

**ELŻBIETA LEŚNIEWSKA**  
**WIESŁAW JAŁMUŻNY**  
**DANUTA ADAMCZEWSKA**  
**IWONNA BOROWSKA-BANAŚ**

Katedra Elektrotechniki Ogólnej i Przekładników  
Politechnika Łódzka

## **HYBRYDOWA METODA PROJEKTOWANIA PRZEKŁADNIKÓW PRĄDOWYCH KLASY TPZ**

### **1. WSTĘP**

Autorzy artykułu od lat zajmują się zagadnieniami związanymi z projektowaniem przekładników prądowych klasy TP. Wynikiem ich prac stał się autorski program „Projektowanie przekładników prądowych do stanów przejściowych” omawiany w artykułach [2], [3], [4], [5]. Program przeznaczony jest do komputerowego wspomagania obliczeń konstrukcyjnych i dokonywania oceny właściwości metrologicznych projektowanych przekładników klasy TP, czyli przekładników przeznaczonych do pracy w stanach przejściowych. Jego algorytm wykorzystuje model cyfrowy zbudowany na podstawie analitycznych zależności opisujących właściwości tego typu przekładników. Wspomagana komputerowo metoda symulacji matematycznej umożliwia wyznaczenie parametrów geometrycznych i elektrycznych wielu różnych wersji obliczanej konstrukcji w bardzo krótkim czasie. Na dokładność otrzymanych wyników duży wpływ wywiera, pomijany często przy budowie modelu symulacyjnego, efekt nierównomiernego rozkładu pola w rdzeniu powodowany przez rozproszenie strumienia w otoczeniu szczelin.

Z doświadczenia wiadomo, że rozkład szczelin powietrznych w przekładnikach klasy TPZ ma istotny wpływ na ich właściwości metrologiczne, czyli na zdolność przekładnika do prawidłowej transformacji prądu w stanie przejściowym. Przy tej samej sumarycznej długości szczelin, a różnej ich liczbie, właściwości przekładnika są zupełnie inne. Rdzeń przekładnika może nawet

lokalnie wchodzić w nasycenie, prąd wtórny może być odkształcony, co powoduje, że taki projekt powinien zostać odrzucony.

Podczas projektowania przekładników zabezpieczeniowych konstruktorzy zwykle stosują wzór przybliżony

$$H_{Fe}l_{Fe} + H_p l_p = \Theta \quad (1)$$

gdzie  $l_p$  jest łączną długością szczelin powietrznych, a  $l_{Fe} = 2\pi r_{sr}$  jest średnią długością w ferromagnetycznej części obwodu magnetycznego.

Warunkiem zastosowania wzoru (1) jest założenie, że rozkład pola magnetycznego w rdzeniu jest równomierny, tymczasem założenie to w przypadku rdzenia ze szczelinami jest nieprawdziwe i w efekcie daje błędny wynik, zarówno co do kształtu zastępczej charakterystyki magnesowania, jak i w konsekwencji chwilowego prądu błędu, a tym samym nieprawdziwą ocenę projektowanego przekładnika.

Dlatego wśród konstruktorów wprowadzono pojęcie długości „szczeliny efektywnej” [1], innej niż długość szczeliny geometrycznej (rzeczywiście wyciętej w rdzeniu). Ze względu na nierównomierny rozkład pola i stosowanie wzoru (1) zaprojektowana długość szczeliny wyciętej w rdzeniu jest zawsze większa niż tzw. „szczelina efektywna”.

Rozkład pola magnetycznego w rdzeniu zależy od wielu parametrów, takich jak: wymiary rdzenia, liczba i wymiary szczelin powietrznych, a także materiału, z jakiego wykonany został rdzeń. Z doświadczenia wiadomo również, że im więcej szczelin dających w efekcie taką samą długość wypadkową, tym bardziej równomierny jest rozkład pola i tym bardziej długość „szczeliny efektywnej” zbliża się do długości rzeczywistej szczeliny wyciętej w rdzeniu. Książka [1], wydana przez rosyjskich autorów, szczegółowo zajmuje się tym problemem i podaje wiele empirycznych współczynników mających za zadanie zminimalizowanie błędów popełnianych przy projektowaniu.

Wykorzystana przez autorów numeryczna metoda polowo-obwodowa pozwala dokładnie określić rozkład pola w rdzeniu i dokładnie obliczyć przebieg czasowy chwilowego prądu błędu, a tym samym określić właściwości metrologiczne przekładnika zabezpieczeniowego klasy TPZ. Dzięki zastosowaniu tej metody można uniknąć drogiego i pracochłonnego budowania i badania wielu prototypów w celu otrzymania konstrukcji przekładnika spełniającego wymagania normy, co jest nieodłącznie związane ze stosowaniem metody analityczno-empirycznej.

W artykułach [6], [7], [8] przedstawiono analizę pracy przekładników prądowych klasy TPZ w stanie ustalonym w warunkach znamionowych oraz w stanie przejściowym wymaganym przez normę [10] przy ocenie chwilowego prądu błędu. Analizę przeprowadzono, przy zastosowaniu metody polowo-obwodowej opartej o metodę elementów skończonych, do obliczenia rozkładów

poła magnetycznego oraz wyznaczenia błędów przekładnika w stanach ustalonych i przejściowych.

Metoda polowo-obwodowa pozwala wyznaczyć błędy przekładnika TPZ dla określonych danych materiałowych i wymiarów geometrycznych rdzenia oraz liczby i długości szczelin. Program projektowania przekładników powinien te dane dostarczyć. Obliczenia przebiegu prądu błędu w stanie przejściowym wymagają pełnej trójwymiarowej analizy przestrzenno-czasowej przy jednoczesnym zastosowaniu metody polowo-obwodowej, co jest skomplikowane i czasochłonne. Znacznie prościej jest obliczyć rozkład pola w stanie ustalonym dla konkretnego rdzenia pracującego w jednym punkcie na liniowej części charakterystyki magnesowania. Dlatego na potrzeby konstruktorów została opracowana metoda pozwalająca obliczyć długość „szczeliny efektywnej” zależnie od wymiarów rdzenia, długości i liczby szczelin i materiału, z jakiego wykonany został rdzeń [8].

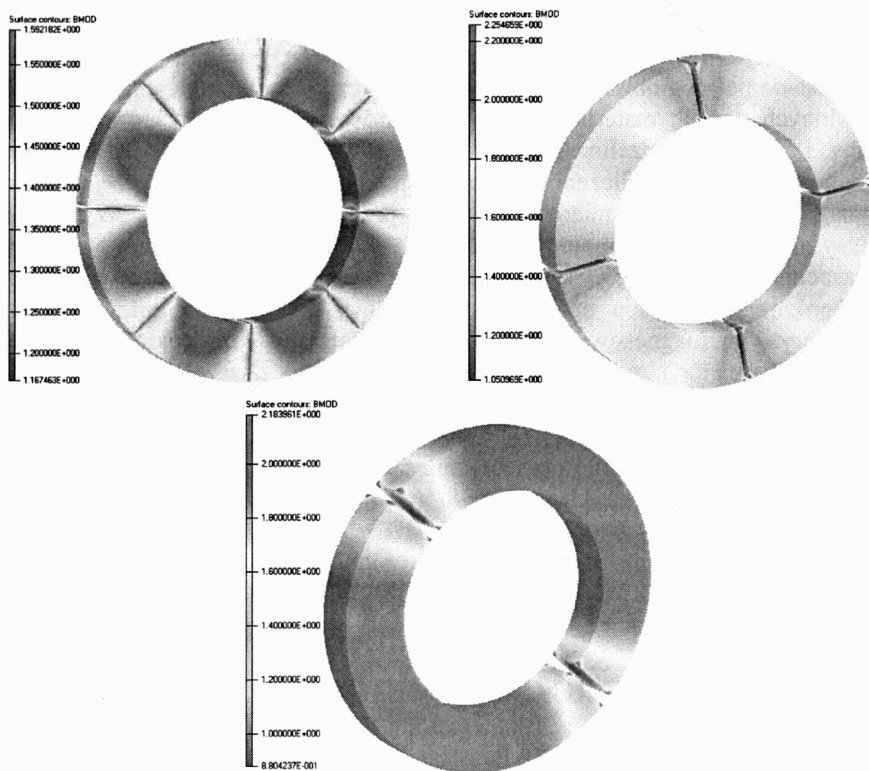
W pracy podjęto próbę opracowania takiej ogólnej metody projektowania przekładników prądowych klasy TPZ, która z wystarczającą, z punktu widzenia obliczeń konstrukcyjnych, dokładnością umożliwi projektowanie przekładników TPZ przy uwzględnieniu występujących w nich w nich rzeczywistych zjawisk fizycznych.

## **2. PORÓWNANIE RÓŻNYCH METOD PROJEKTOWANIA**

W artykułach [6], [7], [8] przedstawiono porównanie właściwości metrologicznych modeli fizycznych i wyniki obliczeń przeprowadzone dla modeli matematycznych przy zastosowaniu metody polowo-obwodowej z pełną trójwymiarową analizą przestrzenno-czasową.

W celu przeprowadzenia analizy porównawczej zaprojektowano za pomocą programu „Projektowanie przekładników prądowych do stanów przejściowych” przekładniki TPZ 1200 A/1 A o identycznych wymiarach rdzeni i uzwojeń. Wzięto pod uwagę trzy rdzenie o takich samych wymiarach (średnica zewnętrzna i wewnętrzna odpowiednio 350 i 230 mm, wysokość 40 mm, łączna długość szczelin powietrznych 24 mm), ale o różnej liczbie szczelin: osiem szczelin po 3 mm, cztery szczeliny po 6 mm długości i dwie szczeliny po 12 mm długości przedstawione na rysunku 1.

Na rdzenie zostały nawinięte równomiernie uzwojenia wtórne o liczbie 1200 zwojów. W takich samych warunkach przy dwóch szczelinach po 12 mm każda, rdzeń wchodzi w stan nasycenia i przekładnik przestaje spełniać swoją rolę (prąd wtórny jest odkształcony). Błąd szczytowy obliczony za pomocą programu komputerowego w tym przypadku wynosi 41%.



Rys. 1. Rozkład indukcji magnetycznej [T] w rdzeniu przekładnika zabezpieczeniowego z ośmioma, czterema i dwiema szczelinami (przy łącznej długości szczeliny takiej samej  $\delta = 24$  mm) w stanie nieustalonym przy takim samym prądzie pierwotnym  $i_p = 30\sqrt{2}(\cos 314t - e^{-20t})$  kA w chwili czasowej  $t = 0,054$  s

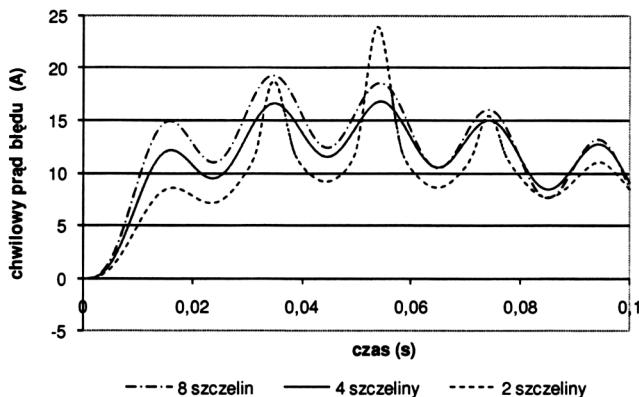
W celu weryfikacji poprawności modelu cyfrowego wykorzystanego w programie „Projektowanie przekładników prądowych do stanów przejściowych” autorzy artykułu porównali charakterystyki magnesowania oraz właściwości metrologiczne modeli otrzymanych na drodze analizy polowobwodowej z otrzymanymi z wykorzystaniem programu autorskiego.

Otrzymane z wykorzystaniem metody opisanej w artykule [8] długości „efektywnych szczelin powietrznych” (tablica 1), wprowadzono, jako składniki układu geometrycznego rdzenia, w procesie projektowania za pomocą programu autorskiego „Projektowanie przekładników prądowych do stanów przejściowych”.

Tablica 1

Liczba szczelin	Sumaryczna długość szczeliny geometrycznej	Długość zastępczej „szczeliny efektywnej”
2	24 mm	10,1 mm
4	24 mm	15,0 mm
8	24 mm	19,2 mm

W celu weryfikacji poprawności modelu wykorzystanego w programie „Projektowanie przekładników prądowych do stanów przejściowych” autorzy artykułu porównali charakterystyki magnesowania oraz właściwości metrologiczne otrzymane na drodze analizy polowo-obwodowej z otrzymanymi z wykorzystaniem programu autorskiego.



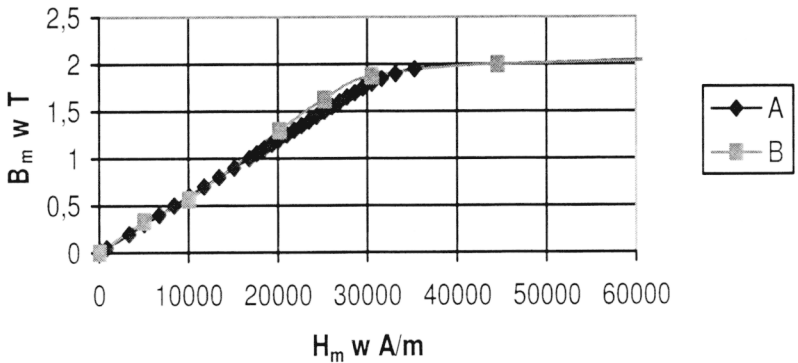
Rys. 2. Obliczony chwilowy prąd błędu (sprowadzony do strony wtórnej) dla konstrukcji rdzeni przekładnika o różnej liczbie szczelin w stanie nieustalonym przy prądzie pierwotnym  $i_p = 30\sqrt{2}(\cos 314t - e^{-20t})$  kA

Otrzymane z wykorzystaniem metody opisanej w artykule [8] długości „efektywnych szczelin powietrznych” (tablica 1), wprowadzono, jako składniki układu geometrycznego rdzenia, w procesie projektowania za pomocą programu autorskiego „Projektowanie przekładników prądowych do stanów przejściowych”.

Na rysunku 3 przedstawiono otrzymane w wyniku badań, przeprowadzonych dla obu typów modeli, charakterystyki magnesowania rdzeni zwijanych z taśmy stalowej VM89-27N z „efektywną szczeliną powietrzną” o długości 19,2 mm (średnia długość strumienia w rdzeniu  $l_{Fe} = 0,97$  m).

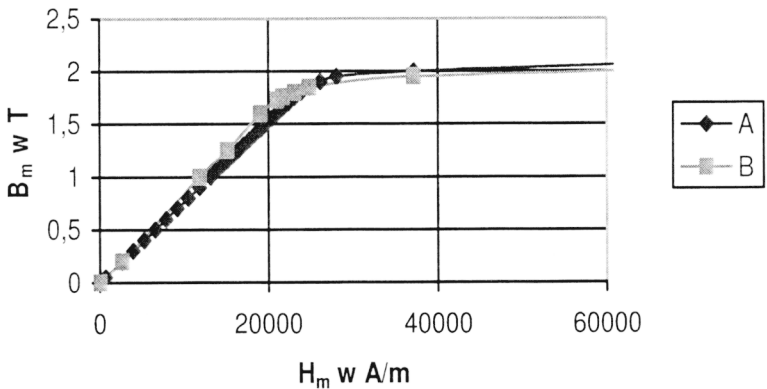
Na rysunku 4 przedstawiono, otrzymane dla obu typów rozpatrywanych modeli, charakterystyki magnesowania rdzeni zwijanych z taśmy stalowej VM89-27N z „efektywną szczeliną powietrzną” o długości 15 mm (średnia długość strumienia w rdzeniu  $l_{Fe} = 0,97$  m).

W celu przeprowadzenia oceny zbieżności charakterystyk magnesowania stali ze szczeliną powietrzną porównano wyniki błędów wyznaczonych z wykorzystaniem obydwu modeli. Wyniki otrzymane za pomocą symulacji cyfrowej i metodą połowo-obwodową przedstawiono w tabelicy 2, w której dodatkowo zamieszczono wyniki otrzymane w ramach badania modelu fizycznego.



Rys. 3. Charakterystyki magnesowania rdzeni zwijanych ze stali ET4 ze szczeliną powietrzną o efektywnej długości 19,2 mm (8 szczelin po 3 mm)

A – charakterystyka otrzymana z programu symulacyjnego  
B – charakterystyka otrzymana na podstawie analizy połowej



Rys. 4. Charakterystyki magnesowania rdzeni zwijanych ze stali ET4 ze szczeliną powietrzną o efektywnej długości 15,0 mm (4 szczeliny po 6 mm).

A – charakterystyka otrzymana z programu symulacyjnego  
B – charakterystyka otrzymana na podstawie analizy połowej

Tablica 2

Długość „efektywnej zastępczej” szczeliny powietrznej	Wyniki pomiarów modelu fizycznego	Wyniki obliczeń metodą polowo-obwodową w układzie 3D	Wyniki symulacji cyfrowej
(przy 8 szczelinach o długości 3 mm)  19,2 mm	$\Delta I = -0,92\%$	$\Delta I = -0,88\%$	$\Delta I = -0,98\%$
	$\delta_i = 398 \text{ min}$	$\delta_i = 346 \text{ min}$	$\delta_i = 379 \text{ min}$
	$\hat{\varepsilon}_{ac} = 11,4\%$	$\hat{\varepsilon}_{ac} = 9,7\%$	$\hat{\varepsilon}_{ac} = 11,3\%$
(przy 4 szczelinach o długości 6 mm)  15,0 mm	$\Delta I = -0,78\%$	$\Delta I = -0,62\%$	$\Delta I = -0,67\%$
	$\delta_i = 278 \text{ min}$	$\delta_i = 265 \text{ min}$	$\delta_i = 297 \text{ min}$
	$\hat{\varepsilon}_{ac} = 8,6\%$	$\hat{\varepsilon}_{ac} = 7,2\%$	$\hat{\varepsilon}_{ac} = 9,1\%$

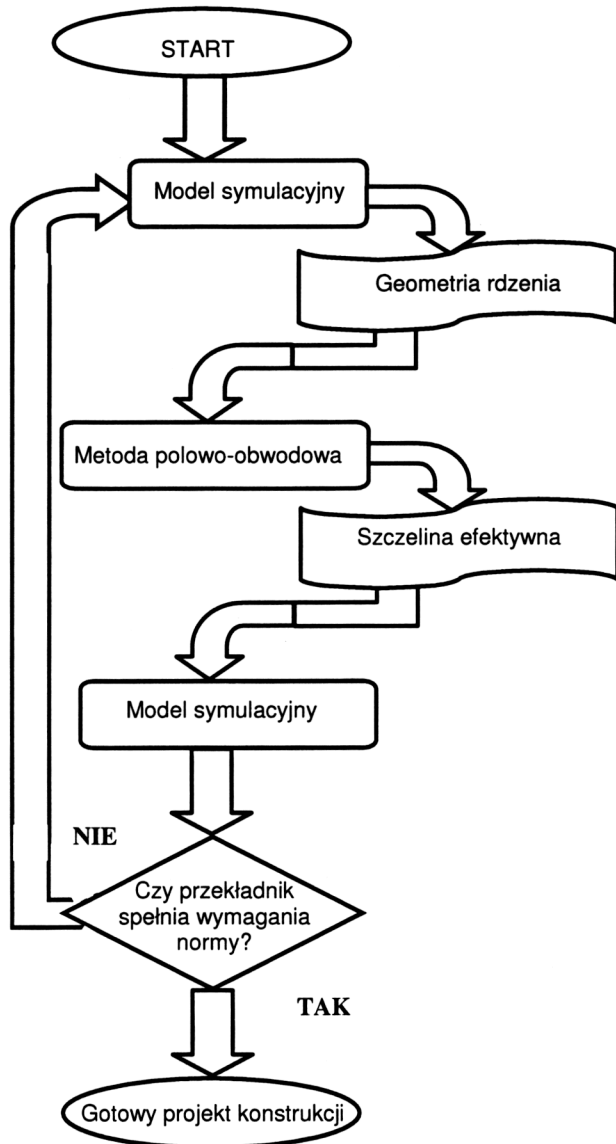
Dla porównania, wyniki obliczeń błędów dla szczeliny geometrycznej długości  $\delta = 24 \text{ mm}$  przy założeniu równomiernego rozkładu pola w rdzeniu, niezależnie od liczby szczelin (nawet dla dwóch szczelin, gdy transformacja prądu jest nieprawidłowa i taki projekt musi być odrzucony), wynoszą  $\Delta I = -0,83\%$ ,  $\delta_i = 460 \text{ min}$ ,  $\hat{\varepsilon}_{ac} = 13\%$ .

### 3. HYBRYDOWA METODA PROJEKTOWANIA

Proponowana przez autorów hybrydowa metoda projektowania przekładników prądowych klasy TPZ polega na współpracy programów opartych o metody polowo-obwodowe i obwodowe.

Dane znamionowe i parametry konstrukcyjne wprowadzane są do programu „Projektowanie przekładników prądowych do stanów przejściowych”.

Wynikiem obliczeń otrzymanym z programu są wymiary geometryczne rdzenia i łączna długość szczeliny powietrznej niezbędnej dla nieprzekroczenia granicznych wartości błędów, przy założeniu równomiernego rozkładu pola magnetycznego w rdzeniu.



Rys. 5. Schemat blokowy hybrydowej metody projektowania przekładników prądowych klasy TPZ



Otrzymane wyniki służą, jako wielkości wejściowe, do stworzenia modelu polowego. Po przeprowadzeniu trójwymiarowej analizy polowo-obwodowej można określić charakterystyki magnesowania rdzenia ze szczelinami w zależności od liczby i rozkładu szczelin (przy założonej łącznej długości szczeliny) oraz określić długość rzeczywistej szczeliny powietrznej. Po wprowadzeniu tego wymiaru do odpowiedniego modułu programu „Projektowanie przekładników prądowych do stanów przejściowych” otrzymuje się ostateczne parametry projektowanej konstrukcji.

Algorytm postępowania przy projektowaniu przekładników prądowych klasy TPZ metodą hybrydowa przedstawia rysunek 5.

Analiza porównawcza błędów transformacji przedstawionych w tablicy 2 obydwu modeli cyfrowych pozwala na stwierdzenie, że proponowana w artykule hybrydowa metoda projektowania przekładników prądowych klasy TPZ jest metoda efektywną, pozwalającą na otrzymanie gotowego projektu konstrukcji, spełniającego oczekiwania projektantów przy optimum czasowo-kosztowym.

## LITERATURA

- [1] **Afanasiew W.W., Adoniew N.M., Kibel W.M., Sirota I.M., Stognij B.S.:** Transformatory toka, Energoatomizdat, Leningrad, 1989.
- [2] **Adamczewska D., Borowska-Banaś I., Jałmużny W.:** Program obliczania przekładników do zabezpieczeń w stanach przejściowych klas TPX, TPY, TPZ. Materiały Konferencyjne XVIII Krajowego Sympozjum Przekładnikowego, Tworzyjanki 2003, ss. 71-80.
- [3] **Adamczewska D., Borowska-Banaś I., Jałmużny W.:** Projektowanie przekładników zabezpieczeniowych, przeznaczonych do pracy w stanach nieustalonych. Przegląd Elektrotechniczny, nr 1/2005, ss. 32-36.
- [4] **Jałmużny W.:** Modelowanie i symulacja przekładników prądowych klasy TPZ, XX Krajowe Sympozjum Przekładnikowe, Tworzyjanki 2005, ZN PŁ nr 964 Elektryka z.104, Łódź 2005, ss. 97-108.
- [5] **Jałmużny W., Adamczewska D., Borowska-Banaś I.:** Metoda symulacyjna oceny jakości metrologicznej przekładników prądowych do stanów przejściowych, XVI Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych, Krynica 17-21 września 2006, Pomiary Automatyka Kontrola, nr 10bis/2006, ss. 96-101.
- [6] **Leśniewska E., Ziemiński J.:** Transient State Analysis of Protective Current Transformers at Different Forced Primary Currents, Przegląd Elektrotechniczny 5'2006, pp. 57-60.
- [7] **Leśniewska E., Jałmużny W.:** Influence of the number of core air gaps on transient state parameters of TPZ class protective current transformers. IET Science, Measurement & Technology, March 2009, Vol. 3, Issue 2, pp. 105-112.
- [8] **Leśniewska E., Jałmużny W.:** Determination of the equivalent magnetic characteristic of the cores of TPZ class protective current transformers, Przegląd Elektrotechniczny 1'2009, pp. 123-126.

- [9] **Stognij B.C.**: Teorija vysokowoltnych izmieritelnych priobrazowatelej pieremiennowo toka i napriazeniija. Izdat. „Naukowa Dumka”. Kiev 1984.
- [10] PN-EN 60044-6: 2000, Przekładniki – Część 6: Wymagania dotyczące przekładników prądowych do zabezpieczeń w stanach przejściowych.

## **THE HYBRID METHOD OF DESIGN OF TPZ CLASS PROTECTIVE CURRENT TRANSFORMERS**

### **Summary**

In the paper, a method of the accurate design of TPZ class protective current transformers has been presented. The TPZ class protective current transformer has a core with air gaps. The effective total length of the air gaps determined based on field-and circuit numerical method permits on accuracy estimation the property of the designed protective current transformer using the author's software. Both programs; authors' „Design of protective current transformers for transient performance” and OPERA 3D, based on the numerical finite element method, interact with each other. The authors have showed the results of the use of numerical methods in the designing process.

*Artykuł recenzowany*