



**Politechnika Warszawska**

**Instytut Elektroenergetyki  
Zakład Aparatów i Automatyki Elektroenergetycznej  
Laboratorium Automatyki Elektroenergetycznej Cyfrowej**

**Instrukcja laboratoryjna AEC**

**Badanie zabezpieczeń odległościowych transformatora**

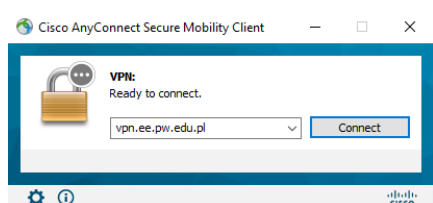
## Z1. Zdalne stanowiska laboratoryjne wykorzystujące program PSCAD

Uniwersalna zdalna platforma do prowadzenia zajęć laboratoryjnych wykorzystująca wirtualizację systemów operacyjnych oraz interfejs www ma na celu umożliwienie prowadzenia wielu różnorodnych zajęć laboratoryjnych realizowanych w ramach Zakładu Aparatów i Automatyki Elektroenergetycznej ZAiAE w trybach synchronicznym, asynchronicznym oraz hybrydowym. Zbudowana platforma laboratoryjna składa się z dwóch elementów: serwera dostępowego z uruchomionymi kilkunastoma maszynami wirtualnymi z zainstalowanym programem PSCAD oraz utworzonych modeli i instrukcji odwzorowujących prowadzone dotychczas w formie stacjonarnej laboratoria. Podstawowym założeniem zbudowanej platformy jest zapewnienie wysokiej jakości merytorycznej realizowanych zajęć oraz ich uatrakcyjnienie z punktu widzenia studentów, jak również opracowanie mechanizmów pozwalających na prosty i intuicyjny dostęp do wirtualnych stanowisk laboratoryjnych.

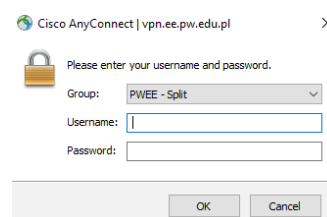
Sposób działania zdalnej platformy laboratoryjnej opiera się na mechanizmie wirtualizacji systemów operacyjnych. W ramach zdalnej platformy wykorzystano serwer z aktywowanymi 15 maszynami wirtualnymi, które zostały skonfigurowane w taki sposób, aby spełnić wymagania dla typowych grup laboratoryjnych uczęszczających na zajęcia w Instytucie Elektroenergetyki PW (IEN PW). Serwer został zainstalowany w Gmachu Mechaniki, gdzie wykorzystano istniejące systemy bezpieczeństwa IT (sprzętowy firewall, urządzenie tunelowe VPN oraz szyfrowany protokół https) i połączone do sieci komputerowej zapewniającej dostęp z sieci lokalnej Gmachu Mechaniki oraz sieci internet, za pośrednictwem tunelu VPN.

W ramach budowy platformy opracowano aplikację dostępową pozwalającą na jednoczesny dostęp do systemu 15 studentów. Studenci uzyskują dostęp do przypisanych maszyn wirtualnych i ich zasobów poprzez opracowany na potrzeby systemu interfejs www bez konieczności instalowania dodatkowego oprogramowania a wszelkie aplikacje narzędziowe konieczne do przeprowadzania ćwiczenia są zainstalowane na udostępnianych maszynach wirtualnych. Takie podejście zapewnia możliwość prowadzenia zajęć z dowolnego miejsca niezależnie czy będzie to laboratorium w budynkach uczelni czy domy uczestników zajęć, jak również pozwala na dostęp do systemów asynchronicznie, poza wyznaczonymi godzinami zajęć.

W celu uzyskania dostępu do platformy testowej konieczne jest posiadanie przez zainteresowaną osobę aktywnego konta na Wydziale Elektrycznym. Po zainstalowaniu aplikacji *Cisco Any Connect Secure Mobility Client* oraz wpisaniu adresu serwera dostępowego pokazanego na Rys. Z.1 przechodzimy do okna z prośbą o wpisanie loginu i hasła (Rys. Z.2). Po uzyskaniu potwierdzenia dostępu do sieci Wydziału elektrycznego możliwe jest połączenia z serwerem platformy laboratoryjnej.



Rys. Z.1. Aplikacja do połączenia VPN



Rys. Z.2. Połączenie VPN – prośba o login i hasło do konta na WE

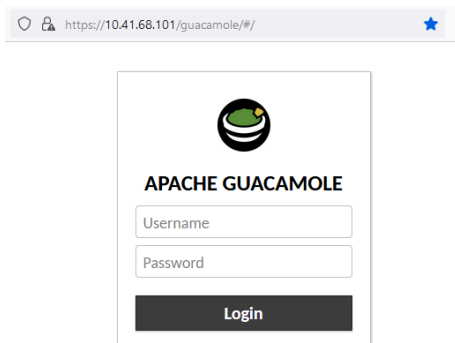
Serwer zdalnej platformy laboratoryjnej ma przydzielony adres:

<https://10.41.68.101/guacamole>

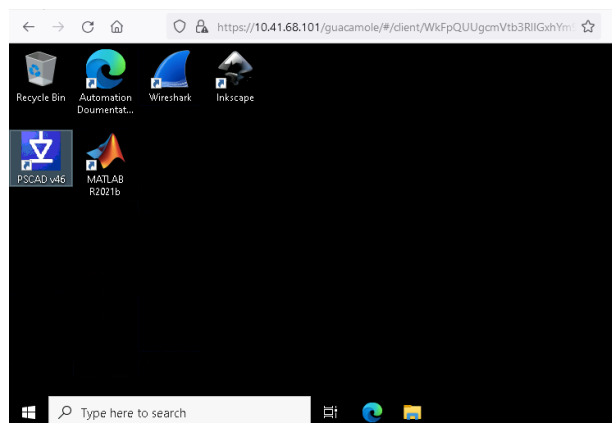
Po wpisaniu adresu do przeglądarki uzyskamy widok z prośbą o podanie loginu i adresu do konkretnej maszyny wirtualnej pokazany na Rys. Z.3

**Login i hasło można uzyskać indywidualnie u prowadzącego.**

Po uzyskaniu dostępu do maszyny wirtualnej użytkownik widzi w przeglądarce pulpit systemu operacyjnego z zainstalowanymi dodatkowymi aplikacjami np. PSCAD (Rys. Z.4). Już w tym momencie można w pełni korzystać z funkcjonalności wszystkich aplikacji zainstalowanych w wybranym systemie. Do pracy z programem PSCAD konieczne jest połączenie z serwerem licencji, które realizowane jest automatycznie po zalogowaniu do maszyny wirtualnej.



Rys. Z.3. Prośba o podanie hasła i loginu do wybranej maszyny wirtualnej

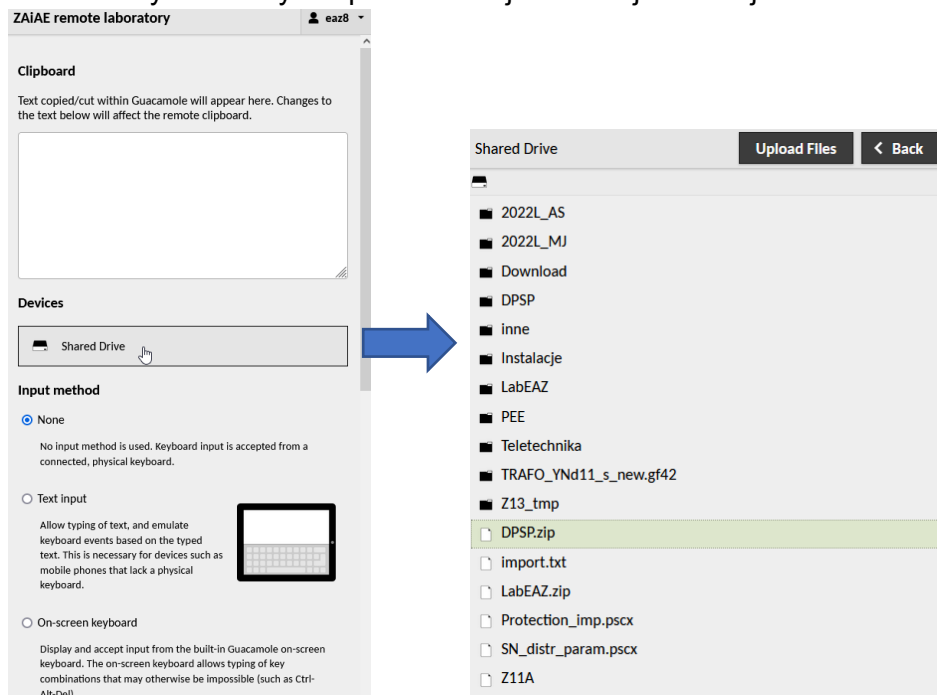


Rys. Z.4. Widok pulpitu wybranej maszyny wirtualnej

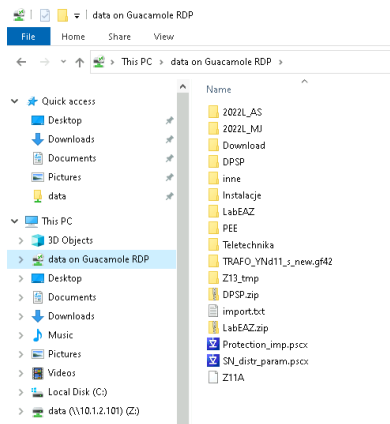
W przypadku konieczności pobrania lub przesłania na serwer plików np. z symulacjami konieczne jest wykorzystanie dodatkowego menu do którego uzyskujemy dostęp po naciśnięciu trzech przycisków *Shift+Ctrl+Alt*. Pojawia się wtedy okno pokazane na Rys. Z.5, gdzie należy wybrać opcję Shared Drive. Po kliknięciu na przycisk uzyskujemy dostęp do zasobów dyskowych serwera. Dwukrotne szybkie kliknięcie na plik daje możliwość pobrania go na własny komputer. Natomiast kliknięcie przycisku *Upload files* pozwala na wysłanie plików na serwer.

Po zakończeniu przesyłania plików należy zamknąć dodatkowe menu przez ponowne naciśnięcie trzech przycisków *Shift+Ctrl+Alt*. Dostęp do przesłanych plików jest możliwy systemie Windows z katalogu *\data on Guacamole RDP* podświetlonego na Rys. Z.6. .

Ze względu na przydzielane uprawnienia, przesłane na maszynę wirtualną pliki z symulacjami należy skopiować na dysk lokalny i dopiero z takiej lokalizacji można je uruchamiać.



Rys. Z.5. Widok dodatkowego menu maszyny wirtualnej

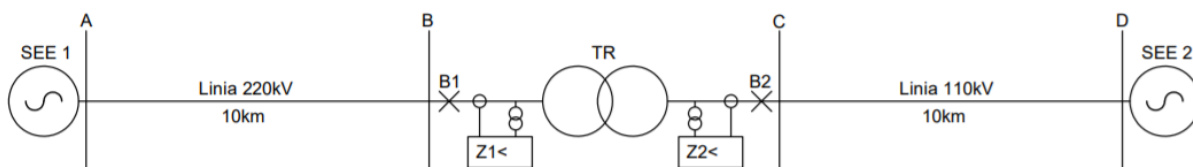


Rys. Z.6. Katalog z plikami przegrzonymi na maszynę wirtualną

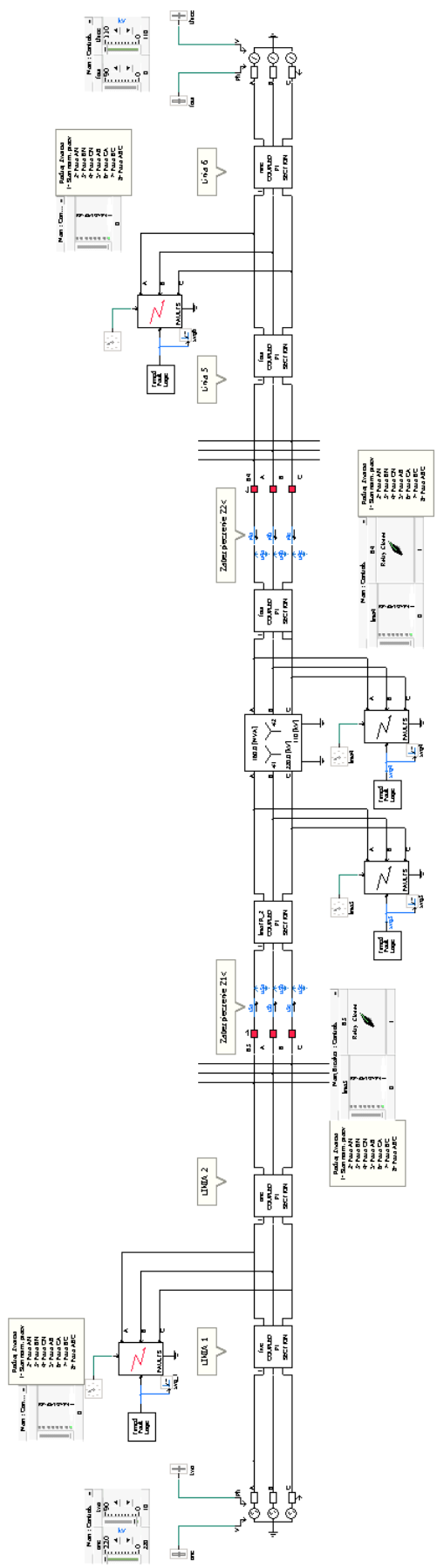
## Z2. Opis przygotowanego modelu

Model przystosowany został do badania działania zabezpieczeń odległościowych stosowanych do ochrony transformatorów. Zgodnie z przyjętym założeniem model składa się z dwóch źródeł napięciowych o poziomie napięć 220kV i 110kV, dwóch odcinków symulujących linie napowietrzne o długości 10km każda oraz transformatora. Poglądowy schemat modelu pokazany jest na rys. z.7.

Cały model, zawierający dwa źródła, dwie linie w czterech fragmentach, transformator, cztery zwarcionniki, mierniki i wyłączniki, pokazany jest na rys. z.2.

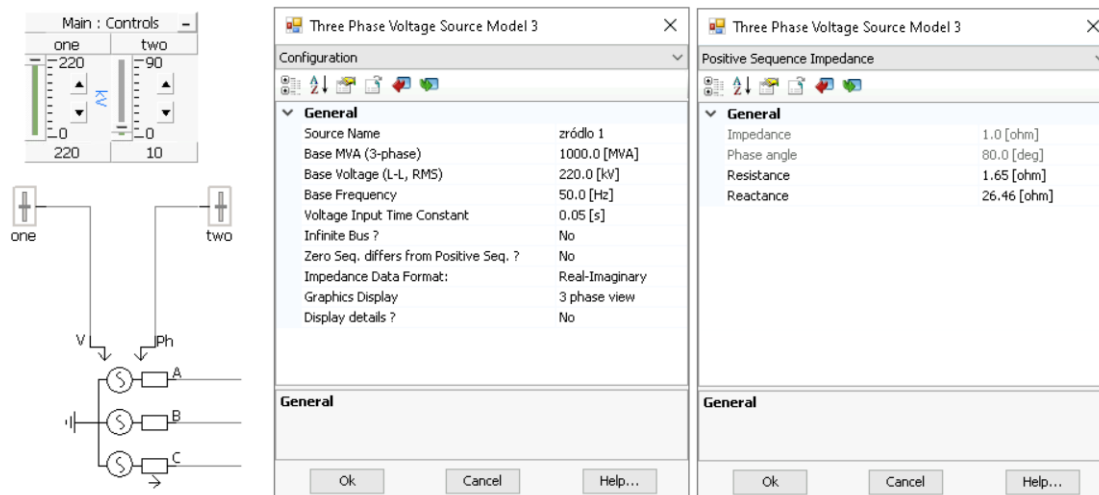


Rys. Z.7. Schemat poglądowy symulowanego układu



Rys. Z.8. Wygląd całego stworzonego modelu w programie PSCAD

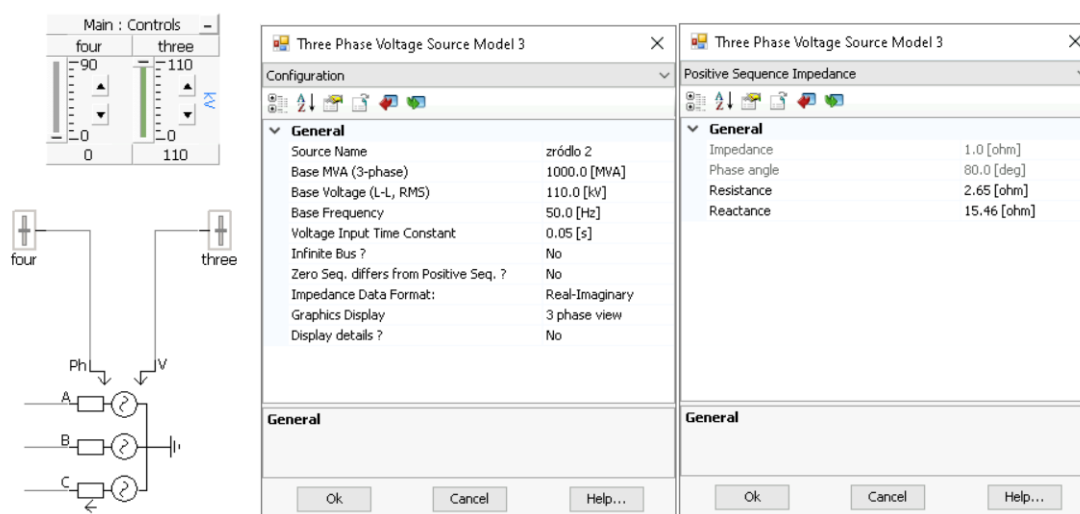
Jak widać na modelu, w jego skład wchodzi dwa źródła napięciowe. Pierwsze z nich, którego napięcie znamionowe wynosi 220kV zostało pokazane na rys. z.3.



Rys. Z.9. Źródło napięciowe 220kV i jego parametry

Źródło to zostało ustawione na napięcie 220kV i częstotliwość 50Hz. Rezystancja wynosi 1,65Ω, a reaktancja 26,46Ω, co daje impedancję źródła wynoszącą 26,51Ω.

Drugie źródło o napięciu 110kV zostało umieszczone na końcu linii i jest ono przedstawione na rys. z.4. Jego rezystancja wynosi 2,65Ω, a reaktancja 15,46Ω, co daje impedancję równą 15,69Ω.

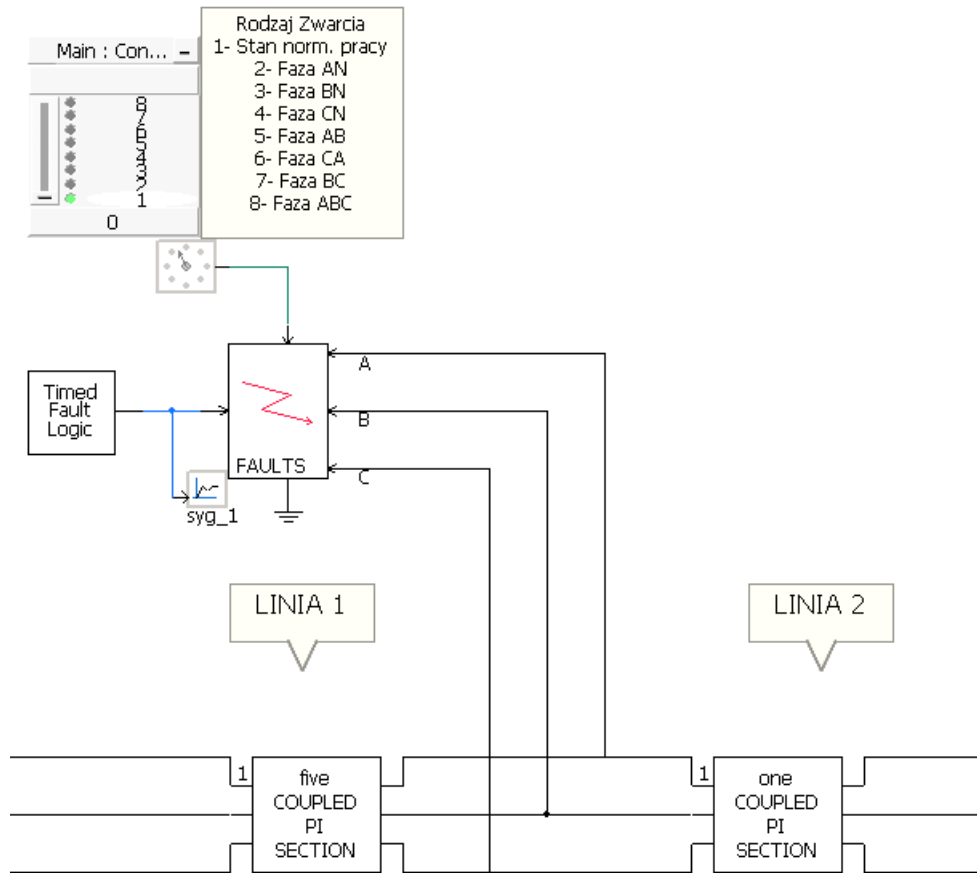


Rys. Z.10. Źródło napięciowe 110kV i jego parametry

Jak można zauważyć, źródła poza różnymi poziomami napięć, posiadają również różne przesunięcia fazowe. W źródle 220kV kąt fazowy wynosi 10°, a w źródle o napięciu 110kV wynosi on 0°. Zaistniała różnica w przesunięciach fazowych obydwu źródeł odpowiada za przesył mocy czynnej. Podczas pracy modelu bez zwarc, płyną prądy i linia przesyła moc czynną. W wyniku doboru przesunięć fazowych i impedancji źródeł, otrzymano napięcie płynące w stanie normalnej pracy na poziomie 57,7V wartości.

Model posiada dwa fragmenty linii, każdy długości 10km, które dodatkowo rozdzielono na dwie części, co w kolejnym etapie budowy modelu pozwoliło na dodanie elementów

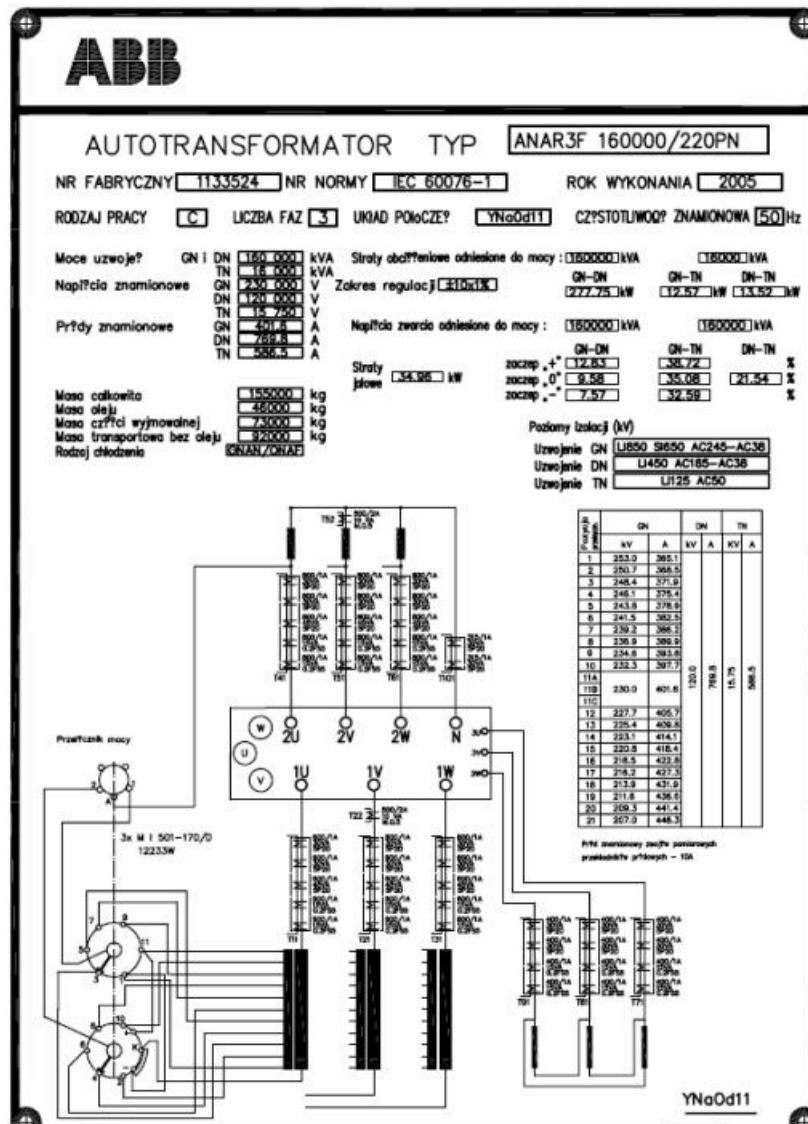
odpowiedzialnych za stworzenie zwarcia. Taka konfiguracja pozwoliła na symulowanie zwarcia na dowolnym kilometrze linii. Zamodelowany fragment linii przedstawia rys. z.5.



Rys. Z.11. Linia przesyłowa o napięciu znamionowym 220kV

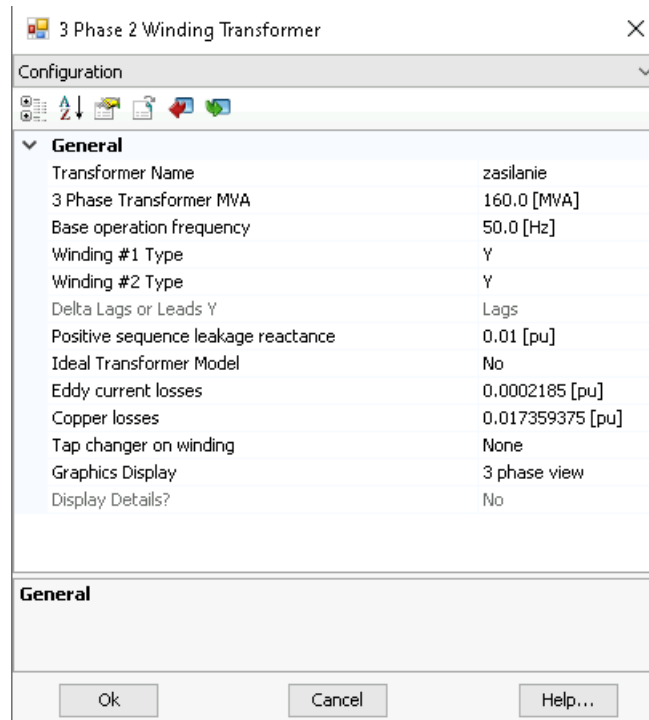
Do zamodelowania transformatora użyto gotowego elementu pobranego z głównej biblioteki z zakładki Transformers. Po dodaniu gotowego bloczka należało ustawić jego parametry zgodnie z wybranym transformatorem, istniejący w rzeczywistości czyli autotransformatorem firmy ABB mocy 160MVA, górnym napięciem 220kV, dolnym 110kV i wyrównawczym 15kV w układzie połączeń YNa0d11. Widok tabliczki znamionowej wybranego transformatora przedstawiony jest na rys. z.6.





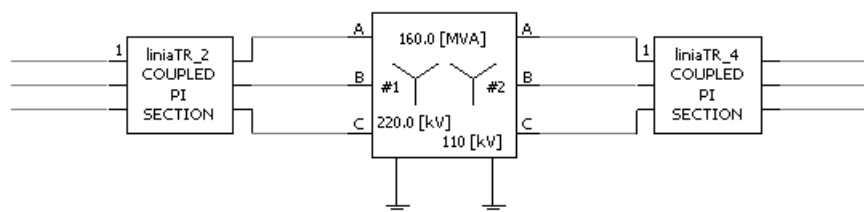
Rys. Z.12. Widok tabliczki znamionowej wybranego transformatora, wg Wiśniewski D., *Układy automatyki zabezpieczeniowej stosowanej do ochrony transformatorów w stacjach WN i NN*

W celu dokładnego odwzorowania transformatora w programie PSCAD, poza ustawieniem odpowiedniej mocy, poziomu napięć, częstotliwości i układu połączeń, należało również wprowadzić wielkości podane w jednostkach względnych, odpowiedzialne za straty w miedzi i straty jałowe. Zadane w programie PSCAD wielkości wykorzystanego transformatora przedstawione są na rys. z.7.



Rys. Z.13. Zadane w programie PSCAD wielkości wybranego transformatora

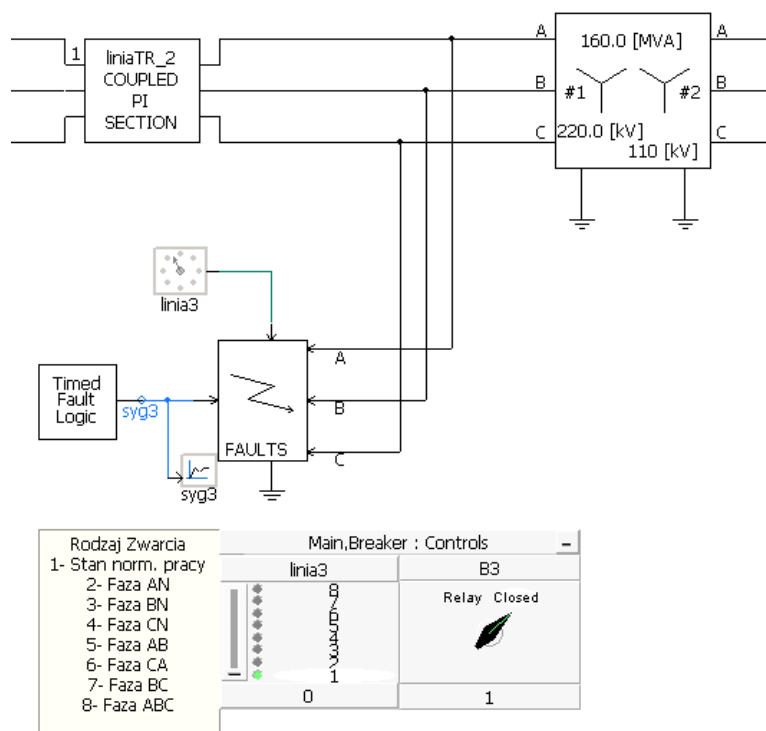
Zastosowany układ wymagał wprowadzenia dodatkowo 100 metrowych fragmentów linii, po obydwu stronach transformatora, w celu odseparowania się od zwarć wykonywanych bezpośrednio za jak i przed transformatorem, tak, aby mierniki prądu i napięcia nie wykrywały zwarcia w sposób, jak gdyby zostało ono wykonane na ich zaciskach. Bez dodanych fragmentów linii odwzorowujących uzwojenia transformatora, w późniejszym etapie wykonane zabezpieczenie odległościowe i wizualizacja impedancji układu na płaszczyźnie impedancyjnej pokazywała zwarcie praktycznie w punkcie (0,0) co świadczyło o zwarcu na zaciskach mierników. Dobrane 100 metrowe fragmenty linii zostały zaimplementowane w programie PSCAD jako czwórniki PI. Z tego powodu konieczne było zastosowanie bardzo małego kroku całkowania. Gotowy model transformatora przedstawiony jest na rys. z.8.



Rys. Z.14. Model transformatora w programie PSCAD

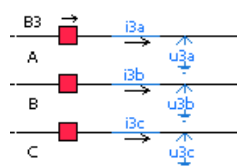
Podczas symulacji założono, że wykonywane będą zvarcia jedno, dwu i trójfazowe. W tym celu do układu dodano elementy odpowiedzialne za wykonanie odpowiednich zwarć. Elementy te zostały zaimplementowane w czterech miejscach w układzie tj. w połowie linii 220kV i 110kV (dlatego te linie zostały podzielone na dwa fragmenty po 5km każdy), oraz po obydwu stronach transformatora (pomiędzy transformatorem a czwórnikami typu PI). Przykładowy wygląd oraz podłączenie elementu odpowiedzialnego za wykonanie zwarć po górnej stronie transformatora przedstawiono na rys. z.9. W widocznym elemencie Timed Fault Logic, istnieje możliwość ustawienia czasu po jakim od rozpoczęcia wykonywania symulacji ma nastąpić zwarcie, tak

aby wykonane ono zostało w momencie ustalenia się prądów i napięć w całym układzie. W tym przypadku wielkość ta została ustawiona na 0,3s.



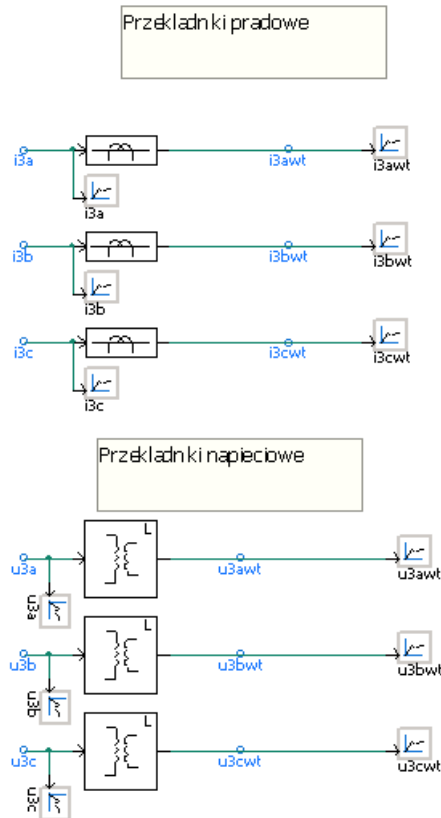
Rys. Z.15. Widok układu odpowiedzialnego za wykonywanie zwarć

Główna część modelu składa się również z mierników prądu i napięcia oraz wyłączników umieszczonych w każdej fazie. Elementy te zostały umieszczone zarówno po stronie napięcia 220kV jak i 110kV. Widok mierników i wyłączników pokazany jest na rys. z.10. Zdublowanie omawianych elementów spowodowane jest koniecznością zabezpieczenia transformatora zarówno od strony niskiego jak i wysokiego napięcia.



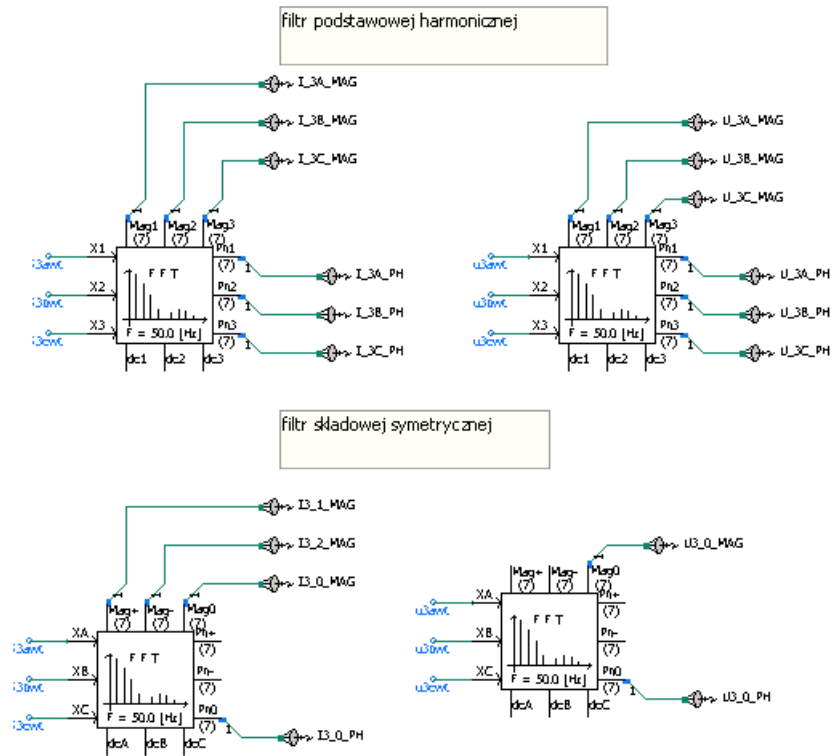
Rys. Z.16. Widok wyłączników, mierników prądu i napięcia strony 220kV

Zastosowane i opisane wcześniej przesunięcia fazowe w źródłach powodują wstępne obciążenie linii, co skutkuje przepływem prądu w modelowanym układzie. Po stronie 220kV zastosowano przekładniki prądowe o przekładni 600A/1A, a po stronie 110kV przekładniki 1000A/1A. Przekładnie przekładników napięciowych wynoszą odpowiednio 2200 i 1100. Wynika to z występujących napięć stron pierwotnych na poziomie 220kV i 110kV i konieczności występowania napięcia 100V po stronie wtórnej. Widok zaimplementowanych w programie PSCAD przekładników prądowych i napięciowych strony 220kV pokazany jest na rys. z.11. Analogiczne rozwiązanie zastosowane jest dla przekładników po stronie 110kV.



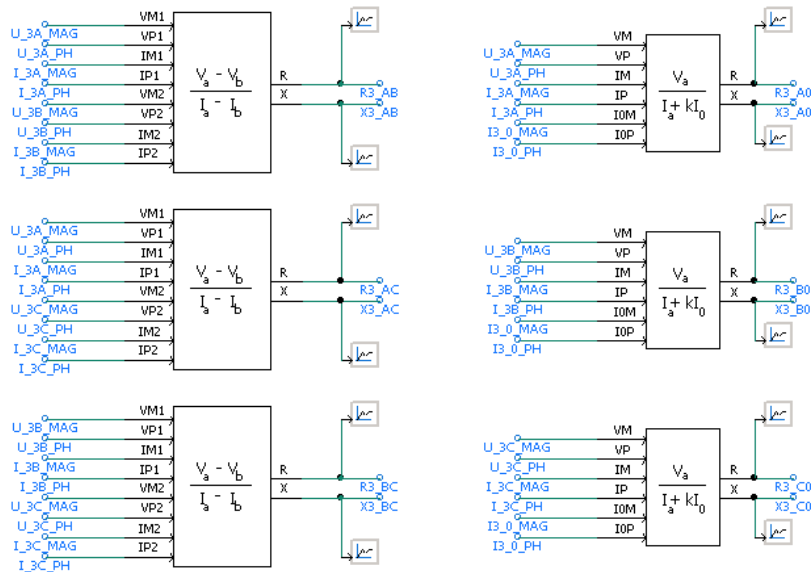
Rys. Z.17. Przekładniki prądowe i napięciowe strony 220kV

Zastosowano również bloczki FFT, które są odpowiedzialne za filtrowanie pierwszej harmonicznej sygnałów pochodzących z przekładników prądowych i napięciowych, oraz rozdzielanie ich składowych na amplitudę i fazę. W zależności od przyjętych ustawień wewnątrz tych bloczków filtrowane są podstawowe harmoniczne i składowe symetryczne. Wartości na wyjściu bloczków FFT podane są jako wartości skuteczne. Przykład zastosowanych bloczków FFT pokazany jest na rys. z.12.



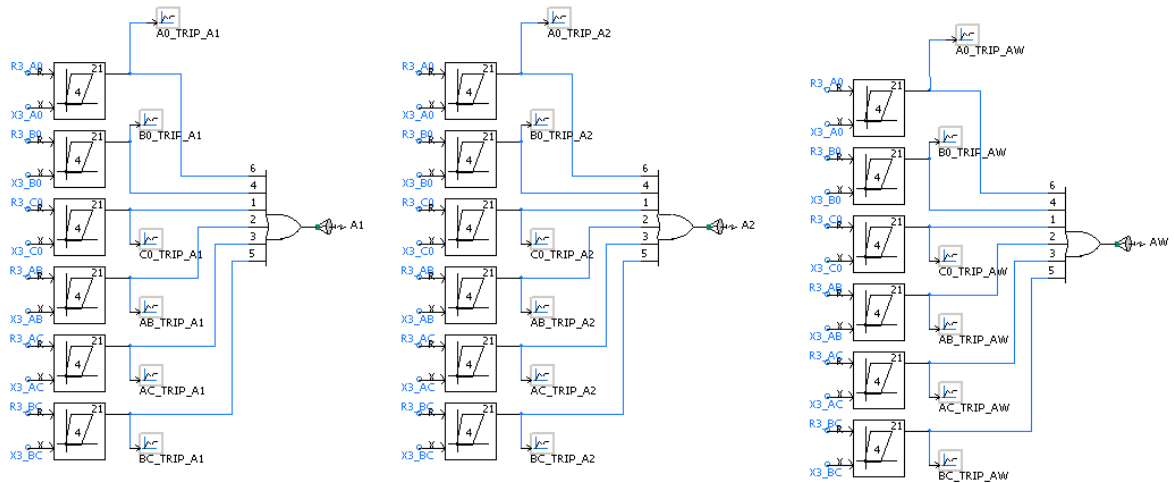
Rys. Z.18. Bloczki FFT

Działanie zabezpieczenia odległościowego zarówno po stronie 220kV jak i 110kV odbywa się na zasadzie pomiaru wartości prądów i napięć, przetransformowaniu ich na stronę wtórną, a następnie przepuszczeniu ich przez odpowiednie bloczki. W pierwszej kolejności odpowiednie sygnały kierowane są na bloczki obliczające impedancję zwarcia dwufazowego i jednofazowego, pokazanych na rys. z.13.



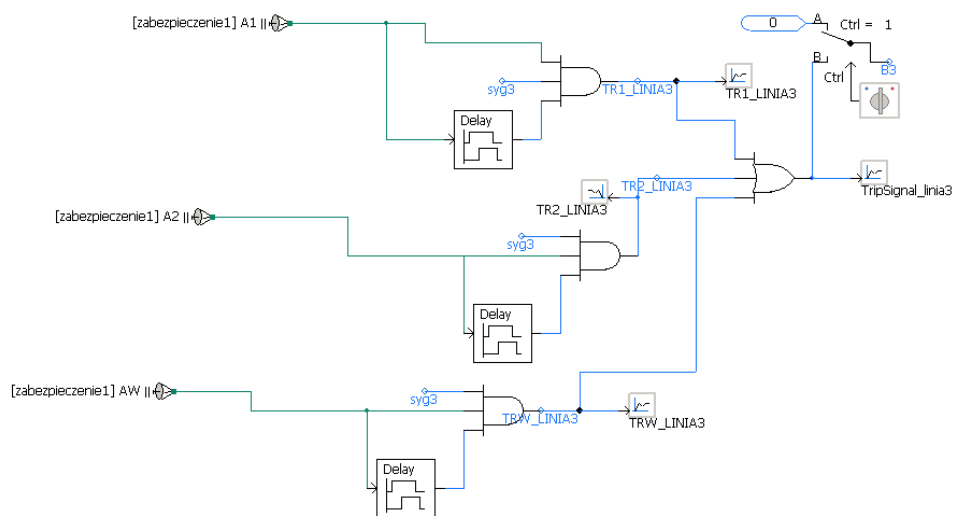
Rys. Z.19. Bloczki obliczające punkt pracy na płaszczyźnie impedancyjnej

Sygnaly wyjściowe z blozków obliczających punkt pracy mają postać (R,X), co pozwalają na niesienie ich na wykresy na płaszczyźnie impedancyjnej i wprowadzenia do kolejnych blozków, odpowiedzialnych za określenie zasięgów stref działania. Blozki te pokazane są na rys. z.14. Przedstawione są trzy zestawy blozków, ponieważ zaimplementowane zabezpieczenie będzie działało z dwoma strefami do przodu i jedną do tyłu. Istnienie sześciu blozków w każdej strefie wymuszone jest koniecznością sprawdzenia każdego rodzaju zwarcia osobno.



Rys. Z.20. Blozki stworzonego zabezpieczenia odległościowego wyposażonego w trzy strefy działania

W momencie zwarcia, blozki ten sprawdza w której strefie do niego doszło i wysyła sygnał na zadziałanie zabezpieczenia czyli otwarcie wyłącznika i wyłączenie całego układu. W układzie logicznym każdej strefy można zauważyć istnienie bramki OR, która otrzyma logiczną jedynkę na wyjściu jeśli chociaż jeden z sygnałów wejściowych będzie logiczną jedynką. Wysłany sygnał przepuszczany jest dodatkowo przez układ widoczny na rys. z.15, który pozwala wprowadzić opóźnienie czasowe dla danej strefy. Opóźnienia zadane są w blokach Delay i wynoszą 0s dla strefy pierwszej, 0,6s dla strefy drugiej i 0,4s dla strefy wstecznej.

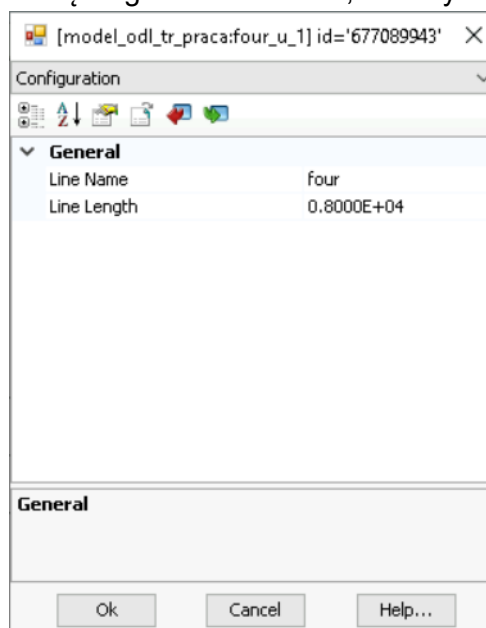


Rys. Z.21. Układ wprowadzający opóźnienia czasowe i wysyłający sygnał na zamknięcie wyłącznika

### Z3. Wykonywanie zwarć

Symulacje należy rozpocząć od zmiany położenia przełącznika B3 i B4 na pozycję closed. Pozwoli to na nie wyłączenie zwarcia przez zabezpieczenia i przeprowadzenie koniecznych obserwacji.

W celu wykonania zwarcia np. na 8km patrząc od strony danego zabezpieczenia, należy wejść do bloczka reprezentującego fragment linii i w polu odpowiedzialnym za podanie długości wpisać pożądaną długość, tak jak jest to pokazane na rys. z.16. Należy pamiętać, że podawane wartości są w metrach. W tym przypadku będzie to 0.8000E+04. W drugim bloczku danej linii należy wpisać pozostałą długość odcinka linii, tak aby sumarycznie wyszło 10km.



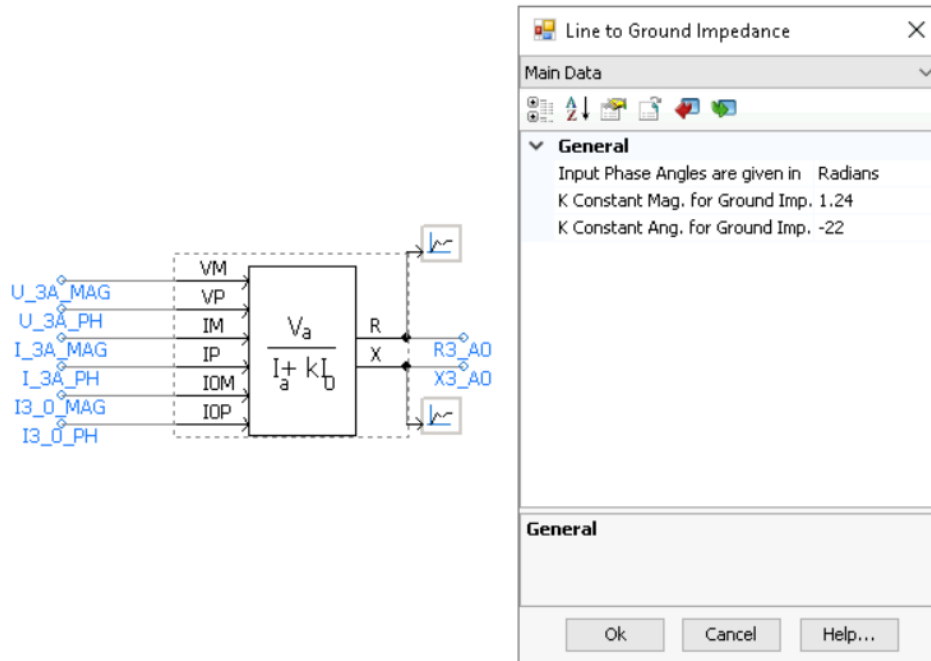
Rys. Z.22. Wprowadzanie wymaganej długości odcinka linii

Przy zwarciach jednofazowych występuje współczynnik kompensacji ziemnozwarciowej, którego moduł dla zabezpieczenia zlokalizowanego po stronie 220kV dla stref działający w przód wynosi 0 i argument również 0. Moduł tego współczynnika dla strefy wstecznej wynosi 1,24, a jego argument  $-22^\circ$ . Dla zabezpieczenia zlokalizowanego po stronie 110kV dla stref działających w przód, moduł i argument współczynnika kompensacji ziemnozwarciowej również wynosi 0. Dla strefy wstecznej moduł wynosi 1,89, a argument  $1^\circ$ . Zestawienie wartości współczynnika kompensacji ziemnozwarciowej pokazane jest w tabl. z.1.

Tabl. Z.1. Blok konfiguracji wyłącznika

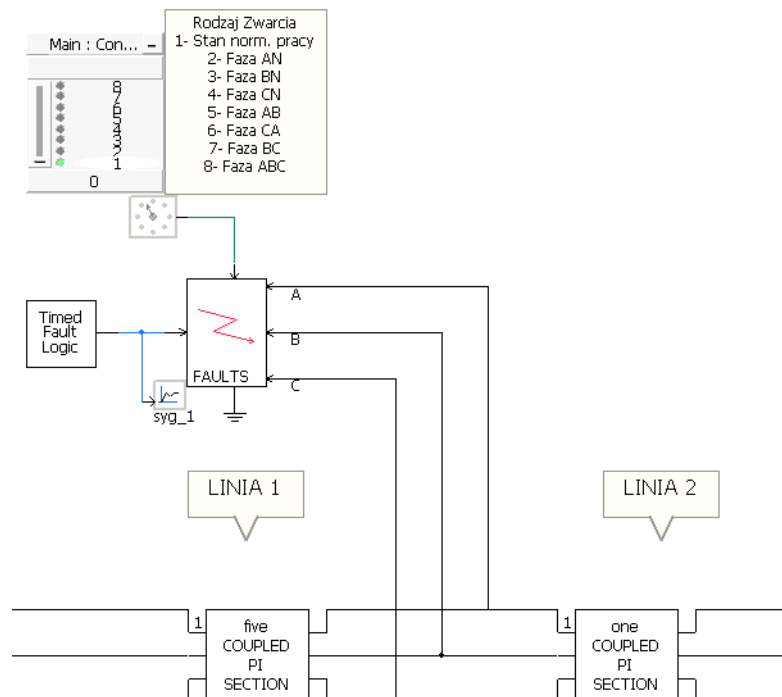
Zabezpieczenie	Strefa wsteczna		Strefa 1		Strefa 2	
	Moduł	Arg.	Moduł	Arg.	Moduł	Arg.
<b>110kV</b>	1,89	$1^\circ$	0	0	0	0
<b>220kV</b>	1,24	$-22^\circ$	0	0	0	0

W celu ustawienia wartości współczynnika kompensacji ziemnozwarciowej należy wejść w bloczek reprezentujący dane zabezpieczenie, a następnie w bloczek odpowiedzialny za wyliczanie współrzędnych punktu pracy podczas danego zwarcia na płaszczyźnie impedancyjnej wpisać wymagane wielkości. Zarówno bloczek jak i okno do wpisania danych wielkości pokazane jest na rys. z.17.



Rys. Z.23. Wprowadzanie wymaganej wartości współczynnika kompensacji ziemnozwarciowej

Aby wykonać zwarcie, należy suwak pokazany na rys z.18 przesunąć na odpowiednią pozycję, zgodnie z legendą umieszczoną obok suwaka oraz wystartować symulację. Wyniki symulacji można obserwować na płaszczyznach impedancyjnych w postaci punktu pracy podczas zwarcia, oraz na wykresach pokazujących czas zadziałania zabezpieczenia.



Rys. Z.24. Wykonywanie zwarcć



## Z4. Treść zadania

Posiadając do dyspozycji model, przygotowany do badania zabezpieczeń odległościowych do ochrony transformatorów, należy:

- Wykonać po jednym zwarcie jednofazowym, dwufazowym i trójfazowym w każdej strefie obydwu zabezpieczeń i zanotować czasy z jakimi wystąpiło zadziałanie zabezpieczenia. Wykonać zrzuty ekranu płaszczyzny impedancyjnej z odczytanymi współrzędnymi punktów pracy układu. Uzupełnić tabelę Z.2 i skomentować otrzymane wyniki.
- Wykonać dowolne zwarcie w strefie wstecznej i drugiej dowolnego zabezpieczenia co kilometr rozpoczynając od 1km i kończąc na 8km. Wykonać zrzuty ekranu płaszczyzny impedancyjnej z odczytanymi współrzędnymi punktów pracy układu. Zanotować współrzędne punktu pracy układu po zejściu zwarcia uzupełniając tabelę Z.3. Za pomocą odpowiednich obliczeń matematycznych określić kąt zwarcia linii i skomentować otrzymane wyniki.

Tabl. Z.2. Tabela podpunkt a

Zabezpieczenie	Rodzaj zwarcia	Strefa wsteczna	Strefa 1	Strefa 2
		[s]	[s]	[s]
110kV	1 faz.			
	2 faz.			
	3 faz.			
220kV	1 faz.			
	2 faz.			
	3 faz.			

Tabl. Z.3. Tabela podpunkt b

	kilometr	R	X
		[ $\Omega$ ]	[ $\Omega$ ]
Strefa wsteczna	1		
	2		
	3		
	4		
	5		
	6		
	7		
	8		
Strefa 2	1		
	2		
	3		
	4		
	5		
	6		
	7		
	8		