

# Symulator zjawisk dynamicznych w systemie elektroenergetycznym działający w czasie rzeczywistym jako nowoczesne narzędzie do badania blokad kołysaniowych

**Streszczenie.** W artykule opisano przyczyny nieprawidłowego działania oraz sposoby badania funkcji blokad kołysaniowych w które wyposażone są zabezpieczenia odległościowe. Zaproponowano badania, jakim powinny podlegać blokady w celu sprawdzenia poprawności ich działania. Przedstawiono propozycje układów testowych, które mogą zostać wykorzystane do badania blokad. Opisano budowę symulatora działającego w czasie rzeczywistym zjawisk, który może zostać wykorzystany do badania blokad kołysaniowych. Pokazano przykładowe wyniki badań przełącznika elektroenergetycznego wykonane za pomocą symulatora.

**Abstract.** The paper describes the causes of malfunction and how to test power swing blocking functions fitted to the distance protections relays'. Tests have been proposed, which should be subject to the power swing blocking functions to validate their operation. The test systems have been proposed that can be used to test the power swing blocking functions. Describes the construction of real time simulator, which can be used to test the power swing blocking functions. Shown are examples of protection relay test results performed using the simulator. (**The real time simulator of dynamic phenomena in the power system as a modern tool for testing power swing blocking functions**).

**Słowa kluczowe:** kołysania mocy, blokady kołysaniowe, badanie przełączników elektroenergetycznych, symulatory działające w czasie rzeczywistym zjawisk, MATLAB/Simulink.

**Keywords:** power swings, power swing blocking functions, protection relays testing, real time simulators, MATLAB/Simulink.

## Wstęp

Funkcje blokad kołysaniowych są dostępne w przełącznikach odległościowych. Ich zadaniem jest blokowanie niepożądanego działania funkcji zabezpieczeń odległościowych podczas kołysań mocy, w trakcie których impedancja ruchowa może wejść w obszary stref działania funkcji odległościowej. Producenci urządzeń zabezpieczeniowych stosują blokady kołysaniowe, wykorzystując różne sposoby detekcji kołysań mocy. Najczęściej stosowanym sposobem detekcji kołysań mocy jest bazowanie na pomiarze szybkości zmian impedancji ruchowej między strefami zewnętrzną i wewnętrzną blokady. Rodzaje blokad kołysaniowych, stosowanych przez różnych producentów przełączników elektroenergetycznych, zebrano w [1,2].

Podobnie jak pozostałe funkcje zabezpieczeniowe, dostępne w przełącznikach elektroenergetycznych funkcje blokad kołysaniowych powinny być badane. Podziały testów, jakim powinny podlegać przełączniki elektroenergetyczne, zebrano i opisano w [3,4]. Najbardziej zbliżonymi do rzeczywistych warunków pracy przełączników elektroenergetycznych są: (a) funkcjonalne testy działania i (b) systemowe testy działania. Oba rodzaje testów dotyczą poprawności działania przełącznika w konkretnych warunkach pracy systemu elektroenergetycznego (SEE) oraz konkretnego przebiegu zakłócenia w SEE. W pierwszym przypadku przebieg wielkości elektrycznych tuż przed oraz w trakcie zakłócenia i po zakłóceniu wgrzywa się do oprogramowania testera. Tester odtwarza przebiegi prądów i napięć, zamienia sygnały cyfrowe na analogowe i wzmacnia do poziomu wejść sprawdzanego przełącznika. Sygnały te wprowadza się do badanego urządzenia i obserwuje jego działanie, rejestrując jego sygnały pobudzeń i zadań. Testy tego typu nazywane są testami w *otwartej pętli*, ponieważ zadziałanie (bądź nie) badanego urządzenia nie ma wpływu na generowane przez tester przebiegi.

W przypadku systemowych testów działania badany przełącznik elektroenergetyczny traktowany jest jak „czarna skrzynka”, w której funkcje mogą być tak skonfigurowane i nastawione, jak w przypadku zainstalowania go w polu. Sposób przeprowadzania badań przełącznika może być

podobny jak w przypadku funkcjonalnych testów działania. Jednak o wiele bardziej odpowiadająca rzeczywistości jest metoda testowania z wykorzystaniem symulatorów SEE działających w czasie rzeczywistym zjawisk (ang. *real time simulators*).

Dzięki takim symulatorom wyniki symulacji wyprowadzane są tak samo szybko, jak przebiegają zjawiska w systemie. Dysponując takim symulatorem, można badany przełącznik włączyć do modelu SEE w ten sposób, że chwilowe wartości napięć i prądów uzyskane z symulatora zamieniane są na sygnały analogowe, odpowiednio wzmacniane i wprowadzane do przełącznika. Natomiast sygnały wyjściowe z przełącznika (np. sygnały na OW i ZW) wprowadza się do modelu SEE odwzorowanego w symulatorze. Jeśli sygnałem wyjściowym jest sygnał na otwarcie wyłącznika jakiegoś elementu systemu i sygnał ten pojawia się w trakcie symulowanego przebiegu, to w modelu systemu zostaje przerwany odpowiedni obwód (co ma wpływ np. na rozpięty mocy w pozostałej części SEE). O takim testowaniu mówi się, że odbywa się w *zamkniętej pętli*, gdyż na zachowanie się zamodelowanego systemu, tak jak w rzeczywistym systemie, wpływ ma działanie badanych przełączników. Komercyjne symulatory tego typu [5,6] są urządzeniami bardzo drogimi. Wielu uczelni technicznych oraz laboratoriów badawczych nie stać na tak duży wysiłek finansowy. Z tego powodu niektóre ośrodki akademickie próbują zbudować (z większym lub mniejszym sukcesem) własne symulatory [7,8]. Zwykle są to symulatory odwzorowujące zjawiska w małym fragmencie SEE. Symulatory te jednak w wielu przypadkach okazują się wystarczające do wykonania wszechstronnych badań wielu funkcji zabezpieczeniowych dostępnych w pojedynczych przełącznikach elektroenergetycznych.

W dalszej części artykułu wymieniono wybrane przyczyny nieprawidłowego działania blokad kołysaniowych oraz opisano stosowane sposoby ich badania. Opisano budowę prostego symulatora działającego w czasie rzeczywistym zjawisk, który może zostać wykorzystany do badania przełączników elektroenergetycznych w zamkniętej pętli sprzężenia w tym funkcji blokad kołysaniowych. Przedstawiono przykładowe wyniki badań wykonane za pomocą symulatora.

## Przyczyny niepoprawnego działania blokad kołysaniowych

Jak napisano wyżej blokady kołysaniowe powinny blokować działanie funkcji zabezpieczenia odległościowego podczas kołysań mocy. Jednak ich działanie powinno być blokowane (blokada powinna zostać „zdejta”) w przypadku wystąpienia zwarć wewnętrznych (symetrycznych i niesymetrycznych) w trakcie kołysań mocy, aby umożliwić ich likwidację za pomocą funkcji zabezpieczenia odległościowego.

Dodatkowo w niektórych sytuacjach blokady kołysaniowe mogą działać niepoprawnie. Takie niepoprawne działanie blokady sprowadza się do brakującego lub zbędnego pobudzenia blokady. Zatem podczas wykonywania badań blokad kołysaniowych należy sprawdzić ich zachowanie się w sytuacjach, w których mogą one błędnie działać. Z błędnymi zadziałaniami blokad, głównie impedancyjnych typu  $\underline{Z}(t)$ , można się spotkać w przypadkach [2,9]:

- długich, silnie obciążonych linii;
- wysokooporowych zwarć rozwijających się (w tym łukowych), podczas których powolne zmiany impedancji mogą być błędnie potraktowane jako kołysania mocy (błędne zadziałanie blokady),
- długich czasów trwania trójfazowych zwarć zewnętrznych i dużych zmian kątów w trakcie zwarcia, podczas których blokady kołysaniowe błędnie nie działają,
- wewnętrznych zwarć trójfazowych występujących podczas kołysań mocy i działania blokady kołysaniowej (błędny brak zablokowania działania blokady),
- zwarć niesymetrycznych (wewnętrznych i zewnętrznych) występujących podczas kołysań mocy i działania blokady kołysaniowej,
- zwarć podczas kołysań mocy (w zdrowych fazach) występujących w trakcie przerwy bezprądowej cyklu SPZ jednofazowego,
- różnych kierunków zmian impedancji ruchowej na płaszczyźnie impedancyjnej podczas kołysań mocy (zmiany „od” i „do” punktu przekaźnikowego),
- niekorzystnego wpływu przekładników prądowych (nasycanie się przekładników) i pojemnościowych napięciowych (stany przejściowe po zwarcu) na poprawność działania blokady kołysaniowej.

Należy podkreślić, że zwykle wymienione przyczyny błędnego działania blokad kołysaniowych nie występują samodzielnie. Przykładowo zwarcia wysokooporowe występują w powiązaniu ze zvarciami łukowymi i mają zwykle charakter zwarć jednofazowych.

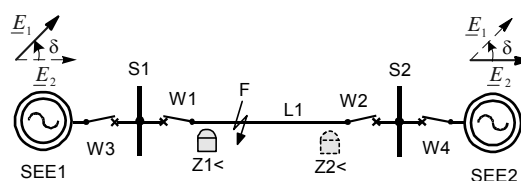
## Badania blokad kołysaniowych

Algorytmy badania blokad kołysaniowych powinny umożliwiać sprawdzenie poprawności ich działania w zakresie podstawowym oraz rozszerzonym [2,10,11]. Sprawdzenie blokad w zakresie podstawowym powinno umożliwić wstępną ocenę poprawności działania blokady w typowych sytuacjach z jakimi mają one do czynienia podczas swojej pracy (kołysania synchroniczne i asynchroniczne o różnej częstotliwości, zwarcia w trakcie kołysań mocy bez uwzględnienia przyczyn niepoprawnego działania blokad kołysaniowych wymienionych wyżej). Natomiast sprawdzenie w zakresie rozszerzonym powinno dodatkowo uwzględniać zamodelowanie zakłóceń nietypowych wymienionych wyżej (np. kołysania w zdrowych fazach podczas przerwy bezprądowej w cyklu SPZ jednofazowego, długotrwałe zwarcia zewnętrzne) w dość dokładnie zamodelowanym fragmencie SEE (dokładne modele generatora i jego regulatorów, dokładne modele transformatora i linii, dokładne modele

przekładników prądowych i napięciowych itp.). Biorąc pod uwagę podział testów przedstawiony we wstępie artykułu, badania w zakresie podstawowym można zaliczyć do funkcjonalnych testów zgodności, a badania w zakresie rozszerzonym obejmują funkcjonalne testy zgodności i funkcjonalne testy działania.

Badania w zakresie podstawowym mogą zostać wykonane w ten sposób, że za pomocą programu symulacyjnego zamodelowany jest prosty układ testowy, za pomocą którego generowane próbki prądów i napięć zapisywane są do plików w formacie COMTRADE. Pliki te są następnie odtwarzane za pomocą oprogramowania testera mikroprocesorowego i na ich podstawie tester generuje odpowiednie prądy i napięcia.

Układy testowe (np. taki jak przedstawiono na rys. 1) mogą zostać zbudowane w programach symulacyjnych takich jak PSCAD/EMTDC, MATLAB/Simulink, ATP-EMTP. Wygenerowane pliki typu COMTRADE z próbkami prądów i napięć odtwarzać można np. za pomocą modułu testowego Advanced TransPlay oprogramowania Test Universe, testera typu CMC firmy OMICRON electronics [12].



Rys. 1. Układ do sprawdzania blokad kołysaniowych w zakresie podstawowym

Inny sposób wykonywania badań w zakresie podstawowym może polegać na wykorzystaniu gotowych modułów testowych, przeznaczonych dla danego testera mikroprocesorowego. Przykładowo, w artykułach [13,14] opisane zostały sposoby badania blokad kołysaniowych za pomocą modułów testowych typu State Sequencer, Ramping, NetSim oprogramowania Test Universe, testera typu CMC firmy OMICRON electronics.

Badania w zakresie rozszerzonym różnią się w tym od badań w zakresie podstawowym, że w programie symulacyjnym modelowane są bardziej rozbudowane układy testowe niż ten przedstawiony na rys. 1. W układach tych o wiele dokładniej modelowane są elementy SEE (dokładne modele generatorów i ich układów regulacji, dokładne modele linii). Do badań tego typu może zostać wykorzystany model układu dwumaszynowego (z linią dwutorową) (rys. 3) lub czteromaszynowego.

Szczegółowy zakres badań blokad kołysaniowych w zakresie podstawowym i rozszerzonym, który zdaniem Autora artykułu należy przeprowadzić, można znaleźć w [2, 10,11].

Oprócz sposobów wymienionych wyżej do badań blokad kołysaniowych, szczególnie w zakresie rozszerzonym, można wykorzystać symulator działający w czasie rzeczywistym zjawisk opisany w dalszej części artykułu. Podczas badań przekaźnika (z uaktywnioną funkcją blokady) za pomocą symulatora istotną rolę odgrywa wpływ (w czasie rzeczywistym) tego przekaźnika na stan zamodelowanego fragmentu SEE.

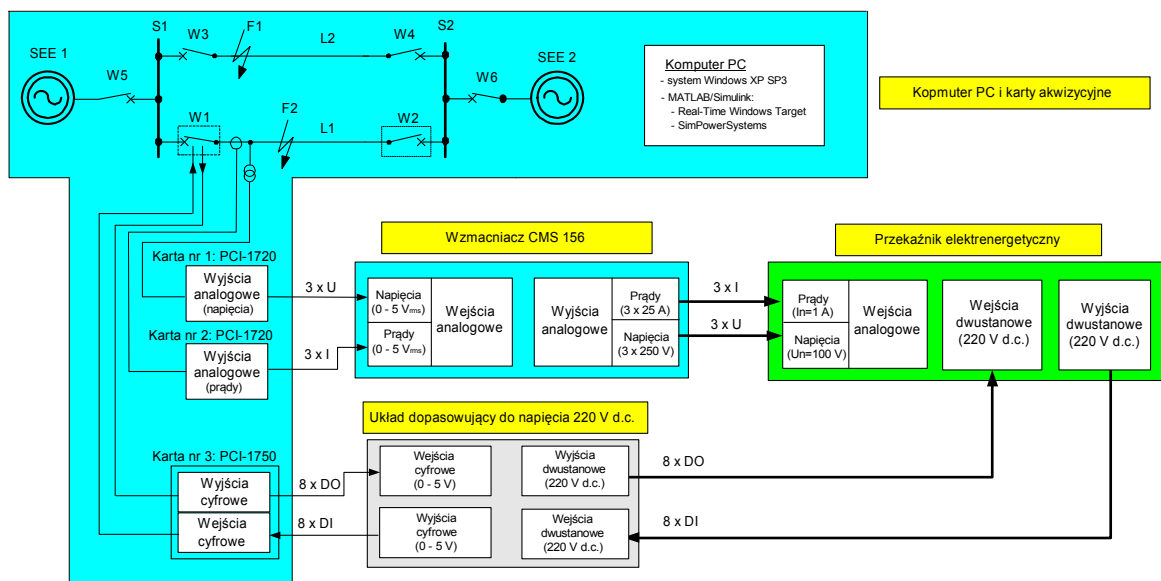
## Symulator do badania przekaźników elektroenergetycznych w czasie rzeczywistym zjawisk

W laboratorium Instytutu Elektroenergetyki PW powstał symulator IEn-RTS do badania przekaźników elektroenergetycznych w czasie rzeczywistym zjawisk. Koncepcję symulatora pracującego w ramach stanowiska laboratoryjnego opisano w [15].

Zadaniem symulatora jest symulacja różnych zjawisk (zwarcia, kołysania mocy, skoki napięcia, przełączenia w sieci itd.) w zamodelowanych fragmentach SEE za pomocą programu do symulacji stanów dynamicznych w SEE. Odpowiednie przebiegi prądów i napięć oraz informacje o położeniu biegunów wyłącznika z wybranego punktu przełącznikowego będące wynikiem symulacji (po odpowiednim przeskalowaniu) pojawiają się na wyjściach kart akwizycyjnych (zbierania danych). Po wzmożeniu sygnałów wyjściowych z kart do wartości odpowiadających stronom wtórnym przekładników prądowych i napięciowych (za pomocą wzmacniacza prądowo-napięciowego) i dopasowaniu (za pomocą układu dopasowującego do napięcia 220 V d.c.) sygnały analogowe i dwustanowe są doprowadzane do badanego przełącznika elektroenergetycznego. Zwrotnie z badanego przełącznika doprowadzane są sygnały dwustanowe (np. informujące o podaniu sygnału na otwarcie lub zamknięcie biegunów odpowiedniego wyłącznika) wpływające (przez układy

dopasowujące i kartę akwizycyjną) na stany łączników w zamodelowanym, za pomocą programu symulacyjnego, fragmencie SEE. Zmiany, będące wynikiem działania badanego przełącznika w konfiguracji zamodelowanego fragmentu SEE zachodzą w czasie rzeczywistym zamodelowanych zjawisk (stąd nazwa symulator działający w czasie rzeczywistym zjawisk).

Obecnie za pomocą zbudowanego symulatora badane są przełączniki elektroenergetyczne wykorzystujące sygnały analogowe (3 sygnały prądowe i 3 sygnały napięciowe) i dwustanowe z jednego końca linii. Ograniczenie to wynika z liczby zainstalowanych kart akwizycyjnych i możliwości wykorzystywanego wzmacniacza, który umożliwił wygenerowanie maksymalnie 3 sygnałów prądowych i 3 sygnałów napięciowych. Zbudowany symulator IEn-RTS składa się z części sprzętowej i programowej. Na rysunku 2 przedstawiono jego schemat blokowy.



Rys. 2. Schemat blokowy symulatora IEn-RTS

Część sprzętowa jest odpowiedzialna za umożliwienie przeprowadzenia symulacji zjawisk w zamodelowanym fragmencie SEE oraz fizyczne powiązanie między modelem fragmentu SEE z badanym przełącznikiem. Natomiast część programowa symulatora jest odpowiedzialna za symulację stanów dynamicznych w zamodelowanym fragmencie SEE oraz uwzględnienie wpływu badanego urządzenia na przebieg zjawisk zachodzących w modelu.

W skład części sprzętowej stanowiska z symulatorem IEn-RTS wchodzi: (a) komputer klasy PC; (b) karty akwizycyjne; (c) wzmacniacz sygnałów prądowych i napięciowych; (d) układ dopasowujący do napięcia 220 V d.c.; (e) badany przełącznik elektroenergetyczny.

Jako komputera PC użyto jednostkę wyposażoną w procesor Intel Pentium 4 CPU, 2,4 GHz, płytę główną firmy ASUSTeK Computer model P4P800SE, pamięć RAM 1.5 GB oraz dysk o pojemności 500 GB. Na komputerze zainstalowano system operacyjny Windows XP SP3.

W symulatorze zastosowano karty akwizycyjne firmy Advantech. Sygnały analogowe (prądy, napięcia) będące wynikiem symulacji fragmentu SEE pojawiają się na wyjściach dwóch kart akwizycyjnych typu PCI-1720. Sygnały cyfrowe (np. sygnały sterujące biegunami zamodelowanego wyłącznika oraz informujące o aktualnym położeniu biegunów wyłącznika) pojawiają się na wejściach i wyjściach karty PCI-1750.

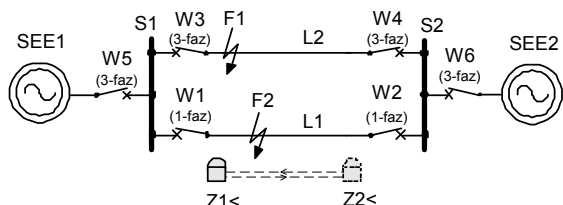
Do wzmacniania sygnałów analogowych pojawiających się na wyjściach kart PCI-1720 wykorzystany został wzmacniacz CMC 156 firmy OMICRON electronics. Natomiast do dopasowania sygnałów cyfrowych wejściowych i wyjściowych z karty PCI-1750 do napięcia 220 V d.c. wykorzystano zbudowany układ dopasowujący.

W skład części programowej symulatora wchodzi oprogramowanie MATLAB/Simulink v.2010b wraz z biblioteką Real-Time Windows Target (RTWT) i biblioteką SimPowerSystems. Aby można było uruchomić poprawne współdziałanie kart PCI-1720 i karty PCI-1750 z elementami biblioteki RTWT należało dodatkowo zainstalować kompilator języka C++ dostępny w zestawie programów Microsoft Visual Studio 2005.

Dokładna budowa symulatora opisana została w artykułach [16+18] i nie będzie w tym artykule przytaczana.

### Układy testowe

W programie MATLAB/Simulink wykonano kilka układów testowych [19]. Układy te w większości przypadków odwzorowują dwa źródła połączone ze sobą za pomocą dwóch linii przesyłowych. W zależności od potrzeb jednym ze źródeł może być źródło sterowane lub generator. Drugim źródłem jest zawsze źródło napięciowe (odwzorowujące sieć sztywną). Są to typowe układy generator-sieć sztywna.



Rys. 3. Schemat układów testowych zamodelowanych w programie MATLAB/Simulink

Ogólny schemat zamodelowanych układów testowych pokazano na rys. 3. Przedstawiony układ składa się z: (a) podsystemu SEE1 odwzorowanego za pomocą generatora (2. lub 5. rzędu) lub sterowanego źródła napięcia; (b) sieci sztywnej (SEE2) odwzorowanej za pomocą źródła napięciowego; (c) dwóch linii przesyłowych (L1, L2) o długościach po 200 km każda odwzorowanych za pomocą czwórników typu PI; (d) wyłączników trójfazowych W3, W4 sterowanych za pomocą elementów czasowych; (e) wyłączników jednofazowych W1, W2 sterowanych za pomocą badanego przełącznika odległościowego (Z1<); (f) zwarcioników F1, F2 pozwalających na odwzorowanie różnych sekwencji wystąpienia zwarcia.

Zbudowane układy testowe są proste (ich wielkość wynika z ograniczeń sprzętowych symulatora). Są one jednak na tyle uniwersalne, że można z ich wykorzystaniem badać rzeczywiste przełączniki elektroenergetyczne w bardzo szerokim zakresie w tym ich zachowanie się podczas kołysań mocy (a co za tym idzie badać funkcje odległościowe, funkcje blokad kołysaniowych) oraz zwarc trwałych, rozwijających się i przemijających (a co za tym idzie badać funkcje automatyki SPZ jedno- i trójfazowego, funkcje odległościowe, funkcje blokad kołysaniowych).

Podczas przebiegu symulacji w czasie rzeczywistym obserwowane są wartości chwilowe podstawowych sygnałów analogowych i dwustanowych w tym wartości prądów i napięć z punktu przełącznikowego (sygnały w linii L1 przy wyłączniku W1) stany wyłączników W1, W2. Wszystkie istotne sygnały analogowe i dwustanowe generowane podczas przebiegu symulacji zapisywane są do przestrzeni roboczej MATLABa (Workspace). Po zakończeniu symulacji w czasie rzeczywistym, sygnały te są poddawane dalszej „obróbce” w celu obliczenia m.in. wartości skutecznych (prądów i napięć), mocy (jedno- i trójfazowych), składowych symetrycznych, rezystancji i reaktancji.

### Opis badanego przełącznika

Do badań pokazujących poprawność działania zbudowanego symulatora IEn-RTS wykorzystano przełącznik D60 firmy General Electric [20]. Na rysunku 4 przedstawiono wygląd jego płyty czołowej. Przełącznik jest dedykowany do ochrony linii elektroenergetycznych przed skutkami zakłóceń. Jego podstawową funkcją jest funkcja zabezpieczenia odległościowego wyposażonego w 5 stref, przy czym każda strefa ma możliwość wyboru kierunku działania („do przodu”, „do tyłu”, „bezkierunkowo”).

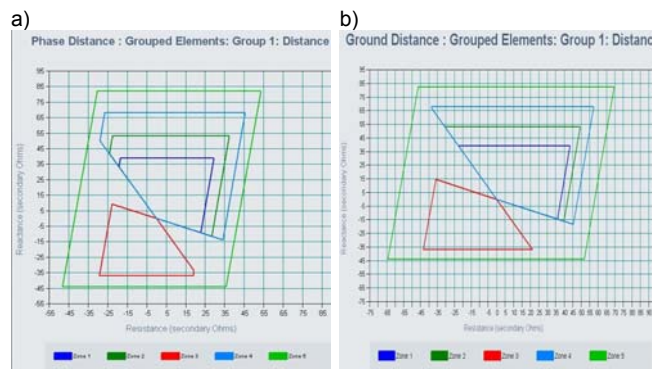
Do sprawdzenia poprawności działania symulatora wykorzystano funkcję zabezpieczenia odległościowego (Distance) i funkcję automatyki SPZ (AR) badanego przełącznika.

Na rysunku 5 pokazano nastawione charakterystyki funkcji odległościowej (odpowiedzialne za wykrywanie zwarc międzyfazowych i doziemnych) wykorzystywane podczas badań. Przedstawione na rysunku charakterystyki zaczerpnięto z programu EnerVista służącego do konfigurowania i nastawiania przełącznika D60. Charakterystyki te zostały odwzorowane w programie MATLAB w celu ułatwienia analizy zmian impedancji

ruchowej na płaszczyźnie  $X(R)$  podczas symulowanych zakłóceń.



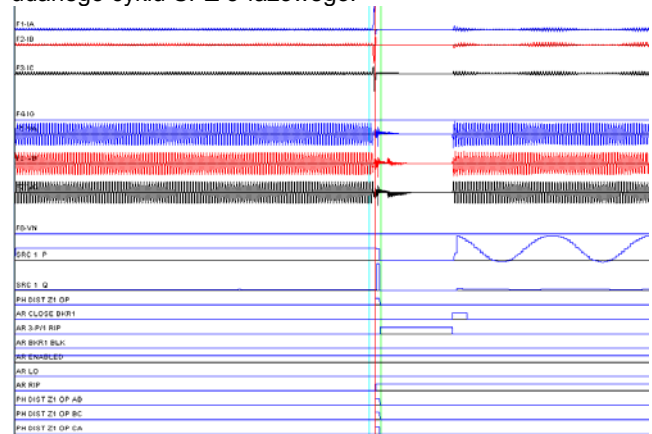
Rys. 4. Wygląd płyty czołowej przełącznika D60



Rys. 5. Nastawione charakterystyki funkcji odległościowej: a) dla zwarć międzyfazowych, b) dla zwarć doziemnych

### Wybrane wyniki badań

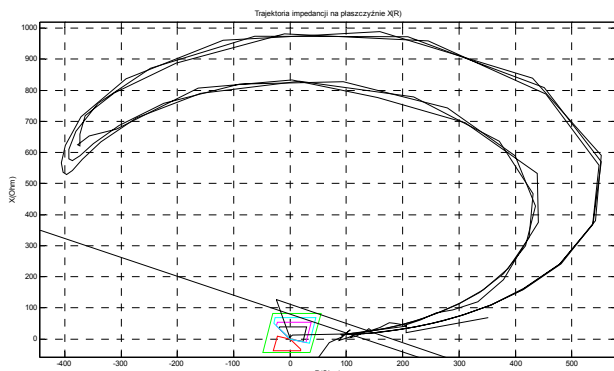
Badania zostały wykonane z wykorzystaniem układu testowego przedstawionego na rys. 3. W układzie tym jako źródło SEE1 wykorzystano model generatora 2. rzędu. Na czas testu uaktywniono funkcję zabezpieczenia odległościowego (Distance) oraz automatykę SPZ (AR). W czasie trwania symulacji linia L2 była załączona (wyłączniki W3 i W4 były zamknięte). W ramach testu zasymulowano zwarcie 3-fazowe metaliczne przemijające w linii L1 w odległości 20 km od szyn S1 wyeliminowane w ramach udanego cyklu SPZ 3-fazowego.



Rys. 6. Przebiegi zarejestrowane podczas testu przez wewnętrzny rejestrator zakłóceń przełącznika D60

**Przebieg testu.** Po wystąpieniu zwarcia przepływ prądu w obwodzie zwarcionym (linia L1) został przerwany po czasie około 15 ms (rys. 6) w wyniku zadziałania funkcji zabezpieczenia odległościowego z czasem własnym strefy Z1 (sygnał PH DIST Z1 OP). W wyniku wysłania sygnału na OW otwarty został wyłącznik W1, a następnie wyłącznik W2 (otwarcie wyłącznika W2 następuje 10 ms po otwarciu wyłącznika W1). Po wyeliminowaniu zwarcia (założono, że wyłączniki W1, W2 nie wprowadzają dodatkowych zwłok czasowych) pobudzona została automatyka SPZ (sygnały AR RIP, AR 3-P/1 RIP). Sygnał AR CLOSE BKR1 na zamknięcie wyłączników W1 i W2 został wysłany po ok. 503 ms od odzbudzenia się sygnału PH DIST Z1 OP

(czas przerwy bezprądowej dla pierwszego cyklu SPZ 3-fazowego nastawiono na 500 ms). Po zamknięciu wyłączników W1 i W2 pojawiły się synchroniczne kołysania mocy (sygnał SRC 1 P) o częstotliwości wynikającej z parametrów układu. Trajektorię impedancji zgodnej na płaszczyźnie  $X(R)$  w odniesieniu do stref działania funkcji odległościowej pokazano na rys. 7. Jak widać podczas kołysań synchronicznych, które wystąpiły po załączeniu linii L1, impedancja ruchowa nie wchodziła w obszar stref działania funkcji odległościowej.



Rys. 7. Trajektorie impedancji zgodnej na płaszczyźnie  $X(R)$  podczas testu przedstawione w programie MATLAB

### Podsumowanie

Funkcje blokad kołysaniowych są integralną częścią zabezpieczeń odległościowych i wspomagają pracę funkcji zabezpieczeń odległościowych podczas zakłóceń, jakimi są kołysania mocy. Funkcje te tak jak i inne funkcje zabezpieczeniowe, powinny być badane. Do badań blokad kołysaniowych można wykorzystać oprogramowanie, w które są wyposażone testery mikroprocesorowe. Takie podejście pozwala na sprawdzenie blokad w ograniczonym zakresie. Bardziej wyrafinowane metody sprawdzania blokad polegają na zamodelowaniu fragmentu SEE i zakłóceń w nim występujących w programie symulacyjnym, a następnie ich odtworzeniu za pomocą testerów mikroprocesorowych i ocenie poprawności jego działania na podstawie jego zachowania się. Metoda badania tego typu ma tę wadę, że nie można ocenić (w czasie rzeczywistym) wpływu zachowania się badanego przełącznika na konfigurację zamodelowanego układu, a co za tym idzie wpływu tej konfiguracji na dalsze zachowanie się przełącznika (np. podczas przerwy bezprądowej w cyklu SPZ). Wady tej nie ma badanie przełączników za pomocą symulatorów działających w czasie rzeczywistym zjawisk.

Opisany w artykule symulator IEn-RTS działający w czasie rzeczywistym zjawisk może być wykorzystany do badania pojedynczych przełączników elektroenergetycznych pracujących w małym fragmencie SEE. Symulator może zostać wykorzystywany m.in. do badania funkcji zabezpieczeniowych (w tym blokad kołysaniowych) w przypadkach w których zmiana konfiguracji zamodelowanego układu ma wpływ (w czasie rzeczywistym) na zachowanie się badanego przełącznika.

Otrzymywane wyniki badań przełącznika wykonane za pomocą zbudowanego symulatora są zadowalające. Wydaje się, że opisany w artykule symulator może być tańszą alternatywą dla symulatorów komercyjnych w przypadku badania pojedynczych przełączników wykonywanych w układach testowych odwzorowujących małe fragmenty SEE.

### LITERATURA

[1] Machowski J., Smolarczyk A., Brzeszczak L., Opracowanie zasad nastaw blokad przeciwkołysaniowych zabezpieczeń pod

kątem odbudowy systemu, Instytut Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej, praca badawczo-rozwojowa zlecona przez PSE-Operator SA, umowa nr SR/RB/IS/008/05, Warszawa 2005

- [2] Smolarczyk A., Nowe metody selektywnego rozróżniania kołysań mocy od zwarć oporowych, rozwijających się i innych złożonych zakłóceń zapewniające niezawodną pracę zabezpieczeń odległościowych, Projekt badawczy własny MNiSW, nr N N511 358234, Warszawa 2008–2010
- [3] CIGRE, Analysis and guidelines for testing numerical protection schemes, *CIGRE Report No. 159*, Working Group 34.10, August 2000
- [4] Smolarczyk A., Badanie przełączników elektroenergetycznych, *Przegląd Elektrotechniczny* 2004, nr 11
- [5] RTDS Technologies Inc., Real Time Digital Simulators, Dostęp on-line (03-2015): <http://www.rtds.com>
- [6] OPAL-RT Technologies, HYPERSIM, Dostęp on-line (03-2015): <http://www.opal-rt.com/new-product/hypersim-power-system-real-time-simulator>
- [7] Blázquez F. R., Rebollo E., Blázquez F., Platero C. A., „Real Time Power Plant Simulation Platform for Training on Electrical Protections and Automatic Voltage Regulators”, *12th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Wrocław, Poland, 5– 8 May 2013
- [8] Montoya L. A., Montenegro D., „Adaptive Protection Testbed Using Real time and Hardware-in-the-Loop Simulation”, *IEEE International Conference PowerTech 2013*, Grenoble, France, June 16-20, 2013
- [9] Smolarczyk A., Sytuacje i czynniki mogące powodować nieprawidłowe działanie blokad przeciwkołysaniowych, *Wiadomości Elektrotechniczne* 2010, nr 11, s. 7–12
- [10] Smolarczyk A., „Badanie blokad przeciwkołysaniowych zabezpieczeń odległościowych”, *XV Ogólnopolska Konferencja 2012 „Zabezpieczenia Przełącznikowe w Energetyce”*, Kocierz, 17–19.10.2012 r., ISBN 978-83-63226-08-4, str. 113 – 125
- [11] Smolarczyk A., „Testing methods of power swing blocking functions of distance protection relays” (Sposoby badania blokad kołysaniowych zabezpieczeń odległościowych), *Acta Energetica*, 4/13 (2012), rok 4, str. 124 - 132, ISSN 2080-7570
- [12] OMICRON electronics: Opis oprogramowania Test Universe, Dostęp on-line (03-2015): <http://www.omicron.at>
- [13] Steinhäuser F., Testing of the power swing blocking in distance relays, *OMICRON User Meeting*, Monachium 2000
- [14] Meinhardt P., Testing approaches for the power swing blocking function, *International Protection Testing Symposium, OMICRON electronics*, Vienna 2009
- [15] Smolarczyk A., „Nowoczesne stanowisko laboratoryjne do badania przełączników elektroenergetycznych w czasie rzeczywistym zjawisk”, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 88 NR 3a/2012
- [16] Smolarczyk A., Bartosiewicz E., Kowalik R., Closed-loop testing method for protective relays with use of MATLAB/Simulink software”, *The IET 12th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP) 2014*, 31 March - 3 April 2014, Copenhagen, Denmark, ISBN 978-1-84919-813-4, E-ISBN 978-1-84919-834-9, pp. 1-6
- [17] Smolarczyk A., Bartosiewicz E., Kowalik R., Rasolomampionona D.D., A Simple Real-Time Simulator for Protection Devices Test”, *EnergyCon 2014, IEEE International Energy Conference*, 13-16 May 2014, Dubrovnik, Croatia, ISBN: 978-1-4799-2448-6, pp. 837 - 843
- [18] Smolarczyk A., Bartosiewicz E., Kowalik R., The Real-Time Simulator for Protective Relays Testing Using MATLAB/Simulink Software”, *18th Power Systems Computation Conference (PSCC)*, 18-22 August 2014, Wrocław, ISBN: 978-83-935801-2-5
- [19] Kowalski S., *Badanie urządzeń zabezpieczeniowych za pomocą symulatora działającego w czasie rzeczywistym zjawisk*, Praca dyplomowa magisterska, Warszawa 2014
- [20] GE Multilin, *D60 Line Distance Relay, Instruction Manual, D60 Revision: 4.6x*, Manual P/N: 1601-0089-K1 (GEK-113007), GE Multilin 2005

**Autor:** dr inż. Adam Smolarczyk, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: [Adam.Smolarczyk@ien.pw.edu.pl](mailto:Adam.Smolarczyk@ien.pw.edu.pl)