

**Tomasz Bednarczyk, Paweł Nandzik**  
 Politechnika Śląska, Gliwice

## BADANIE POPRAWNOŚCI POMIAROWEJ I DECYZYJNEJ CYFROWYCH I ANALOGOWYCH ZABEZPIECZEŃ ODLEGŁOŚCIOWYCH – WYBRANE ASPEKTY

### TESTING CORRECTNESS OF MEASURING AND DECISION MAKING OF ANALOG AND DIGITAL DISTANCE PROTECTION

**Streszczenie:** Ciągły postęp ewolucyjny systemu elektroenergetycznego wymaga również dopasowania do zmieniających się warunków stosowanych środków ochrony przed skutkami zakłóceń. W tym zakresie m.in. dokonywana jest wymiana analogowych przekaźników zabezpieczeniowych na ich cyfrowych następców. Zmiany często prowadzą do refleksji czy taka zmiana technologii prowadzi do polepszenia czy do pogorszenia ochrony systemu elektroenergetycznego. Biorąc pod uwagę zabezpieczenia odległościowe linii WN, przeprowadzono serię wybranych testów reprezentatywnych egzemplarzy zabezpieczeń analogowych i cyfrowych mających na celu uzyskanie w określonym zakresie odpowiedzi na postawione pytanie.

**Abstract:** In this paper they were conducted laboratory tests in order to verify the accuracy of the measurement and decision-making of selected distance protection in the execution of digital and analogue. Were carried out based on actual measurements of the distribution network parameters 110 kV, analyzing the frequency deviation and content of higher harmonic currents and phase voltages.

**Słowa kluczowe:** automatyka zabezpieczeniowa sieci wysokich napięć, analiza parametrów sieci 110 kV, zabezpieczenia odległościowe linii WN

**Keywords:** system protection high-voltage network, analysis parameters power system 110 kV, line distance protection

### 1. Wstęp

Powszechność dostępu i korzystanie z zalet energii elektrycznej wymaga sprawnego działania rozbudowanego układu urządzeń do jej wytwarzania, przesyłania i rozdziału. W obszarze przesyłania energii elektrycznej linie przesyłowe są narażone na skutki przypadkowych i niepożądanych czynników zwanych zakłóceniami. Zakłócenia te wpływają na ciągłość dostaw energii elektrycznej oraz na stabilność systemu elektroenergetycznego. W celu zachowania selektywnej ochrony przed skutkami zakłóceń tak ważna jest rola sprawnie działającej elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej. W analizowanym przypadku będą to zabezpieczenia odległościowe linii, którego działanie bazuje na kryterium podimpedancyjnym [1], w którym miejsce zwarcia tożsame jest z wyznaczoną impedancją zgodną pętli zwarciowej  $\underline{Z}_p$  na podstawie pomiaru sygnału nośnego, którym jest prąd  $\underline{I}_p$  i napięcie  $\underline{U}_p$  o częstotliwości podstawowej 50 Hz zgodnie z zależnością (1).

$$\underline{Z}_p = \frac{\underline{U}_p}{\underline{I}_p} \quad (1)$$

gdzie:  $\underline{U}_p$ ,  $\underline{I}_p$  - fazy napięcia i prądu mierzone w miejscu przyłączenia zabezpieczenia.

W stanie pracy normalnej, bez zakłóceń, w sygnale analogowym (prąd, napięcie) powinna występować jedynie składowa podstawowa o częstotliwości 50 Hz. Jednakże w rzeczywistości sygnał pomiarowy oprócz składowej podstawowej zawiera również inne sygnały nakładające się na siebie i tworzące wypadkowy sygnał wejściowy zabezpieczenia [4]:

$$u_{ik}(t) = x_1 \cdot \cos(\omega t - \alpha_1) + \text{podstawowa harmoniczna (50 Hz)}$$


---


$$\sum_{n=2}^{\infty} x_n \cdot \cos(h\omega t - \alpha_n) + \text{sygnał zawierający wyższe harmoniczne}$$


---


$$x_a \cdot e^{-\frac{t}{\tau_a}} + \text{składowa aperiodyczna} \quad (2)$$


---


$$\sum_{k=1}^r x_{ok} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_k}} \cdot \cos(\omega_k t - \beta_k) + \text{składowa oscylacyjna}$$


---


$$e(t) \quad \text{sygnał błędu}$$

gdzie:  $T_a$  – stała czasowa zanikania składowej aperiodycznej,  $T_k$  – stała czasowa zanikania składowej oscylacyjnej.

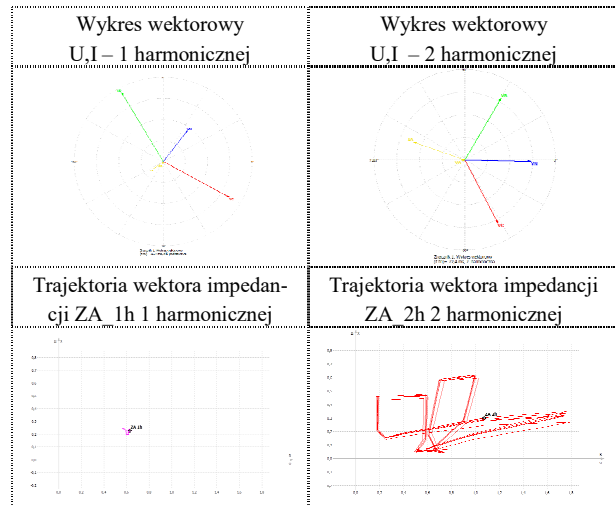
Zabezpieczenie otrzymując sygnał zniekształcony (2), wyznacza impedancję pętli zwarciowej różną od rzeczywistej (rys.1). Może to powodować błędne działanie automatyki zabezpieczeniowej (zbędne lub nieprawidłowe). W celu prawidłowego działania algorytmu pomiarowego istotne znaczenie ma filtracja sygnału pomiarowego, tak aby układ mierzący otrzymał dane do obróbki zawierające w idealnym przypadku jedynie składową podstawową. Ponieważ obszar działania zabezpieczeń odległościowych linii obejmuje przede wszystkim stany zakłócenia, tj. zwarcia wieloprądowe, to właśnie te sygnały powinny być analizowane pod kątem poprawności pomiarowej i decyzyjnej układów automatyki zabezpieczeniowej.

Podczas zakłóceń prądy i napięcia „jakościowo” odbiegają od sygnałów zawierających jedynie składową podstawową. Pojawiają się wtedy wyższe harmoniczne, składowe oscylacyjne, składowe nieokresowe. Z tegoż właśnie powodu warto przyrzeć się głównym torom przetwarzania w układach zabezpieczeniowych wykorzystujących technikę cyfrową i analogową. Pozwoli to określić, w jaki sposób zakłócone sygnały wejściowe wpływają na poprawność pomiarową i decyzyjną zabezpieczeń odległościowych. Stanowi to cel niniejszej publikacji, która podzielona jest na dwie części, tworzące integralną całość.

W części pierwszej zostaną przeanalizowane wybrane aspekty jakości prądu i napięcia sieci dystrybucyjnej 110 kV. Część druga obejmować będzie testy laboratoryjne wybranych zabezpieczeń odległościowych, których działanie opiera się o technikę analogową (elektro-niczne) oraz cyfrową (mikroprocesorowe).



Rys. 1. Przykładowe przebiegi chwilowe prądów i napięć podczas zwarcia

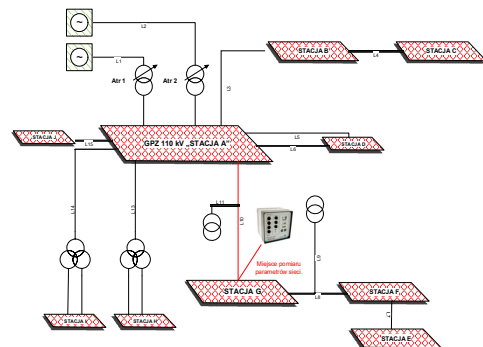


Rys. 2. Wykres wektorowy i trajektoria wektora impedancji (fazy A) dla 1 i 2 harmonicznej dla przebiegu z rys. 1

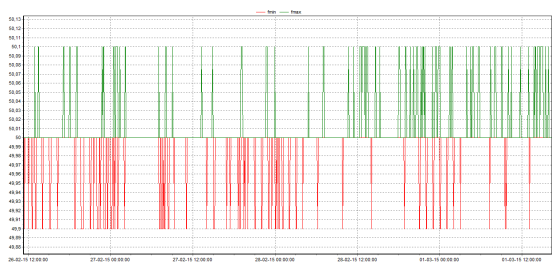
## 2. Analiza parametrów sieci 110 kV

Przeprowadzona analiza wybranych parametrów prądów i napięć sieci dystrybucyjnej 110 kV ma na celu pozyskanie informacji o jakości tych sygnałów w stanie normalnej (bezzakłóceńowej) pracy systemu.

Opierając się na pozyskanych wynikach analizy zostały one również wykorzystane w dalszej części pracy dotyczącej testów laboratoryjnych. Brane pod uwagę były między innymi odchylenia częstotliwości (rys.4) oraz występujące wyższe harmoniczne napięcia (rys.5,6) i prądu (rys.7,8). Analiza parametrów sieci wykorzystywała przebiegi czasowe napięć i prądów w wybranym fragmencie sieci 110 kV znajdującego się w aglomeracji Polski południowej w bliskim otoczeniu zakładów przemysłowych (rys.2). Rejestracja trwała 3 dni (dwa dni pracujące: czwartek, piątek oraz dzień wolny od pracy: sobota). Rejestracja została przeprowadzona za pomocą analizatora jakości sieci typu REM – 370.

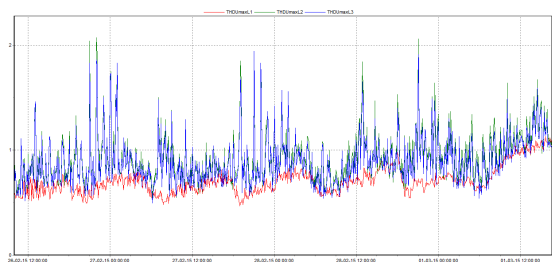


Rys. 3. Fragment analizowanej sieci dystrybucyjnej 110 kV

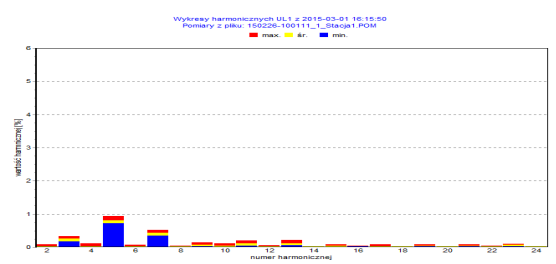


Rys. 4. Maksymalne i minimalne odchylenie częstotliwości w czasie trwania rejestracji

Analizując wartości częstotliwości sieci w stanie normalnej pracy (rys.4) zauważyć można maksymalne odchylenia w granicach 50 Hz  $\pm 0,1$ .

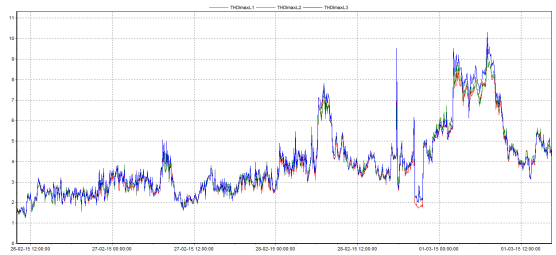


Rys. 5. Współczynnik zawartości harmonicznych THD w napięciach fazowych

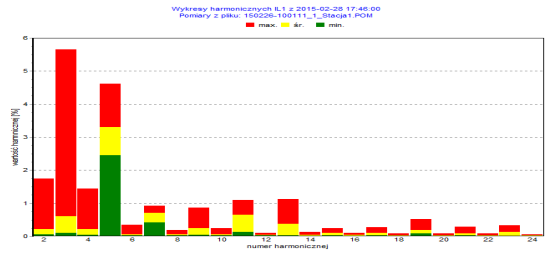


Rys. 6. Współczynnik zawartości harmonicznych THD w napięciach fazowych

Rejestracja widma harmonicznych napięć fazowych (rys.6) wskazuje największy udział wyższych harmonicznych w odniesieniu do składowej podstawowej harmonicznej rzędu nieparzystego: 3, 5, 7.



Rys. 7. Współczynnik zawartości harmonicznych THD w prądach fazowych



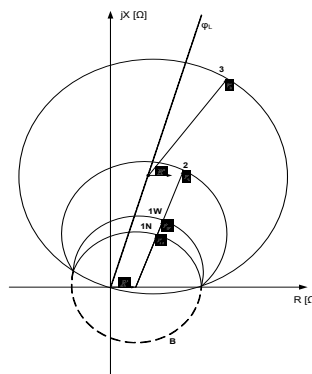
Rys. 8. Współczynnik zawartości harmonicznych THD w prądach fazowych

Rejestracja widma harmonicznych prądów fazowych (rys.8) wskazuje największy udział wyższych harmonicznych w odniesieniu do składowej podstawowej harmonicznej rzędu nieparzystego: 2, 3, 4, 5, 11, 13.

### 3. Charakterystyka wybranych zabezpieczeń odległościowych

#### 3.1. Analogowe zabezpieczenie odległościowe

Wybrane zabezpieczenie analogowe jest zabezpieczeniem statycznym ( tranzystorowym) przeznaczonym dla linii 110 kV. Zabezpieczenie posiada trójstrefową charakterystykę impedancyjno – czasową  $t=f(Z)$  o różnych kształtach oraz strefę dodatkową dla automatyki SPZ (rys.9).



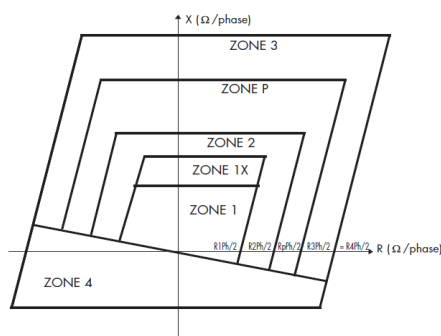
Rys. 9. Charakterystyki pomiarowe zabezpieczenia analogowego na płaszczyźnie zespolonej

Zabezpieczenie posiada dla wszystkich stref wspólne układy przygotowujące wielkości zespolone, wspólne układy prostujące – filtrujące oraz wspólne statyczne wybiorniki wartości maksymalnych i minimalnych. Układ filtrujący jest realizowany za pomocą elektronicznego filtra dolnoprzepustowego RC o częstotliwości odcięcia 100 Hz.

#### 3.2. Cyfrowe zabezpieczenie odległościowe

Działanie zabezpieczenia odległościowego w wykonaniu cyfrowym oparte jest na zastosowaniu dwóch typów algorytmów: "Delta" – nazywa-

nego też algorytmem szybkim, wykorzystujący wartości przyrostowe prądów i napięć charakterystycznych dla zwarcia. Obliczanie odległości do miejsca zwarcia dokonywane jest przez "algorytmy pomiaru impedancji" wykorzystujące metodę Gaussa-Seidela. "Klasyczny" wykorzystujący klasyczną metodę wyznaczania impedancji po wystąpieniu zwarcia. Zabezpieczenie posiada pięciostrefową charakterystykę impedancyjno – czasową poligonalną  $t=f(Z)$  oraz strefę dodatkową dla automatyki SPZ (rys. 10).



Rys. 10. Charakterystyki pomiarowe zabezpieczenia cyfrowego na płaszczyźnie zespolonej

Wykorzystanym układem filtrującym sygnał Analogowy jest filtr cyfrowy o skończonej odpowiedzi impulsowej (SOI).

#### 4. Laboratoryjne badanie poprawności pomiarowej i decyzyjnej wybranych zabezpieczeń odległościowych

Dla przyjętego układu sieciowego (rys. 3) skonfigurowano i sparametryzowano zabezpieczenia odległościowe (analogowe i cyfrowe) w zakresie stref pomiarowych i rozruchowych. Następnie tak sparametryzowane kryterium podimpedancyjne poddano laboratoryjnej weryfikacji w zakresie poprawności podejmowanych decyzji identyfikujących miejsce wystąpienia zakłócenia. Aparatura użyta do badań to cyfrowy tester ARTES 440 II firmy KoCoS. Badania przeprowadzone zostały zarówno dla monoharmonicznych, jak i zakłóconych sygnałów wejściowych. Szczególnie uwzględniono sytuacje w obszarach rozgraniczających strefy pomiarowe. Z uwagi na powtarzalność symulacji zdecydowano, że badania zostaną przeprowadzone tylko dla pierwszej strefy pomiarowej.

Dla przykładowego analogowego i cyfrowego rozwiązania zabezpieczeń odległościowych zbadano laboratoryjnie i przeanalizowano wpływ postaci wejściowych sygnałów pomiarowych (prądów) na poprawność estymacji pętli zwarciowej.

Założono następujące formy wejściowych sygnałów pomiarowych: sygnały monoharmoniczne o znamionowej częstotliwości, o odchyłonej częstotliwości  $\pm 2$  Hz, sygnały monoharmoniczne + składowa aperiodyczna o zmiennej stałej czasowej zanikania  $T$ , sygnały poliharmoniczne o zróżnicowanej zawartości wyższych harmonicznych.

Badanie granicy strefy pomiarowej oparte było na wyznaczeniu różnicy wyników dla kilku wybranych punktów pomiarowych. Do określania poprawności pomiarowej i decyzyjnej wyznaczono błąd impedancyjny  $\delta Z$  (3), za pomocą którego określony zostanie rozrzut zasięgu strefy, który może przyjmować wartości dodatnie lub ujemne. Wyznaczono również błąd czasowy  $\delta t$  (4), ponieważ sygnały zakłócenia w głównym torze pomiarowym wpływają również na czas podejmowania decyzji zabezpieczenia.

$$\delta Z = \left( \frac{Z_{wz} - Z_{od}}{Z_{od}} \right) \cdot 100\%, \quad (3)$$

$$\delta t = \left( \frac{t_{zm} - t_{od}}{t_{od}} \right) \cdot 100\%, \quad (4)$$

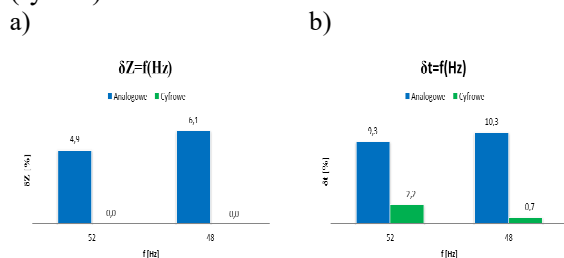
Przez pojęcie impedancja odniesienia ( $Z_{od}$ ) należy rozumieć wyznaczoną granicę działania strefy pomiarowej dla warunków, w których to sygnał pomiarowy (prąd, napięcie) występuje bez zakłócenia tj. dla sygnału sinusoidalnego o częstotliwości 50 Hz. Impedancja odniesienia ( $Z_{od}$ ) jest to wartość średnia dla trzech następujących po sobie prób pomiarowych. Wartość wyznaczonej impedancji ( $Z_{wz}$ ) również została przedstawiona jako wartość średnia dla trzech prób pomiarowych. Czas odniesienia ( $t_{od}$ ), podobnie jak impedancja odniesienia ( $Z_{od}$ ), jest czasem działania zabezpieczenia dla sygnału pomiarowego bez zakłóceń, wyznaczony jako wartość średnia z trzech pomiarów. Czas działania jest nieco dłuższy niż by to wynikało z czasu nastawionego dla strefy pomiarowej z uwzględnieniem czasu własnego zabezpieczenia. Różnica ta wynika z naturalnego przejścia jednej strefy pomiarowej w drugą, to oznacza, że czas działania zabezpieczenia na granicy strefy wydłuża się o kilka do kilkunastu milisekund. Dlatego jako wartość odniesienia postanowiono przyjąć wartość średnią pomiarową, a nie teoretyczną wynikającą z parametrów zabezpieczenia. Aby móc porównywać ze sobą dwie wielkości, czas zmierzony ( $t_{zm}$ ) poda-

wany został również jako wartość średnia z trzech następujących po sobie pomiarów. Testy odbywały się za pomocą stałej amplitudy prądu testu ( $2I_n$ ) przy zmiennej amplitudzie napięcia fazowego oraz kąta fazowego. Pierwsze okno testowe w czasie od 0 do 500 ms odzwierciedlało stan pracy linii w warunkach normalnych, po czasie 500 ms następowała generacja zakłóconego sygnału (zwarcie) o zmiennej wartości częstotliwości, zawierającego wyższe harmoniczne oraz składową aperiodyczną.

#### 4.1. Analiza porównawcza poprawności działania testowanych zabezpieczeń odległościowych

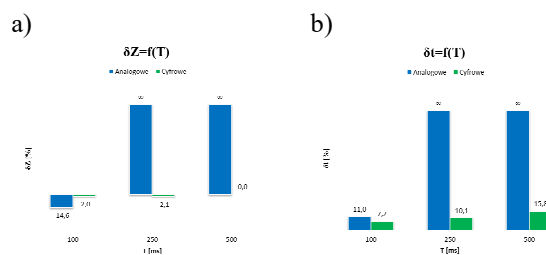
Analiza poprawności pomiarowej i decyzyjnej wybranych zabezpieczeń odległościowych ze względu na zadane sygnały testowe została przeprowadzona w formie porównawczej za pomocą wykresów słupkowych wyznaczonych błędów impedancyjnych i czasowych. Błąd impedancyjny na podstawie (3) – rys. 11a, 12a, 13a oraz czasowy na podstawie (4) – rys. 11b, 12b, 13b. Badaniom podlegała dokładność filtracyjna głównego toru pomiarowego oraz algorytmu decyzyjnego. Elementy filtracyjne zabezpieczeń zostały poddane badaniom weryfikacyjnym m.in. odporności na zmianę częstotliwości sygnału pomiarowego w zakresie  $50 \pm 2$  Hz.

W pierwszej sekwencji testowej zabezpieczenie cyfrowe wykazało znacznie większą odporność na odkształcenie częstotliwości sygnału testowego. Zmiany częstotliwości w zadanym zakresie nie wpłynęły na zmianę zasięgu strefy pomiarowej zabezpieczenia cyfrowego, również czas działania został praktycznie niezmienny (rys.11). Odwrotne działania wykazało zabezpieczenie analogowe, którego zasięg strefy pomiarowej wydłużył się maksymalnie o 6,1%, a czas zadziałania uległ wydłużeniu o 10,3% (rys.11).



Rys. 11. Błąd a) impedancyjny i b) czasu zadziałania zależnie od zmiennej częstotliwości

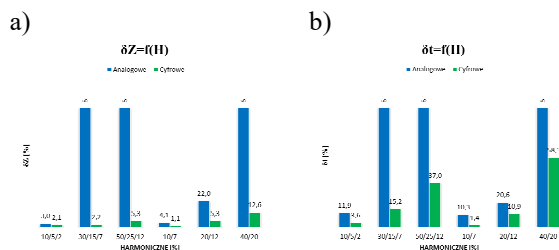
Kolejnym etapem badań laboratoryjnych było określenie wpływu obecności składowej aperiodycznej o różnym czasie zanikania na poprawność pomiarową. Również tym razem zabezpieczenie cyfrowe wykazało względnie lepsze właściwości filtracyjne. W tym przypadku zasięg strefy pomiarowej uległ skróceniu o -2,1%, a czas działania maksymalnie wydłużył się o 15,8% (rys.12). Zabezpieczenie analogowe wykazało dużą wrażliwość na obecność składowej aperiodycznej w sygnale prądowym. W skrajnych przypadkach dla obranych punktów pomiarowych zabezpieczenie nie zadziało, co na wykresach słupkowych (rys.12) oznaczono jako „∞”. Testy wykazały, że zabezpieczenie „próbowało” podjąć decyzję o zwarcie w strefie, jednak kończyło się to tylko szybkim „cykaniem” przekaźnika, który powinien podać trwały impuls wyłączający z czasem danej strefy.



Rys. 12. Błąd a) impedancyjny i b) czasu zadziałania zależnie od zmiennej stałej czasowej zanikania składowej aperiodycznej

W ostatniej sekwencji pomiarowej zbadany został wpływ wybranych wyższych harmonicznych parzystych i nieparzystych na właściwości filtracyjne. Ponownie zabezpieczenie cyfrowe wykazało lepsze właściwości filtracyjne. Nieparzyste harmoniczne (3,5,7) w sygnale pomiarowym spowodowały wydłużenie zasięgu strefy pomiarowej maksymalnie o 5,3% (rys.13). Większy wpływ na wydłużenie strefy działania miały harmoniczne parzyste (2 i 4), zasięg strefy wydłużył się o 12,6% (rys.13), co wskazuje na brak precyzyjnych filtrów cyfrowych dedykowanych dla parzystych wyższych harmonicznych. Czas zadziałania zabezpieczenia znacząco się wydłużył, najbardziej dla harmonicznych parzystych o 58,3% (rys.13). Zabezpieczenie analogowe, które posiada filtr LC dolnoprzepustowy, dla sygnału o znacznej zawartości wyższych harmonicznych w skrajnych przypadkach wykazał brak zadziałania (rys.13). Podobnie jak przy składowej aperiodycznej, próba podjęcia decyzji była, bez trwałego efektu wysłania impulsu wyłączającego.

Oznaczenia na rys.13: 10/5/2, 30/15/7, 50/25/12 oznacza zawartość harmoniczných kolejno 3h=10/30/50%, 5h=5/15/25%, 7h=2/7/12%. 10/7, 20/12, 40/20 oznacza zawartość harmoniczných kolejno 2h=10/20/40%, 4h=7/12/20%.



Rys. 13. Błąd a) impedancyjny i b) czasu zadziałania zależnie od zawartości wyższych harmoniczných

Tabela. 1. Analiza porównawcza poprawności pomiarowej i decyzyjnej zabezpieczenia odległościowego analogowego i cyfrowego pod względem spełnienia wymagań [3]

| SYGNAŁ                |                        | CYFROWE      |            | ANALOGOWE        |                  |
|-----------------------|------------------------|--------------|------------|------------------|------------------|
|                       |                        | $\delta Z$   | $\delta t$ | $\delta Z$       | $\delta t$       |
| Częstotliwość         | 52 Hz                  | Brak zmian   | 2,2%       | 4,9%             | 9,3%             |
|                       | 48 Hz                  | Brak zmian   | 0,7%       | 6,1%             | 10,3 %           |
| Wymaganie             | (1)                    | SPEŁNIONE    |            | NIESPEŁNIONE     |                  |
|                       | (2)                    | SPEŁNIONE    |            | NIESPEŁNIONE     |                  |
|                       | (3)                    | SPEŁNIONE    |            | NIESPEŁNIONE     |                  |
| Wyższe harmoniczne    | Nieparzyste h3, h5, h7 | max 5,3%     | max 37,0%  | Brak zadziałania | Brak zadziałania |
|                       | Parzyste h2, h4        | max 12,6%    | max 58,3%  | Brak zadziałania | Brak zadziałania |
| Wymaganie             | (1)                    | NIESPEŁNIONE |            | NIESPEŁNIONE     |                  |
|                       | (2)                    | Nie dotyczy  |            | Nie dotyczy      |                  |
|                       | (3)                    | NIESPEŁNIONE |            | NIESPEŁNIONE     |                  |
| Składowa aperiodyczna | 100 ms                 | -2,0%        | 7,2%       | Brak zadziałania | Brak zadziałania |
|                       | 500 ms                 | 0,0%         | 15,8%      | Brak zadziałania | Brak zadziałania |
| Wymaganie             | (1)                    | SPEŁNIONE    |            | NIESPEŁNIONE     |                  |
|                       | (2)                    | SPEŁNIONE    |            | NIESPEŁNIONE     |                  |
|                       | (3)                    | SPEŁNIONE    |            | NIESPEŁNIONE     |                  |

W tabeli nr 1 została przeprowadzona analiza spełnienia wymagań operatora systemu przesyłowego, względem odporności algorytmów pomiarowych i decyzyjnych zabezpieczeń odległościowych

na zniekształcone sygnały. Dokonano sprawdzenia spełnienia wybranych wymagań, zgodnie z [3]: Wymaganie (1): Zabezpieczenie prawidłowo określa strefę pomiarową  $\pm 5\%$ , Wymaganie (2): Zabezpieczenie pracuje prawidłowo dla częstotliwości znamionowej 50 Hz, 52 Hz oraz 47 Hz, Wymaganie (3): Zabezpieczenie działa z czasem nastawionym  $\pm 5\%$ . Analiza porównawcza poprawności pomiarowej i decyzyjnej zabezpieczenia odległościowego analogowego i cyfrowego pod względem spełnienia wymagań przeprowadzona w tabeli 1 wskazuje na znacznie gorsze właściwości filtracyjne zabezpieczenia odległościowego analogowego. W przeprowadzonym zakresie testów nie spełnia ono żadnych z przytoczonych warunków.

## 5. Wnioski

Zabezpieczenia analogowe są sukcesywnie wycofywane z eksploatacji i zastępowane zabezpieczeniami wykorzystującymi technikę cyfrową. Niemniej jednak wiele egzemplarzy pozostaje jeszcze w eksploatacji. Przeprowadzone badania wykazują niespełnienie wybranych warunków dla zabezpieczenia analogowego, jakie stawiane są zabezpieczeniom odległościowym linii operatora systemu przesyłowego. Niemniej należy podkreślić, że badania przeprowadzono dla wybranych egzemplarzy zabezpieczeń. Aby potwierdzić otrzymane wyniki z badań należałoby przeprowadzić takie same próby dla większej liczby egzemplarzy, aby wykluczyć ewentualną niesprawność zabezpieczenia. Uzyskane wyniki badań skłaniają do podjęcia dalszych badań mających na celu weryfikację prawidłowej współpracy zabezpieczeń odległościowych opartych o technikę analogową i cyfrową w przypadku pracy współbieżnej.

## 6. Literatura

- [1]. Bednarczyk T.: „Wybrane zagadnienia zabezpieczeń odległościowych linii część 1 – kryterium podimpedancyjne oraz parametryzacja zasięgów reaktancyjnych stref pomiarowych”. Elektro.info 11/2016.
- [2]. Standardowe specyfikacje krajowe. NK:PSE SF.KSE1/2005 Krajowy system elektroenergetyczny. PSE Operator. Warszawa 2005.
- [3]. Standardowe specyfikacje techniczne. Zabezpieczenie odległościowe linii 110 kV. PSE-ST.EAZ.A.110.0/2008v3. Warszawa, kwiecień 2012.
- [4]. Wiszniewski.A, Szafran.J: „Algorytmy pomiarowe i decyzyjne cyfrowej automatyki elektroenergetycznej”. WNT Warszawa 2004.