

Współczynnik bezpieczeństwa FS i współczynnik graniczny dokładności ALF przekładników prądowych

Streszczenie. W artykule scharakteryzowano współczynnik bezpieczeństwa FS przekładników prądowych do pomiarów i współczynnik graniczny dokładności ALF przekładników prądowych do zabezpieczeń. Pokazano możliwość analitycznego wyznaczenia tych współczynników oraz podano istotne z praktycznego punktu widzenia uwagi i wyjaśnienia dotyczące omawianych metod pomiarowych.

Abstract. The article describes the instrument security factor FS of the measuring and accuracy limit factor ALF of the protective current transformers. The possibility of analytical determination of these factors was presented as well as comments and explanations concerning the respective measurement methods important from the practical point of view. The instrument security factor FS of the measuring and accuracy limit factor ALF of the protective current transformers

Słowa kluczowe: przekładnik prądowy do pomiarów, przekładnik prądowy do zabezpieczeń, współczynnik bezpieczeństwa FS, współczynnik graniczny dokładności ALF

Keywords: measuring current transformer, protective current transformer, instrument security factor FS, accuracy limit factor ALF

Wstęp

Przekładniki prądowe do pomiarów i do zabezpieczeń są elementami systemu elektroenergetycznego niezbędnymi do przetwarzania prądu sieci na znormalizowany prąd wtórny. Wymagania stawiane w normie [1] obu rodzajom przekładników dotyczą dwóch stanów pracy: znamionowej i w warunkach przetężeniowych. Przedmiotem rozważań jest analiza możliwości teoretycznego i praktycznego określenia właściwości metrologicznych przekładników prądowych do pomiarów i do zabezpieczeń w warunkach przetężenia ustalonego. Przetężenie ustalone to stan, w którym składowa przejściowa prądu pierwotnego praktycznie zanika, a jego wartość skuteczna kilkakrotnie lub nawet kilkudziesięciokrotnie przekracza wartość znamionową. Należy przy tym zwrócić uwagę na fakt, że oczekiwania w stosunku do przekładników prądowych zależą od ich przeznaczenia. Od przekładników do pomiarów wymaga się zapewnienia ochrony mierników prądu i prądowych obwodów wejściowych liczników energii elektrycznej przed niedopuszczalnym przeciążeniem, natomiast od przekładników do zabezpieczeń – jak najdokładniejszej transformacji zwarciovego prądu sieci w możliwie szerokim zakresie przetężeniowym.

Kryterium oceny przydatności eksploatacyjnej przekładników prądowych do pomiarów i do zabezpieczeń przy przetężeniach oparte jest na ustaleniu progu, którego przekroczenie powoduje pracę przekładnika przy nasyconym obwodzie magnetycznym. W tym celu w normie [1] zdefiniowano odpowiednio: współczynnik bezpieczeństwa przyrządu FS (Instrument Security Factor) oraz współczynnik graniczny dokładności ALF (Accuracy Limit Factor). Przepisy normalizacyjne wprowadzają definicje i ogólnie charakteryzują układy pomiarowe nie uwzględniając różnorodnych problemów technicznych z jakimi mogą się spotkać użytkownicy i producenci przekładników. W związku z tym, dla usystematyzowania tego zagadnienia, w artykule scharakteryzowano obydwa współczynniki z punktu widzenia ich znaczenia dla przekładników obydwu klas eksploatacyjnych, a także omówiono sposób ich wyznaczenia metodami: analityczną, symulacyjną i pomiarową.

Przekładniki prądowe do pomiarów – współczynnik FS

W normie [1] zdefiniowano:

• **Znamionowy prąd pierwotny bezpieczny przyrządu I_{PL}**
Wartość skuteczna minimalnego prądu pierwotnego, przy którym błąd całkowity przekładnika prądowego do

pomiarów jest równy lub większy 10% przy obciążeniu znamionowym.

• **Współczynnik bezpieczeństwa przyrządu FS**
Stosunek znamionowego prądu pierwotnego bezpiecznego przyrządu I_{PL} do znamionowego prądu pierwotnego I_{pr} , czyli

$$(1) \quad FS = \frac{I_{PL}}{I_{pr}}$$

• **Wtórna graniczna siła elektromotoryczna E_{FS}**
Iloczyn współczynnika bezpieczeństwa przyrządu FS, znamionowego prądu wtórnego I_{sr} oraz sumy wektorowej obciążenia znamionowego R_b , X_b i rezystancji uzwojenia wtórnego R_{ct} , czyli

$$(2) \quad E_{FS} = FS \times I_{sr} \times \sqrt{(R_{ct} + R_b)^2 + X_b^2}$$

Przekładniki prądowe do zabezpieczeń – współczynnik ALF

W normie [1] zdefiniowano:

• **Znamionowy graniczny prąd pierwotny**
Wartość skuteczna prądu pierwotnego, do której przekładnik spełnia wymagania w zakresie błędu całkowitego.

• **Współczynnik graniczny dokładności ALF**
Stosunek znamionowego granicznego prądu pierwotnego do znamionowego prądu pierwotnego

• **Wtórna graniczna siła elektromotoryczna E_{FS}**
Iloczyn współczynnika granicznego dokładności ALF, znamionowego prądu wtórnego I_{sr} oraz sumy wektorowej obciążenia znamionowego R_b , X_b i rezystancji uzwojenia wtórnego R_{ct} , czyli

$$(3) \quad E_{FS} = ALF \times I_{sr} \times \sqrt{(R_{ct} + R_b)^2 + X_b^2}$$

Metoda analityczna wyznaczenia FS i ALF

Wartości współczynników FS i ALF można otrzymać wykorzystując odpowiednią procedurę obliczeniową [2], [3] w której błąd całkowity przekładnika prądowego osiąga założoną wartość graniczną, czyli $\varepsilon_c = 10\%$ dla przekładników do pomiarów oraz $\varepsilon_c = 5\%$ (klasa 5P lub 5PR) lub $\varepsilon_c = 10\%$ (klasa 10P lub 10PR) dla przekładników do zabezpieczeń. Zgodnie z normą [1] błąd całkowity ε_c przekładnika prądowego jest opisany zależnością

$$(4) \quad \varepsilon_c = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (k_r i_s - i_p)^2 dt}}{I_p} \times 100\%$$

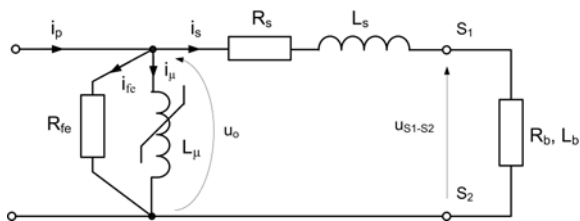
gdzie: k_r – przekładnia znamionowa, i_s – wartość chwilowa prądu wtórnego, i_p – wartość chwilowa prądu pierwotnego, I_p – wartość skuteczna prądu pierwotnego, T – czas trwania jednego okresu przebiegu.

Wzór (4) można zapisać w postaci:

$$(5) \quad \varepsilon_c = \frac{I_{\text{rms}}}{I_p} \cdot 100\%$$

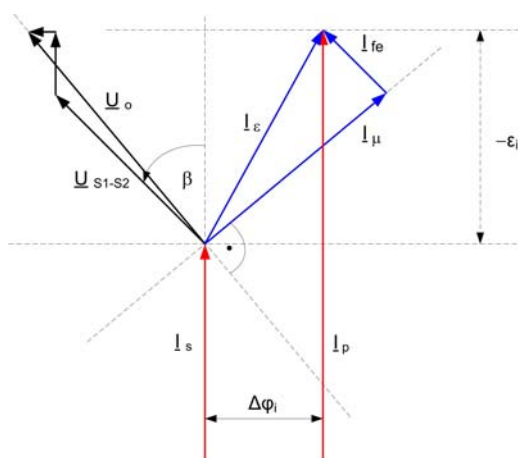
przy czym: I_{rms} – wartość skuteczna prądu jałowego, zwanego również prądem błędu; I_p – wartość skuteczna sinusoidalnego prądu pierwotnego.

Błąd całkowity, którego graniczna wartość determinuje poprawność wyznaczenia współczynników FS i ALF, może być obliczony na podstawie relacji między wartościami skutecznymi podstawowych harmonicznych prądów występujących w pokazanym na rys. 1 układzie schematu zastępczego przekładnika prądowego.



Rys. 1. Schemat zastępczy przekładnika prądowego. (wszystkie wielkości i parametry sprowadzono do strony wtórnej)

Obraz wektorowy sinusoidalnych, odpowiadających podstawowym składowym harmonicznym prądów i napięć ze schematu zastępczego przekładnika prądowego (rys. 1), pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Wykres wskazowy przekładnika prądowego (oznaczenia jak na rys. 1)

Prąd błędu jest geometryczną sumą jego składowych, czynnej i biernej (rys. 2). Można zatem zapisać, że

$$(6) \quad I_\varepsilon = \sqrt{I_{fe}^2 + I_\mu^2}$$

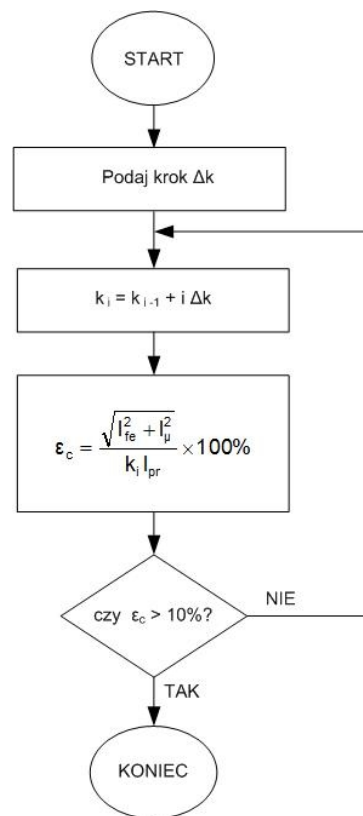
Z drugiej strony, na podstawie wykresu wskazowego pokazanego na rys. 2, można, wykorzystując wzór (5), ustalić, że błąd całkowity stanowi sumę geometryczną błędów: prądowego i kąтового przekładnika, czyli zapisać w postaci zależności (7).

$$(7) \quad \varepsilon_c = \sqrt{\varepsilon_i^2 + (\Delta\varphi_i)^2}$$

gdzie: ε_i – błąd prądowy przekładnika [%], $\Delta\varphi_i$ – błąd kątowy przekładnika [crad].

Do wyznaczenia współczynnika bezpieczeństwa FS zastosowano metodę analityczną [2], której algorytm przedstawiono na rys. 3. W zastosowanej procedurze wykorzystano zależności (5) i (6), mimo że rzeczywisty przebieg prądu magnesującego nie jest sinusoidalny (przy $\varepsilon_c = 10\%$ punkt pracy obwodu magnetycznego osiąga kolano charakterystyki magnesowania), co w przyjętej metodzie obliczeń wprowadza dodatkową niedokładność wyznaczania błędu całkowitego. Z drugiej strony rzeczywista wartość błędu całkowitego nie jest nigdy mniejsza od sumy wektorowej błędów prądowego i kąтового. Niezbędną do wyznaczenia błędów przekładnika na podstawie wzoru (7) charakterystykę magnesowania i stratności obwodu magnetycznego przekładnika wyznaczono autorską metodą opisaną w publikacji [4], przy czym jako konsekwencję sinusoidalnego przebiegu prądów współczynnik szczytu prądu magnesującego przyjęto jako 1,41.

Algorytm wyznaczania współczynnika ALF jest podobny do algorytmu wyznaczania współczynnika FS. Ze względu na większe wartości przetężenia ustalonego, wymaganego do osiągnięcia początkowego punktu nasycenia obwodu magnetycznego, ($ALF > FS$), rezystancję R_{ct} należy przeliczyć na rezystancję w temperaturze 75°C .



Rys. 3. Algorytm wyznaczania FS metodą obliczeniową.

Badania symulacyjne

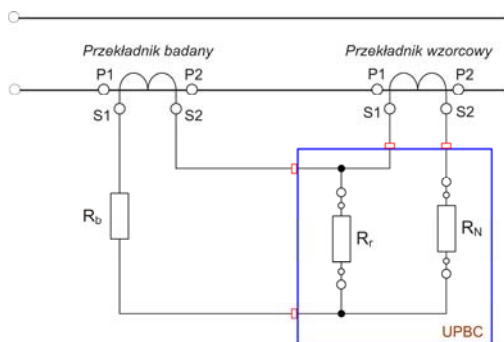
Współczynniki FS i ALF zostały wyznaczone także za pomocą badań symulacyjnych opartych na wykorzystaniu pakietu numerycznego Matlab-Simulink (dla identycznych modeli matematycznych). W ramach tych badań ustalono wartość współczynnika szczytu prądu jałowego (prądu błędu) odpowiadającego 10-procentowej wartości błędu całkowitego zdefiniowanego zależnością (4). W tym przypadku, punkt pracy charakterystyki magnesowania obwodu magnetycznego przekładnika osiąga jej kolano. Wobec tego prąd magnesujący czyli prąd jałowy

przekładnika wykazują wyraźne odkształcenie harmonicznymi rzędu nieparzystego.

Na podstawie badań symulacyjnych przeprowadzonych dla różnych modeli przekładników prądowych stwierdzono, że w zależności od rodzaju materiału magnetycznego rdzenia współczynnik szczytu prądu jałowego może osiągnąć wartość przekraczającą 2,5 a współczynnik kształtu – 1,8. W tym przypadku zastosowanie w metodzie analitycznej do wyznaczania błędu całkowitego w kolejnych krokach algorytmu (rys. 3) zależności (7), która wykorzystuje obliczone błędy: prądowy i kątowy przekładnika definiowane przecież wyłącznie dla harmonicznej podstawowej, musi prowadzić do występowania rozbieżności między tak wyznaczonymi współczynnikami FS lub ALF a wynikami otrzymanym podczas sprawdzania modeli fizycznych przekładnika.

Metoda bezpośrednia wyznaczenia FS i ALF

Metodą referencyjną dla weryfikacji zgodności współczynników FS lub ALF otrzymanych w wyniku obliczeń dla danej konstrukcji przekładnika prądowego oraz dla potwierdzenia poprawności zastosowanej metody symulacyjnej jest metoda bezpośrednia z zastosowaniem układu różnicowego. W normie [1] zaproponowano trzy wersje takiego układu. Scharakteryzowano je poniżej.

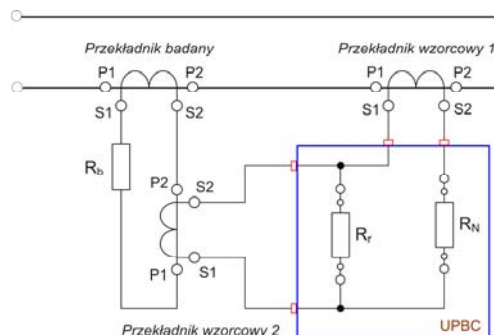


Rys. 4. Układ różnicowy do pomiaru błędu całkowitego przekładników prądowych z jednym przekładnikiem wzorcowym.

W wersji pierwszej, pokazanej na rys. 4, zastosowano jeden przekładnik wzorcowy, czyli przekładnik o pomijalnych błędach w przewidywanym zakresie badanego przetężenia ustalonego, o identycznej jak przekładnik badany przekładni znamionowej. Pomiar wartości skutecznych prądu różnicowego i prądu wtórnego przekładnika wzorcowego może być przeprowadzony za pomocą kompaktowego urządzenia do pomiaru błędu całkowitego (UPBC). Jego sprawdzona w czasie wieloletniej eksploatacji w zwiarcowni praktyczna realizacja [5] umożliwia przede wszystkim znaczące skrócenie do około 1 sekundy czasu przepływu probierczego prądu zwarcowego, niezbędnego do osiągnięcia stanu ustalonego oraz jednoczesny pomiar wartości skutecznych prądów przepływających przez boczniki R_r oraz R_N . Błąd całkowity jest określony procentową wartością ilorazu tych prądów. Maksymalne z możliwych skrócenie przepływu prądu probierczego ma istotne znaczenie, gdyż do osiągnięcia wymaganej wartości błędu całkowitego (5% lub 10%) praktycznie w każdym przypadku konieczne jest przeprowadzenie kilku prób, a po każdej próbie wymagane jest pozostawienie obydwu przekładników do ostygnięcia.

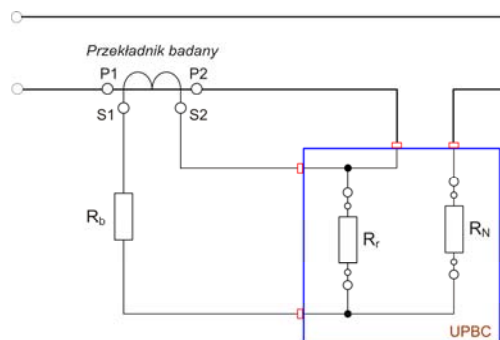
Zmodyfikowany układ różnicowy, w którym nie występuje silne nagrzewanie przekładnika wzorcowego pokazano na rys. 5. W tym przypadku prąd płynący przez bocznik R_N zostaje zredukowany do poziomu znamionowego prądu wtórnego przekładnika badanego. Jednak niezbędne jest zastosowanie dodatkowego przekładnika prądowego

pośredniczącego o wysokiej klasie dokładności (przekładnik wzorcowy 2) kompensującego niezgodność przekładni znamionowych przekładników: badanego i wzorcowego 1. Wadą tego rozwiązania jest konieczność uwzględnienia dodatkowego obciążenia wprowadzonego przez dodatkowy przekładnik pośredniczący do obwodu wtórnego przekładnika badanego.



Rys. 5. Układ różnicowy do pomiaru błędu całkowitego przekładników prądowych z dwoma przekładnikami wzorcowymi.

W przypadku, gdy nie ma możliwości wykorzystania odpowiednich przekładników wzorcowych, lub gdy nie można ustalić mocy wnoszonej do obwodu wtórnego przez przekładnik wzorcowy 2, możliwe jest zastosowanie układu różnicowego przedstawionego na rys. 6, który jest znaczącym uproszczeniem układu różnicowego z rys. 4.

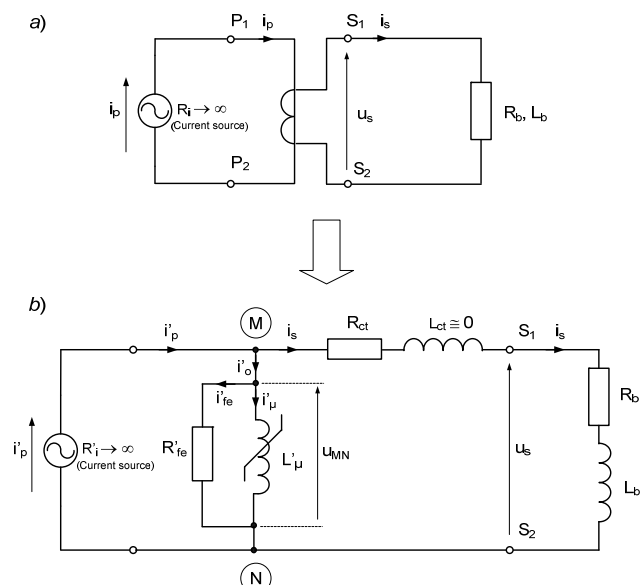


Rys. 6. Układ różnicowy do pomiaru błędu całkowitego przekładników prądowych bez przekładników wzorcowych.

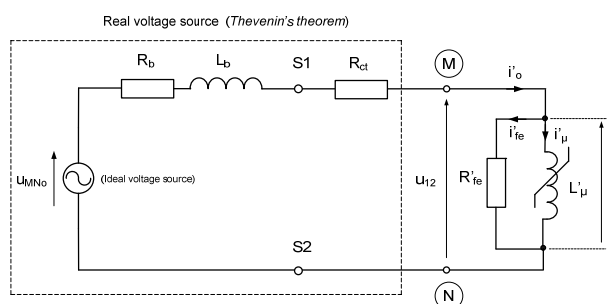
Przed próbą przekładnik badany powinien zostać przygotowany w taki sposób, aby jego przekładnia znamionowa była równa jedności. Oznacza to, że niezbędne jest nawinięcie, równomiernie wzdłuż obwodu rdzenia, dodatkowego uzwojenia o liczbie zwojów równej liczbie zwojów uzwojenia wtórnego. W tym przypadku mamy również do czynienia ze znacznym nagrzewaniem się przekładnika badanego. Wobec tego, podobnie jak w układach poprzednich, zalecane jest zastosowanie specjalnego urządzenia UPBC.

Metoda pośrednia pomiaru współczynnika FS i ALF

Sprawdzanie dokładności przekładników prądowych w warunkach przetężeniowych w rzeczywistym układzie eksploatacyjnym (rys. 7a) wymaga zastosowania źródła prądowego o znacznej wydajności prądowej. W związku z tym, dla przekładników prądowych o znikomym rozproszeniu magnetycznym, bardziej dogodna jest metoda pośrednia, tzw. metoda odwzorowania napięciowego [6]. Jej zasadę można wyjaśnić, stosując dla układu pokazanego na rys. 7b twierdzenie Thevenina. Po zastosowaniu tego twierdzenia otrzymuje się układ przedstawiony na rys. 8.

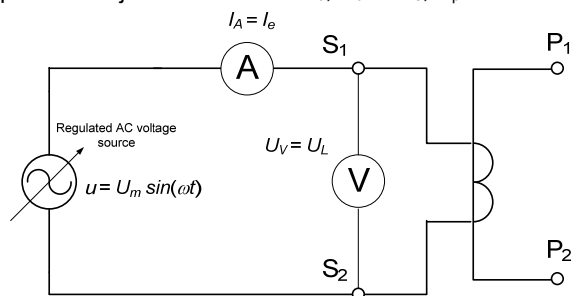


Rys. 7. Schematyczne zilustrowanie przekładnika prądowego: a) połączenie eksploatacyjne; b) z uwzględnieniem schematu zastępczego



Rys. 8. Schemat układu z zasilaniem napięciowym równoważny układowi jak na rys. 7b.

Praktyczną realizację schematu pokazanego na rys. 8 można przedstawić w postaci układu do pośredniego pomiaru współczynnika FS (rys.9), w którym nie jest konieczne włączenie prądowej skrzynki obciążenia, gdyż prawdziwa jest nierówność: $R_b, X_b \ll R_{fe}, X_{\mu}$.



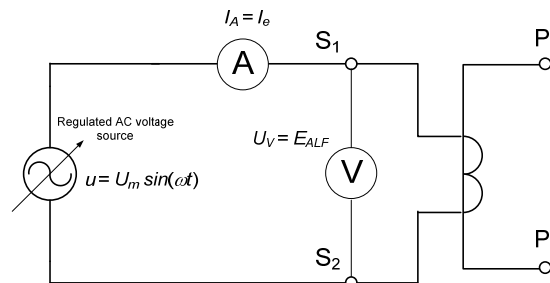
Rys. 9. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania FS w pośredniej metodzie odwzorowania napięciowego.

Przekładnik badany pozostaje w stanie otwartego obwodu pierwotnego a jego uzwojenie wtórne jest zasilane ze źródła napięcia przemiennego $u(t)$, które powinno być praktycznie sinusoidalne. Dla pomiaru należy zwiększać wartość skuteczną napięcia $u(t)$ do osiągnięcia przez prąd magnesujący przekładnika wymaganej wartości $0,1 \times FS \times I_{sr}$. Wynik sprawdzenia FS przekładnika należy uznać za pozytywny, gdy graniczna wartość napięcia U_L , dla której $I_e = 0,1 \times FS \times I_{sr}$, spełnia nierówność

$$(8) U_L < E_{FS} \Rightarrow U_L < FS \times I_{sr} \times \sqrt{(R_{ct} + R_b)^2 + X_b^2}$$

Woltomierz V powinien być miernikiem wartości średniej z modułu, wyskalowanym w wartościach skutecznych dla przebiegu sinusoidalnego, natomiast amperomierz A powinien być przyrządem true rms.

Sprawdzenie współczynnika ALF może być wykonane w warunkach otwartego obwodu pierwotnego (rys. 10) przy zasilaniu strony wtórnej przekładnika praktycznie sinusoidalnym napięciem $u(t)$ o wartości skutecznej równej granicznej sile elektromotorycznej E_{ALF} .



Rys. 10. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania ALF w pośredniej metodzie odwzorowania napięciowego.

Wywołany w tych warunkach prąd wzbudzący I_e o wartości skutecznej wyrażonej w procentach znamionowego prądu wtórnego pomnożone przez współczynnik granicznej dokładności ALF nie powinien przekraczać wartości odpowiadającej granicznej wartości błęd całkowitego 5% (klasa 5P lub 5PR) lub 10% (klasa 10P lub 10PR) obliczonego ze wzoru:

$$(9) \varepsilon_c = \frac{I_e}{ALF \times I_{sr}} \cdot 100\%$$

Wyniki badań eksperymentalnych

W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań identycznych modeli przekładników otrzymane metodą analityczną, symulacyjną oraz z pomiarów modeli fizycznych.

Tabela. 1. Porównanie wartości FS wyznaczonych różnymi metodami.

Przekładnik 5/5A	Rdzeń 2,5VA	Rdzeń 5VA
Metoda analityczna	4,0	2,75
Metoda symulacyjna	3,9	2,7
Metoda pośrednia	3,6	2,5
Metoda bezpośrednia	3,4	2,4

Wnioski

- W metodzie analitycznej i symulacyjnej przyjęto współczynnik kształtu = 1,41. Wyznaczone tymi metodami wartości współczynnika FS są w każdym przypadku większe od wartości pomierzonych. Uzyskanie lepszej zgodności rezultatów obliczeń i pomiarów wymagałoby uwzględnienia każdorazowo kształtu prądu jałowego projektowanego przekładnika.
- Powyższy wniosek, mimo że z metrologicznego punktu widzenia niezbyt optymistyczny, daje projektantowi obwodów elektromagnetycznych przekładników prądowych do pomiarów około 10-procentowy zapas wartości FS. Oznacza to dużą pewność spełnienia tego wymagania.
- W przypadku współczynnika ALF przytoczone we wniosku pierwszym spostrzeżenie nie jest korzystne. Może się zdarzyć, że w wyniku obliczeń wartość współczynnika ALF będzie prawidłowa, a wartość otrzymana z pomiarów będzie mniejsza od wartości znamionowej, co dyskwalifikuje wykonany już obwód elektromagnetyczny przekładnika. Należy jednak

pamiętać, że obwody magnetyczne przekładników prądowych do zabezpieczeń są wykonywane ze stali elektrotechnicznej, której charakterystyka magnesowania nie wykazuje, na tle materiałów magnetycznych miękkich wykorzystywanych do budowy rdzeni przekładników do pomiarów (materiał nanokrystaliczny), tak silnej ostrości przejścia do stanu nasycenia. Oznacza to, że wartości współczynników szczytu i kształtu prądu jałowego przekładnika nie odbiegają od wartości właściwych dla napięć sinusoidalnych, co powoduje lepszą zbieżność wyników obliczeń i pomiarów.

- Metoda pośrednia może być zastosowana tylko do przekładników prądowych z rdzeniami toroidalnymi. Natomiast metoda bezpośrednia może być zastosowana do przekładników prądowych z rdzeniami o dowolnym kształcie.
- W metodzie bezpośredniej zaleca się zastosowanie specjalnego urządzenia elektronicznego umożliwiającego pomiar z podtrzymywaniem wynikiem wartości skutecznej prądu różnicowego i pierwotnego, a także sterowanie załączaniem i czasem przepływu prądu probierczego.

Autorzy. dr hab. inż. Wiesław Jałmużny wieslaw.jalmuzny@p.lodz.pl, dr inż. Danuta Adamczewska danuta.adamczewska@p.lodz.pl, dr inż. Iwonna Borowska-Banaś, iwonnabb@p.lodz.pl. Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, Zakład Przekładników i Kompatybilności Elektromagnetycznej, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź

LITERATURA

- [1] PN-EN 61869-2: 2013 – wersja angielska, Przekładniki – Wymagania szczegółowe dotyczące przekładników prądowych (zastępuje normy: PN-EN 60044-1:2000, PN-EN 60044-1:2000/A2:2004, PN-EN 60044-1:2000/A1:2003, PN-EN 60044-6:2000).
- [2] Adamczewska D., Borowska-Banaś I., Jałmużny W.: Program obliczania rdzeni i uzwojeń przekładników prądowych. W: Materiały XVII Krajowego Sympozjum Przekładnikowego, Tworzyjanki, 2002, s.31-38.
- [3] Jałmużny W.: Metoda obliczeniowa wyznaczania błędu całkowitego przekładników prądowych przy przetężeniach. Materiały konferencyjne XX Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów, Szczecin 1988, Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej nr 386, ss. 84-89.
- [4] Jałmużny W., Adamczewska D., Borowska-Banaś I.: Estimating current transformer core characteristics application. Program do wyznaczania charakterystyk rdzeni przekładników prądowych, Energetyka, problemy energetyki i gospodarki paliwowo-energetycznej, XII 2010, str.601-603.
- [5] Jałmużny W., Kawczyński R.: Urządzenie do szybkiego pomiaru błędu całkowitego przekładników prądowych. Przegląd Elektrotechniczny 1987, z. 4, ss. 92-94.
- [6] Wolpert T.: Praca transformatorów prądowych w układach zabezpieczeń z uwzględnieniem wpływu nasycenia. Praca doktorska. PŁ, Łódź 1956.