

Programowy tester automatyki zabezpieczeniowej wykorzystujący Sampled Values

Streszczenie. W artykule opisano programowy, uruchamialny na komputerze klasy PC, tester urządzeń zabezpieczeniowych zgodny ze standardem IEC61850. Do wysyłania danych będących próbkami sygnałów analogowych prądów i napięć wykorzystano łącze Ethernet, a same dane zostały umieszczone w ramkach SV (ang. Sampled Values). Celem artykułu jest ukazanie możliwości oraz sposobu testowania nowych urządzeń elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej posiadających cyfrowe wejścia pomiarowe pozwalające na odbiór danych SV, za pomocą testerów będących programami uruchamianymi na komputerze PC. Przeprowadzone badania wykazały prawidłowe zachowanie przekaźników elektroenergetycznych, zasilanych strumieniem danych syntezowanym przy pomocy programowego testera. Nie zanotowano różnic w stosunku do konwencjonalnych, komercyjnych rozwiązań, a sam tester programowy jest przezroczysty z punktu widzenia testowanych urządzeń.

Abstract. This paper describes IEC61850 compliant protective device software tester, that can be run on a PC grade machine. Tester delivers current and voltage samples to the protection device by the means of Sampled Values data stream on the top of Ethernet link. The series of tests carried out with the use of entitled software are being presented. Analysis of those results proves proper operation of power protection devices fed with data stream synthesized by software tester. No differences in operation were observed in comparison to conventional solutions and tester itself is transparent from tested device point of view. **IEC61850 compliant protective device software tester using Sampled Values data stream**

Słowa kluczowe: IEC61850, Sampled Values, testowanie zabezpieczeń, układy automatyki zabezpieczeniowej.

Keywords: IEC61850, Sampled Values, testing of power protection, power protection systems.

Wstęp

Wykrywanie i eliminacja zwarć w systemie elektroenergetycznym jest głównym zadaniem elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej, kluczowym z punktu widzenia stabilności i niezawodności systemu elektroenergetycznego. Fakt eliminacji zakłócenia w dużej mierze zależy między innymi od pewności działania urządzenia zabezpieczeniowego. Z tego powodu wiele uwagi przykładają się do testowania algorytmów pomiarowych i zabezpieczeniowych zaimplementowanych w zabezpieczeniach, jak również do testów logik i połączeń wykonywanych w czasie uruchomienia terminali zabezpieczeniowych w docelowym obiekcie.

Aktualne rozwiązania wykorzystujące standard IEC 61850 [3], [4] pozwalają na wprowadzenie zabezpieczeń operujących na pomiarach i sygnałach cyfrowych w miejsce wartości analogowych jak również komunikatów GOOSE w zastępstwie sygnałów dwustanowych w formie połączeń drutowych [11]. W nowym typie konstrukcji zabezpieczeń, dane dotyczące pomiarów prądów i napięć trafiają do przekaźnika w formie cyfrowej bezpośrednio poprzez łącze komunikacyjne np. światłowodowe. Urządzenia wykorzystujące cyfrowe wartości pomiarowe są dostępne na rynku od kilku lat, a od niedawna w KSE pojawiają się ich pierwsze wdrożenia.

Obecnie dostępne na rynku testery, służące do weryfikacji działania urządzeń automatyki elektroenergetycznej wykorzystujących IEC61850 SV, są realizowane w postaci przystawek lub rozszerzeń zgodnych ze standardem IEC61850 do już istniejących rozwiązań (np. OMICRON) bądź samodzielnych testerów. W przypadku zabezpieczeń posiadających jedynie cyfrowe wejścia pomiarowe, możliwe jest ich testowanie za pomocą komputera PC wyposażonego w kartę sieciową i odpowiednie oprogramowanie. Podejście takie pozwala na znaczne obniżenie kosztów ponoszonych na zakup urządzeń testowych oraz uproszczenie samego układu testowego.

W artykule przedstawiono wyniki testów tego rodzaju oprogramowania, uruchomionego na komputerze klasy PC działającego pod kontrolą systemu operacyjnego Linux. Oprogramowanie testowe pozwala na zasyмуляwanie szeregu pomiarów – prądów i napięć oraz sygnałów dwustanowych w postaci zwrotnych wiadomości GOOSE

(subscriber) niosących informację o stanie testowanego zabezpieczenia. Opracowane oprogramowanie pozwala na następujące operacje:

- ustawienie kątów i modułów 4 prądów i 4 napięć fazowych,
- definicję następujących po sobie stanów (przedzwarcioowy, zwarcioowy, pozawarcioowy),
- włączenie wyższych harmonicznych do dowolnych kanałów pomiarowych o dowolnej zawartości i przesunięciu kątowym,
- pomiar czasu działania zabezpieczenia na podstawie odbieranych wiadomości GOOSE.

W szerszej perspektywie czasowej, możliwe jest wykonanie oprogramowania zastępującego funkcjonalnie urządzenia typu RTDS (Real Time Power System Simulation), które będzie pobierało próbki prądów i napięć w czasie rzeczywistym z wybranego oprogramowania symulacyjnego.

Stanowisko testowe

Do przeprowadzenia badań programowego testera posłużono się następującymi urządzeniami:

- Urządzenie zabezpieczeniowe MiCOM P446, wersja oprogramowania: P4463C6F6M0720M,
- Przełącznik Alstom REASON T1000,
- Merging Unit Alstom Reason MU320,
- Komputer PC pracujący pod kontrolą systemu operacyjnego Linux,
- Tester mikroprocesorowy CMC156.

Do badań wykorzystano trzy układy testowe:

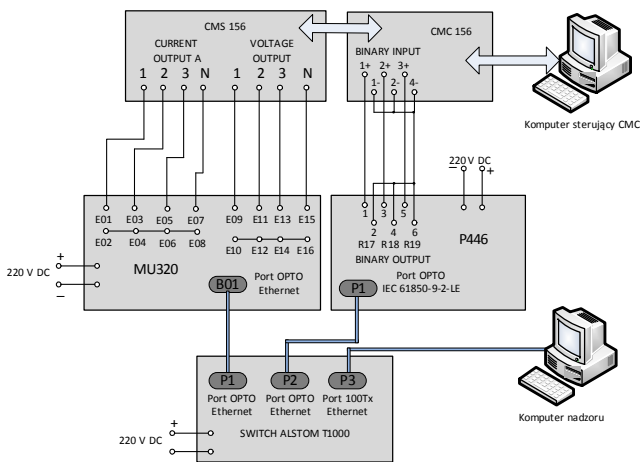
- układ 1, w którym sygnały analogowe napięć i prądów generowane przez tester CMC156 trafiały do urządzenia MU320, gdzie podlegały próbkowaniu i w postaci danych SV były przesyłane łączem Ethernet do urządzenia P446, z którego zwrotny elektryczny sygnał dwustanowy był wprowadzany na wejście dwustanowe CMC156 (rys. 1),

- układ 2, w którym sygnały analogowe napięć i prądów generowane przez tester CMC156 trafiały do urządzenia MU320, gdzie podlegały próbkowaniu i w postaci danych SV były przesyłane łączem Ethernet do urządzenia P446, z którego zwrotnie do urządzenia MU320 przesyłane były tym samym łączem komunikaty GOOSE, na podstawie których urządzenie MU320 sterowało swoimi

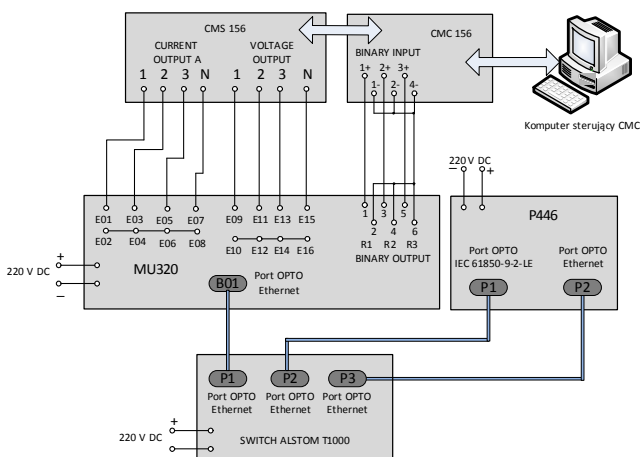
wyjściami dwustanowymi przekazującymi sygnały dwustanowe na wejścia testera CMC156 (rys. 2),

- układ 3, w którym dane SV zawierające próbki sygnałów napięć i prądów były przesyłane przez komputer PC z programu testera do urządzenia P446, z którego zwrótnie do komputera PC i programu testera przesyłany był komunikat GOOSE (rys. 3).

Różnią się one sposobem dostarczania sygnałów pomiarowych dla urządzenia zabezpieczeniowego oraz sposobem dostarczenia zwrotnej informacji o zadziałaniu zabezpieczenia (sygnału dwustanowego).



Rys. 1. Układ testowy wykorzystujący CMC156, MU320 i sygnał dwustanowy w postaci elektrycznej od zabezpieczenia P446



Rys. 2. Układ testowy wykorzystujący CMC156, MU320 i sygnał dwustanowy w postaci elektrycznej od urządzenia MU320 oraz komunikat GOOSE pomiędzy urządzeniami P446 i MU320

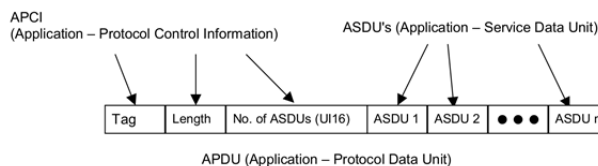
Rys. 3. Układ testowy wykorzystujący komputer PC wraz z aplikacją symulatora oraz komunikat GOOSE pomiędzy urządzeniami P446 i komputerem PC

Dwa pierwsze układy testowe (rys. 1 i rys. 2) pozwoliły na uzyskanie danych będących odniesieniem dla wyników uzyskanych podczas badań z wykorzystaniem testera programowego. Obydwa pozwalają na zadawanie za pomocą CMC156 ustalonych wartości pomiarowych napięć i prądów, które po wprowadzeniu na wejścia analogowe urządzenia Merging Unit MU320 są próbkowane, a następnie przesłane do sieci Ethernet w postaci strumieni ramek SV. Sieć Ethernet wykonano z wykorzystaniem przełącznika Ethernet (ang. Switch) Alstom Reason T1000 dedykowanego dla zastosowań zabezpieczeniowych. Ma on zarówno wejścia elektryczne jak i optyczne. W pierwszym układzie (rys. 1) wyprowadzono sygnał dwustanowy świadczący o zadziałaniu, bezpośrednio z przełącznika P446 na wejście dwustanowe testera CMC. Drugi z układów (rys. 2) bazuje na przesłaniu cyfrowego komunikatu GOOSE, zawierającego sygnał na wyłączenie od przełącznika P446 do urządzenia MU320. Do tego celu wykorzystano dodatkowy port optyczny w urządzeniu P446. Urządzenie Merging Unit zostało skonfigurowane w taki sposób, że po otrzymaniu sygnału o wartości logicznej TRUE w komunikacie GOOSE, przekazuje go dalej w postaci elektrycznego sygnału dwustanowego na wejście dwustanowe wymuszalnika CMC156. Jednym słowem układ dokłada dodatkową warstwę komunikacyjną na linii urządzenie zabezpieczeniowe – Merging Unit – tester. Podejście to obrazuje pełniejsze wykorzystanie mechanizmów oferowanych przez standard IEC61850 i jest jednocześnie jednym z przykładów implementacji rozwiązań cyfrowych w stacji elektroenergetycznej. Należy zauważyć, że układy tego typu będą prawdopodobnie w najbliższym czasie najczęściej stosowanymi w stacjach elektroenergetycznych.

Trzeci układ testowy (rys. 3) posłużył do sprawdzenia funkcjonalności testera programowego. Składa się on z komputera PC podłączonego do przełącznika Ethernet T1000 za pomocą przewodu typu skrętka miedziana CAT5 oraz samego urządzenia zabezpieczeniowego P446 przyłączonego do wspomnianego przełącznika Ethernet za pomocą łącza optycznego. Komunikacja w układzie odbywa się w dwie strony – komputer PC wysyła do sieci ramki SV, które są czytane przez urządzenie P446. Natomiast przełącznik P446 wysyła do sieci komunikaty GOOSE czytane przez komputer PC. Przesyłane komunikaty GOOSE zawierają informacje o wyłączeniu w trzech fazach (CB Trip). Układ ten jest zdecydowanie prostszy od dwóch pierwszych i opiera się w całości na rozwiązaniach cyfrowych zgodnych ze standardem IEC61850.

Implementacja mechanizmu przesyłania ramek Sampled Values

Testowane urządzenie zabezpieczeniowe MiCOM P446, zostało wyposażone w moduł komunikacyjny IEC61850-9-2-LE, pozwalający na odczyt przesyłanych do zabezpieczenia danych cyfrowych w postaci próbek sygnałów analogowych napięć i prądów. Transfer danych realizowano za pomocą ramek Sampled Values bezpośrednio w warstwie sieciowej Ethernet. Dokładną specyfikację mechanizmu Sampled Values zaczerpnięto z normy IEC61850 (część 9-2).



Rys. 4. Budowa jednostki APDU (Application Protocol Data Unit) 0

Ramka danych Sampled Values złożona jest z jednostek APDU (ang. Application Protocol Data Unit), a ta z kolei może składać się z jednej lub więcej jednostek ASDU (ang. Application Service Data Unit). Budowę jednostki APDU przedstawiono na rys 4.

Jednostki ASDU zawierają w swoim wnętrzu szereg uporządkowanych danych. Znaczenie i kolejność danych wchodzących w skład wspomnianej jednostki definiowana jest za pomocą zbioru danych – DataSet. Pojedyncza ramka Sampled Values zawierać może szereg wartości odpowiadających wspólnej chwili czasowej – chwili próbkowania, bądź zawierać zestaw próbek z następujących po sobie chwil czasowych. Zgodnie z zaleceniami przedstawionymi w [4] upakowanie danych wewnątrz jednostki ASDU może zostać zrealizowane na dwa sposoby. Do celów zabezpieczeniowych tworzony jest strumień danych składający się z ramek zawierających pojedynczą jednostkę ASDU z wartościami próbek pochodzących z ośmiu kanałów analogowych – 4 prądy i 4 napięcia. Do celów pomiarowych strumień danych składa się z ramek zawierających 8 jednostek ASDU – każda z osobnych następujących po sobie chwil czasowych. W strumieniu danych zabezpieczeniowych przesyłanych jest 80 próbek na okres podstawowej harmonicznej sygnału (dla 50Hz - 20ms), co odpowiada częstotliwości próbkowania 4 kHz. W strumieniu danych pomiarowych liczba próbek wynosi 256 na okres, co odpowiada częstotliwości próbkowania 12,8 kHz. Tak jak wspomniano ramka pomiarowa zawiera 8 jednostek ASDU – a więc zestaw próbek z 8 chwil czasowych. Z tego powodu ramka strumienia pomiarowego pomimo wyższej częstotliwości próbkowania, wysyłana jest rzadziej od ramki strumienia zabezpieczeniowego. Jest to działanie intuicyjne – strumień zabezpieczeniowy zawiera pojedyncze próbki w celu dostarczenia ich w jak najkrótszym czasie, natomiast strumień pomiarowy sprowadza 8 próbek do jednej ramki danych, a następnie wysyła je w dłuższych interwałach czasowych, charakteryzując się jednocześnie wyższą częstotliwością próbkowania.

Próbki danych są 32 bitowymi liczbami całkowitymi. Po każdej z próbek umieszczany jest odpowiadający jej atrybut danych – q (quality). Ułożenie danych wewnątrz jednostki ASDU przedstawiono na rys. 5.

I1	q	I2	q	I3	q	I0	q	V1	q	V2	q	V3	q	V0	q
----	---	----	---	----	---	----	---	----	---	----	---	----	---	----	---

Rys. 5. Zawartość jednostki ASDU (Application Service Data Unit)

Strumień danych rozsyłany jest w trybie multicast, a więc jest dostarczany do wszystkich urządzeń znajdujących się w sieci. Filtracja danych następuje na poziomie interfejsu sieciowego odbiornika i sprowadza się do nasłuchiwanie danego adresu rozgłoszeniowego MAC. W celu kierowania strumienia danych tylko do określonych węzłów w sieci, konieczna jest konfiguracja przełącznika Ethernet poprzez wydzielenie wirtualnych sieci LAN (VLAN). Wiąże się to z przypisaniem ramek SV do konkretnej sieci wirtualnej VLAN, przy czym należy zauważyć, że w takim przypadku nie będą one docierały do pozostałych sieci. W ten sposób możliwe jest wydzielenie za pomocą pojedynczego przełącznika Ethernet szyny procesowej, w której rozgłaszane będą pomiary SV oraz szyny stacyjnej, wewnątrz której przesyłane będą komunikaty GOOSE.

Sposób działania oraz testy układów opartych na szynie procesowej zostały przedstawione w [6], [7], [8].

Wyniki badań

Możliwość wykorzystania programowego testera w badaniach urządzeń zabezpieczeniowych wykorzystujących dane Sampled Values, musi zostać poprzedzona

określeniem jego właściwości, które najlepiej jest wykonać w badaniach porównawczych odnoszących się do powszechnie stosowanych testerów. Badania przydatności opracowanego testera programowego wykonano w kilku krokach:

- Krok 1 – sprawdzenie poprawności generowania sygnałów sinusoidalnych napięć i prądów.

W czasie tych testów porównano przebiegi oraz określono dokładność zarejestrowanych przez przełącznik P446 sygnałów uzyskiwanych z testera CMC 156 + MU320 oraz testera programowego. Testy dotyczyły sygnałów sinusoidalnych o częstotliwości 50 Hz.

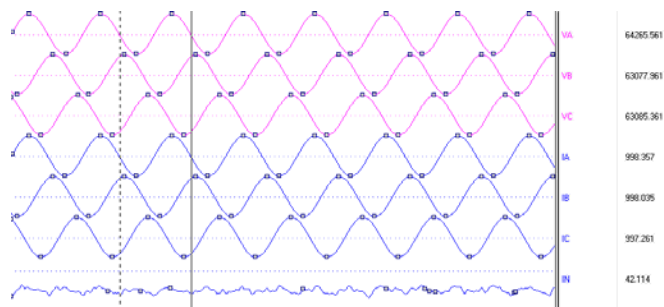
- Krok 2 - sprawdzenie możliwości generowania sygnałów o określonej zawartości harmonicznych.

W czasie tych testów porównano przebiegi oraz określono dokładność zarejestrowanych przez przełącznik P446 sygnałów uzyskiwanych z testera CMC 156 + MU320 oraz testera programowego. Testy dotyczyły sygnałów sinusoidalnych o częstotliwości 50 Hz zniekształconych odpowiednio dobranymi harmonicznymi. Dla każdego typu wymuszenia określono zawartość harmonicznych w przebiegach zarejestrowanych w przełączniku P446.

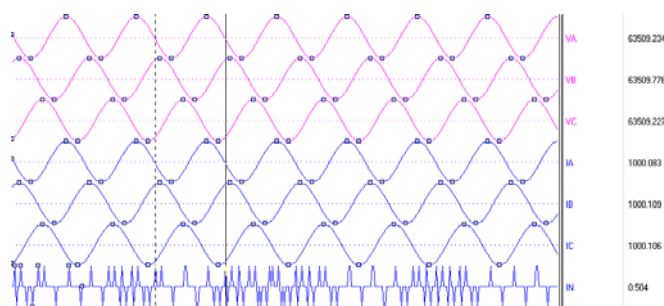
- Krok 3 – symulacja zakłóceń.

W czasie tych testów porównano czasy działania zabezpieczenia odległościowego pobudzanego z testera CMC 156 + MU320 oraz bezpośrednio z programowego testera. Określono czasy własne działania funkcji odległościowej dla kilku wariantów przesyłania sygnału na wyłączenie.

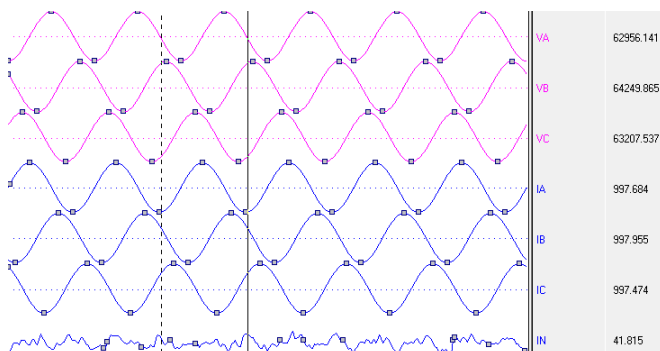
Pierwszy z testów polegał na wymuszeniu klasycznych zestawów sygnałów sinusoidalnych o częstotliwości 50 Hz, kolejno dla przesunięć kątowych 0° i -90°. Wartości prądów i napięć ustawiono na parametry znamionowe przełącznika P446 – napięcie fazowe równe 63,51 kV oraz prądy fazowe równe 1 kA. Na rys. 6 i rys. 7 przedstawiono rejestracje zakłóceń pobrane z urządzenia P446, przy 2 źródłach w postaci sygnałów analogowych syntezowanych i mierzonych przez CMC156 + MU320 oraz danych SV przesyłanych z komputera PC i programu testera dla przypadku przesunięcia kątowego równego 0°.



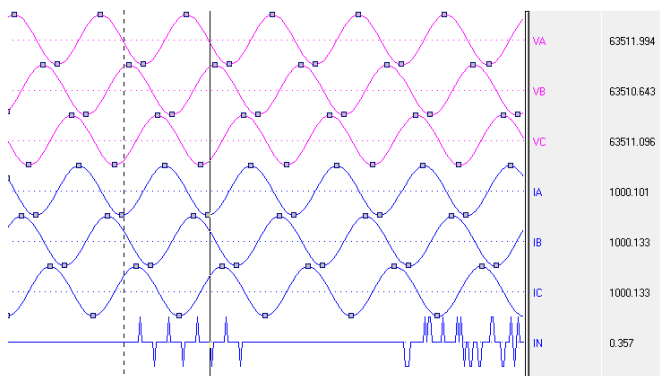
Rys. 6. Rejestracja dla źródła CMC + MU320, przesunięcie kątowe 0°



Rys. 7. Rejestracja dla źródła PC + program testera, przesunięcie kątowe 0°



Rys. 8. Rejestracja dla źródła CMC + MU320, przesunięcie kątowe -90°



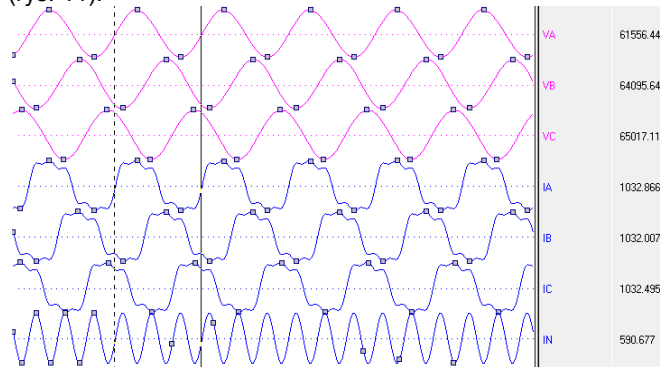
Rys. 9. Rejestracja dla źródła PC + program testera, przesunięcie kątowe -90°

Rysunki 8 i 9 przedstawiają rejestracje dla przypadku przesunięcia kątowego równego -90° . Uzyskane wyniki dla testera programowego i CMC są niemal identyczne, co potwierdza jego poprawne działanie. W wynikach dla źródła CMC156 + MU320, pojawiają się niewielkie odchyłki pomierzonych wartości od sygnałów znamionowych, które wynikają z niedokładności układów pomiarowych. Dla źródła w postaci symulatora wartości te są dokładniejsze, gdyż są generowane programowo.

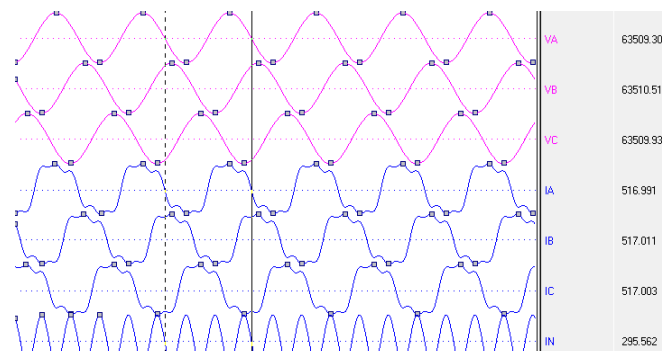
W kolejnym teście podano do zabezpieczenia zniekształcone sygnały prądowe o następujących zawartościach wyższych harmonicznych w stosunku do składowej podstawowej:

- 2 harmoniczna – 10%,
- 3 harmoniczna – 20%,
- 5 harmoniczna – 15%.

Uzyskane wyniki zostały zaprezentowane na rys. 10 oraz rys. 11. Są to rejestracje wykonane przez przełącznik P446 wyzwolone odpowiednio przy pomiarach sygnałów analogowych CMC156 + MU320 (rys. 10) oraz pomiarach odzwierciedlających dane przesyłane w ramach SV z komputer PC z działającym programowym symulatorem (rys. 11).



Rys. 10. Rejestracja dla źródła CMC + MU320, zniekształcony sygnał prądowy



Rys. 11. Rejestracja dla źródła PC + program testera, zniekształcony sygnał prądowy

Wyniki testu dla obydwu źródeł zostały zebrane i przedstawione w tabeli 1.

Zawartości wyższych harmonicznych w prądzie są zgodne z zadanymi i identyczne dla obydwu testowanych źródeł sygnałów. Potwierdza to poprawność zaimplementowanej w programowym symulatorze funkcji dodawania wyższych harmonicznych do składowej podstawowej.

Tabela 1. Wyniki testu generowania sygnałów zniekształconych

Rząd harm.	Wartość Zadana	Źródło CMC156 + MU320	Źródło Tester programowy
2	10%	9,9%	10%
3	20%	19,7%	19,7%
5	15%	14,3%	14,3%

Ostatni etap testów dotyczył sprawdzenia działania funkcji odległościowej zabezpieczenia P446 przy wymuszeniu sygnałów z CMC156 + MU320 oraz przy wymuszeniu sygnałów bezpośrednio z programowego testera.

Wykonano testy dla zwarć trójfazowych w sześciu punktach charakterystyki mhO przełącznika P446. Podczas testów przy użyciu CMC + MU320 posłużono się modulem Advanced Distance dostarczanym razem z oprogramowaniem Test Universe v. 3.01. W celu odwzorowania identycznych stanów w aplikacji programowego testera, wymuszano identyczne zestawy napięć i prądów odczytane w oprogramowaniu Advanced Distance. Zestawienie punktów testowych przedstawiono na płaszczyźnie impedancyjnej (rys. 12). Natomiast w tabeli 2 pokazano konieczne do wymuszenia wartości prądów i napięć odpowiadające poszczególnym punktom pomiarowym.

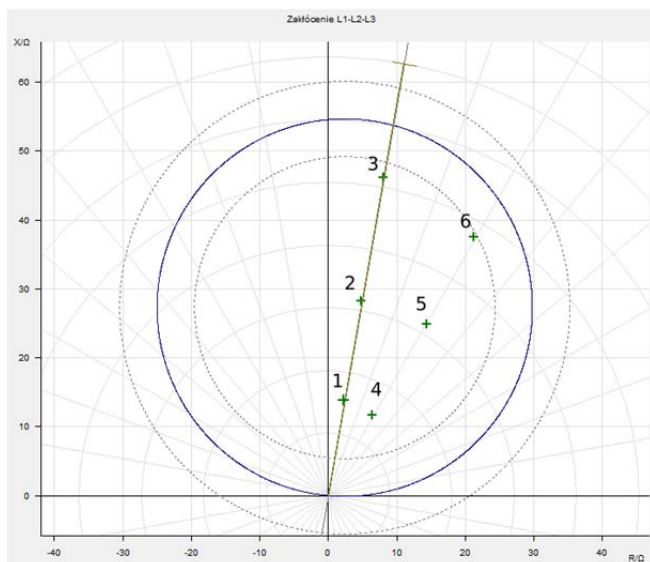
W tabeli 3 przedstawiono zestawienie wyników uzyskanych w każdym z punktów testowych przy wykorzystaniu wymuszenia w postaci CMC156 i urządzenia MU320 jak również testera programowego. Czasy działania dla dwóch pierwszych kolumn (1, 2) zostały odczytane z rejestracji zakłóceń zapisanych w przełączniku P446 – są to czasy od chwili narastania prądu zwarciovego do chwili pojawienia się wewnętrznego sygnału wyłączającego (CB Trip Ln). Dwie następne kolumny (3, 4) przedstawiają wyniki odczytane poprzez oprogramowanie Advanced Distance – kolejno dla układu pomiarowego przedstawionego na rys. 1 i rys. 2. Ostatnia kolumna tabeli (5) przedstawia czasy uzyskane przy wykorzystaniu układu przedstawionego na rys. 3, czyli z wykorzystaniem programu testera wysyłającego dane SV i zwrotnego komunikatu GOOSE przesyłanego z zabezpieczenia do komputera PC - zgodnie z układem testowym przedstawionym w [13].

Tabela 1. Zestawienie napięć i prądów odpowiadających poszczególnym punktom testowym

	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3	Punkt 4	Punkt 5	Punkt 6
I_A [A]	$2 e^{-80,82^\circ}$	$2 e^{-80,44^\circ}$	$1,23 e^{-80,15^\circ}$	$2 e^{-81,30^\circ}$	$2 e^{-60,03^\circ}$	$1,341 e^{-60,52^\circ}$
I_B [A]	$2 e^{-200,82^\circ}$	$2 e^{-200,44^\circ}$	$1,23 e^{-200,15^\circ}$	$2 e^{-181,30^\circ}$	$2 e^{-180,03^\circ}$	$1,341 e^{-180,52^\circ}$
I_C [A]	$2 e^{39,48^\circ}$	$2 e^{39,56^\circ}$	$1,23 e^{39,85^\circ}$	$2 e^{58,70^\circ}$	$2 e^{59,97^\circ}$	$1,341 e^{59,48^\circ}$
U_A [V]	$28,02 e^{0^\circ}$	$57,73 e^{0^\circ}$	$57,73 e^{0^\circ}$	$26,6 e^{0^\circ}$	$57,3 e^{0^\circ}$	$57,73 e^{0^\circ}$
U_B [V]	$28,02 e^{-120^\circ}$	$57,73 e^{-120^\circ}$	$57,73 e^{-120^\circ}$	$26,6 e^{-120^\circ}$	$57,3 e^{-120^\circ}$	$57,73 e^{-120^\circ}$
U_C [V]	$28,02 e^{120^\circ}$	$57,73 e^{120^\circ}$	$57,73 e^{120^\circ}$	$26,6 e^{120^\circ}$	$57,3 e^{120^\circ}$	$57,73 e^{120^\circ}$

Tabela 2. Zestawienie wyników badań funkcji odległościowej dla różnych układów testowych

	1	2	3	4	5
	CMC156 + MU320 sygnał wewnętrzny	PC + symulator sygnał wewnętrzny	CMC156 + MU320 sygnał elektryczny (układ rys. 1)	CMC156 + MU320 sygnał elektryczny i komunikat GOOSE (układ rys. 2)	PC + symulator komunikat GOOSE (układ rys. 3)
Punkt 1	11,23 ms	11,67 ms	18,30 ms	31,90 ms	22,89 ms
Punkt 2	10,82 ms	9,59 ms	18,30 ms	30,80 ms	21,01 ms
Punkt 3	11,36 ms	12,51 ms	19,80 ms	32,30 ms	18,71 ms
Punkt 4	12,09 ms	10,42 ms	20,20 ms	31,40 ms	20,93 ms
Punkt 5	19,97 ms	10,01 ms	27,90 ms	37,60 ms	20,03 ms
Punkt 6	15,49 ms	23,76 ms	26,20 ms	38,80 ms	32,13 ms



Rys. 12. Punkty testowe na płaszczyźnie impedancyjnej (charakterystyka mhO)

Czasy zadziałania funkcji odległościowej są najkrótsze dla przypadku obliczenia ich z rejestracji na podstawie sygnałów wewnętrznych urządzenia zabezpieczeniowego. Czasy te są pozbawione narzutów nakładanych przez przełączniki wyjściowe czy dodatkowe algorytmy i logiki urządzenia. Wyniki uzyskane podczas testów wykonywanych za pośrednictwem komputera PC i symulatora programowego są porównywalne do wyników uzyskanych w tradycyjnych testach z wykorzystaniem CMC i urządzenia MU320. Uzyskane wyniki wskazują, że zaproponowane rozwiązanie oparte na programowej symulacji przebiegów zwarciovych pozwala na uzyskiwanie realnych czasów działania zabezpieczeń. Badany przełącznik zachowywał się identycznie dla przebiegów generowanych przez tester CMC156 jak i programowy symulator, co jednoznacznie wskazuje, że działanie stworzonej aplikacji jest poprawne.

Czasy działania uzyskane podczas badań w układzie testowym przedstawionym na rys. 2 są najdłuższe. W układzie tym informacja o zadziałaniu przełącznika P446 trafiała w formie komunikatu GOOSE do urządzenia MU320, które na podstawie otrzymanej informacji zamykało swoje dedykowane wyjście dwustanowe. Widoczne

zwiększenie czasu działania w tym przypadku, wynikało najprawdopodobniej z dodatkowego czasu potrzebnego urządzeniu MU320 na: odebranie komunikatu GOOSE, sterowanie cewką przekaźnika i uzyskanie reakcji (zamknięcia) styków.

Czasy działania uzyskane w testach w układzie testowym wykorzystującym CMC i MU320 z wykorzystaniem tylko sygnału wyłączającego bezpośrednio wyprowadzonego z przełącznika P446 do CMC oraz te uzyskane podczas testów w układzie wykorzystującym tester i komunikaty GOOSE są w dużej mierze porównywalne. Obserwowane różnice wynikają z rozbieżności działania przełącznika P446 oraz opóźnień wprowadzanych przez zwrotne wiadomości GOOSE – a dokładniej czas ich przetwarzania wewnątrz samego przełącznika [12]

Wnioski

Wykonane testy dowodzą, że opracowany tester jest w pełni funkcjonalnym programowym symulatorem przekazującym wartości pomiarowe w postaci cyfrowej, które są właściwie interpretowane przez urządzenia zabezpieczeniowe firmy Alstom/GE wykorzystywane podczas badań. Potwierdzone zostały pozytywne cechy testera pozwalające na właściwe kształtowanie przebiegów wymuszanych prądów i napięć. Na podstawie analizy ramek SV należy przypuszczać, że tester będzie poprawnie współpracował również z urządzeniami innych firm (np. ABB, Schenider, Siemens).

Należy podkreślić, że w trakcie testów sprawdzono nie tylko możliwość wymuszania sygnałów o stałej amplitudzie składowej podstawowej i różnej zawartości harmonicznych, ale także przebiegów zwarciovych zawartych w plikach o formacie COMTRADE pozwalających na realizację testów opisanych w [9]. Sprawdzono również reakcję rzeczywistego zabezpieczenia P446 na symulowane sygnały potwierdzając jego poprawne działanie.

Ważną cechą wykonanego symulatora jest możliwość wykorzystania do przekazywania sygnałów dwustanowych (np. sygnałów wyłączających) komunikatów GOOSE. W związku z tym tester umożliwia przetestowanie zabezpieczeń wykorzystując do tego celu jedynie łącze sieci Ethernet (wysyłając do sprawdzanego urządzenia zabezpieczeniowego ramki SV zawierające informacje o sygnałach analogowych prądów i napięć oraz odbierając z niego komunikaty GOOSE niosące informacje o działaniu

na wyłączenie). Co istotne tester ma możliwość nie tylko odbierania ale również wysyłania tych komunikatów, co pozwala na opracowywanie bardziej skomplikowanych scenariuszy testów.

Uzyskane za pomocą programowego testera wyniki są zbieżne z rezultatami testów opisanymi w [10], co dodatkowo potwierdza poprawność działania opracowanego testera.

Należy zaznaczyć, że tester opracowany w IEN PW może być rozwijany, a w przyszłości planowane jest poszerzenie jego funkcjonalności o kolejne elementy.

Autorzy: mgr. inż. Karol Kurek, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: karol.kurek@ien.pw.edu.pl; dr inż. Marcin Januszewski, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: marcin.januszewski@ien.pw.edu.pl; dr inż. Ryszard Kowalik, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: ryszard.kowalik@ien.pw.edu.pl

LITERATURA

- [1] MiCOMho P446 Technical Manual Fast Multifunction Distance Protection Relay Platform Hardware Version: M Platform Software Version: 71 *Publication Reference: P446/EN/TM/E* <http://gegridsolutions.com>
- [2] International standard IEC61850, „Communication networks and systems in substations - Part 9-2: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Sampled values over ISO/IEC 8802-3”
- [3] Integrated Merging Unit MU320 - Technical Manual, *Publication Reference: MU320-TM-EN-6*
- [4] „Implementation Guideline for Digital Interface to Instrument Transformers using IEC 61850 9 2”, *UCA International Users Group*
- [5] Honeth N., Khurram Z. A., Zhao P. and Nordström L., "Development of the IEC 61850–9–2 software merging unit IED test and training platform," *2013 IEEE Grenoble Conference, Grenoble, 2013, pp. 1-6.*
- [6] Kowalik R., Rasolomampionona D., Januszewski M., "Laboratory testing of process bus equipment and protection functions in accordance with IEC 61850 standard Part II: Tests of protection functions in a LAN-based environment", 2018, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRICAL POWER & ENERGY SYSTEMS*, ISSN: 0142-0615, vol. 94, pp 405-414
- [7] Kowalik R., Rasolomampionona D., Januszewski M., "Laboratory testing of process bus equipment and protection functions in accordance with IEC 61850 standard. Part I: Electrical arrangement and basic protection functions tests", 2018, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRICAL POWER & ENERGY SYSTEMS*, ISSN: 0142-0615, vol. 90, pp 54-63
- [8] Rasolomampionona D., Kowalik R., Gontarz K., Januszewski M., "The construction and operation of some examples of MERGING UNITS", 2014, *IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, SN: 2164-4322, pp. 779-785
- [9] Siara Ł., Januszewski M., Kowalik R., Kurek K., Tomaszek K., Zalewski P., "Wykorzystanie symulacji komputerowych do testowania działania przekaźnika odległościowego "XX Ogólnopolska konferencja Zabezpieczenia Przekaznikowe w Energetyce, Kazimierz Dolny, 11 - 13 października 2017 r.
- [10] Kurek K., Januszewski M., Kowalik R., Tomaszek K., Zalewski P., "Testy porównawcze działania funkcji odległościowych opartych na klasycznych pomiarach prądów i napięć oraz z wykorzystaniem pomiarów Sampled Values", *XX Ogólnopolska konferencja Zabezpieczenia Przekaznikowe w Energetyce, Kazimierz Dolny, 11 - 13 października 2017 r.*
- [11] Nogal Ł., Soszka M., Kurek K., "Zastosowanie standardu IEC61850 w elektroenergetyce", *elektro.info*, ISSN 1642-8722, pp. 12-16, 3/2016
- [12] M. Daboul, J. Orsagova, T. Bajanak, i V. Wasserbauer, „Testing protection relays based on IEC 61850 in Substation Automation Systems”, w *2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, 2015, s. 335–340.
- [13] A. Apostolov i B. Vandiver, „Functional Testing of IEC 61850 Based Protection Relays”, w *2007 60th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 2007, s. 333–340.