulowanej stacji odległości zmieniano na odcinkach przekładniki – odłączniki. W przypadku stacji 420 kV sumaryczna długość połączeń wynosiła 200 m.

### Transformator napięcia 400 kV na 110 kV

Szczegółowy model przedstawiony jest na rysunku 74. Do skonstruowania modelu transformatora użyto modelu *Ideal Transformer (m-windings on secondary)*. Parametry napięć wejściowych  $U_{\text{wysokie}} = 420 \text{ kV}$  oraz wyjściowych  $U_{\text{niskie}} = 110 \text{ kV}$ . Przyjęta pojemność doziemna transformatora  $C_{\text{trafo}} = 1 \text{ nF}$ .

### Koniec stacji – miejsce łączenia z drugim systemem

W przypadku stacji 400 kV, do łączenia systemów lub ich przełączania służy odłącznik, często nazywany sprzęgłem stacji. Dotyczy to sytuacji symulacji bez obciążenia prądowego. Również w tym miejscu często występuje połączenie z szynami obejściowymi, które potrafią znacząco wydłużyć drogę połączeń stacji. Model sprzęgła przedstawiony jest na rysunku 75. Fragmenty szyn obejściowych zastąpiono pojedynczymi modelami linii *Constant Parameter (CP) line model (1-phase version)*, o poszczególnych parametrach :  $Z_s = 73 \Omega$ , oraz prędkość propagacji

fali  $v = 3e^8$  m/s, pojemność doziemna  $C_{\text{sprzęgła}} = 0,1$  nF dla każdej fazy. W trakcie symulacji sprzęgło jest otwarte.

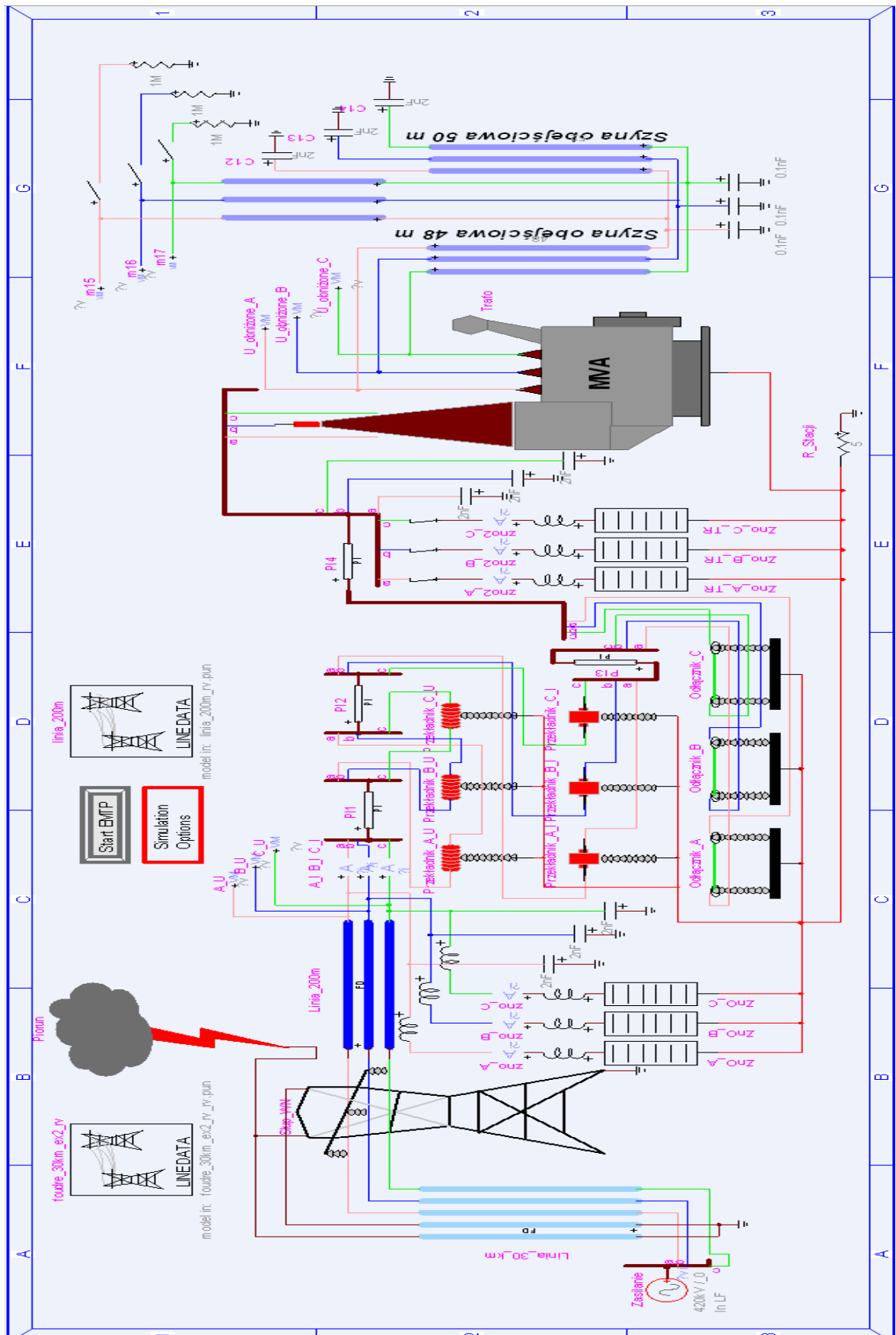
#### Parametry czasowe symulacji

Do pełnego modelowania stacji przyjęto opcje *Simulation Options*. Czas trwania całej symulacji  $t_{\text{simulation time}} = 20$  ms, krok czasowy (*Main time-step*)  $\Delta t = 0,02$   $\mu$ s. Tak przyjęty czas ma na celu obserwację pełnego okresu sinusoidy i ewentualnych odbić fali przepięciowych w czasie.

#### Obserwowane punkty pomiarowe

- Napięcie odkładające się na parametrach LC słupa (*Napięcie słupa*);
- Napięcia na izolatorach słupa (*Słup\_Wn/Izolator\_A*, *Słup\_Wn/Izolator\_B*, *Słup\_Wn/Izolator\_C*);
- Prądy przechodzące przez parę ograniczników za słupem (*zno\_A*, *zno\_B*, *zno\_C*);
- Napięcia między ogranicznikami ZnO a pierwszym obiektem stacji (*A\_U*, *B\_U*, *C\_U*);
- Prądy wchodzące do stacji za ogranicznikami ZnO (*A\_I*, *B\_I*, *C\_I*);
- Napięcia na izolacji doziemnej odłączników przed transformatorem (*Odłącznik\_A/Izolator\_A*, *Odłącznik\_B/Izolator\_B*, *Odłącznik\_C/Izolator\_C*);
- Napięcie po stronie niskiej transformatora (*U\_obniżone\_A*, *U\_obniżone\_B*, *U\_obniżone\_C*).

Symulowany fragment stacji przedstawiony jest na rysunku 76. Podstawowa konstrukcja oparta jest na dokumencie [6]. Odległości oraz rozmieszczenie urządzeń stacji odpowiada stacji 400 kV na 110 kV, biorąc jednak pod uwagę pełne możliwości programu z łatwością prezentowany fragment stacji można przekształcić w dowolną konfigurację napięciową, zmieniając tylko jego parametry odległości między urządzeniami oraz wartości napięć wytrzymywanych izolacji zastosowanych urządzeń. Na uwagę zasługuje informacja, że przedstawiony fragment stacji (rysunek 76) zawiera modele urządzeń 1-fazowych a nie 3-fazowych. Celem tego zabiegu jest lepsza rozdzielczość przedstawionego fragmentu stacji. Został jednak zachowany schemat połączeń dla wszystkich 3-faz, który umożliwił w programie realizację sprzężeń między fazowych.



Rys. 76. Zamodelowany fragment stacji wysokich napięć 110 – 400 kV w programie EMTP – RV, sytuacja uderzenia pioruna w pierwszy słup przed stacją wysokich napięć.



## 9.4. Wyniki badań symulacyjnych

### 9.4.1. Uderzenie pioruna w przewody odgromowe linii, w pierwszy słup przed stacją

W omawianej sytuacji przepływający prąd pioruna przez elementy RLC słupa powoduje powstanie różnicy napięć, na skutek czego następuje przeskok odwrotny na izolacji słupa. Parametry prądowe pioruna przyjęte do symulacji przedstawione są w tabeli 14. Prezentowane wartości są wartościami średnimi przyjętymi z danych literaturowych pozycji [10,92,8] oraz [72].

Tabela 14 Szczegółowe dane parametrów prądu pioruna przyjęte do symulacji uderzenie pioruna w przewody odgromowe linii.

	Kształt udaru $T_1/T_2$		
	$\mu\text{s}$		
Maksymalna wartość prądu [kA]	100(a)	100(b)	50
Stromość narastania [kA/ $\mu\text{s}$ ]	20,0	5,0	10,0
Czas trwania czoła udaru $T_1$ [ $\mu\text{s}$ ]	5,0	2,0	5,0
Czas do półszczytu udaru $T_2$ [ $\mu\text{s}$ ]	98,0	100,0	100,0

Podczas symulacji odłączniki umieszczone przed transformatorem były otwierane i zamykane. Celem tego zabiegu było zamodelowanie sytuacji wolnego końca stacji oraz sytuacji stacji z obciążeniem w postaci pojemności stacji.

Odczytane parametry w wybranych punktach pomiarowych przedstawione są w tabelach 15, 16 oraz 17.

W przypadku odłączników otwartych całkowita długość połączeń stacyjnych wynosi 150 m. Sytuacja ta ma odzwierciedlenie w stacji bez szyn obejściowych, natomiast w przypadku odłączników zamkniętych długość drogi wydłuża się o 60 m i wynosi 210 m, co odpowiada stacji wraz z zamontowanymi szynami obejściowymi. Omawiana sytuacja odzwierciedla przyjęty przykładowy model stacji w niniejszej pracy.

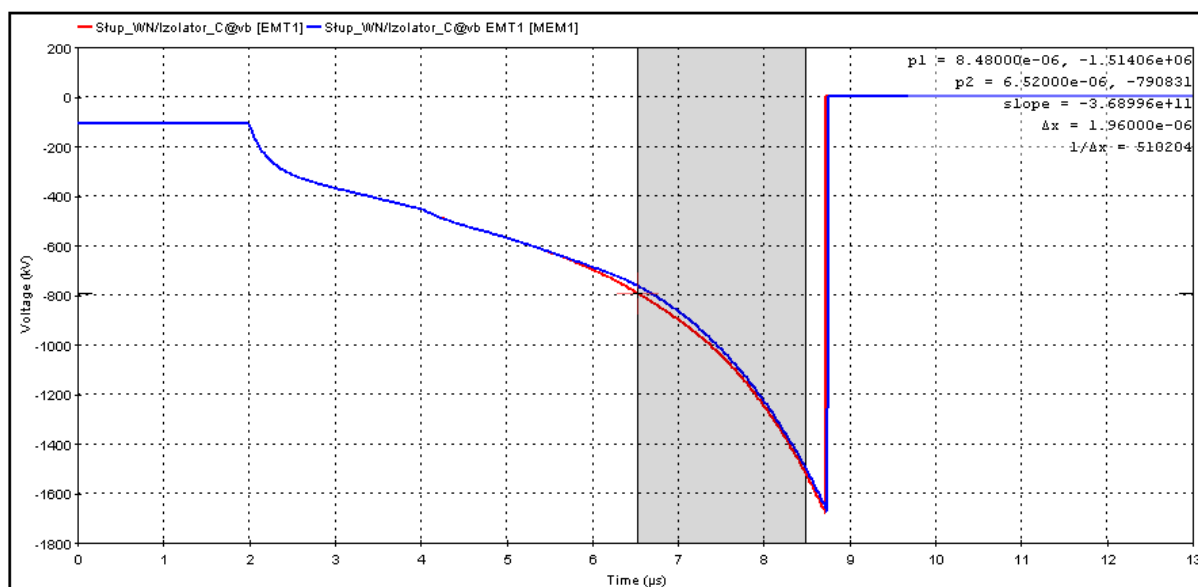
### Szczegółowe wyniki badań dla prądu pioruna 100 (a) kA

W trakcie symulacji były obserwowane napięcia na izolacji słupa przed stacją. W tabeli 15 przedstawiono wartości napięć zarejestrowane w sytuacji przeskoku odwrotnego. Na fazach sąsiednich również indukują się napięcia, jednakże wartości tych napięć oraz ich czasy czoła nie powodują przeskoku na izolacji słupa.

Tabela 15 Szczegółowe wyniki pomiarów napięć na izolacji słupa przed stacją.

Stan odłączników przed transformatorem			
		<i>otwarte</i>	<i>zamknięte</i>
Faza C	$U_x$ [kV]	1671,3	1671,3
	$T_1$ [ $\mu$ s]	1,8	1,9

Na rysunku 77 przedstawiono przebiegi napięciowe rejestrowane na izolacji słupa fazy C. Oba przebiegi pokrywają się oraz wykazują ten sam moment czasu do przeskoku. Ucięcie nastąpiło na czole udaru, wartość czasu trwania czoła udaru  $T_1$  nie mieści się w ramach znormalizowanego udaru napięciowego.



[EMT1] Circuit1m - Thu Feb 23 18:10:36 CET 2012 - C:\Documents and Settings\maca\Pulpit\Doktorat\temp\Circuit1\_pj  
 [MEM1] Signals in memory - Thu Feb 23 18:10:18 CET 2012

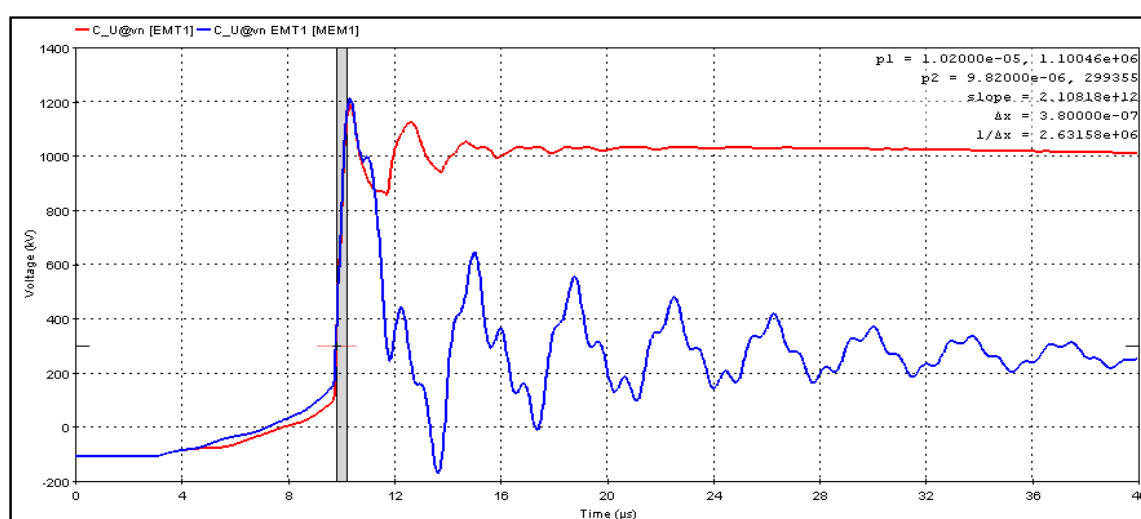
Rys. 77. Przeskok odwrotny na izolatorze słupa fazy C. Obliczony czas czoła trwania udaru  $T_1 = 1,9 \mu$ s. Kolor niebieski przebieg przy odłączniku otwartym, kolor czerwony przy odłączniku zamkniętym.

Napięcia wchodzące do stacji mierzone są tuż za ogranicznikami przepięć. Tabela 16 przedstawia napięcia obniżone fazy C, na której nastąpił przeskok odwrotny. Parametry napięciowe ograniczników przedstawione są na rysunku 72. Wszelkie dane techniczne zaczerpnięto z pozycji [104].

Tabela 16 Szczegółowe wyniki pomiarów napięć wchodzących do stacji.

Stan odłączników przed transformatorem			
		<i>otwarte</i>	<i>zamknięte</i>
Faza C	$U_x$ [kV]	1189,9	1208,4
	$T_1$ [ $\mu$ s]	0,4	0,4

Przedstawione na rysunku 78 przebiegi napięć obniżonych wchodzących do stacji charakteryzują się krótkimi czasami trwania czoła udaru  $T_1$ . Charakterystyka przedstawiona kolorem czerwonym odpowiada przebiegowi w sytuacji odłączników przed transformatorem będących w stanie zamkniętym. Na uwagę zasługuje informacja o pojawiających się oscylacjach, których wartość szacuje się na około 20%. W przypadku przebiegu zaznaczonego kolorem niebieskim, program zarejestrował przeskok na izolacji. Widoczne oscylacje na przebiegu niebieskim są wynikiem odbić od otwartego odłącznika.



[EMT1] Circuit1m - Thu Feb 23 18:10:36 CET 2012 - C:\Documents and Settings\maca\Pulpit\Doktorat\temp\Circuit1\_pj  
 [MEM1] Signals in memory - Thu Feb 23 18:10:18 CET 2012

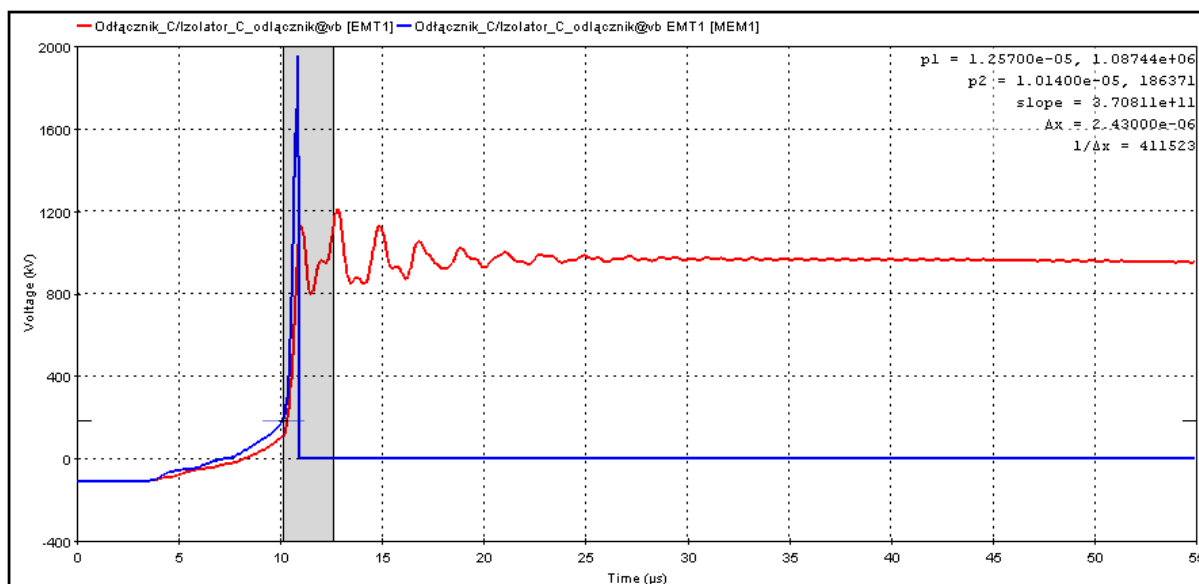
Rys. 78. Napięcie wchodzące do stacji, czas czoła  $T_1 = 0,4 \mu$ s. Kolor niebieski przebieg przy odłączniku otwartym, kolor czerwony przy odłączniku zamkniętym.

Napięcia rejestrowane były również na izolacji doziemnej odłączników. Zmierzone wartości przedstawia tabela 17.

Tabela 17 Szczegółowe wyniki pomiarów napięć na izolacji odłączników

Stan odłączników przed transformatorem			
		<i>otwarte</i>	<i>zamknięte</i>
Faza C	$U_x$ [kV]	1951,2	1208,4
	$T_1$ [ $\mu$ s]	0,3	2,4

Przedstawione na rysunku 79 przebiegi obrazują dwie różne sytuacje. W pierwszej, gdy odłącznik jest otwarty, mamy wtedy do czynienia z sytuacją wolnego końca w stacji, obserwujemy pełen przeskok na izolacji (kolor niebieski). Natomiast w sytuacji, gdy odłączniki są zamknięte, rejestrujemy pełne przepięcie, brak przeskoków oraz oscylacje na czole udaru wynikające z indukcyjności połączeń stacyjnych. Zmierzenie wartości czasu czoła udaru dokonano zgodnie z zasadami określonymi w [1].



[EMT1] Circuit1m - Thu Feb 23 18:10:36 CET 2012 - C:\Documents and Settings\maca\Pulpit\Doktorat\temp\Circuit1\_pj  
 [MEM1] Signals in memory - Thu Feb 23 18:10:18 CET 2012

Rys. 79. Napięcie na izolacji odłącznika fazy C, czas czoła  $T_1 = 2,4 \mu$ s. Kolor niebieski przebieg przy odłączniku otwartym, kolor czerwony przy odłączniku zamkniętym. Przebieg koloru niebieskiego przedstawia przeskok na izolacji.

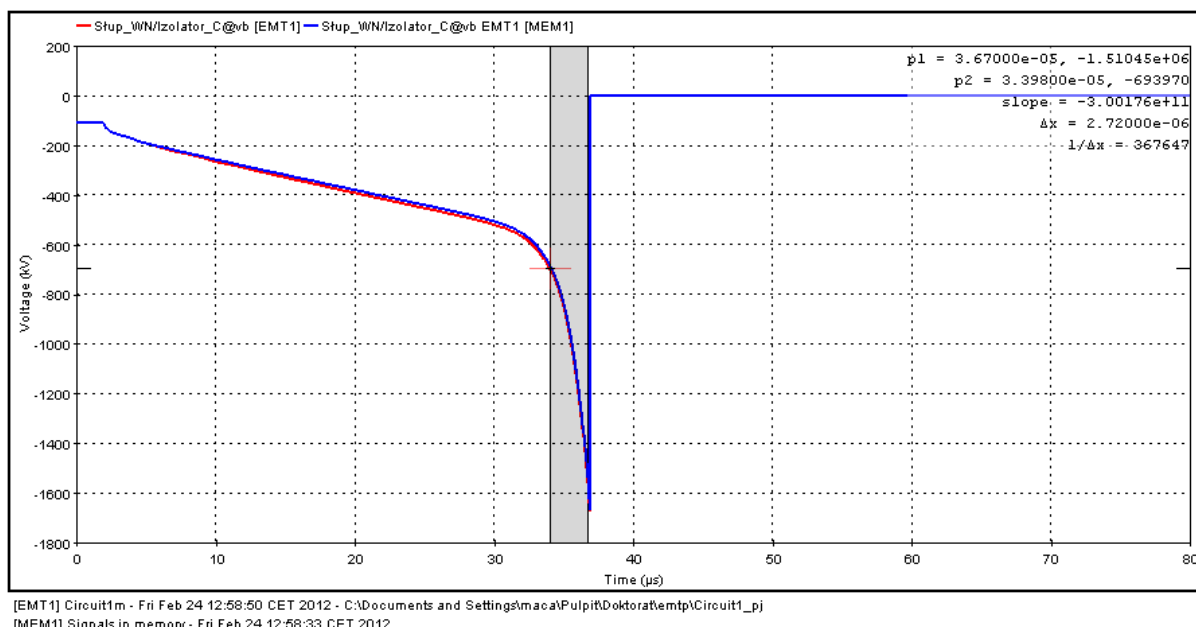
### Szczegółowe wyniki badań dla prądu pioruna 100 (b) kA

Symulacji dokonywano analogicznie w ten sam sposób zamykając oraz otwierając odłączniki znajdujące się przed transformatorem. W tabeli 18 przedstawiono wartości napięć zarejestrowane na izolacji słupa

Tabela 18 Szczegółowe wyniki pomiarów napięć na izolacji słupa przed stacją.

Stan odłączników przed transformatorem			
		<i>otwarte</i>	<i>zamknięte</i>
Faza C	U <sub>x</sub> [kV]	1671,3	1676,6
	T <sub>1</sub> [μs]	2,7	2,7

Na rysunku 80 przedstawiono przebiegi napięciowe rejestrowane na izolacji słupa fazy C.



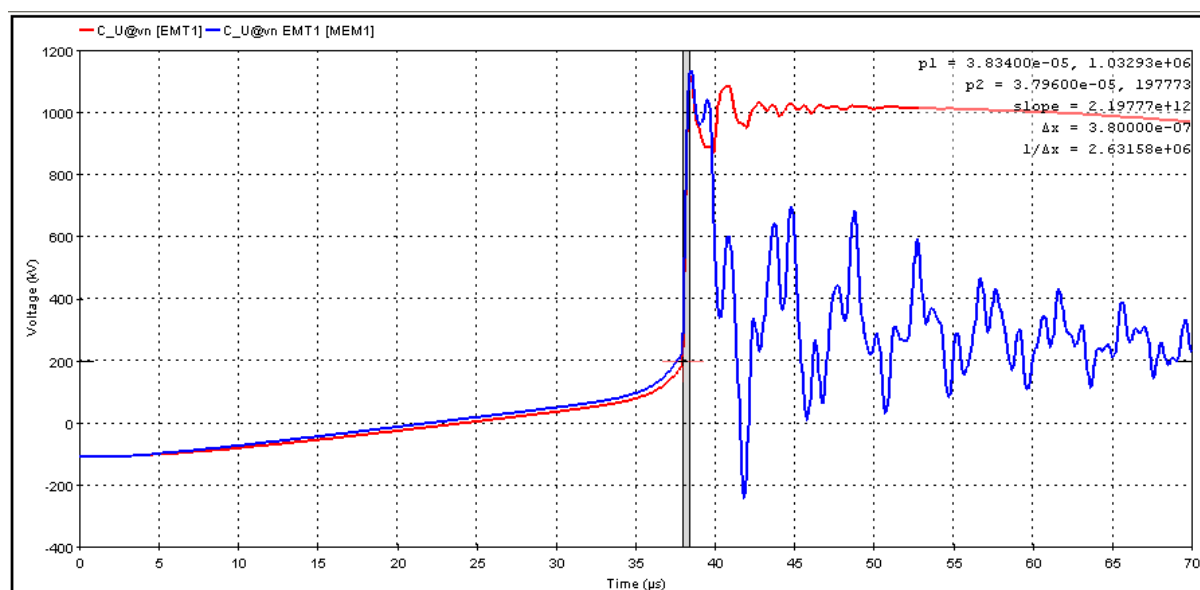
Rys. 80. Przeskok odwrotny na izolatorze słupa fazy C. Obliczony czas czola trwania udaru  $T_1 = 2,7 \mu\text{s}$ . Kolor niebieski przebieg przy odłączniku otwartym, kolor czerwony przy odłączniku zamkniętym.

Napięcia wchodzące do stacji mierzone są tuż za ogranicznikami napięć przedstawia tabela 19.

Tabela 19 Szczegółowe wyniki pomiarów napięć wchodzących do stacji.

Stan odłączników przed transformatorem			
		<i>otwarte</i>	<i>zamknięte</i>
Faza C	$U_x$ [kV]	1133,9	1108,3
	$T_1$ [ $\mu$ s]	0,4	0,4

Przedstawione na rysunku 81 przebiegi napięć obniżonych wchodzących do stacji charakteryzują się podobnymi cechami jak w sytuacji prądu pioruna 100 (a), wartość oscylacji na przebiegu czerwonym szacuje się na około 20%.



[EMT1] Circuit1m - Fri Feb 24 12:58:50 CET 2012 - C:\Documents and Settings\maca\Pulpit\DoktoraTemp\Circuit1\_pj  
 [MEM1] Signals in memory - Fri Feb 24 12:58:33 CET 2012

Rys. 81. Napięcie wchodzące do stacji, czas czoła  $T_1 = 0,4 \mu$ s. Kolor niebieski przebieg przy odłączniku otwartym, kolor czerwony przy odłączniku zamkniętym.

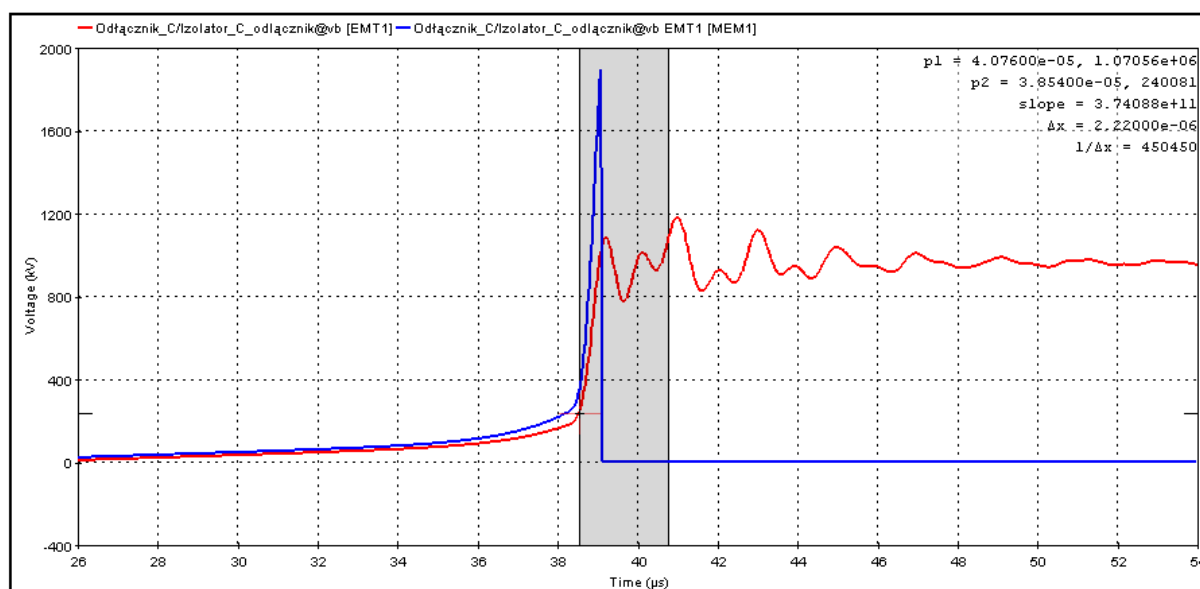
Przebieg koloru niebieskiego odpowiada sytuacji symulacji odłącznika otwartego, czyli fragmentu stacji bez obciążenia. Natomiast przebieg koloru czerwonego odpowiada sytuacji, gdy odłącznik jest zamknięty. Powstałe oscylacje przebiegu niebieskiego są wynikiem odbić od otwartego odłącznika.

Napięcia rejestrowane na izolacji doziemnej odłączników przedstawione są w tabeli 20.

Tabela 20 Szczegółowe wyniki pomiarów napięć na izolacji odłączników

Stan odłączników przed transformatorem			
		<i>otwarte</i>	<i>zamknięte</i>
Faza C	$U_x$ [kV]	1895,9	1181,0
	$T_1$ [ $\mu$ s]	0,3	2,2

Przedstawione na rysunku 82 przebiegi obrazują dwie różne sytuacje. W pierwszej, gdy odłącznik jest otwarty (przebieg koloru niebieskiego). Mamy wtedy do czynienia z sytuacją wolnego końca w stacji, obserwujemy pełen przeskok na izolacji. Natomiast w sytuacji odłączników zamkniętych (przebieg koloru czerwonego) rejestrujemy pełne przepięcie, brak przeskoków oraz znaczne oscylacje na czole udaru wynikające z indukcyjności połączeń stacyjnych. Zmierzenie wartości czasu czoła udaru dokonano zgodnie z zasadami określonymi w [1].



[EMT1] Circuit1m - Fri Feb 24 12:58:50 CET 2012 - C:\Documents and Settings\maca\Pulpit\DoktoraTemp\Circuit1\_pj  
 [MEM1] Signals in memory - Fri Feb 24 12:58:33 CET 2012

Rys. 82. Napięcie na izolacji odłącznika fazy C., czas czoła  $T_1 = 2,2 \mu$ s. Kolor niebieski przebieg przy odłączniku otwartym, kolor czerwony przy odłączniku zamkniętym.

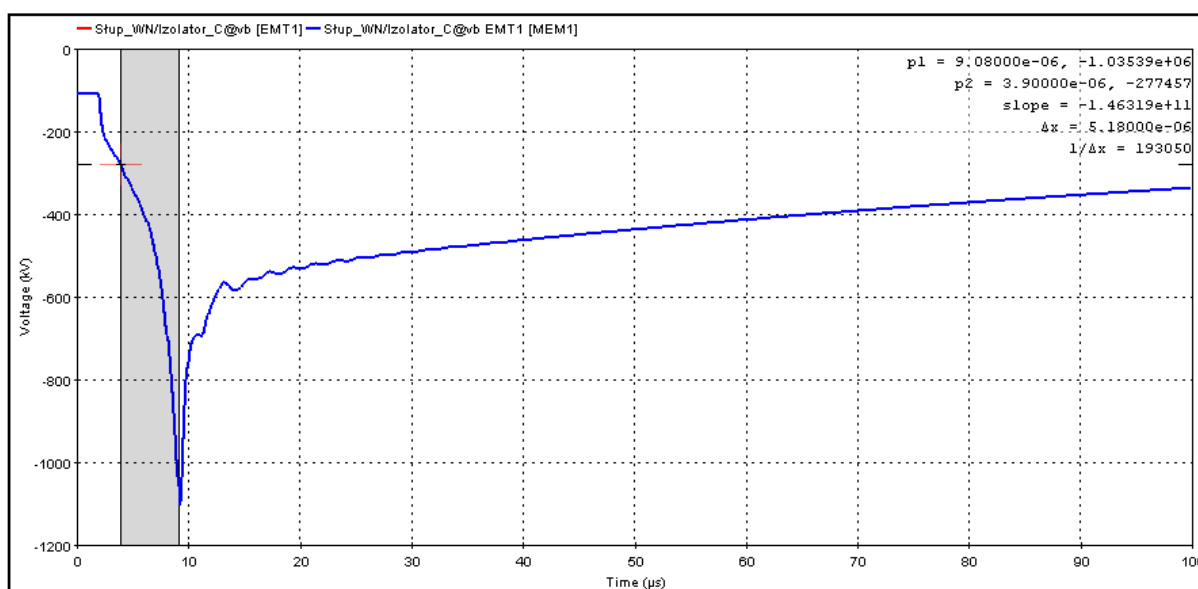
### Szczegółowe wyniki badań dla prądu pioruna 50 kA

Napięcia zarejestrowane na izolacji słupa przed stacją przedstawia tabela 21. Z obserwacji przebiegu napięcia wynika, że przy wartościach prądu pioruna 50 kA nie występuje przeskok odwrotny na żadnej z faz.

Tabela 21 Szczegółowe wyniki pomiarów napięć na izolacji słupa przed stacją.

Stan odłączników przed transformatorem			
		<i>otwarte</i>	<i>zamknięte</i>
Faza C	U <sub>x</sub> [kV]	1104,3	1104,3
	T <sub>1</sub> [μs]	5,2	5,2

Na rysunku 83 przedstawiono przebiegi napięciowe rejestrowane na izolacji słupa fazy C. W przypadku faz sąsiadujących przebiegi są takie same jak na fazie C. Z praktycznego punktu widzenia nie ma różnic między przebiegami w sytuacji odłączników zamkniętych oraz otwartych.



[EMT1] Circuit1m - Fri Feb 24 13:15:06 CET 2012 - C:\Documents and Settings\maca\Pulpit\Doktorat\temp\Circuit1\_pj  
 [MEM1] Signals in memory - Fri Feb 24 13:16:13 CET 2012

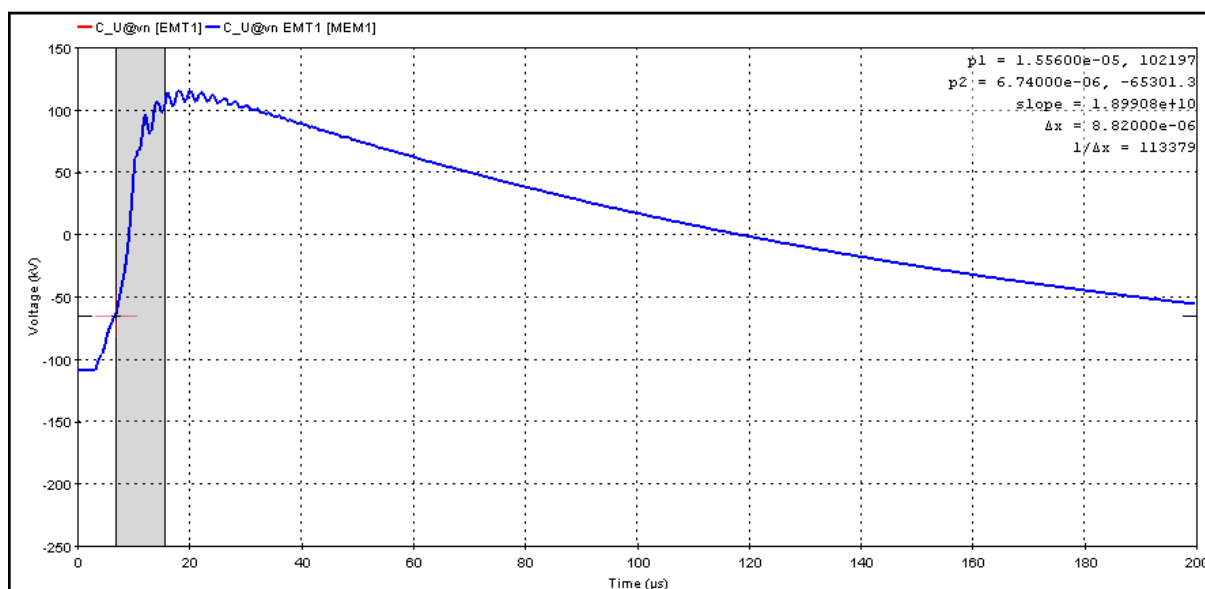
Rys. 83. Przebieg przepięcia piorunowego na izolatorze słupa fazy C. Obliczony czas czoła trwania udaru T<sub>1</sub> = 5,2 μs. Kolor niebieski przebieg przy odłączniku otwartym, kolor czerwony przy odłączniku zamkniętym.



Napięcia wchodzące do stacji mierzone przedstawia tabela 22.

Tabela 22 Szczegółowe wyniki pomiarów napięć wchodzących do stacji.

Stan odłączników przed transformatorem			
		<i>otwarte</i>	<i>zamknięte</i>
Faza C	U <sub>x</sub> [kV]	115,7	115,7
	T <sub>1</sub> [μs]	8,8	8,8



[EMT1] Circuit1m - Fri Feb 24 13:15:06 CET 2012 - C:\Documents and Settings\maca\pulpik\Doktorat\temp\Circuit1\_pj  
 [MEM1] Signals in memory - Fri Feb 24 13:16:13 CET 2012

Rys. 84. Napięcie wchodzące do stacji, czas czoła  $T_1 = 8,8 \mu\text{s}$ . Kolor niebieski przebieg przy odłączniku otwartym, kolor czerwony przy odłączniku zamkniętym.

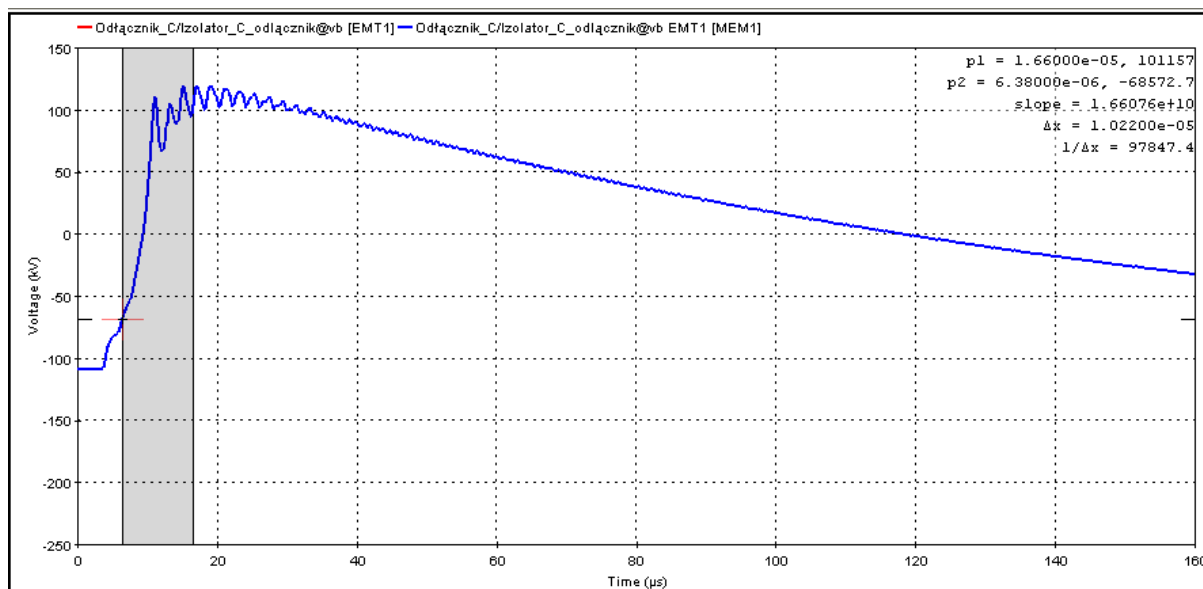
Zarejestrowane przebiegi z rysunku 84, praktycznie pokrywają się. Oscylacje, które znajdują zaczynają się na czole udaru i przechodzą na jego grzbiet są wynikiem indukcyjności połączeń stacji. Wartość oscylacji szacuje się na około do 8%.

Napięcia rejestrowane na izolacji doziemnej odłączników przedstawione są w tabeli 23.

Tabela 23 Szczegółowe wyniki pomiarów napięć na izolacji odłączników

Stan odłączników przed transformatorem			
		<i>otwarte</i>	<i>zamknięte</i>
Faza C	$U_x$ [kV]	118,2	118,2
	$T_1$ [ $\mu$ s]	10,2	10,2

Przedstawione na rysunku 85 przebiegi obrazują dwie różne sytuacje. W pierwszej, gdy odłącznik jest otwarty. Mamy wtedy do czynienia z sytuacją wolnego końca w stacji, obserwujemy brak przeskoku na izolacji. Natomiast w sytuacji odłączników zamkniętych rejestrujemy praktycznie takie same przebiegi oraz znaczne oscylacje na czole udaru wynikające z indukcyjności połączeń stacyjnych. Zmierzanie wartości czasu czoła udaru dokonano zgodnie z zasadami określonymi w [1].



[EMT1] Circuit1m - Fri Feb 24 13:15:06 CET 2012 - C:\Documents and Settings\maca\Pulpit\Doktorat\temp\Circuit1\_pj  
 [MEM1] Signals in memory - Fri Feb 24 13:16:13 CET 2012

Rys. 85. Napięcie na izolacji odłącznika fazy C., czas czoła  $T_1 = 10,2 \mu$ s. Kolor niebieski przebieg przy odłączniku otwartym, kolor czerwony przy odłączniku zamkniętym.

#### 9.4.2. Uderzenie pioruna bezpośrednio w przewody robocze linii

W omawianej sytuacji przepięcie rozłoży się na część wchodzącą do stacji oraz na część wchodzącą na izolację słupa. Dla tego przykładu mierzone są napięcia na izolacji słupa, wchodzące do stacji przed ogranicznikami oraz napięcia na izolacji doziemnej odłącznika przed transformatorem. Podczas badań odłączniki były otwierane i zamykane. Parametry prądowe pioruna przyjęte do symulacji przedstawione są w tabeli 24. Prezentowane wartości są wartościami średnimi jakie podaje literatura tematu [10,92,8] oraz [72].

Tabela 24 Szczegółowe dane parametrów prądu pioruna przyjęte do symulacji uderzenie pioruna bezpośrednio w przewody robocze linii.

	Kształt udaru $T_1/T_2$	$\mu\text{s}$		
Maksymalna wartość prądu [kA]		30	20	10

Stromość narastania [kA/ $\mu\text{s}$ ]	7,0	6,6	2,0
Czas trwania czoła udaru $T_1$ [ $\mu\text{s}$ ]	4,5	3,0	6,0
Czas do półszczytu udaru $T_2$ [ $\mu\text{s}$ ]	100	100	100

Podczas symulacji uderzenie pioruna było zasymulowane w fazę A. Odczytane parametry punktów pomiarowych przedstawione są w tabelach 25, 26 oraz 27.

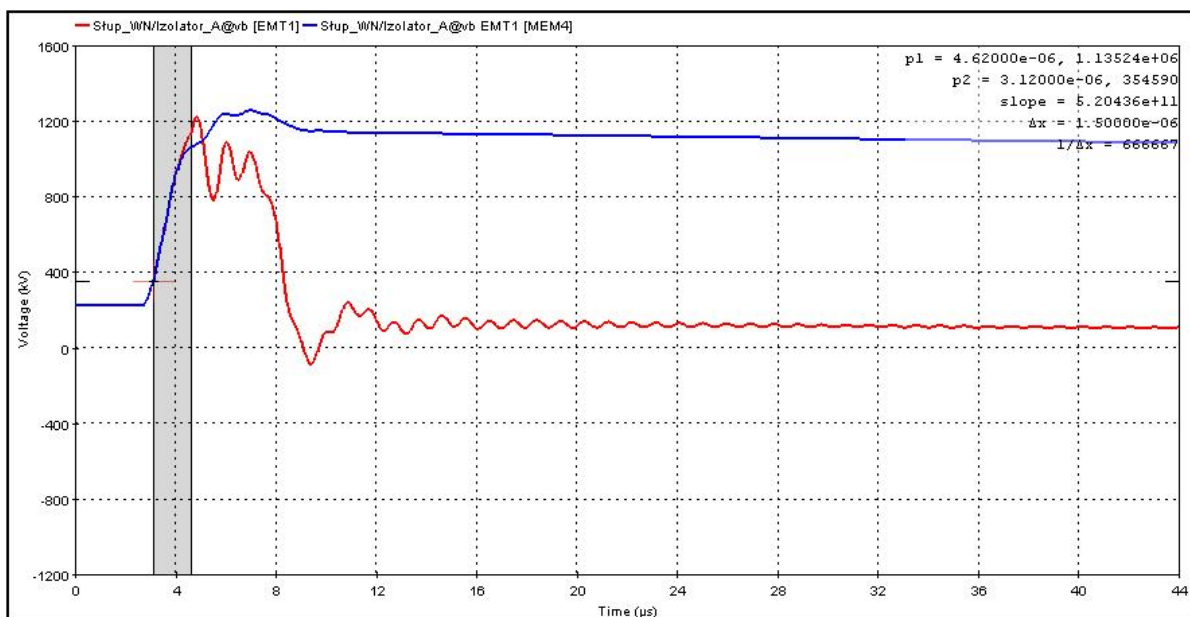
### Szczegółowe wyniki badań dla prądu pioruna 30 kA

W trakcie symulacji były obserwowane napięcia na izolacji słupa przed stacją. W tabeli 25 przedstawiono wartości napięć zarejestrowane w sytuacji uderzenia pioruna bezpośrednio w fazę A.

Tabela 25 Szczegółowe wyniki pomiarów napięć na izolacji słupa przed stacją.

Stan odłączników przed transformatorem			
		<i>otwarte</i>	<i>zamknięte</i>
Faza A	$U_x$ [kV]	1221,6	1252,8
	$T_1$ [ $\mu$ s]	1,5	3,2

Na rysunku 86 przedstawiono przebiegi napięciowe rejestrowane na izolacji słupa. Zarejestrowany przebieg koloru czerwonego odpowiadający fazie A przedstawia chwilowy wzrost napięcia przepięcia, którego wartość szacuje się na 10%. Z praktycznego punktu widzenia ma ono znaczenie jedynie w pomiarach czasu trwania czoła, ponieważ lokalnie zwiększa wartość maksymalną.



[EMT1] Circuit1m - Thu Apr 12 10:25:18 CEST 2012 - C:\Documents and Settings\maoa\Pulpit\Doktora\temp\Circuit1\_pj  
 [MEM4] Signals in memory - Thu Apr 12 10:24:50 CEST 2012

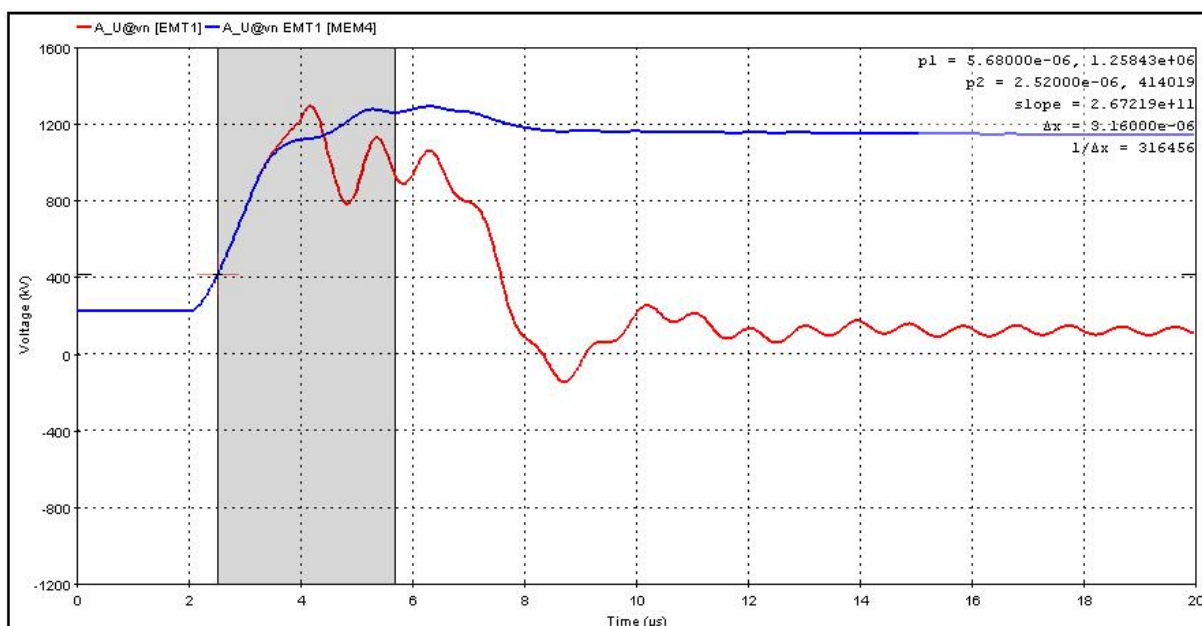
Rys. 86. Przepięcie zmierzone na fazach izolacji słupa. Kolor czerwony – odłącznik otwarty, Kolor niebieski – odłącznik zamknięty.

Obserwowane napięcia wchodzące do stacji mierzone są tuż za ogranicznikami napięć. Tabela 26 przedstawia napięcia obniżone dla fazy A

Tabela 26 Szczegółowe wyniki pomiarów napięć wchodzących do stacji.

Stan odłączników przed transformatorem			
		otwarte	zamknięte
Faza A	$U_x$ [kV]	1289,5	1289,9
	$T_1$ [ $\mu$ s]	1,7	3,1

Charakterystyka przedstawiona kolorem czerwonym odpowiada przebiegowi w fazie A. Na rysunku 87, przedstawiony przebiegi praktycznie pokrywają się z przebiegami z rysunku 86, wynika to z faktu że po „wstrzyknięciu” przepięcia do stacji ograniczniki praktycznie zadziałały od razu, a napięcia na słupie oraz wchodzące do stacji są napięciami już obniżonymi.



[EMT1] Circuit1m - Thu Apr 12 10:25:18 CEST 2012 - C:\Documents and Settings\maca\Pulpit\Doktorat\temp\Circuit1\_pj  
 [MEM4] Signals in memory - Thu Apr 12 10:24:50 CEST 2012

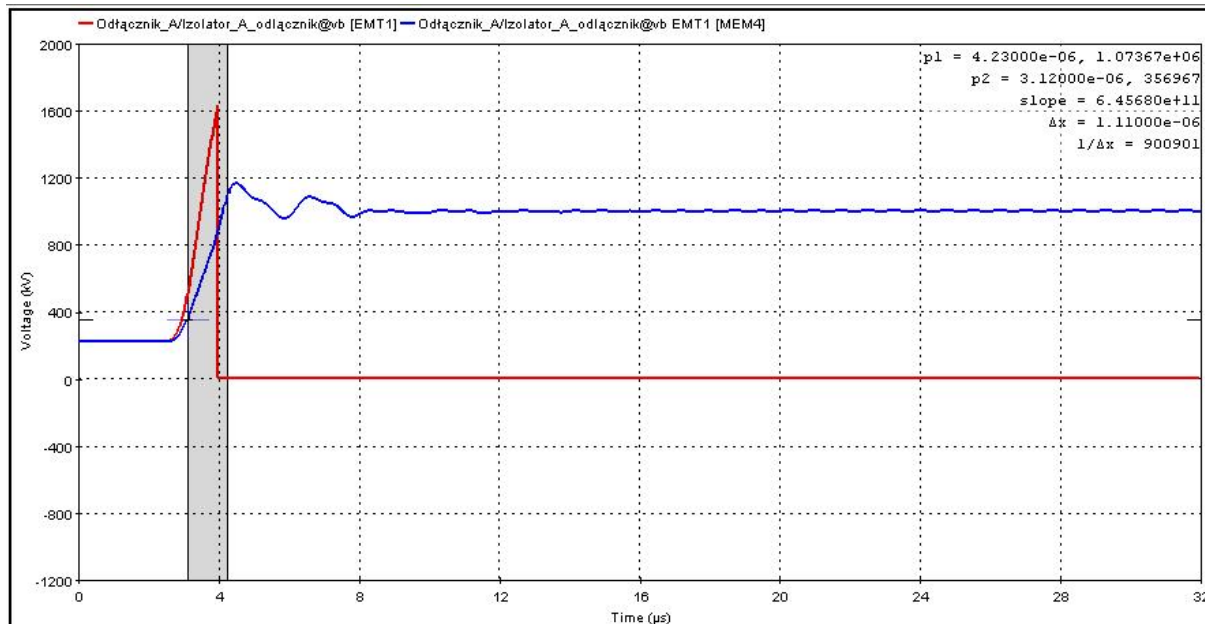
Rys. 87. Napięcie wchodzące do stacji. Kolor czerwony – odłącznik otwarty, Kolor niebieski – odłącznik zamknięty, zmierzony czas czoła  $T_1 = 3,1\mu$ s

Napięcia rejestrowane były również na izolacji doziemnej odłączników. Zmierzone wartości przedstawia tabela 27.

Tabela 27 Szczegółowe wyniki pomiarów napięć na izolacji odłączników

Stan odłączników przed transformatorem			
		otwarte	zamknięte
Faza A	$U_x$ [kV]	1628,0	1165,0
	$T_1$ [ $\mu$ s]	Przeskok	1,3

Przedstawione na rysunku 88 przebiegi fazy A obrazuje sytuacje przepięcia na izolacji doziemnej odłącznika przed transformatorem. Przy bliższej analizie zauważamy powstałe oscylacje, których wartość szacuje się na około 10%. W sytuacji gdy podczas symulacji odłączniki są zamknięte. Zmierzenie wartości czasu czoła udaru dokonano zgodnie z zasadami określonymi w [1].



[EMT1] Circuit1m - Thu Apr 12 10:25:18 CEST 2012 - C:\Documents and Settings\macal\Pulpit\Doktorat\temp\Circuit1\_pj  
 [MEM4] Signals in memory - Thu Apr 12 10:24:50 CEST 2012

Rys. 88. Napięcie na izolacji odłącznika fazy A, Kolor czerwony – odłącznik otwarty, Kolor niebieski – odłącznik zamknięty

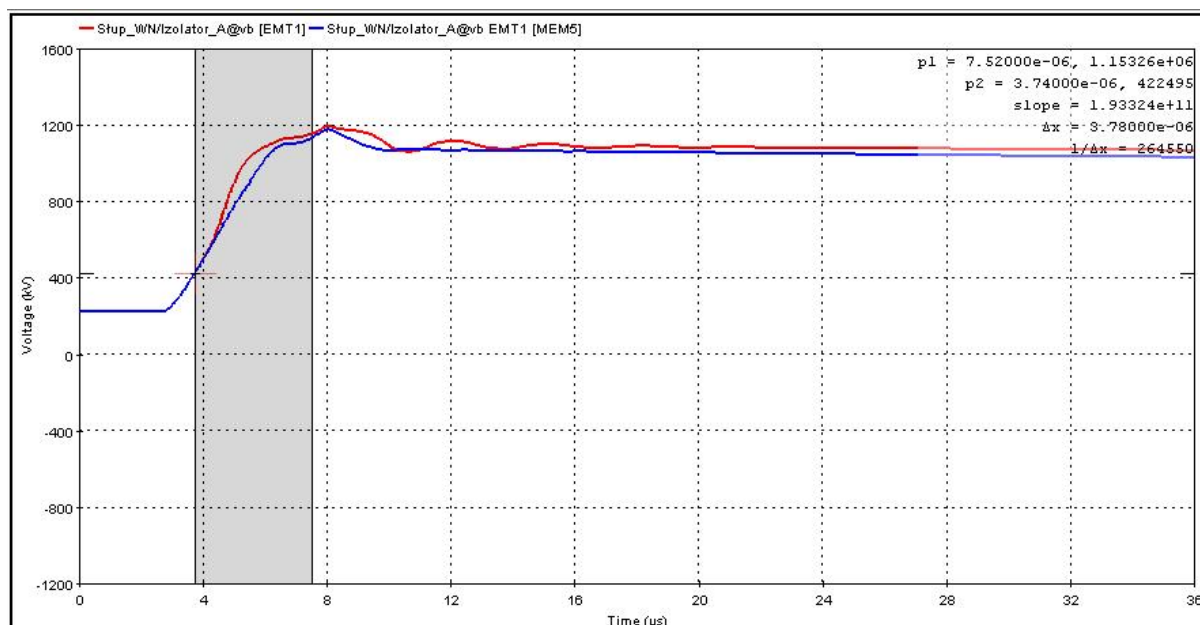
### Szczegółowe wyniki badań dla prądu pioruna 20 kA

W trakcie symulacji były obserwowane napięcia na izolacji słupa przed stacją. W tabeli 28 przedstawiono wartości napięć zarejestrowane w sytuacji uderzenia pioruna bezpośrednio w fazę A.

Tabela 28 Szczegółowe wyniki pomiarów napięć na izolacji słupa przed stacją.

Stan odłączników przed transformatorem			
		otwarte	zamknięte
Faza A	U <sub>x</sub> [kV]	1187,5	1171,6
	T <sub>1</sub> [μs]	3,7	3,7

Na rysunku 89 przedstawiono przebiegi napięciowe rejestrowane na izolacji słupa. Kolor czerwony odpowiada przepięciu w fazie A. W porównaniu z przebiegami z rysunków 87 oraz 86 warto zwrócić uwagę na znaczne mniejsze oscylacje na przebiegach. Różnice te wynikają z różnych wartości stromości prądów pioruna.



[EMT1] Circuit1m - Thu Apr 12 10:48:56 CEST 2012 - C:\Documents and Settings\maca\FulpifDoktorat\temp\Circuit1\_pj  
 [MEM5] Signals in memory - Thu Apr 12 10:49:00 CEST 2012

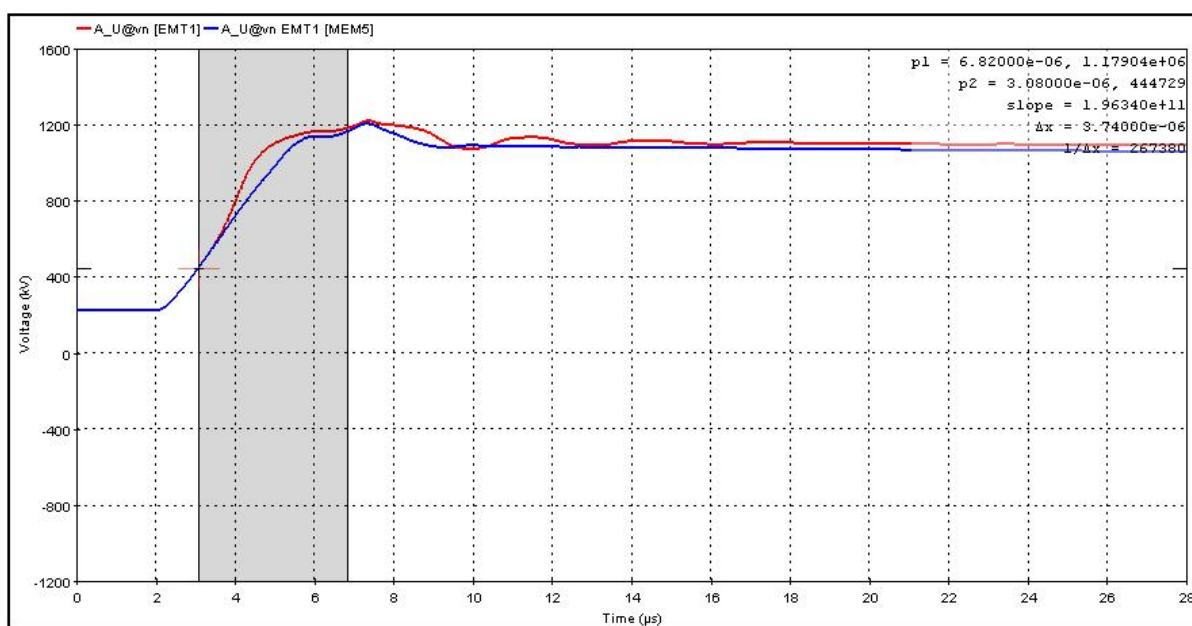
Rys. 89. Przepięcie zmierzone na fazach izolacji słupa dla fazy A. Kolor czerwony – odłącznik otwarty, Kolor niebieski – odłącznik zamknięty

Obserwowane napięcia wchodzące do stacji mierzone są tuż za ogranicznikami napięć. Tabela 29 przedstawia napięcia obniżone dla fazy A

Tabela 29 Szczegółowe wyniki pomiarów napięć wchodzących do stacji.

Stan odłączników przed transformatorem			
		otwarte	zamknięte
Faza A	U <sub>x</sub> [kV]	1217,1	1209,9
	T <sub>1</sub> [μs]	3,7	3,7

Charakterystyka przedstawiona kolorem czerwonym odpowiada przebiegowi w fazie A.



[EMT1] Circuit1m - Thu Apr 12 10:48:56 CEST 2012 - C:\Documents and Settings\maca\Pulpit\Doktorat\temp\Circuit1\_pj  
 [MEM5] Signals in memory - Thu Apr 12 10:49:00 CEST 2012

Rys. 90. Napięcie wchodzące do stacji, czas czoła. Kolor czerwony – odłącznik otwarty, Kolor niebieski – odłącznik zamknięty

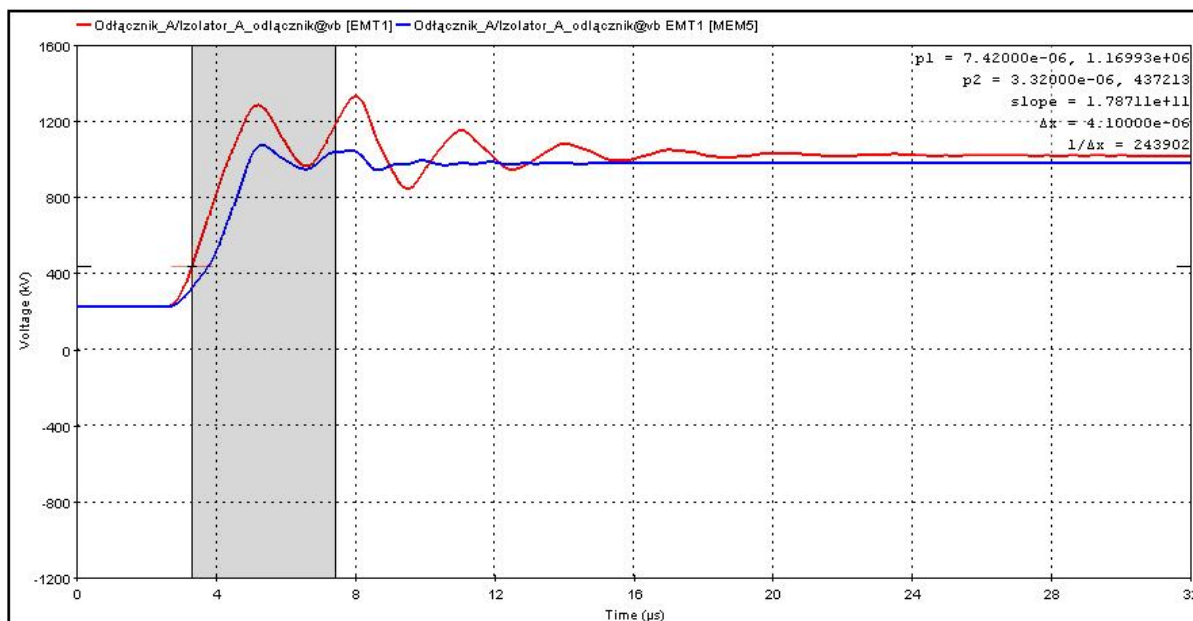


Napięcia rejestrowane były również na izolacji doziemnej odłączników. Zmierzone wartości przedstawia tabela 30.

Tabela 30 Szczegółowe wyniki pomiarów napięć na izolacji odłączników

Stan odłączników przed transformatorem			
		otwarte	zamknięte
Faza A	$U_x$ [kV]	1325,7	1072,6
	$T_1$ [ $\mu$ s]	4,1	1,6

Przedstawione na rysunku 91 przebieg fazy A obrazuje sytuacje przepięcia na izolacji doziemnej odłącznika przed transformatorem. Przy bliższej analizie zauważamy powstałe oscylacje, których wartość szacuje się na około 20%.



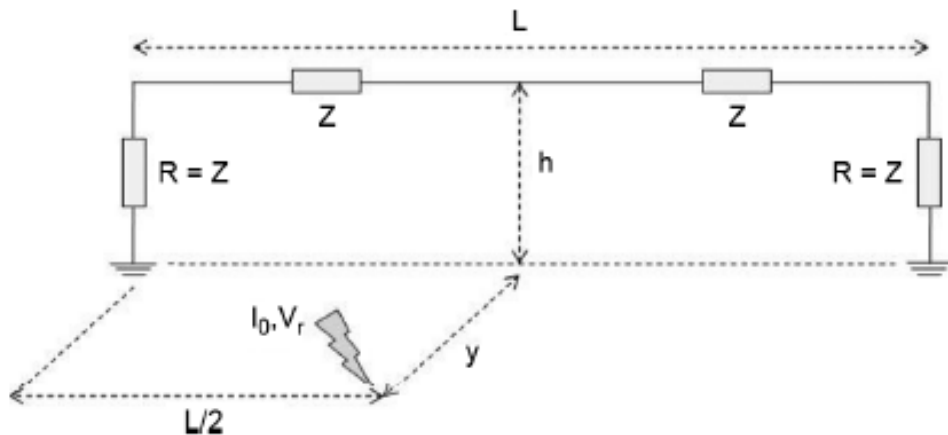
[EMT1] Circuit1m - Thu Apr 12 10:48:56 CEST 2012 - C:\Documents and Settings\maca\pulpit\Doktorat\temp\Circuit1\_pj  
 [MEM5] Signals in memory - Thu Apr 12 10:49:00 CEST 2012

Rys. 91. Napięcie na izolacji odłącznika fazy A. Kolor czerwony – odłącznik otwarty, Kolor niebieski – odłącznik zamknięty

Obliczona wartość czasu trwania czoła w sytuacji, gdy w trakcie symulacji odłącznik był otwarty (kolor czerwony), została dokonana zgodnie z wytycznymi normy [1], ponieważ wartość  $0.9 U_{max}$  przyjmuje się od najwyższej wartości. W tym szczególnym przypadku jest to drugi wzrost napięcia.

### 9.4.3. Uderzenie pioruna w otoczenie stacji

W literaturze przedmiotu przedstawiono wiele podobnych badań i symulacji. Dla przykładu Autorzy pracy [54] analizują przebiegi napięć indukowanych w linii, których czasy trwania czoła przepięcia wynoszą nawet do  $T_1 = 7 \mu\text{s}$ . Istotnym elementem wpływającym na wartość indukowanego przepięcia stanowi rezystywność gruntu oraz odległość od miejsca uderzenia pioruna do miejsca, w którym dokonujemy pomiarów napięcia indukowanego. Schematyczną taką sytuację przedstawiono na rysunku 92.



Rys. 92. Analiza rozkładu parametrów w sytuacji uderzenia pioruna w pobliże stacji [54].

Do zobrazowania powyższej sytuacji przyjęto przykładową odległość od stacji  $y = 50 \text{ m}$ , natomiast rezystywność gruntu  $R_{\text{gruntu}} = 1000 \Omega\text{m}$ . Według pozycji [99] maksymalną wartość napięcia indukowanego w przewodach stacji można określić według wzoru /11/:

$$V_s = 1,28 \cdot I_{\text{max}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{y}} \quad /11/$$

gdzie:

$I_{\text{max}}$  = maksymalna wartość prądu pioruna [kA],

$\rho$  = rezystywność gruntu [ $\Omega\text{m}$ ],

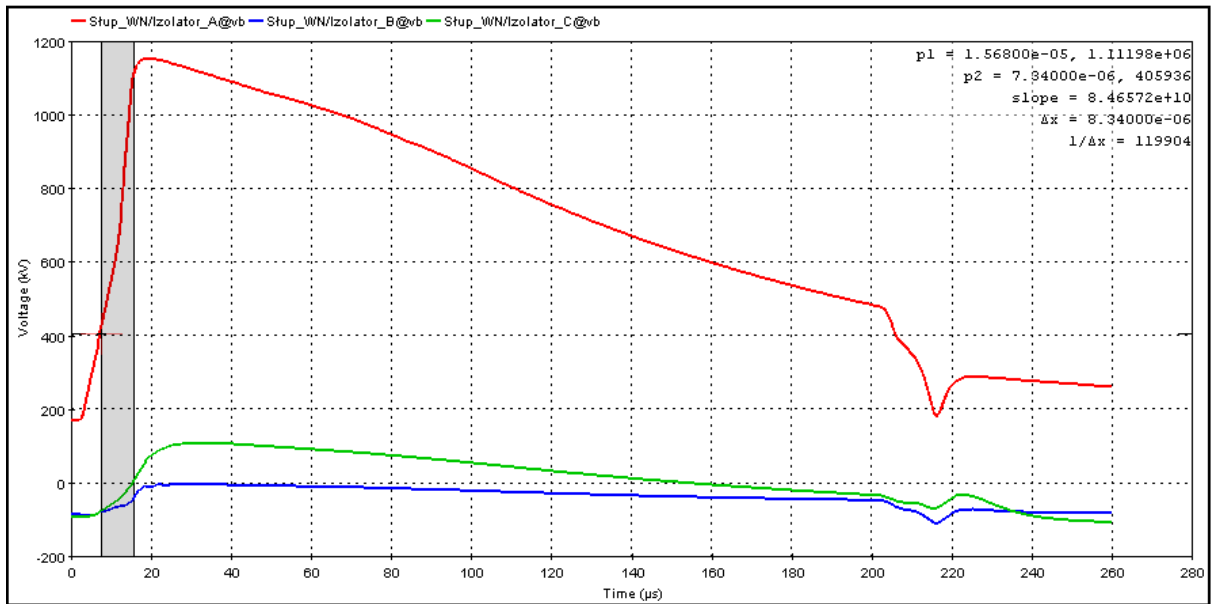
$y$  = odległość miejsca uderzenia pioruna od linii [m].

Obliczona wartość  $V_s$ , która powinna pojawić się w stacji w przypadku omawianej przykładowej sytuacji, wynosi  $V_s = 572,4 \text{ kV}$ , w przypadku prądu pioruna  $I_{\text{max}} = 100 \text{ kA}$ .

Analiza prowadzona przez Autorów prac [54] oraz [99] nie uwzględnia sytuacji uderzenia pioruna w pobliże stacji, w której indukcyjność połączeń odgrywa znaczną rolę. Zobrazowany fragment stacji zapewnia połączenia galwaniczne, które zabezpieczają przed spadkami uziemieniowymi, jak jednak można zaobserwować z danych literaturowych, pojawiające się w stacji przepięcia pochodzące od uderzeń w otoczenie stacji, nie mogą odgrywać istotnej roli z punktu widzenia koordynacji izolacji stacji. W przedstawianej pracy symulowano uderzenie pioruna w bardzo bliskie otoczenie stacji, którego odległość od przewodów roboczych jest na tyle mała, że można uznać iż wyładowanie nastąpiło bezpośrednio w stację [109]. Na rysunku 53 przedstawiono poglądowy model napięciowo-prądowy, narażenia indukowanego w stacji. Miejsce dopływu prądu oraz napięcia jest wybrane jak w przypadku pracy [54] i stanowi środek stacji. Istotnym z punktu widzenia autora jest założenie, że zamodelowanie indukowanych napięć w stacji czy linii w programie EMTP – RV wymaga wykonania nietypowego zabiegu polegającego na „wstrzyknięciu” napięcia w zamodelowany obiekt. Nie jest to tym samym co uderzenie pioruna, w którym używa się tylko modelu prądowego. Autor założył, że uderzenie pioruna w otoczenie stacji nastąpiło od strony fazy A, która była najbardziej narażona. Rozpatrywany jest przypadek uderzenia pioruna w otoczenie stacji w odległości 50 m od fazy A,  $I_{max} = 250$  kA obliczone napięcie indukowane, które powinno pojawić to :  $V_s = 1,43$  MV. Obserwowane rozptyły napięć oraz prądów przedstawiono w tabelach 31,32 oraz 33.

Tabele 31 Napięcia na izolacji słupa w sytuacji uderzenia pioruna w otoczenie stacji

Stan odłączników przed transformatorem		
		<i>zamknięte</i>
Faza A	$U_x$ [kV]	1152,7
	$T_1$ [ $\mu$ s]	8,3
Faza B	$U_x$ [kV]	-6,2
	$T_1$ [ $\mu$ s]	---
Faza C	$U_x$ [kV]	105,3
	$T_1$ [ $\mu$ s]	---



[EMT1] Circuit1m - Fri Mar 02 10:58:05 CET 2012 - C:\Documents and Settings\macat\Pulpit\Doktorat\temp\Circuit1\_pj

Rys. 93. Napięcia na izolacji słupa dla każdej z faz. Kolor czerwony faza A, kolor niebieski faza B oraz kolor zielony faza C.

Na rysunku 93 przedstawione są zmierzone wartości napięć dla faz B oraz C oraz czasów czoła trwania udarów na izolacji słupa nie niosą praktycznie żadnego zagrożenia. Na uwagę zasługuje fakt, że „wstrzyknięcie” przepięcia nastąpiło w fazę A, natomiast napięcia na fazach sąsiednich są o praktycznie pomijalne .

Tabela 32 Napięcia na wchodzące do stacji za ogranicznikami od strony wejścia stacji

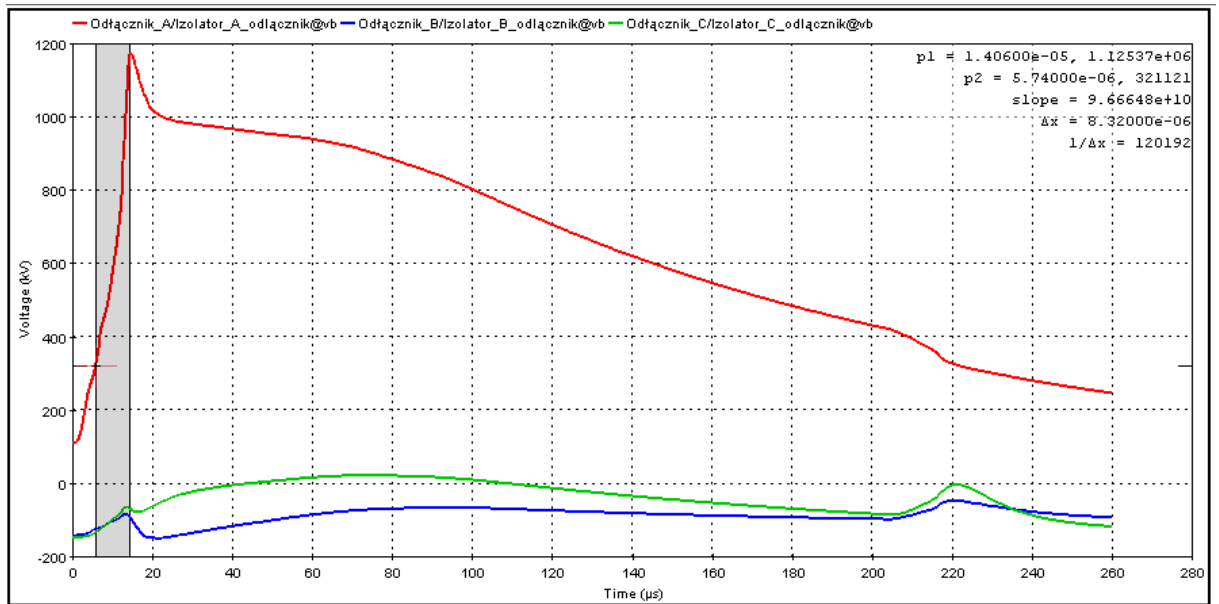
Stan odłączników przed transformatorem	
<i>zamknięte</i>	

Faza A	$U_x$ [kV]	1110,7
	$T_1$ [ $\mu$ s]	9,2

Tabela 33 Napięcia na izolacji odłączników

Stan odłączników przed transformatorem	
<i>zamknięte</i>	

Faza A	$U_x$ [kV]	1173,5
	$T_1$ [ $\mu$ s]	8,3



[EMT1] Circuit1m - Fri Mar 02 10:58:05 CET 2012 - C:\Documents and Settings\mcaacat\Pulpit\Doktorat\temp\Circuit1\_pj

Rys. 94. Napięcia na izolacji słupa dla każdej z faz. Kolor czerwony faza A, kolor niebieski faza B oraz kolor zielony faza C.

Maksymalne wartości jakie autor uzyskał to  $U_x = 1173,5$  kV przy czasie czoła  $T_1 = 8,3$  μs, co w przypadku rzeczywistych obiektów przy tym czasie czoła może stanowić realne zagrożenie wytrzymałości izolacji, jednak analiza literaturowa [3,17] dowodzi, że w większości przypadków, mierzone wartości przepięć w stacjach i liniach są nie wielkie, natomiast wartości czasów trwania czoła  $T_1$  są rzędu 8 μs [17].

## 10. Podsumowanie badań symulacyjnych

Przeprowadzone badania nad rzeczywistymi obiektami badań wysokich napięć linii i stacji 110 – 420 kV oraz badania symulacyjne, pozwalają na stwierdzenie, że występujące przebiegi o charakterze czasu trwania czoła zdecydowanie różnym niż standardowy znormalizowany  $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$  mają istotny wpływ na jej wytrzymałość. W sytuacji symulacji programem EMTP – RV zasymulowany fragment stacji 420 kV [6], której odległości między słupem, a obserwowanym odłącznikiem wynosiła 200 m, posiadał zaimplementowaną izolację przez model *Air gap*. W związku z tym, że model ten nie posiada możliwości zmiany wartości wytrzymałości w trakcie trwania symulacji, należy dokonać dodatkowej analizy umożliwiającej określenie czy i kiedy wystąpi przeskok na obserwowanej stacji.

Poniższe zestawienie wyników pomiarów autor uważa za istotne z punktu widzenia oceny zapasu wytrzymałości badanej izolacji w stosunku do jej rzeczywistej wytrzymałości  $U_{zn}$ .

Porównania dotyczą stacji 400 kV o poziomie izolacji  $U_n = 1425 \text{ kV}$

### W przypadku uderzenia pioruna w przewody odgromowe linii

- Piorun  $I_{\text{max}} = 100,0 \text{ (a) kA}$  zmierzona wartość przebiegu na odłączniku  $U_x = 1208,4 \text{ kV}$ , przy czasie czoła  $T_1 = 2,4 \mu\text{s}$ . Obniżenie wytrzymałości przy tym czasie czoła wynosi 11 %. Zapas wytrzymałości w stosunku do przyjmowanej wytrzymałości wynosi 4,2 %
- Piorun  $I_{\text{max}} = 100,0 \text{ (b) kA}$  zmierzona wartość przebiegu na odłączniku  $U_x = 1181,0 \text{ kV}$ , przy czasie czoła  $T_1 = 2,2 \mu\text{s}$ . Obniżenie wytrzymałości przy tym czasie czoła wynosi 10 %. Zapas wytrzymałości w stosunku do przyjmowanej wytrzymałości wynosi 7,1 %.
- Piorun  $I_{\text{max}} = 50,0 \text{ kA}$  zmierzona wartość przebiegu na słupie przed stacją  $U_x = 1104,3 \text{ kV}$ , przy czasie czoła  $T_1 = 5,2 \mu\text{s}$ . Obniżenie wytrzymałości przy tym czasie czoła wynosi 13 %. Zapas wytrzymałości w stosunku do przyjmowanej wytrzymałości wynosi 9,5 %

#### W przypadku uderzenia pioruna bezpośrednio w przewody robocze linii

- Piorun  $I_{\max} = 30,0$  kA zmierzona wartość przepięcia na słupie przed stacją  $U_x = 1252,8$  kV, przy czasie czoła  $T_1 = 3,2$   $\mu$ s. Obniżenie wytrzymałości przy tym czasie czoła wynosi 9,5 %. Zapas wytrzymałości w stosunku do przyjmowanej wytrzymałości wynosi 2,5 %
- Piorun  $I_{\max} = 20,0$  kA zmierzona wartość przepięcia na odłączniku  $U_x = 1325,7$  kV, przy czasie czoła  $T_1 = 4,1$   $\mu$ s. Obniżenie wytrzymałości przy tym czasie czoła wynosi 13,5 %. Zapas wytrzymałości w stosunku do przyjmowanej wytrzymałości wynosi – 6,5 %

#### W przypadku uderzenia pioruna w otoczenie stacji

- Piorun  $I_{\max} = 250,0$  kA zmierzona wartość przepięcia na słupie przed stacją  $U_x = 1152,7$  kV, przy czasie czoła  $T_1 = 8,3$   $\mu$ s. Obniżenie wytrzymałości przy tym czasie czoła wynosi 17,5 %. Zapas wytrzymałości w stosunku do przyjmowanej wytrzymałości wynosi 1,6 %

## 11. Przewidywane zastosowanie uzyskanych wyników badań w ochronie układów izolacyjnych

W prezentowanej pracy była prowadzona ocena rzeczywistej wytrzymałości układów izolacyjnych linii i stacji 110 – 400 kV, poprzez badania laboratoryjne odłączników, wyłączników, oraz układów izolacyjnych linii wysokich napięć od 110 kV do 500 kV. Badania przeprowadzono na urządzeniach, które znajdują wykorzystanie w polskiej oraz europejskiej energetyce stosowanej. Szczegółowe dane obiektów zawarte są w rozdziale 7 niniejszej pracy.

Uzyskane wyniki badań symulacyjnych w programie EMTP – RV umożliwiają natomiast rozszerzenie uzyskanych wyników badań urządzeń, na układy stacyjne, które z powodu rozległości, trudno było by zbadać w laboratorium.

Analizując ocenę aktualnie stosowanej ochrony odgromowej poprzez dane literaturowe oraz poprzez dane techniczne istniejących stacji oraz linii wysokich napięć, autor wyraża przypuszczenie o możliwym zagrożeniu wytrzymałości izolacji. Wniosek ten ma poparcie w fakcie, że na wytrzymałość układów izolacyjnych składa się wiele czynników. Są to: obniżenie wytrzymałości przy zastosowaniu przepięcia, którego czas trwania czoła  $T_1$  różni się od znormalizowanego  $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ , co powoduje obniżenie wytrzymałości badanej izolacji, oraz wzrost narażenia wynikający z indukcyjności połączeń [96], które w swojej istocie powodują powstanie oscylacji na czole udaru. Zjawisko to jest dodatkowym zwiększeniem narażenia o wartości napięć mogące w sposób znaczący decydować o wytrzymałości izolacji. Dlatego też autor uważa za bardzo istotne, w przypadku obserwacji kształtu przepięcia wchodzącego do stacji lub też wędrującego po stacji, odpowiednie zaimplementowanie poszczególnych elementów stacji, ponieważ pomiędzy nimi, jak wykazuje literatura techniczna [6], występuje znaczna odległość. Obserwowane zagrożenie ma szczególną wagę w rozległych stacjach o napięciu 400 kV, z szynami obejmującymi, których odległości mogą dochodzić nawet do 200 m i więcej. Ma to istotne znaczenie w przypadku obserwacji wytrzymałości z punktu widzenia przepięcia. Literatura [35,36,37] podaje, że średnio na 1 metrze przewodu, pomijając ulot, istnieje indukcja około  $1 \mu\text{H}$ .

Spadek napięcia na indukcyjności w krytycznej sytuacji, gdy odległość między wejściem przepięcia do stacji a zagrożonym obiektem, np.: odłącznikiem, wynosi około 150 m, to wzrost przepięcia wynikający z przepływu prądu pioruna może



osiągnąć wartość nawet do 100 kV i więcej. Jeżeli tę wartość uwzględnimy w analizie obniżonej wytrzymałości izolacji, wynikającej z niestandardowych narażeń piorunowych, innych niż 1,2/50  $\mu$ s, może nastąpić przeskok na izolacji, co może skutkować bardzo niebezpiecznymi konsekwencjami. Autor wyraża przekonanie, że wytrzymałość izolacji linii oraz stacji 110 – 400 kV można analizować z punktu widzenia wielu zagrożeń jednocześnie.

Jak wykazują badania laboratoryjne nad rzeczywistymi układami izolacyjnymi, wytrzymałość izolacji może ulec zmniejszeniu nawet do 20 % znamionowej wartości wytrzymywanej [38,39], przy założeniu że udar znacznie różni się od znormalizowanego.

W europejskiej normie [1] przedstawiono podstawowe parametry narażenia napięciowego, któremu powinno się poddawać badane obiekty. Jest to udar piorunowy o kształcie czasu trwania czoła  $T_1 = 1,2 \mu$ s oraz czasie trwania do półszczytu  $T_2 = 50 \mu$ s. Przedstawiony kształt napięciowy został ustanowiony w celu ujednoczenia wyników badań w laboratoriach oraz w celu umożliwienia porównania wyników między różnymi laboratoriami. Przyjęta tolerancja 30% czasu trwania czoła  $T_1$ , nie ujmuje właściwego odzwierciedlenia rzeczywistego udaru piorunowego, który jak wskazuje analiza literatury znaczenie różni się od opisywanego w normie [1].

Dokładna analiza pomiarowa obserwowanej wytrzymałości z jednoczesną pogłębioną analizą niepewności pomiarów, wraz z obszernymi symulacjami komputerowymi programem EMTP – RV, pozwala na właściwą ocenę zagrożeń płynących z rzeczywistego narażenia piorunowego. Celem pracy również jest poszerzenie wiedzy z zakresu aktualnie stosowanej, ochrony odgromowej stacji, poprzez ewentualne zastosowanie dodatkowych ograniczników w miejscach szczególnie narażonych na obniżenie wytrzymałości.

## 12. Wnioski końcowe

Przeprowadzone badania eksperymentalne, przedstawione w niniejszej pracy, dowodzą znacznego obniżenia wytrzymałości izolacji linii i stacji 110 – 400 kV. Badania te stanowią uzupełnienie wiedzy literaturowej oraz dokumentują, iż znaczne obniżenia rzeczywistej izolacji urządzeń stacyjnych oraz układów izolacyjnych linii mogą stanowić znaczne zagrożenie w sytuacjach:

- wyładowania piorunowego w słup wysokiego napięcia oraz wystąpienia przeskoku odwrotnego,
- wyładowania piorunowego w przewody robocze linii wysokiego napięcia,
- wyładowania piorunowego bezpośrednio w urządzenia stacji 110 – 400 kV.

W omawianych sytuacjach występujące narażenia przepięciowe, maksymalnych wartości napięć, charakteryzują się znacznie zróżnicowanymi wartościami czasów czoła  $T_1$ , które mieszczą się w granicach od 2  $\mu$ s do 12  $\mu$ s. Efektem tego zjawiska jest znaczne, bo sięgające nawet 26%, obniżenie znamionowej wytrzymałości izolacji. Obecnie stosowana koordynacja, definiująca różnicę napięć między napięciem na ograniczniku a rzeczywistą wartością wytrzymywaną, izolacji jest niewystarczająca, ponieważ standardowe badania układów lub urządzeń wysokonapięciowych dokonuje się przy udarze znormalizowanym, którego czas czoła wynosi  $T_1 = 1,2 \mu$ s. Schematyczne różnice wartości wytrzymywanych dla poszczególnych grup napięciowych przedstawia poniższe zestawienie.

1. Występuje znaczne obniżenie wytrzymałości badanej rzeczywistej izolacji w stosunku do wartości wytrzymywanej przy czasie czoła udaru  $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ .

Wartości obniżeń notowane przez autora sięgają:

- Dla napięć 110 – 220 kV
  - i. Odłącznik 145 kV – obniżenie 15%
  - ii. Kolumna wsporcza 220 kV – obniżenie 16%
  - iii. Odłącznik 220 kV – obniżenie 26%
  - iv. Łącuch przelotowy 220 kV – obniżenie 13%
  
- Dla napięć 400 kV
  - i. Odłącznik 400 kV – obniżenie 22%
  - ii. Pojedynczy łańcuch przelotowy 400 kV – obniżenie 14%
  - iii. Podwójny łańcuch przelotowy 400 kV – obniżenie 8%
  
- Dla napięć niestandardowych
  - i. Kolumna wsporcza o poziomie 1300 kV – obniżenie 20%
  - ii. Kolumna wsporcza 550 kV – obniżenie 24%
  - iii. Odłącznik 550 kV – obniżenie 5%

Ze względu na istniejącą tendencję obniżania poziomów izolacji urządzeń w elektroenergetyce obniżenie wytrzymałości elektrycznej odgrywa istotną rolę szczególnie przy występowaniu rzeczywistych udarów, znacznie odbiegających od znormalizowanych. Mając na celu stwierdzenie teoretycznej możliwości rozplywu przepięć w liniach oraz stacjach 110 – 400 kV, dokonywano obszernych symulacji programem EMTP – RV. Obserwacje te miały na celu pomiary czasów czoła maksymalnych wartości napięciowych przepięć w zamodelowanym fragmencie stacji [6]. Wyniki symulacji pozwalają jednoznacznie stwierdzić że :

2. Wartości czasów trwania czoła przepięcia napięciowego rejestrowanego w stacji.
  - a. Na ostatnim odłączniku tuż przed transformatorem mieszczą się między  $T_1 = 1,0 \mu\text{s}$  do  $T_1 = 4,0 \mu\text{s}$ ,
  - b. Na izolacji ostatniego słupa linii przed stacją notuje się wartości  $T_1 = 9,9 \mu\text{s}$ .

Wynikająca z tego faktu rzeczywista wartość wytrzymałości pozwala na stwierdzenie, że obliczone wartości zapasu koordynacyjnego mieszczą się na poziomach:

W przypadku uderzenia pioruna w przewody odgromowe linii

- Piorun  $I_{\text{max}} = 100,0$  (a) kA zmierzona wartość przepięcia na odłączniku  $U_x = 1208,4$  kV, przy czasie czoła  $T_1 = 2,4 \mu\text{s}$ . Obniżenie wytrzymałości przy tym czasie czoła wynosi 11 %. Zapas wytrzymałości w stosunku do przyjmowanej wytrzymałości wynosi 4,2 %
- 
- Piorun  $I_{\text{max}} = 100,0$  (b) kA zmierzona wartość przepięcia na odłączniku  $U_x = 1181,0$  kV, przy czasie czoła  $T_1 = 2,2 \mu\text{s}$ . Obniżenie wytrzymałości przy tym czasie czoła wynosi 10 %. Zapas wytrzymałości w stosunku do przyjmowanej wytrzymałości wynosi 7,1 %.
- Piorun  $I_{\text{max}} = 50,0$  kA zmierzona wartość przepięcia na słupie przed stacją  $U_x = 1104,3$  kV, przy czasie czoła  $T_1 = 5,2 \mu\text{s}$ . Obniżenie wytrzymałości przy tym czasie czoła wynosi 13 %. Zapas wytrzymałości w stosunku do przyjmowanej wytrzymałości wynosi 9,5 %

#### W przypadku uderzenia pioruna bezpośrednio w przewody robocze linii

- Piorun  $I_{\max} = 30,0$  kA zmierzona wartość przepięcia na słupie przed stacją  $U_x = 1252,8$  kV, przy czasie czoła  $T_1 = 3,2$   $\mu$ s. Obniżenie wytrzymałości przy tym czasie czoła wynosi 9,5 %. Zapas wytrzymałości w stosunku do przyjmowanej wytrzymałości wynosi 2,5 %
- Piorun  $I_{\max} = 20,0$  kA zmierzona wartość przepięcia na odłączniku  $U_x = 1325,7$  kV, przy czasie czoła  $T_1 = 4,1$   $\mu$ s. Obniżenie wytrzymałości przy tym czasie czoła wynosi 13,5 %. Zapas wytrzymałości w stosunku do przyjmowanej wytrzymałości wynosi – 6,5 %

#### W przypadku uderzenia pioruna w otoczenie stacji

Piorun  $I_{\max} = 250,0$  kA zmierzona wartość przepięcia na słupie przed stacją  $U_x = 1152,7$  kV, przy czasie czoła  $T_1 = 8,3$   $\mu$ s. Obniżenie wytrzymałości przy tym czasie czoła wynosi 17,5 %. Zapas wytrzymałości w stosunku do przyjmowanej wytrzymałości wynosi 1,6 %

Otrzymane wartości napięć drogą symulacji programem EMTP – RV wskazują na możliwe wystąpienie tych przepięć w rzeczywistej stacji wysokich napięć. Obliczone wartości zapasu wytrzymałości w stosunku do przyjmowanej wartości 1425 kV są znacząco niskie i są rzędu pojedynczych procentów, należy zaznaczyć, że w przypadku uderzenia pioruna bezpośrednio w przewód roboczy linii na obserwowanym odłączniku stacji powinien nastąpić przeskok, ponieważ obliczony zapas wytrzymałości jest na poziomie – 6,5%.

Omawiane wnioski końcowe stanowią uzasadnienie tezy niniejszej rozprawy:

**Właściwa ocena współczesnych rozwiązań ochrony odgromowej stacji 110 – 400 kV wymaga uwzględnienia przebiegów czasowych rzeczywistych narażeń piorunowych występujących w tych stacjach oraz zmian wytrzymałości układów izolacyjnych stosowanych w nich urządzeń, poddanych niestandardowym udarom napięciowym.**

### 13. Wykaz symboli użytych w pracy

$I_{max}$	Maksymalna skuteczna wartość prądu pioruna
$T_1$	Czas trwania czoła udaru piorunowego
$T_2$	Czas trwania do pół szczytu udaru piorunowego
$U_{50\%}$	Napięcie pięćdziesiąt procentowe uwzględniające poprawkę atmosferyczną K
$U_{50}$	Napięcie pięćdziesiąt procentowe nie uwzględniające poprawki atmosferycznej K
$U_w$	Obliczone napięcie wytrzymywane
$U_0$	najmniejsza wartość napięcia branych pod uwagę zdarzeń
$\Delta U$	Krok napięciowy między poziomami wyzwalań generatora
$\Delta U_B$	Błąd systematyczny dzielnika Haefely
$U_{zno}$	Napięcie obniżone ogranicznika
$U$	Napięcie znamionowe urządzenia
$U_n$	Napięcie przyjmowane zgodnie z normą [1]
$U_i$	Spadek napięcia na indukcyjności
$U_z$	Wartość zapasu napięcia wytrzymywanego określana w stosunku do wartości normatywnej.
$U_{zn}$	Wartość zapasu napięcia wytrzymywanego określona w stosunku do wartości rzeczywistej
$U_x$	Wartość napięcia zmierzona w programie EMTP –RV
$V_s$	Wartość napięcia indukowanego w sytuacji uderzenia pioruna w otoczenie stacji / linii
$S$	Odchylenie standardowe wg. Dixona i Mooda [40]
$A,B,N$	Ilość przeskoków/braku przeskoków na danym poziomie, wzór /1/
$K$	Poprawka atmosferyczna
$t_s$	Temperatura termometru suchego
$t_m$	Temperatura termometru mokrego
$\phi$	Wilgotność względna
$w$	Wilgotność bezwzględna
$b$	Ciśnienie
$\sigma$	Sigma z przeprowadzonej próby określona normatywnie w [1]
$\sigma_U$	Odchylenie standardowe napięcia przyjęte przez Dixona i Mooda [40]

$\sigma_S$	Odchylenie standardowe napięcia przyjęte przez Dixona i Mooda [40]
$u$	Niepewność standardowa podstawowa
$u_2$	Niepewność standardowa rozszerzona
$u_s$	Niepewność standardowa systematyczna
$u_r$	Niepewność standardowa losowa
$u_{2-}$	Niepewność standardowa rozszerzona, wartość lewostronna przedziału
$u_{2+}$	Niepewność standardowa rozszerzona, wartość prawostronna przedziału
$S_{index}$	Niepewność standardowa
$C_i$	Współczynnik wrażliwości
$\sigma_n$	Udział w niepewności całkowitej

## 14. Literatura

- [1] PN – EN 60060 – 1 : styczeń 2011, „Wysokonapięciowa technika probiercza – Część 1. Ogólne definicje i wymagania probiercze”.
- [2] Lloyd W.L., Clem J.E., Montsinger M., “Coordination of Insulation”, Winter Convention of the A.I.E.E. NYC, January p. 23-27 1933.
- [3] Barker P., Short T., Eybert-Berart A., Berlandis J.P., “Induced voltage measurements on an experimental distribution line during rocket triggered lightning flashes”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, p. 980-995, April 1996.
- [4] Caldwell R.O., Darvenizm M., “Experimental and analytical studies of the effect of non-standard waterscapes on the impulse strength of external insulation”, presentation at IEEE PES Winter Meeting in NYC, Vol. PAS-92 Issue 4, p. 1420-1428, January 1973.
- [5] Udo T., “Contents of large flashes among all the Lightnings measured on transmission lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, p. 1432-1436, October 1998.
- [6] Energoprojekt, “Typowe rozdzielnie napowietrzne 400 kV”, projekt wstępny obiekt T-25/71/a, 1973.
- [7] Xiaolan Li., Jiahong C., Shanqiang G., Xuefang T., „Statistics and analysis of lightning flashovers of transmission lines during 2000 – 2007”, International Conference on HV Engineering , China, p. 53-55, November 9-13, 2008.
- [8] Milewski M., Hussein A.M., “Lightning return-stroke transmission line model based on CN tower lightning data and derivative of hailed function”, CCECE / CCGE, May 5-7 Niagara Falls 2008 p. 001861 - 001866, 2008.
- [9] Hussein A.M., Janiszewski W., Milewski M., Shostak V., Rachidi F.,” Comparison of current characteristic of lightning strokes measured at the CN tower and at other elevated objects”, Vol. 2, IEEE Conferences, p. 495 - 500, 2003.
- [10] Berger K., Anderson R.B., “Parameters of lightning flashes”, Electra No.41 p. 23 – 37, 1975.
- [11] Bochkovskii B.B., Bogozihin B., Rosanov N.I., Timashova L.V., „Recording of lightning strike locations and determination of lightning current amplitudes”, Elektrichestwo, No. 8, 24 – 29, 1997.



- [12] Fuchs F., Ernest U., Schmid R., Wiesinger J., „Lightning current and magnetic field parameters caused by lightning strikes to tall structures relating to interference of electronic systems”, IEEE Transactions on Electromagnetic compatibility, Vol. 40, No.4, p. 444 – 451, November 1998.
- [13] Borghetti A., Nucci A. C., Paolone M., “Estimation of the statistical distributions of lightning current parameters at ground level from the data recorded by instrumented towers”, IEEE transactions on power delivery, Vol. 19, No. 3, Issue 3, p. 1400 – 1409, July 2004.
- [14] Anderson R.B., Eriksson A.J., ”Lightning parameters for engineering applications”, Electra vol. 69, p: 65 – 102, 1980.
- [15] Szpor S., “Comparison of polish versus American lightning records”, IEEE Transactions on power apparatus and systems, Vol. 88, No. 5, p. 646 – 652, May 1969.
- [16] Takami J., Okabe S., Zaima E., „Study of lightning surge overvoltage at substations due to direct lightning strokes to phase conductors”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25., No. 1, p. 425 – 433, January 2010.
- [17] Conti A., Perez E., Soto E., Silvera F., Vicarso S., Torres H., “Calculations of lightning – induced voltages on overhead distribution lines including insulation breakdown”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 4, p. 3078 – 3084, October 2010.
- [18] Eriksson A.J., Stringfellow M.F., “ Lightning – induced overvoltages on overhead distribution lines” IEEE Transactions on Power App. Vol. Pass-101, No. 4, p. 960-968, April 1982.
- [19] Miyazaki S., Ishii M., „Influence on independent towers and transmission lines on lightning return stroke current and associated fields”, IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility, Vol. 50., No. 2, p. 358 – 368, May 2008.
- [20] Takami J., Okabe S., Zaima E., „Lightning surge overvoltage at substations due to backflashover with assumed lightning current waveforms based on observations”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 4, Issue 4, p. 2958 – 2969, October 2010.
- [21] Shwehdi H.M., “Computation of lightning flashovers & backflashover voltage on 230 kV transmission lines”, IEEE International Conference on Power and Energy, p. 1488 – 1493, December 1-3, 2008.

- [22] Coelho C.J., Pinto D., “ Backflashover analysis of overhead transmission lines for different tower and lightning models”, Instituto Superior de Engenharia de Ciombra, Portugal, Power and Energy, International Conference, p. 985 – 988, 2010
- [23] Chowdhuri P., Li S., Yan P., „Rigorous analysis of backflashover outages by direct lightning strokes to overhead power lines”, IEEE JET Journals, Vol. 149, Issue 1, p. 58- 65, 2002.
- [24] Okabe S., Takami J., „Observational results of lightning current on transmission lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22., No. 1, p. 547-556, January 2007.
- [25] Okabe S., Takami J., „Evaluation of improved lightning stroke current waveform using advanced statistical method”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 4, p. 2197 – 2205, October 2009.
- [26] Mackiewicz M. M., „Narażenia przepięciowe stacji WN przy wyładowaniach piorunowych i przeskoku odwrotnym”, Przegląd Elektrotechniczny, 11b’, p. 94 – 96, 2010
- [27] Vujević S., Lović D., Balaz Z., “Numerical approximation of the lightning current function”, presented in IEC 62305-1, IEEE Conferences p. 19 - 23, 2009.
- [28] Grzybowski S., Rahal-Abou M., „Experimental studies of flashover voltage under lightning and step-front pulses on distribution line construction”, IEEE Session 8A3, p. 664 - 669, 1990.
- [29] Ancijama A., Carrus A., Cinieri E., Mazzetti C., “Optimal selection of disruptive effect models parameters for the reproduction of MV insulators volt-time characteristics under standard and non standard lightning impulses”, Power Tech, p. 760 – 765, July 1-5, 2007.
- [30] Standring W.G., Browing N.D., Huges R.C., and other, “Impulse flashover of air-gaps and insulators in the voltage range 1-2,5 MV”, PROC IEE, Vol. 110., No. 6, p. 1082 – 1088, June 1963.
- [31] Mackiewicz M. M., „Wytrzymałość układów izolacyjnych rozdzielni i linii 110 – 400 kV przy niestandardowych narażeniach przepięciowych”, Praca statutowa Instytutu Energetyki, EWN/10/Stat/10, 2010.
- [32] Mackiewicz M. M., „Modelowanie linii i stacji 110 – 400 kV w programie EMTP – RV oraz ocena statystyczna wyników badań nad wytrzymałością

- układów izolacyjnych przy niestandardowych przepięciach piorunowych”, praca statutowa Instytutu Energetyki, EWN/10/Stat/09, 2009
- [33] Task Force 15.09 on nonstandard lightning voltage waves Lightning and Insulator Committee of the T & D Committee, “ Bibliography of research on nonstandard lightning voltage waves”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, Issue 4, p. 1982 – 1990, October 1994.
- [34] Dudurych I.M., Gallagher T.J., Corbett J., “EMTP analysis of the lightning performance of HV transmission line”, IEE Proc-Gener. Transactions Distributions, Vol. 150, No. 4, Issue 4, p. 501 – 506, July 2003 .
- [35] Szpor S., Samula J., “Ochrona odgromowa”, Tom I, Wydawnictwo NT Warszawa 1983.
- [36] Szpor S., „Ochrona odgromowa”, Tom II, Wydawnictwo NT, Warszawa 1975.
- [37] Szpor S., „Ochrona odgromowa”, Tom III, Wydawnictwo NT, Warszawa 1978.
- [38] Mackiewicz M.M., „Wytrzymałość izolacji i stacji wysokiego napięcia przy niestandardowych napięciach piorunowych”, Prace statutowe Instytutu Energetyki, EWN/10/Stat/06, 2006.
- [39] Mackiewicz M.M., „Racjonalizacja ochrony odgromowej izolacji w krajowych sieciach wysokich napięć związana z występowaniem niestandardowych narażeń piorunowych”, Prace statutowe Instytutu Energetyki, EWN/10/Stat/07, 2007.
- [40] Kosztaluk R., „Technika badań wysokonapięciowych”, Tom I, WNT, Warszawa 1985.
- [41] Mackiewicz M.M., Badania udarami piorunowymi niestandardowymi wybranych układów izolacyjnych rozdzielni 110 – 400 kV oraz weryfikacja i analiza wyników”, Prace statutowe Instytutu Energetyki, EWN/10/Stat/08, 2008.
- [42] EA-04/16, „Wytyczne EA dotyczące wyrażania niepewności w badaniach ilościowych”, Grudzień 2003.
- [43] Janiczek R., „Metody oceny niepewności pomiarów”, PAN, 2008.
- [44] EA, Dokunemt EA-4/02, „ Wyrażanie niepewności pomiaru przy wzorcowaniu”, Grudzień 1999.

- [45] Fotowicz P., „Obliczanie niepewności rozrzerzonej metodą analityczną opartą na splocie rozkładów wielkości wejściowych”, *Pomiary Automatyka Robotyka* 1/2005.
- [46] Guide to the Expression of uncertainty in measurements. BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML., International Organization for standardization, Printed in Switzerland ISBN 92-67-10188-9.
- [47] Główny Urząd Miar, „Wyrażanie niepewności pomiarów – przewodnik”, Warszawa 1999.
- [48] Bedoui S., Bayardi A., Haddad A., “Analysis of lightning protection with transmission line arrester using ATP/EMTP: Case of HV 220 kV Double circuit line”, *IEEE Conferences, UPEC*, p. 1 – 6, 31<sup>st</sup> August – 3<sup>rd</sup> September 2010.
- [49] Pham T., Boggs S., „Flashover model of arcing horn in transient simulation“, *IEEE Conferences*, D.O.I. 10.1109/ELINSL.2010.5549756, p. 1 – 4, 2010.
- [50] Deng Y., Sood V.K., Lopes L., “Statcon model in emtp – rv using hysteretic current voltage source converter (VSC)”, *IEEE Conferences*, D.O.I. 0-7803-8886-0/05, p. 517 - 522, May 2005.
- [51] Mo F., Jiang J., Huang Y., Wang T., „Study the induced voltage caused by lightning flash to overhead power lines tower“, *IEEE Conferences*, D.O.I. 978-1-4244-3557-9-09, p. 2521 – 2526, 2009.
- [52] Motoyama H., Kinoshita Y., Nonaka K., Baba Y., „Experimental and analytical studies on lightning surge respond of 500 kV transmission tower”, *IEEE Transactions On Power Delivery* , Vol. 24, No. 4, p. 2488 – 2495, October 2009.
- [53] Martinez J., Aranda C., “Lightning performance analysis of overhead transmission lines using the EMTP”, *IEEE Transactions on power delivery*, Vol. 20, No. 3, Issue 3, p. 2200 – 2210, July 2005.
- [54] Paulino O., Barbosa C., Lopez S., Boaventura C., “ The peak value of lightning – induced voltages in overhead lines considering the ground resistivity and typical return stroke parameters”, *IEEE transactions on Power Delivery*, Vol. 26, No. 2, Issue 2, p. 920 – 927, April 2011.
- [55] Mackiewicz M. M., „ Modelowanie linii i stacji 110 – 400 kV w programie EMTP – RV w sytuacji różnych zagrożeń przepięciowych”, *Przegląd Elektrotechniczny*, 5’2010, p. 214-217, 2010.

- [56] Paolone M., Rachidi F., Borghetti A., Nucci A., Rubinstein M., Rakov V., Uman M., “Lightning electromagnetic field coupling to overhead lines: theory, numerical simulations, and experimental validation”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 51, No. 3, Issue 3, Part 1, p. 532 – 547, August 2009.
- [57] Mikulski J. L., Popczyk J., Żmuda K., Reliability coordination in overhead line design conditioned by probabilistic approach”, CIGRE, p. 22-01, 1988.
- [58] Inoue A., Kanao S., „Observation and analysis of multiple- phase grounding faults caused by lightning”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, Issue 1, p. 353 – 360, January 1996.
- [59] Martinez J.A., Aranda C., “Lightning Performance analysis of transmission lines using the EMTP”, Power Engineering Society General Meeting, Vol. 1 p. 295 – 300, 2003.
- [60] Coelho J.C., Moura M., “Study of the backflashover phenomena in overhead transmission lines using the EMTP”. Transmission & Distribution Conference and Expositions, p. 1 – 6, 2006.
- [61] Zheren Z., Qing Y., Lilbin Y., Wenxia S., Tao Y., „Lightning back-flash performance of 220 kV AC quadruple-circuit transmission lines on the same tower”, International Symposium on Electromagnetic compatibility, p. 1570 – 1573, April 12-15, 2010, China.
- [62] Mata C., Fernadnez I., Rakov V.A., Uman A.M., „EMTP Modeling of a triggered-lightning strike to the pashe conductor of an overhead distribution line”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15., No. 4, Issue 4, p. 1175 – 1181, October 2000.
- [63] Martinez J.A., Castro-Aranda F., “Modeling Overhead Transmission lines for line arrester studies”, Power Engineering Society Meeting, Vol.1, pp. 1125-1130, 2004.
- [64] Darveniza M., Roby D. and Tumma L.R., “Laboratory and analytical studies of the effects of multipulse lightning current on metal oxide arresters”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, p. 764 - 771, April 1994.
- [65] Zanetta L.C., “Evaluation of line surge arrester failure rate for multipulse lightning stress”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 3, p. 706-801, July 2003.

- [66] IEEE Working Group on Surge Arrester Modeling, "Modeling of metal oxide surge arresters", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 1, p. 302-309, January 1992.
- [67] Bayadi, A.; Harid, N.; Zehar, K., „Dynamic surge arrester protection performance on high voltage systems using EMTP”, Universities Power Engineering Conference, UPEC, Vol. 1 p. 118 - 122 , 2004.
- [68] Abdul-Malek, Z.; Haddad, A.; German, D.M.; Waters, R.T. ,”Insulation co-ordination of spark gaps and ZnO surge arresters”, High Voltage Engineering Symposium, Vol. 2 p. 397 – 400, 22-27 August 1999.
- [69] Mikropoulos P.N., Tsovilis T.E., “Lightning sttachment models and maximum shielding failure current of overhead transmission lines: implications in insulation coordination of substations”, IET Generation, Transmission & Distribution Vol. 4, Issue 12, p. 1299 - 1313, 2010.
- [70] IEEE Working Task Force, “Modeling guidelines for fast front transients”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, p. 493 - 506, 1996.
- [71] IEEE Working Group, “A simplified method for estimating lightning performance of transmission lies”, IEEE on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS –104, No. 4, p. 919 - 932, 1985.
- [72] Takami J., Okabe S., „Characteristics of direct lightning stokes to phase conductors of UHV transmission lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 1, Issue 1, p. 537 – 546, January 2007.
- [73] Gavris M.R., “ Iterative method for waveshape restoration of directly measured lightning flash currents” , IET Journals, Vol. 149, Issue 1, p. 66 - 70, 2002.
- [74] Mahseredjian J., Dennetiere S., Dube L., Khodabakhcgian B., Gerin-Lajoie L., „On a new approach for the simulation of transients in power systems”, Electric Power Systems Research, Vol. 77, p. 1514 - 1520, 2007.
- [75] Mikropulos P.N., Tsovilis E.T., Nikos G., Mavrikakis C., “Effects of simulation of overhead transmission line basic components on backflashover surges impinging on GIS substations”, Universities Power Engineering Conference, UPEC, p. 1 – 6, 2010.
- [76] Allibone T.E., Dring D., “Influence of the wavefront of impulse voltages on the sparkover of rod gaps and insulators”, IET Journals, Volume: 122, Issue 2, p. 235 – 238, 1975.

- [77] Suzuki T., Miyake K., „Experimental study of breakdown voltage-time characteristics of large air gaps with lightning impulses”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PAS – 96, No. 1, Issue 1, Part 1, p. 227 – 233, January 1977.
- [78] Chowdhuri P., Baker A.C., Carra G., Chisolm W.A., Feser K, Grzybowski S., Lux A., Newman F.R., “Review of research on nonstandard lightning voltage waves”, Lightning and Insulator Subcommittee of the T&D Committee, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, Issue 4, p. 1972 – 1981, October 1994.
- [79] Hagenguth H.J., “Volt-time areas of impulse spark-over”, IEEE Journals, Vol. 60, Issue 7, p. 803-810, 1941.
- [80] Jones A.R., “ Evaluation of the integration method for analysis of nonstandard surge voltages”, IEEE Journals, Vol. 73, Issue 2, p. 984 – 990, 1954.
- [81] Chowdhuri P., Mishra A.K., and McConnell B.W., “Volt-time characteristics of short air gaps under nonstandard lightning voltage waves”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, Issue 1, p. 67-68, January 1997.
- [82] Chowdhuri P., Mishra A.K., and McConnell B.W., Martin P.M, “The effects of nonstandard lightning voltage waveshapes on the impulse strength of short air gaps”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, Issue 4, p. 1991 – 1999, October 1994.
- [83] Darveniza M., Vlastos E.A., “The generalized Integration method for predicting impulse volt-time characteristics for non-standard wave shapes – a theoretical basic”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol., 23, No. 3, Issue 3, p. 373 – 381, June 1988.
- [84] Skuletic S., Savic M., Muratovic D., “Simplification of the lightning limiting parameters method by establishing the equivalent flashover voltage characteristics”, Universities Power Engineering Conference, UPEC, Vol. 1, p.175 - 178, 2004.
- [85] Miyazaki T., Okabe S., „A detailed field study of lightning stroke effects on distribution lines”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 24, No. 1, issue 1, p. 352 – 359, January 2009.

- [86] Grzybowski S., Jacob P.B., Ross R.E., “An estimation of lightning insulation level on overhead distribution lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 1, Issue 1, p. 384 – 390, January 1991.
- [87] Grzybowski S., Jacob B.P., “The step-front, short-duration pulse characteristics of distribution insulators with wood”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 5, No. 3, Issue 3, p. 1608 – 1616, July 1990.
- [88] Okabe S., Tsuibo T., Takami J., „Evaluation of K-factor based on insulation characteristics under non-standard lightning impulse waveforms”, IEEE Journals, Vol. 16, No. 4, p. 1124 - 1126, 2009.
- [89] Mackiewicz M.M., Mikulski J.L., “Wytrzymałość izolacji linii i stacji wysokiego napięcia przy niestandardowych napięciach probierczych udarowych”, Praca statutowa Instytutu Energetyki, EWN/10/Stat/05, 2005.
- [90] Mackiewicz M.M., “ Wpływ niestandardowych udarów napięciowych piorunowych na wytrzymałość izolacji linii i stacji wysokich napięć”, Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 1, p. 155 – 157, 2006
- [91] PN – EN 62271 – 1 : lipiec 2009, „ Wysokonapięciowa aparatura rozdzielcza i sterownicza – Część 1. Postanowienia wspólne”.
- [92] PN – EN 62305-1: maj 2011, „Ochrona odgromowa – Część 1 : Zasady ogólne”.
- [93] PN – EN 62305-3: maj 2011, „Ochrona odgromowa – Część 3: Uszkodzenia fizyczne obiektów i zagrożenie życia”.
- [94] Federal Aviation Administration, „Aircraft lightning protection, handbook I”, DOT/FAA/CT-89, September 1989.
- [95] Federal Aviation Administration, „Aircraft lightning protection, handbook II”, DOT/FAA/CT-89, September 1989.
- [96] Bolkowski S., “Teoria obwodów elektrycznych”, Wydawnictwo naukowo-techniczne, 2008.
- [97] Flisowski Z., „Technika wysokich napięć”, Wydawnictwo naukowo-techniczne, 2008.
- [98] Chwaleba A., Poniński M., Siedlecki A., ”Metrologia elektryczna” Wydawnictwo naukowo- techniczne, 1998.
- [99] Paulino O.S.J., Barbosa F.C., Lopes C.I.J.S., and Boaventura W.C., “An approximate formula for the peak value of lightning – induced voltages in



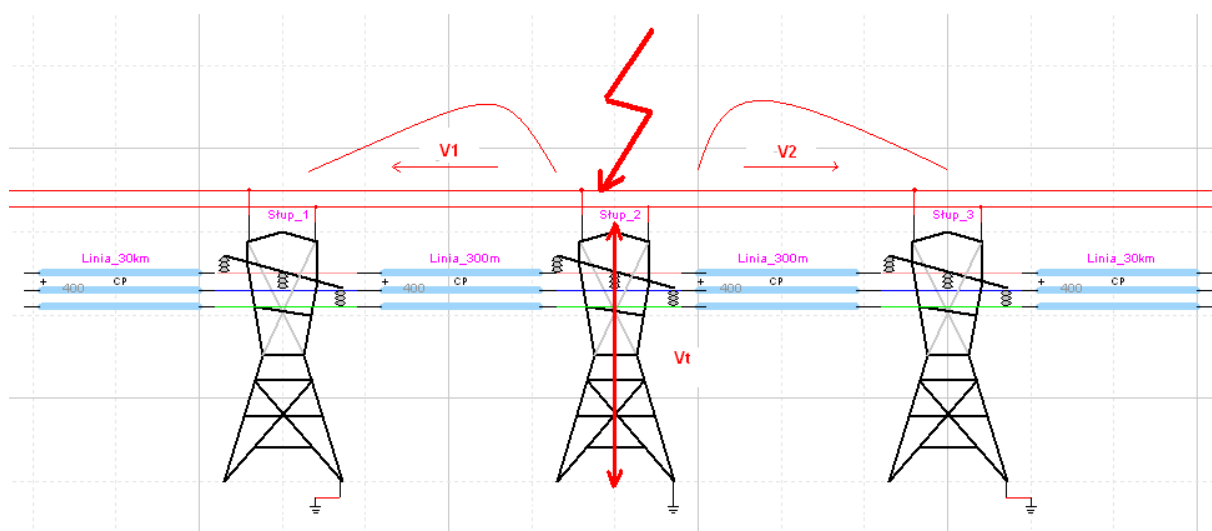
- overhead lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 2, p. 843-851, April 2010.
- [100] Flisowski Z., Kosztaluk R., Mikulski J. L., „Wytrzymałość elektryczna i odstępów powietrzne instalacji wysokich napięć”, Przegląd Elektrotechniczny, 10’2002.
- [101] Mikulski J. L., „Współczesne zastosowanie techniki wysokich napięć”, Ośrodek Informacji Naukowej i Technicznej, Instytut Energetyki, 2004 – Monografia.
- [102] Ancajima A., Baran I., Costeca M., Carrus A., Cinieri E., Dragan G., Mazzetti C., “Breakdown characteristics of MV distribution and electric traction lines insulators stressed by standard and short tail lightning impulses”, IEEE Power Tech 2005, p. 1 – 7, St Petersburg , 25 - 29, June 2005.
- [103] Ancajima A., Carrus A., Cinieri E., Mazzetti C., “Volt-time characteristics reproduction of MV line insulations under impulses similar to lightning induced overvoltages”, ICLP 2006 Kanazawa, Japan, 18 - 22, September 2006.
- [104] ABB, “Zinic oxide surge arrester”, Catalogue, Pub. SESWG/A 2240E Edition 1, 1991.
- [105] Okabe S., Tsuboi T., Takami J., „Analysis of Aspects of Lightning Strokes to Large-sized Transmission Lines”, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 18, Issue 1, p. 182-191, February 2011.
- [106] M. Rioual : “Short and long air gaps (insulator strings and spark gaps modeling for lightning studies with EMTP program (EPRI-DCG version 2.0)”, Research project, final report, March 1988.
- [107] A.Ametani., „A method of a Lightning Surge Analysis Recommended in Japan using EMTP”, October 24-26, University of Bologna – Faculty of Engineering, 2007.
- [108] J. Tarchini.,” Improving the lightning performance of transmission lines: modeling and statistical analysis”, PhD Thesis, tutor, Prof. C. A. Nucci, 2002
- [109] M. Paolone. – informacja prywatna, konsultacje na EPFL, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2012.
- [110] J. Fleszyński „laboratorium wysokonapięciowe w dydaktyce i elektroenergetyce”, Wydawnictwa PWR

## ZAŁĄCZNIK A

### ALTERNATYWNE MODELOWANIE

W przedstawianej pracy omawiane modele oraz sposoby symulacyjne oparte są na własnych rozwiązaniach oraz poparte przez badania porównawcze.

W przypadku modelu słupa wysokich napięć zostały zastosowane elementy o parametrach skupionych takich jak L oraz R. Podstawową ideą tego rozwiązania było odwzorowanie odległości (wysokości słupa) indukcyjnością. W literaturze [51,107] modele słupów wysokonapięciowych przedstawia się za pomocą rezystancji oraz impedancji falowej Z. Zastosowanie tego rodzaju elementów do konstrukcji modelu słupa wysokich napięć ma znaczenie w przypadku kiedy czas przebiegu przepięcia na drodze wzdłuż słupa jest mniejszy niż czas przebiegu przepięcia od słupa do krańca linii. Na rysunku 1/A przedstawiono model linii wysokonapięciowej przedstawiający ideę rozchodzenia się fali przepięciowej wraz z zaznaczeniem jej prędkości oraz drogi.



Rysunek 1/A. Model linii wysokich napięć wraz z zaznaczonymi prędkościami rozchodzenia się fali.

W przypadku przedstawianego modelu linii zastosowanie elementów skupionych w modelu słupa powoduje, że nie znamy przyjętej prędkości rozchodzenia się fali Vt na drodze słup – ziemia, co może powodować interferencję fal odbitych z krańców linii wraz i falami odbitymi od ziemi słupa.

Właściwa zależność prędkości propagacji fal powinna spełniać warunek:

$$V_t \ll V_1 \wedge V_2$$

Zastosowanie modeli impedancji  $Z$  w programie EMTP – RV takich jak CP oraz FD pozwala na wprowadzenie wartości prędkości rozchodzenia się fali w ośrodku  $V$ . Wartości  $V$  oraz  $Z$  oblicza się z następujących wzorów [108] :

$$V_x = \frac{S}{t_{\text{symulacji}}}$$

gdzie:

$V_x$  – prędkość rozchodzenia się fali w ośrodku

$S$  – droga przepięcia

$T_{\text{symulacji}}$  – całkowity czas przyjęty do symulacji modelu

Wartości impedancji określa się za pomocą wzoru:

$$Z_t = 60 \left[ \ln \left( \sqrt{2} \frac{2H_T}{r_T} \right) - 1 \right]$$

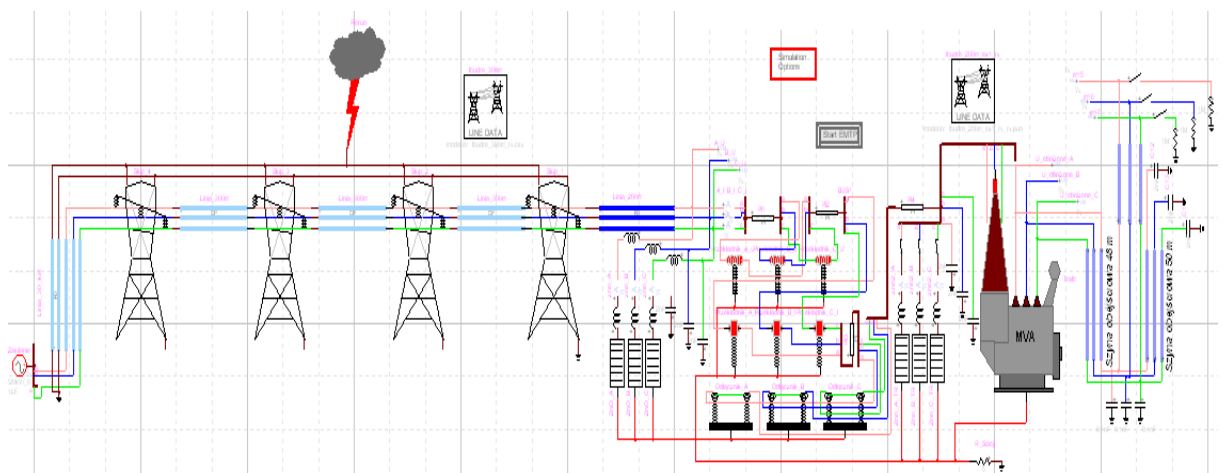
gdzie :

$H_T$  – wysokość słupa wysokich napięć w metrach

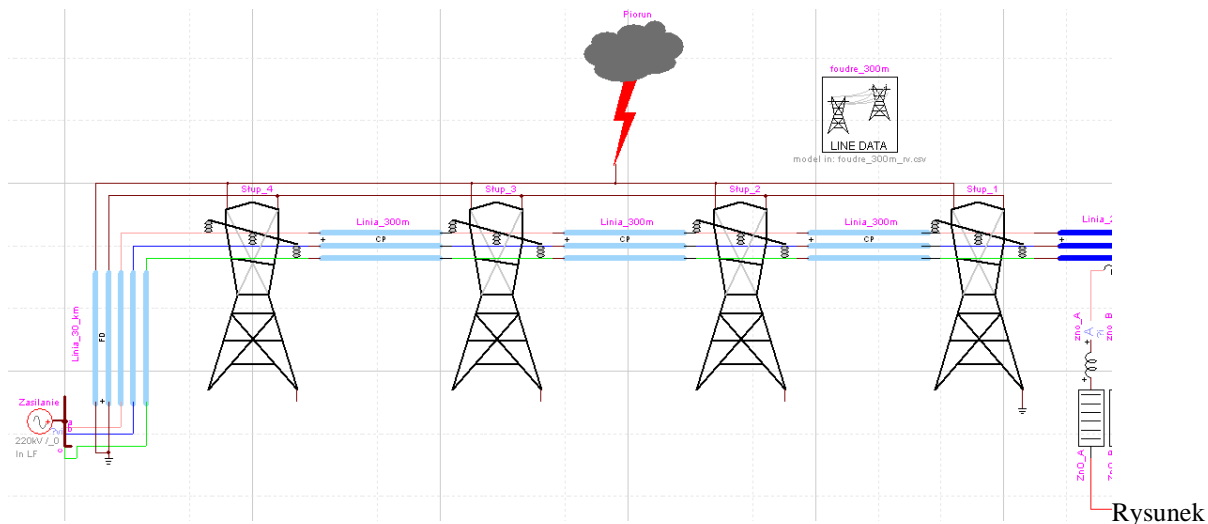
$R_T$  – wartość współczynnika przyjmowana według typu słupa

W omawianej pracy dokonano dodatkowe badania symulacyjne dla porównania wyników symulacji dla przykładu modelu słupa odwzorowanego zgodnie z przykładami literaturowymi [51,107,108] oraz przyjętymi w prezentowanej pracy.

Zgodnie z zaleceniami [109] model fragmentu stacji 400 kV rozbudowano o linię wysokiego napięcia, składającą się z czterech słupów [108]. Model przedstawia rysunek 2/A, model szczegółowy linii przedstawiony jest na rysunku 3/A.

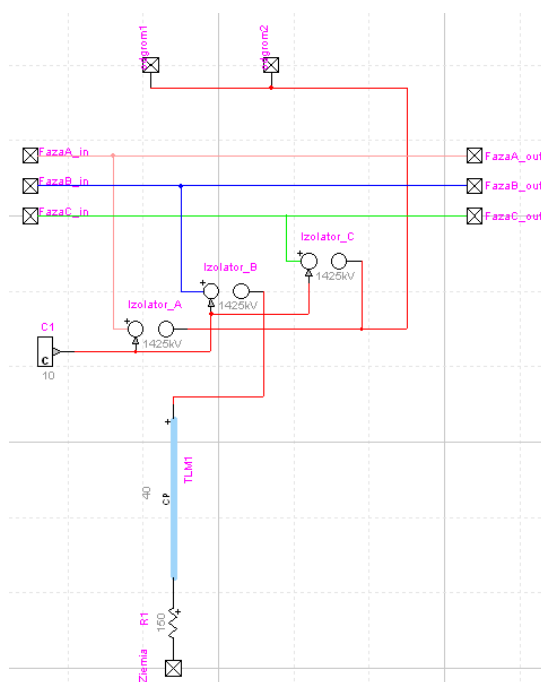


Rysunek 2/A. Model stacji wraz z rozbudowaną linią wejściową 400 kV



3/A. Szczegółowy model linii wejściowej 400 kV

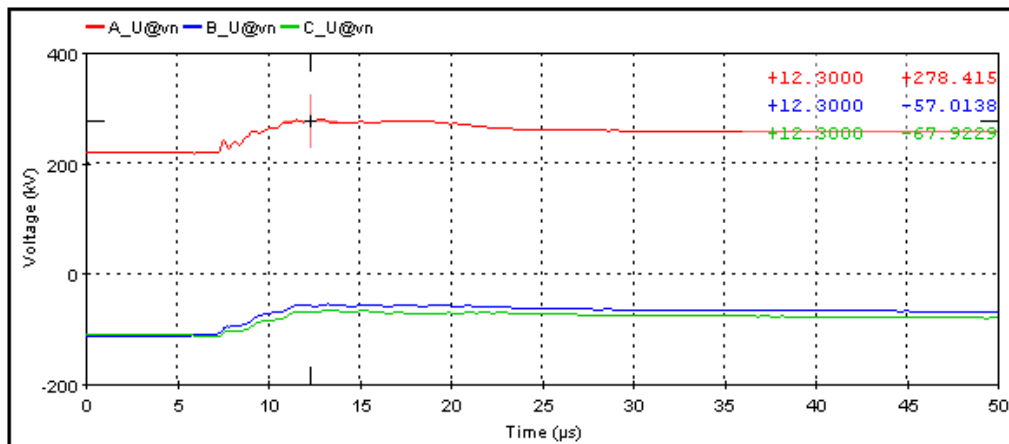
Przyjęte parametry do symulacji modelu słupa przedstawia rysunek 4/A. Obliczone parametry impedancji  $Z = 145 \Omega$ ,  $V_{\text{osrodka}} = 13,3 \cdot 10^6 \text{ m/s}$



Rysunek 4/A. Szczegółowy model słupa wysokich napięć.

Wyniki symulacji dla uderzenia pioruna w przewody odgromowe linii 400 kV dla parametrów pioruna przyjętych z pracy doktorskiej (strona 106, punkt. 9.4.1. Uderzenie pioruna w przewody odgromowe linii, w pierwszy słup przed stacją).

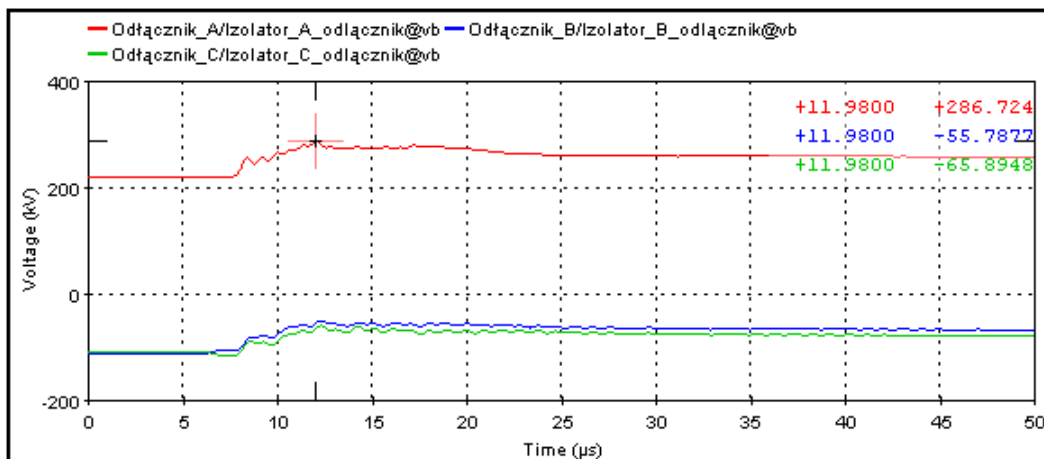
Napięcia wchodzące do stacji przedstawia rysunek 5/A. Maksymalna wartość przepięcia na fazie A, na której nastąpił przeskok odwrotny, wynosi  $U_{\text{max}} = 278 \text{ kV}$ , czas czoła udaru  $T_1 = 3,8 \mu\text{s}$ .



[EMT1] Circuit1m - Sat Jan 12 17:38:57 CET 2013 - C:\Documents and Settings\macalPulpi\B\Doktorat\temp\Circuit1\_pj

Rysunek 5/A napięcia wchodzące do stacji.

Napięcia zarejestrowane na odłącznikach przed transformatorem w stacji przedstawia rysunek 6/A. Maksymalna wartość przepięcia na fazie A, na której nastąpił przeskok odwrotny, wynosi  $U_{\max}=286,7$  kV, czas czoła udaru  $T_1 = 4,2$   $\mu$ s.



[EMT1] Circuit1m - Sat Jan 12 17:38:57 CET 2013 - C:\Documents and Settings\macalPulpi\B\Doktorat\temp\Circuit1\_pj




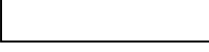







Rysunek 6/A. Zarejestrowane napięcia na odłącznikach fazy A,B oraz C przed transformatorem w stacji.

Wnioskiem autora przedstawianej rozprawy analizowanie modelu stacji wraz z fragmentem linii oraz uderzeniem pioruna w środek linii nie stwarza istotnego, z punktu widzenia koordynacji izolacji, zagrożenia przepięciowego. Dlatego też, w omawianej pracy, w szczególności nad oceną koordynacji izolacji, symuluje się najbardziej niekorzystną sytuację, w której występuje ostatni słup przed stacją wraz z imitacją całej linii w postaci jednego modelu CP.

## ZAŁĄCZNIK B

### ZAREJSTROWANE PRZEBIEGI UDARÓW NIESTANDARDOWYCH W LABORATORIUM WYSOKICH NAPIĘĆ

Szczegółowe dane techniczne dostępnych rezystancji dla układu generatora wysokich napięć Haefely 5MV.

GRANATOWY Z PASKIEM		14,5 Ω
CZERWONY		32 Ω
ZIELONY		65 Ω
BIAŁY		89 Ω
NIEBIESKI		150 Ω
SZARY		420 Ω
BRAZOWY		1250 Ω
FIOLETOWY		3000 Ω
GRANATOWY		4500 Ω
ŻÓŁTY		6000 Ω
CZARNY		20000Ω

W dokumentacji technicznej generatora zawarta jest informacja, że pełna sprawność jest zapewniona dla kształtu udaru 1,2/50 μs, otrzymywana moc maksymalna to 375 kJ.

Podstawowe dane techniczne generatora:

Napięcie znamionowe generatora udarów  $U = 5000 \text{ kV}$

Energia w stanie pełnego naładowania generatora  $W = 375 \text{ kJ}$

Liczba stopni generatora  $s = 25$

Dopuszczalna wartość napięcia ładowania jednego stopnia  $U_s = 200 \text{ kV}$

Energia w stanie pełnego naładowania jednego stopnia  $W_s = 15 \text{ kJ}$

Pojemność robocza stopnia generatora  $C_s = 0,75 \text{ μF}$

Kształty udarów jakie zapewnia producent:

1,2/50 μs

50/150 μs

250/2500  $\mu\text{s}$

500/2500  $\mu\text{s}$

1500/10000  $\mu\text{s}$

Rezystor ładujący stopnia

$R_1 = 28 \text{ k}\Omega$

Rezystor sterujący rozkład napięcia na stopnie

$R_{\text{pot}} = 2 \text{ M}\Omega$

Rezystor uziemienia generatora

$R_e = 4,45 \text{ k}\Omega$

Częstotliwość wytwarzania udarów

$k=1/\text{min}$

Średnia kul iskierników

$\varphi = 25 \text{ cm}$

Wysokość generatora

$H = 19,1 \text{ m}$

Podstawa generatora

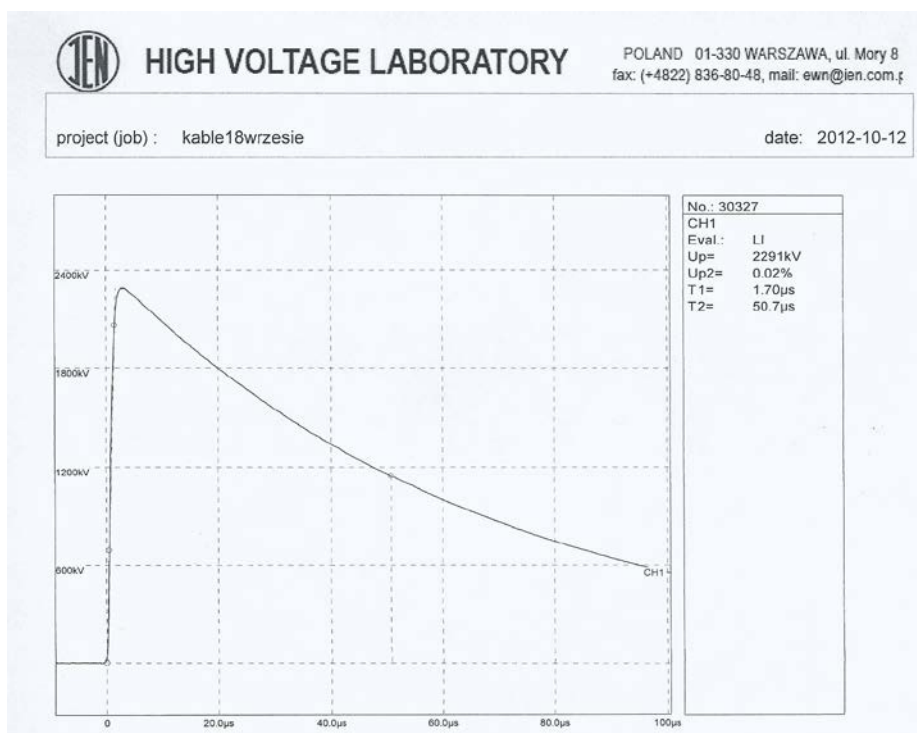
$A \times B = 6,2 \times 6,2 \text{ m}^2$

Całkowity ciężar

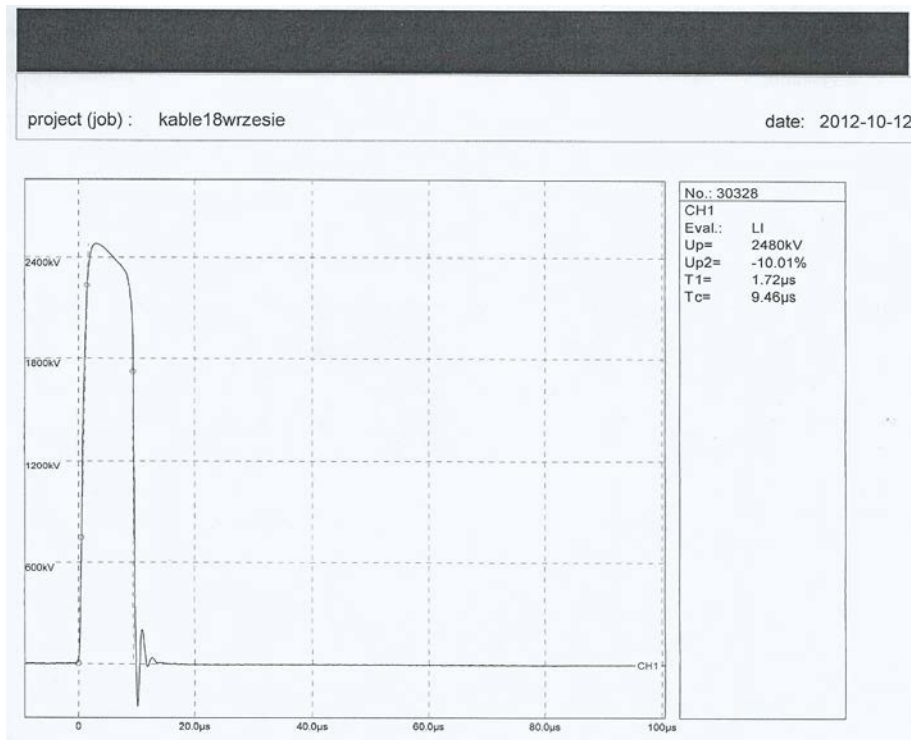
$G = 20 \text{ ton}$

Poniższe przykładowe udary zostały zarejestrowane za pomocą rejestratora stanów nieustalonych Dr Strauss w Laboratorium Zakładu Wysokich Napięć. Rozpiętość czasów trwania czoła od  $T_1 = 1,63 \mu\text{s}$  do  $T_1 = 7,53 \mu\text{s}$ .

**Udar pełny 1,7/50,7  $\mu\text{s}$   $U_{\text{max}}2,3 \text{ MV}$**



**Udar ucięty  $T_1 = 1,7\mu s$   $T_c = 9,5 \mu s$   $U_{max} 2,4 MV$**

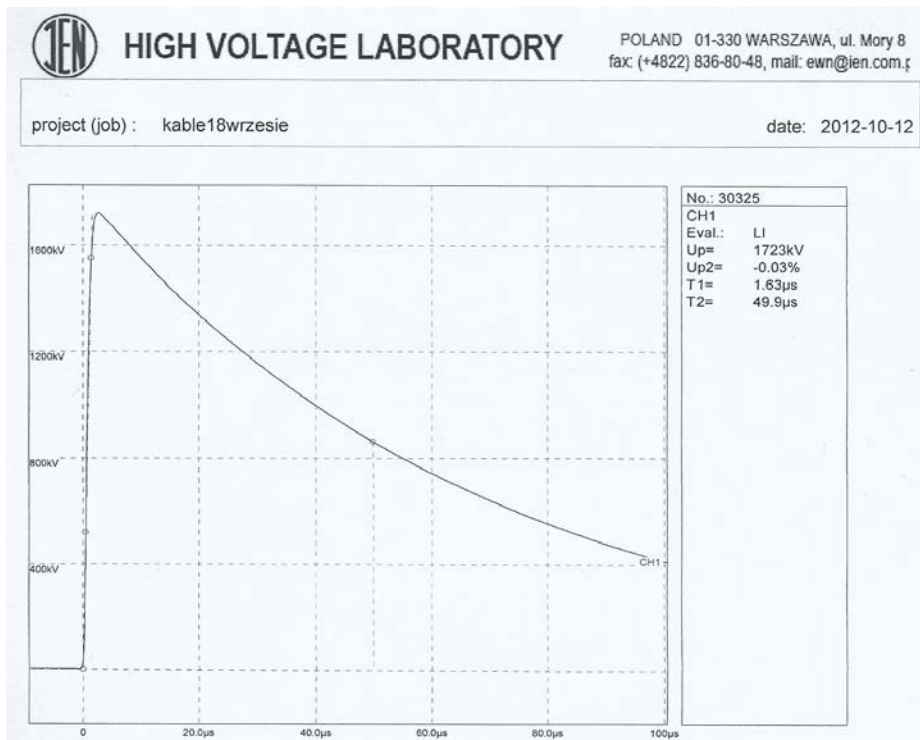


**Udar ucięty  $T_1 = 1,72\mu s$   $T_c = 9,5 \mu s$   $U_{max} 2,4 MV$**

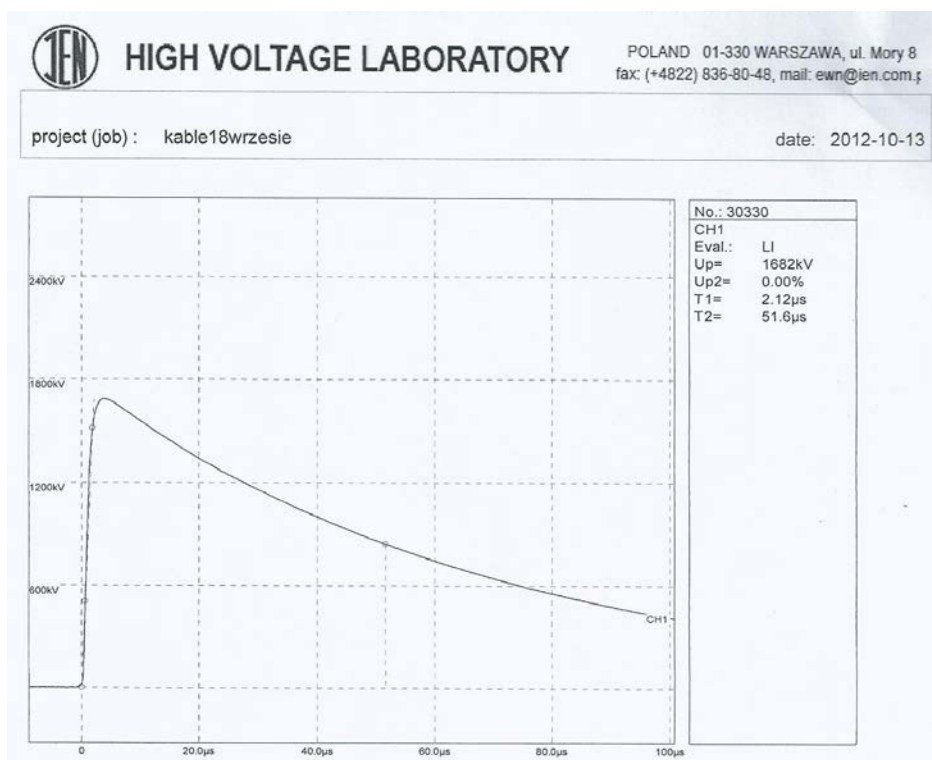




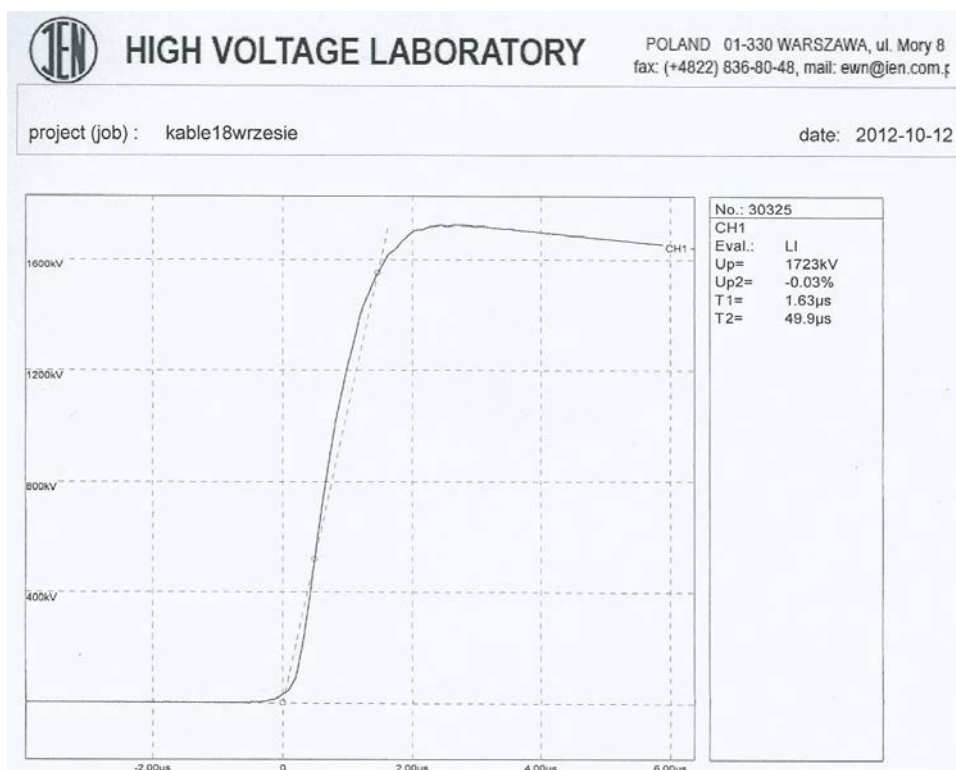
**Udar pełny 1,63/49,9  $\mu$ s  $U_{max} = 1,7$  MV**



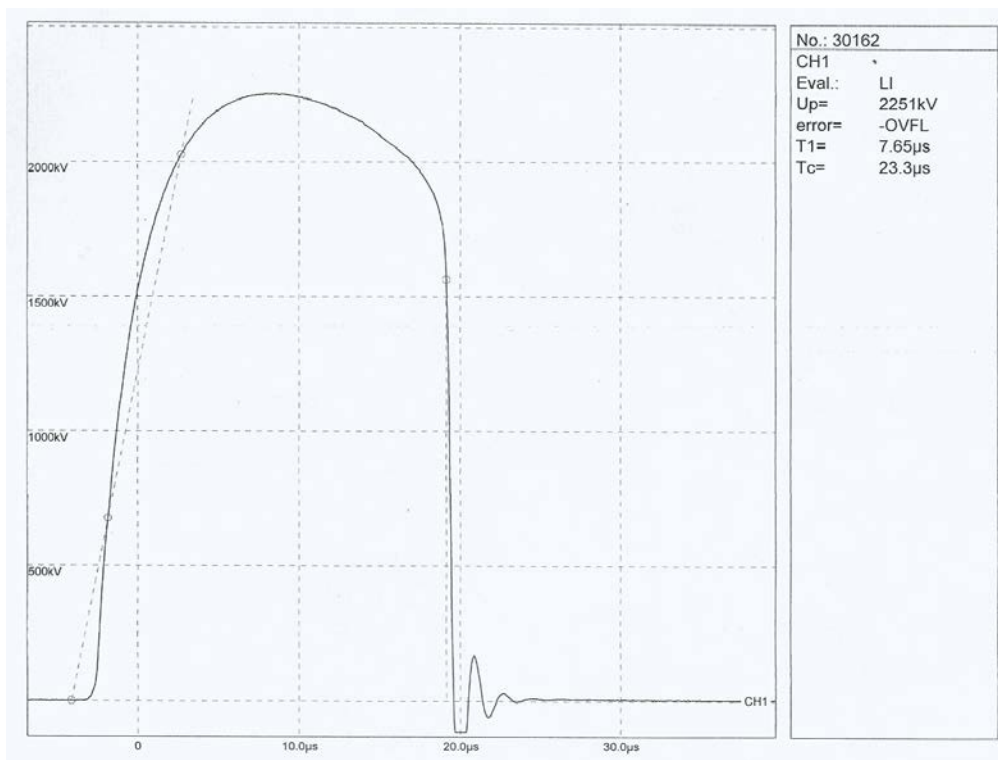
**Udar pełny 2,12/51,6  $\mu$ s  $U_{max} = 1,6$  MV**



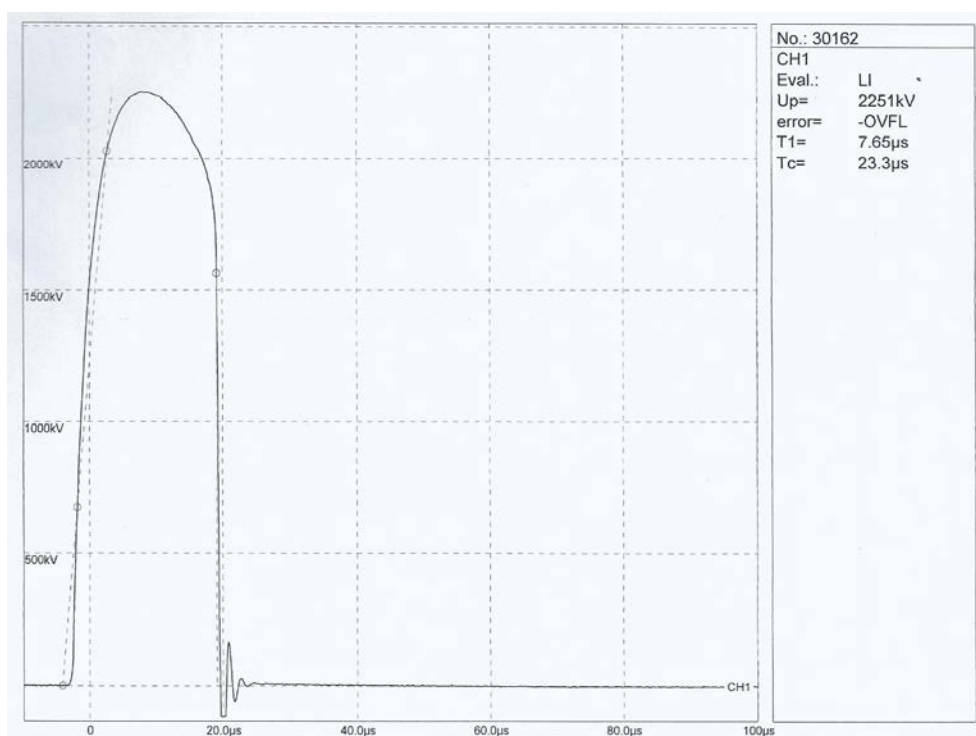
**Udar pełny 1,63/49,9  $\mu$ s  $U_{max} = 1,7$  MV**



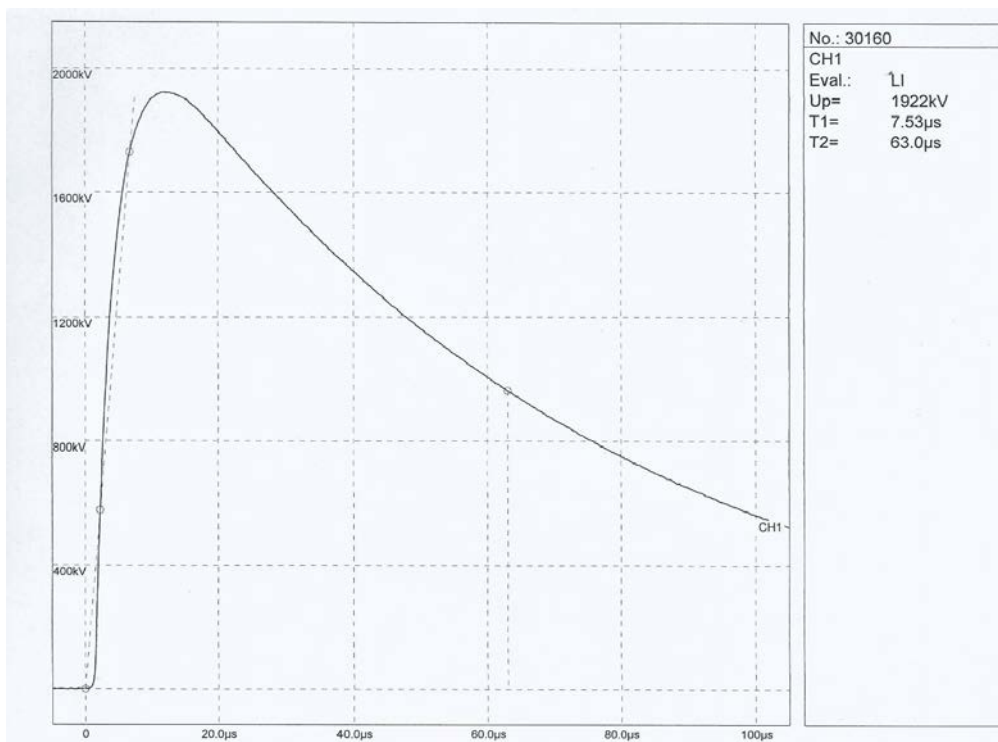
**Udar ucięty  $T_1 = 7,55\mu$ s  $T_c = 23,3\mu$ s  $U_{max} = 2,2$  MV**



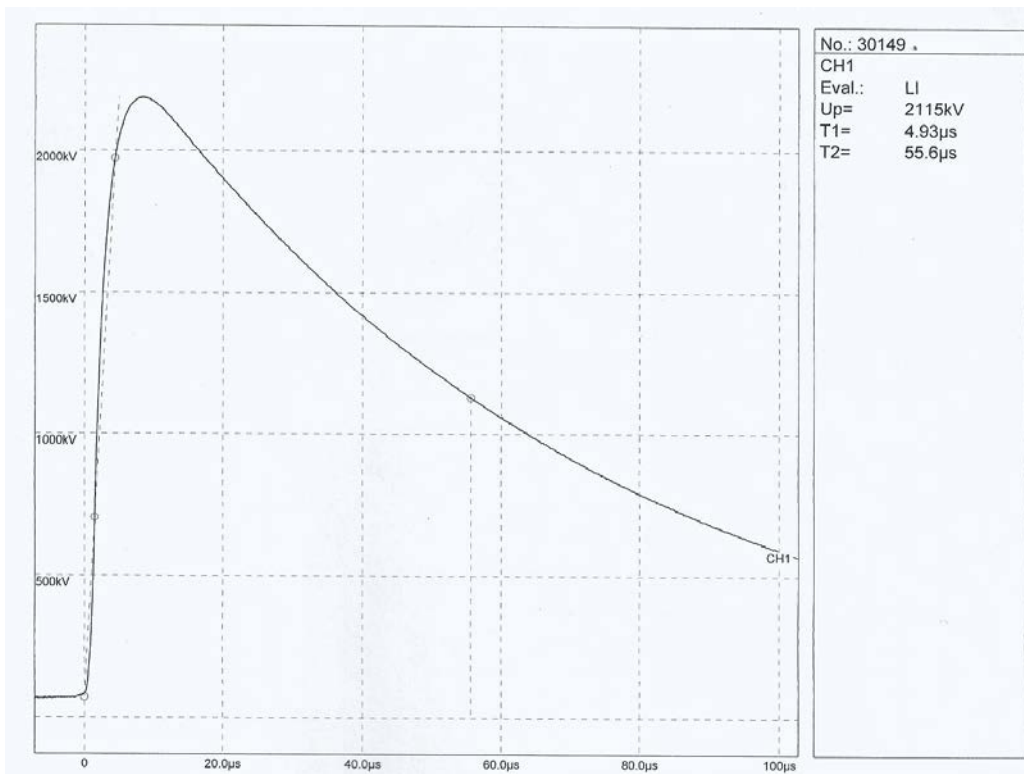
**Udar ucięty  $T_1 = 1,65 \mu\text{s}$   $T_c = 23,3 \mu\text{s}$   $U_{\text{max}} = 2,2 \text{ MV}$**



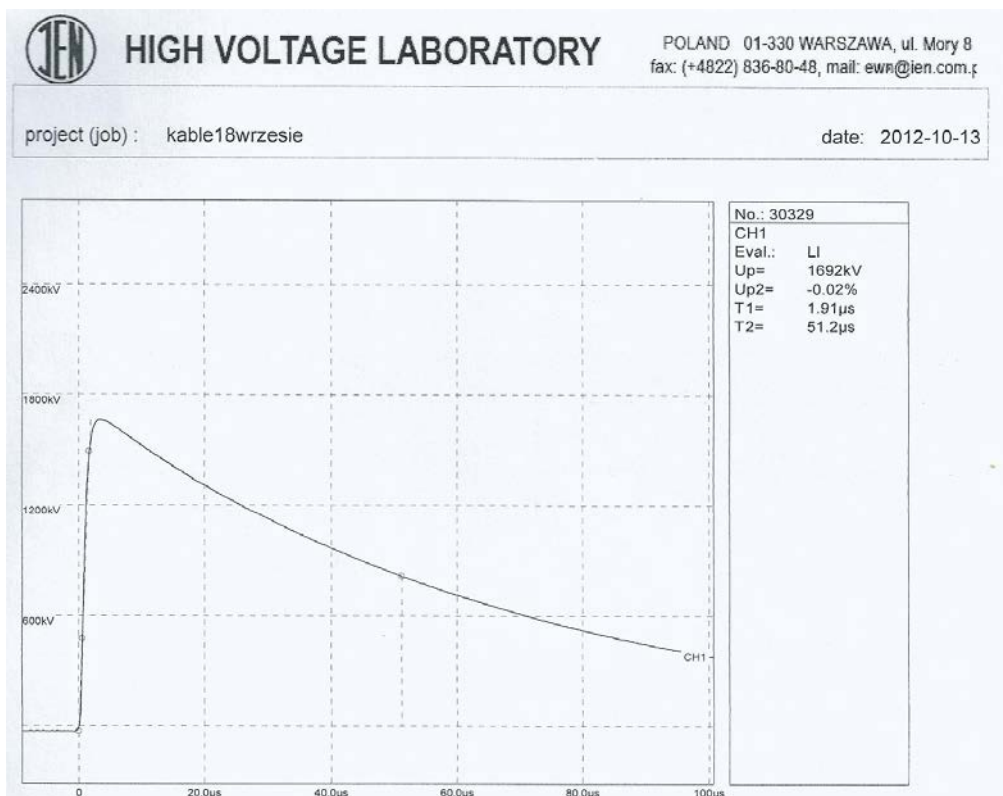
**Udar pełny 7,53/63  $\mu\text{s}$   $U_{\text{max}} = 1,9 \text{ MV}$**



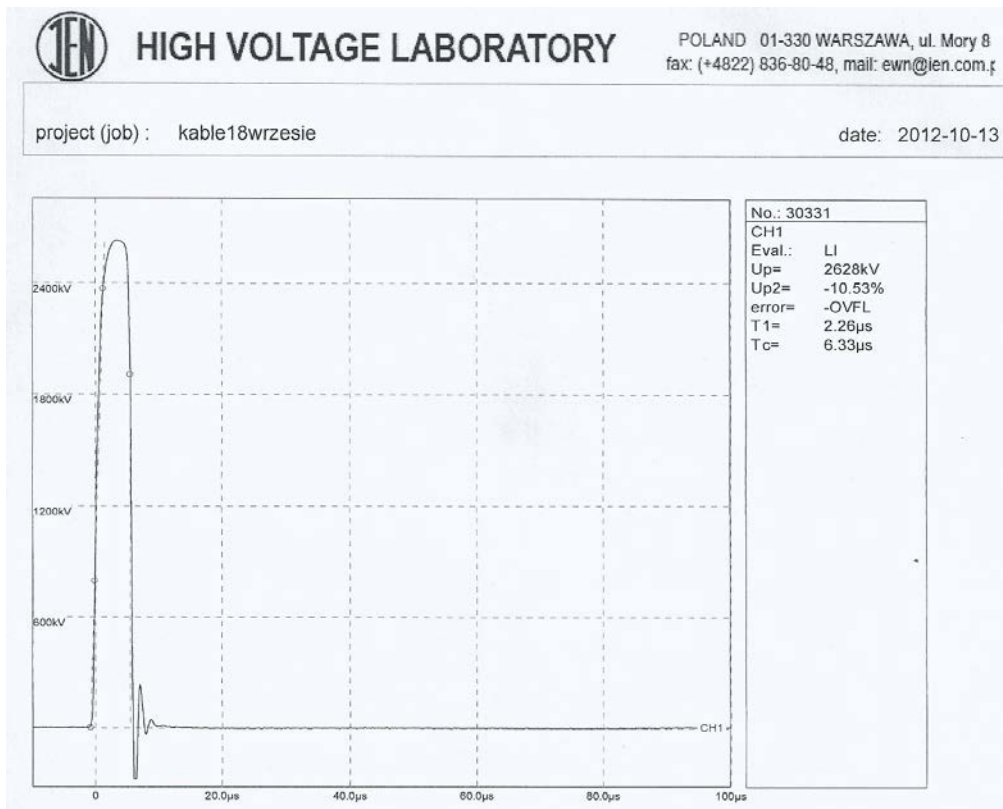
Udar pełny 4,93/55,6  $\mu\text{s}$   $U_{\text{max}} = 2,1 \text{ MV}$



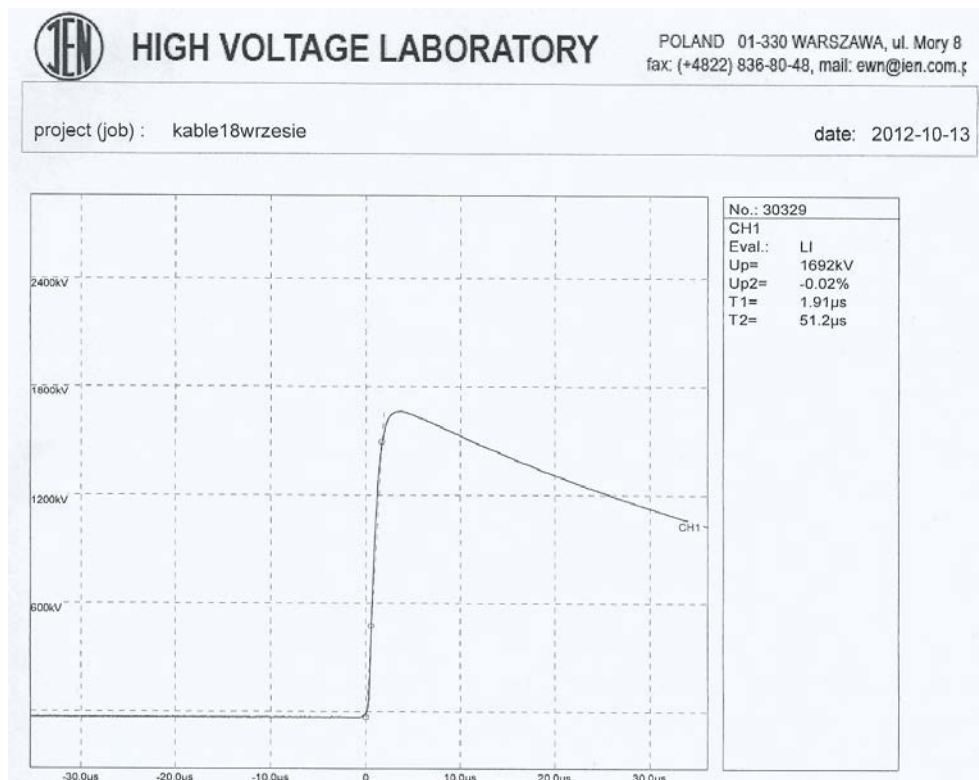
Udar pełny 1,9/51,2  $\mu\text{s}$   $U_{\text{max}} = 1,7 \text{ MV}$



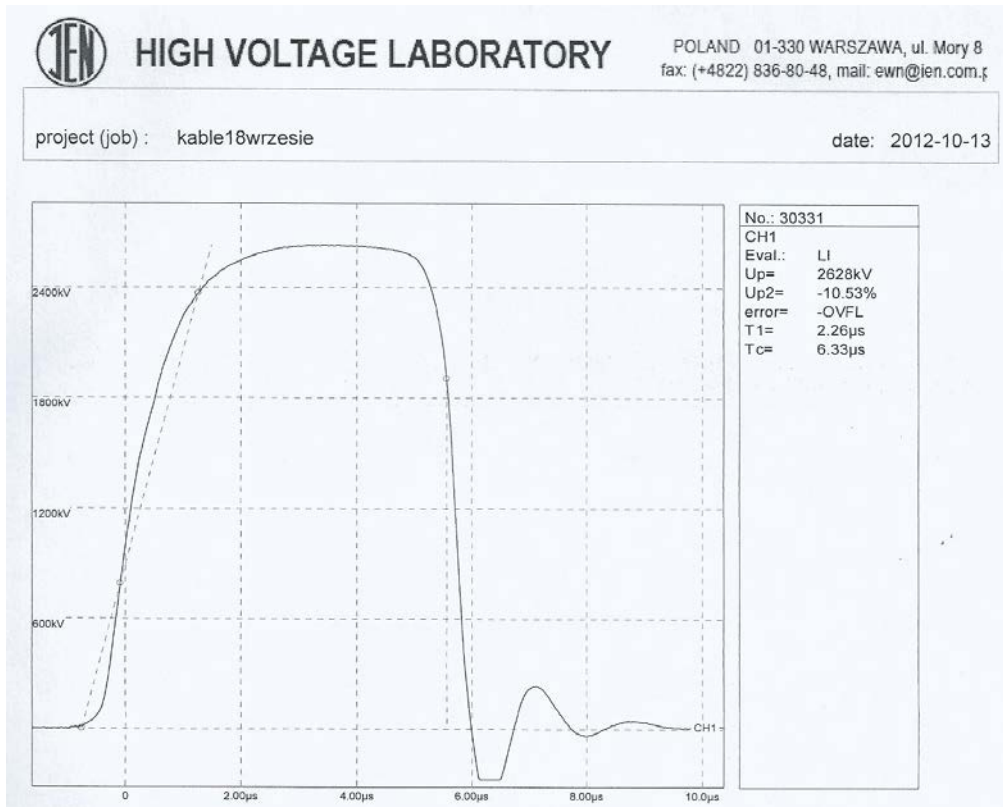
Udar ucięty  $T_1 = 2,26 \mu\text{s}$   $T_c = 6,33 \mu\text{s}$   $U_{\text{max}} = 2,6 \text{ MV}$



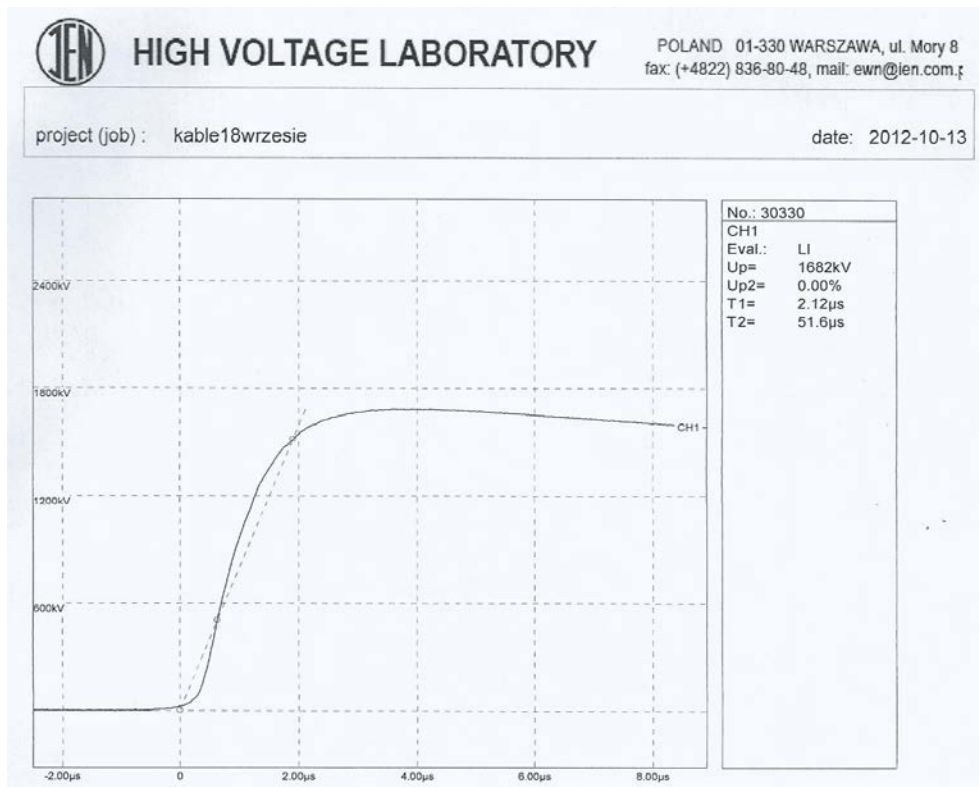
Udar pełny  $1,9/51,2 \mu\text{s}$   $U_{\text{max}} = 1,7 \text{ MV}$



Udar ucięty  $T_1 = 2,26 \mu\text{s}$   $T_c = 6,33 \mu\text{s}$   $U_{\text{max}} = 2,6 \text{ MV}$



Udar pełny 2,12/51,6  $\mu\text{s}$   $U_{\text{max}} = 1,6 \text{ MV}$



**Udar ucięty  $T_1 = 4,96 \mu\text{s}$   $T_c = 12,5 \mu\text{s}$   $U_{\text{max}} = 2,3 \text{ MV}$**

