

Projektowanie przekładników prądowych klasy S

Streszczenie. W artykule opisano możliwość zastosowania programu komputerowego do projektowania przekładników prądowych klasy S. Przedstawiono wyniki praktycznej weryfikacji przyjętego rozwiązania poprzez porównanie błęd prądowego i kąтового dla modelu cyfrowego i fizycznego badanego przekładnika prądowego.

Abstract. The paper presents mathematical model and its application in design process of S class current transformers. The accuracy of the designed method was verified by comparing the current error and phase displacement of digital and physical models of the tested CT. (CAD of S class current transformers).

Słowa kluczowe: przekładniki prądowe klasy S, projektowanie wspomagane komputerem, aproksymacja charakterystyk magnesowania.

Keywords: S class current transformers, computer-aided design, approximation of magnetization and loos curves.

Wstęp

Przekładniki prądowe są ważnymi, z punktu widzenia przetwarzania prądu na znormalizowany prąd wtórny, elementami sieci elektroenergetycznej. Ze względu na wykorzystanie, wyróżniono dwie kategorie przekładników – do pomiarów i do zabezpieczeń. Przekładniki prądowe do pomiarów, zachowując wymaganą, ustaloną przez klasę dokładności jakoś metrologiczną, zapewniają przede wszystkim prawidłowe rozliczanie energii elektrycznej. Zadaniem przekładników do zabezpieczeń jest ochrona urządzeń przed skutkami zakłóceń w pracy systemu elektroenergetycznego.

Obecnie, zamiast przekładników prądowych zwykłych klas 0,2 i 0,5, projektanci układów pomiarowych, w ślad za stawianymi przez eksploatatorów sieci wymaganiami, przewidują instalowanie przekładników prądowych specjalnych klas dokładności 0,2 S lub 0,5 S. Sytuacja taka jest praktycznie powszechna dla przekładników niskiego napięcia, występuje jednak także w przypadku rozdzielnic średniego napięcia oraz rzadko w stacjach elektroenergetycznych WN. Wynika ona zarówno z potrzeby określenia dokładności przetwarzania prądu w przypadku niewielkiego zapotrzebowania na moc, bliskiego 1% mocy znamionowej, jak i dążenia do osiągnięcia zgodności zakresu pracy wejściowego obwodu prądowego liczników energii elektrycznej ze zdefiniowanym błędami granicznymi zakresem prądu pierwotnego przekładników klasy S (1-120)%. Wzrostowi wymagań metrologicznych stawianych przekładnikom prądowym klasy S towarzyszą, nie występujące w przypadku zwykłych klas dokładności, problemy przy projektowaniu ich obwodów magnetycznych. Wynikają one z konieczności wykorzystania charakterystyk magnesowania i stratności materiału rdzenia dla skrajnie małych wartości amplitudy indukcji magnetycznej B_m , rzędu kilku militesli.

W związku z tym niezbędna jest modyfikacja już eksploatowanych programów do projektowania obwodów elektromagnetycznych przekładników prądowych [1], [2]. Wprowadzone zmiany muszą uwzględniać konieczność znajomości przebiegu charakterystyk zastosowanego materiału ferromagnetycznego w zakresie poniżej kilku mT umożliwiając tym samym projektowanie przekładników prądowych również klasy S.

Dla obydwu specjalnych, dopuszczonych przez normę [3] klas dokładności: 0,2 S i 0,5 S przekładników prądowych błęd prądowy i kątowy dla tych klas nie powinny przekraczać, przy znamionowej częstotliwości, wartości granicznych podanych w tabeli 1, przy obciążeniu wtórnym o dowolnej wartości zawartej w przedziale od 25% do 100% obciążenia znamionowego [3].

Tabela1. Błąd prądowy i kątowy klasy S według normy [3]

Klasa	Procentowy błąd prądowy (przekładni) dla podanych procentowych wartości prądu znamionowego + lub –				
	1%	5%	20%	100%	120%
0,2 S	0,75	0,35	0,2	0,2	0,2
0,5 S	1,5	0,75	0,5	0,5	0,5

Klasa	Błąd kątowy dla podanych procentowych wartości prądu znamionowego + lub –									
	minuty					centyradiany				
	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
0,2 S	30	15	10	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3	0,3
0,5 S	90	45	30	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9	0,9

Przekładniki klasy S są przeznaczone do współpracy z urządzeniami pomiarowymi przystosowanymi do poprawnego pomiaru prądu w zakresie od 1% do 120% prądu znamionowego. Oznacza to, że określony metrologicznie zakres prądu wtórnego jest w przypadku przekładników o znamionowym prądzie wtórnym 1 A równy od 10 mA do 1,2 A, a dla przekładników, których znamionowy prąd wtórny jest równy 5 A – od 50 mA do 6 A.

Modyfikacja modelu cyfrowego przekładnika prądowego

Wykorzystany w realizacji prac [1], [2] model cyfrowy przekładnika prądowego pozostał w swojej głównej postaci niezmienny. Wprowadzona zmiana dotyczy jego uzupełnienia o opcję projektowania przekładników klasy S. Ekran umożliwiający wprowadzanie danych znamionowych projektowanej wersji przekładnika prądowego przedstawiono na rys.1.

Celem obliczeń projektowych realizowanych w ramach opracowanego programu komputerowego [1], [2] jest określenie rodzaju materiału i wymiarów rdzenia toroidalnego dla wymaganych amperozwojów i obciążenia znamionowego. Przy czym koniecznym jest spełnienie przez projektowany przekładnik prądowy wymagań wskazanej klasy dokładności. Problem ten może być prawidłowo rozwiązany pod warunkiem znajomości charakterystyk magnesowania i stratności dostępnych materiałów ferromagnetycznych, odpowiednich dla rdzeni projektowanych przekładników. Można przy tym wykorzystać charakterystyki dostarczone przez producentów materiałów magnetycznych. Jednak rzadko obejmują one zakres indukcji magnetycznej poniżej 50 mT, szczególnie w odniesieniu do krzywej stratności.

Przekładniki prądowe do pomiarów

Dane znamionowe

Symbol przekładnika do pomiarów	TEST
Amperozwoje znamionowe	(Iz)n 100 A
Prąd wtórny znamionowy	I2n 5,00 A
Moc znamionowa	Sn 5,00 VA
Współczynnik mocy	cosφ 0,80
Klasa dokładności pomiarowa	k1p 0,20 <input checked="" type="checkbox"/> klasa S
Współczynnik bezpieczeństwa	FS 5,00
Znamionowy prąd cieplny	Ith 60,00 kA
Napięcie probiercze o częstot. sieciowej	Up 3,00 kV
Częstotliwość znamionowa	fn 50 Hz
Masa właściwa materiału rdzenia	ρ 7200,00 kg/m ³
Krotność prądu	ki 1,00
Współczynnik wypełnienia rdzenia	k 0,87

Rodzaj blachy:
 Transformatorowa Permaloj Inne

Rdzeń składany:
 osiowo promieniowo

< Wstecz Dalej > Anuluj

Rys. 1. Ekran wprowadzania danych znamionowych projektowanego przekładnika prądowego

Miarodajne charakterystyki materiałów magnetycznych, w zakresie od kilku militesli do indukcji punktu kolanowego, wyznaczono przy zastosowaniu oryginalnej metody, której podstawy opisano w [4]. Metoda ta jest oparta na wyznaczeniu błędów prądowego i kąтового przekładnika prądowego, którego toroidalny rdzeń stanowi próbkę wykonaną z badanego materiału ferromagnetycznego. Otrzymane wyniki mają postać dyskretną, czyli wyznaczone charakterystyki magnesowania i stratności są krzywymi odcinkowo aproksymowanymi.

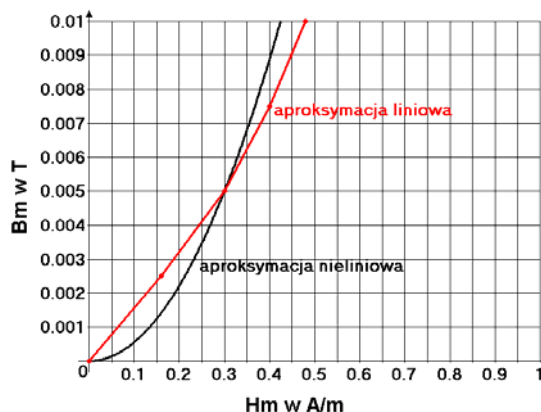
Problemy pojawiające się przy doborze rdzeni przekładników klasy S dotyczą głównie zapewnienia zgodności z wymaganiami metrologicznymi przy 1% prądu znamionowego. W dolnej części zakresu pracy obwodu magnetycznego przekładnika klasy S, amplituda indukcji magnetycznej wynosi najczęściej kilka militesli, co narzuca potrzebę znajomości przebiegu charakterystyk materiału rdzenia na tak niskim poziomie jej przebiegu.

Wykorzystując metodę opisaną w publikacjach [4] i [5], wyznaczono charakterystyki magnesowania i stratności różnych materiałów ferromagnetycznych miękkich o dolnym zakresie indukcji równym około 10 mT.

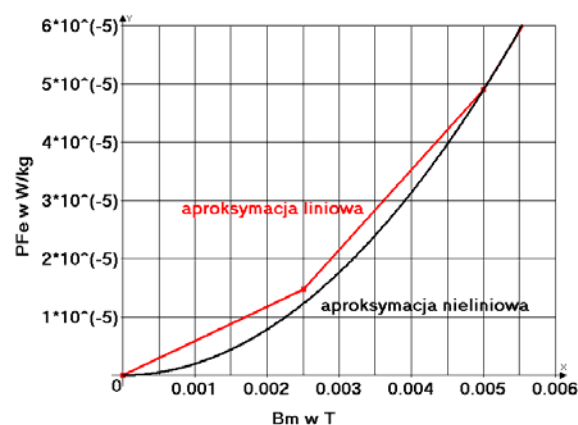
W programie do projektowania przekładników [1], [2], między poszczególnymi punktami charakterystyk magnesowania i stratności zastosowano aproksymację liniową. W jej wyniku, dla początkowego zakresu indukcji magnetycznej, zawartego między 0 a 5 mT, otrzymano zawyżone względem rzeczywistym wartości przenikalności magnetycznej i stratności (rys. 2), co wywiera znaczący wpływ na uzyskane metodą obliczeniową błędy projektowanych przekładników dla małej procentowej wartości prądu pierwotnego.

Zbadano różne przybliżenia przebiegu charakterystyk magnesowania i stratności dla punktów początkowych oraz poszukiwano takich funkcji aproksymujących, które dałyby najbardziej zbliżone błędy transformacji modelu cyfrowego i fizycznego. Dla większych wartości indukcji aproksymacja liniowa jest wystarczająca.

Na rys. 2 i rys. 3 pokazano przykładowe przebiegi krzywych magnesowania i stratności magnetycznej dla bardzo małych indukcji.



Rys. 2. Charakterystyka magnesowania stali elektrotechnicznej dla małych wartości indukcji magnetycznej – aproksymacja liniowa i nieliniowa



Rys. 3. Charakterystyka stratności stali elektrotechnicznej dla małych wartości indukcji – aproksymacja liniowa i nieliniowa

Weryfikacja modelu cyfrowego

Poprawność przyjętego modelu cyfrowego została zweryfikowana w badaniach przeprowadzonych dla dwóch modeli fizycznych przekładników prądowych z rdzeniami toroidalnymi, o podanych parametrach.

Przekładnik 1:

- średnica zewnętrzna rdzenia 86 mm
- średnica wewnętrzna rdzenia 74 mm
- wysokość 30 mm
- przekładnia znamionowa 600/5A
- klasa dokładności 0,2S
- moc znamionowa 5VA

Przekładnik 2:

- średnica zewnętrzna rdzenia 53 mm
- średnica wewnętrzna rdzenia 40 mm
- wysokość 30 mm
- przekładnia znamionowa 600/5A
- klasa dokładności 0,2S
- moc znamionowa 5VA

Dla przekładnika 1 porównano wartości indukcji i błędów transformacji w trzech przypadkach:

- Model cyfrowy przy zastosowaniu aproksymacji liniowej charakterystyk obwodu magnetycznego w całym zakresie indukcji.
- Model cyfrowy z wykorzystaniem nowego sposobu aproksymacji w początkowej części przebiegu charakterystyk obwodu magnetycznego.
- Model fizyczny.

W tabeli 2 przedstawiono wartości indukcji magnetycznej dla modeli cyfrowych A i B. Wyznaczenie wartości indukcji dla modelu fizycznego C było niemożliwe.

Tabela 3 zawiera zestawienie błędów transformacji dla wszystkich trzech badanych modeli przekładnika 1. Wartości błędów dla modeli A i B otrzymano za pomocą programu do projektowania przekładników, natomiast model fizyczny C zbadano za pomocą mostka (komparatora) do pomiaru błędu prądowego i kąтового.

Tabela 2. Wartości indukcji dla znormalizowanych krotności prądu

Krotność prądu	Indukcja [T]		
	A	B	C
1,2	0,395	0,395	-
1	0,329	0,329	-
0,2	0,066	0,066	-
0,05	0,016	0,016	-
0,01	0,003	0,003	-

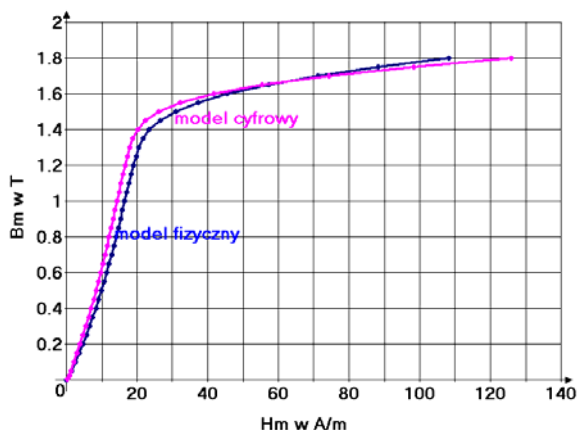
Tab. 3. Błędy transformacji dla modeli cyfrowych A i B oraz modelu fizycznego C

Krotność prądu	Błąd prądowy w %			Błąd kątowy w min.		
	A	B	C	A	B	C
1,2	-0,17	-0,17	-0,22	3,67	3,67	3,00
1	-0,18	-0,18	-0,22	3,79	3,79	3,38
0,2	-0,22	-0,22	-0,27	4,84	4,84	5,21
0,05	-0,28	-0,33	-0,25	7,9	6,94	7,74
0,01	-0,32	-0,78	-0,78	22,9	15,4	16,16

Na podstawie wyników zawartych w tabelach 2 i 3 można ocenić stopień zbieżności wyznaczonych błędów dla modelu B, czyli cyfrowego z aproksymacją nieliniową charakterystyk obwodu magnetycznego, z modelem fizycznym C, szczególnie w zakresie małych wartości indukcji.

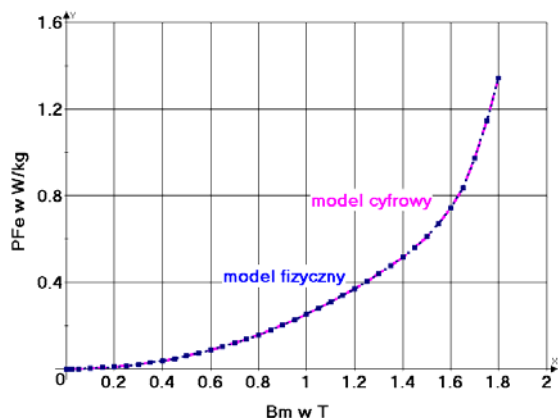
Tak duża zbieżność wyników uzyskana została dzięki możliwie dokładnemu odwzorowaniu charakterystyk magnetycznych w modelu cyfrowym

Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono, dla szerokiego zakresu wartości indukcji magnetycznej, charakterystyki magnesowania i stratności dla modeli B i C, przy czym ich przebiegi powyżej indukcji punktu kolanowego są wynikiem dokonanej ekstrapolacji.

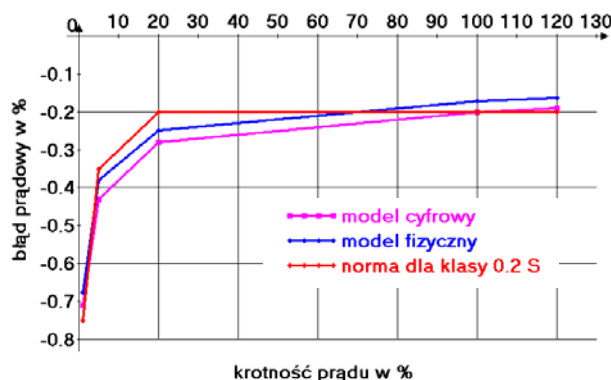


Rys. 4. Charakterystyki magnesowania modeli B i C przekładnika prądowego 1 w szerokim zakresie indukcji

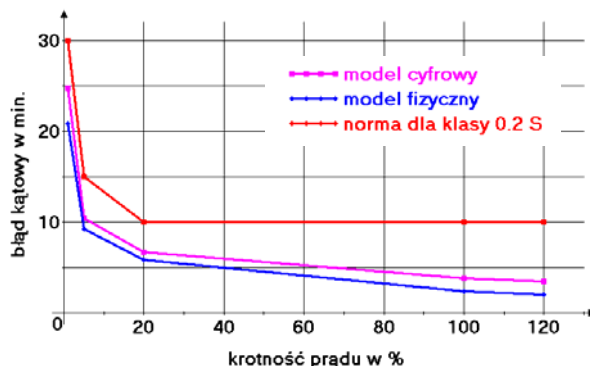
W przypadku przekładnika 2 wyznaczono błędy transformacji dla modelu cyfrowego oraz fizycznego i przedstawiono je na rysunkach 6 i 7.



Rys. 5. Stratność materiału rdzenia modeli B i C przekładnika prądowego 1 w szerokim zakresie indukcji



Rys. 6. Charakterystyki błędów prądowych dla przekładnika 2 –model cyfrowy i fizyczny przy obciążeniu równym 100% obciążenia znamionowego



Rys. 7. Charakterystyki błędów kątowych dla przekładnika 2 –model cyfrowy i fizyczny przy obciążeniu równym 100% obciążenia znamionowego

Charakterystyki błędów przekładnika prądowego 2, zarówno dla jego modelu cyfrowego jak i fizycznego, są podobnego kształtu. Producenci rdzenia nie mogą zagwarantować idealności przebiegu krzywych magnesowania i stratności dla każdego rdzenia danej dostawy. Może to spowodować stosunkowo niewielkie różnice charakterystyk błędów dla badanych modeli. Autorzy do obliczeń realizowanych dla modelu cyfrowego wykorzystali określone charakterystyki magnetyczne. Mogły one różnić się od tych, które były właściwe zbudowanemu modelowi fizycznemu. Inną przyczyną może być tkwić w pewnej tolerancji wartości współczynnika wypełnienia przekroju materiałem ferromagnetycznym. Może ona różnić się między poszczególnymi rdzeniami w obrębie danej partii nawet o kilka procent.

Wnioski

- Projektowanie przekładników klasy S stwarza ich konstruktorom duże trudności, ze względu na znormalizowaną pracę przekładnika przy amplitudzie indukcji magnetycznej mniejszej niż 5 mT, a także ze względu na identyczność granicznych wartości błędów zarówno dla 120% jak i 20% prądu znamionowego.
- Możliwość poprawnego wyznaczenia krzywych magnesowania i stratności dla początkowego zakresu ich przebiegu, ma decydujące znaczenie dla właściwego doboru obwodu elektromagnetycznego projektowanego przekładnika prądowego. Zawyżone przybliżeniem liniowym wartości przenikalności magnetycznej i stratności, zniekształcają wyniki obliczeń konstrukcyjnych.
- Przyjęta w opracowanym dla przekładników prądowych klasy S modelu cyfrowym nieliniowa aproksymacja początkowej części przebiegu charakterystyk magnesowania i stratności, daje dopuszczalną względami praktycznymi metrologiczną zbieżność z modelami fizycznymi, bez względu na rodzaj materiału i parametry rdzenia. Na tej podstawie można uznać ją za poprawną.
-

Autorzy: dr inż. Danuta Adamczewska, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: danuta.adamczewska@p.lodz.pl, dr inż. Iwonna Borowska-Banaś, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: iwonnabb@p.lodz.pl, dr hab. inż. Wiesław Jałmużny, E-mail: wiesjalm@gmail.com

LITERATURA

- [1] 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.
- [2] Jałmużny W., Adamczewska D., Iwonna Borowska-Banaś.: Komputerowa optymalizacja obwodu elektromagnetycznego przekładników prądowych. Logistyka nr 6/2014, ss. 4781-4785.
- [3] Norma PN-EN 61869-2: 2013E, Przekładniki – Wymagania szczegółowe dotyczące przekładników prądowych.
- [4] Jałmużny W.: Wyznaczanie charakterystyk magnesowania i stratności małowymiarowych próbek pierścieniowych. IV Krajowe Sympozjum Pomiarów Magnetycznych, Kielce-Borków, 12-14 października 1994. ZN Politechniki Świętokrzyskiej, Elektryka 31, ss.105-110.
- [5] Jałmużny W., Adamczewska D., Borowska-Banaś I.: Estimating current transformer core characteristics application, Energetyka, nr 12/2010, ss. 601-603.