

## Wpływ parametrów transformatora nadprzewodnikowego na ograniczenie prądu w stanach przejściowych

**Streszczenie.** W artykule dokonano analizy parametrów transformatora nadprzewodnikowego, takich jak długość i grubość uzwojenia, szerokość szczeliny, prąd krytycznego nadprzewodnika oraz procentowe napięcie zwarcia, które pozwalają ograniczać prądy w stanach przejściowych. Poprawne projektowanie i wykonanie uzwojeń nadprzewodnikowych wraz z doбором parametrów taśmy nadprzewodnikowej 2G pozwala na ograniczenie prądów w stanach przejściowych do wartości ich prądu znamionowego. Etap modelowania komputerowego uzwojeń pozwoli na optymalizację doboru parametrów i materiałów do produkcji transformatorów nadprzewodnikowych

**Abstract.** In this paper, the analysis of the parameters of the superconducting transformer, which allows to limit transient currents, has been performed. The proper designing and carrying out the superconducting winding as well as selecting a proper superconducting 2G HTS tape allows to limit transient currents to the value of winding's rated current. Computer modelling of the transformer transient behavior will enable the optimization of the parameters and material design for superconducting transformer manufacture. (Influence of superconducting transformer's parameters on transient current limiting.)

**Słowa kluczowe:** transformator nadprzewodnikowy, ograniczanie prądów zwarcia, stany przejściowe  
**Keywords:** transformator nadprzewodnikowy, ograniczanie prądów zwarcia, stany przejściowe

### Wstęp

Obecnie stosowane taśmy nadprzewodnikowe HTS 2G w stanie rezystywnym posiadają dużą rezystywność. Dzięki temu istnieje możliwość budowania transformatorów nadprzewodnikowych, które ograniczają prąd w stanach przejściowych takich jak: zwarcie czy włączanie transformatora do sieci. Rezystancja uzwojeń wzrasta po przekroczeniu gęstości prądu krytycznego oraz temperatury krytycznej nadprzewodnika do wartości, która pozwala ograniczać prądy zwarcia. [1]

Do głównych zalet transformatora z uzwojeniami nadprzewodnikowymi należą:

- mniejsze straty w uzwojeniach,
- wyeliminowanie strat Joule'a w stanie nadprzewodnikowym ze względu na zerową rezystancję,
- zmniejszenie gabarytów i masy transformatora,
- brak oleju w układzie chłodzenia transformatora,
- odporność na zwarcia.

### Parametry pozwalające na ograniczenie prądu w stanie zwarcia

Jedną z największych korzyści zastępowania transformatorów konwencjonalnych, transformatorami z uzwojeniami nadprzewodnikowymi jest odporność na zwarcia, dzięki ograniczeniu prądu zwarcia przez uzwojenia nadprzewodnikowe. Wartość ograniczenia prądu zwarcia zależy od budowy uzwojeń nadprzewodnikowych oraz parametrów danej taśmy nadprzewodnikowej HTS 2G. Odporność na zwarcia transformatora nadprzewodnikowego możliwa jest dzięki małej wartości procentowego napięcia zwarcia. Siła elektrodynamiczna przy zwarciach oraz wartość prądu zwarcia, zależy od podstawowego parametru transformatora czyli od napięcia zwarcia  $u_z$ , podawanego w procentach. W tabeli 1 przedstawiono procentowe napięcie zwarcia  $u_z\%$  w transformatorach konwencjonalnych oraz w transformatorach nadprzewodnikowych. Wysokość uzwojeń oraz szczelina między uzwojeniami jest taka sama w obu transformatorach. [1]

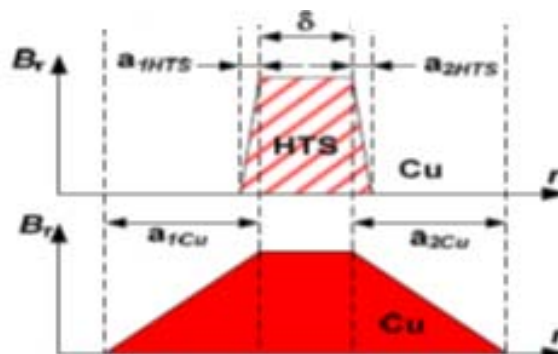
W transformatorach z uzwojeniami nadprzewodnikowymi procentowe napięcie zwarcia jest znacznie mniejsze niż w transformatorach z uzwojeniami

konwencjonalnymi. Im większa moc jednostki tym różnica pomiędzy wartościami napięcia zwarcia wzrasta.

Napięcie zwarcia w transformatorach konwencjonalnych i transformatorach nadprzewodnikowych jest proporcjonalne do pola powierzchni trapezu rys.1.

Tabela 1. Procentowe napięcia zwarcia w transformatorach konwencjonalnych i transformatorach nadprzewodnikowych w zależności od mocy jednostki [2], [3], [4]

Transformator	Procentowe napięcie zwarcia - $u_z\%$	
	Konwencjonalne	Nadprzewodnikowe
Małej mocy	<6	< 2 – 5
Dużej mocy	10-15	< 6 – 10

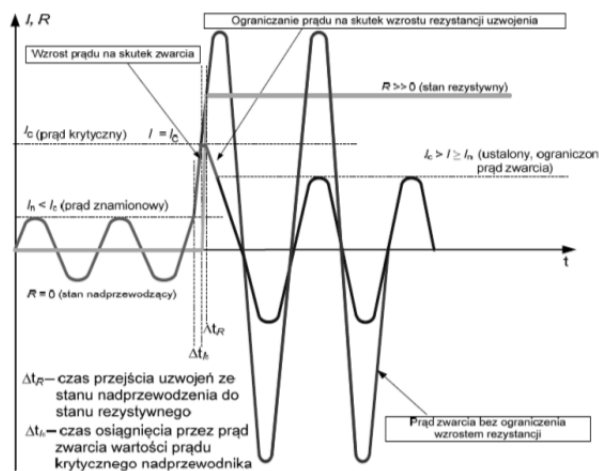


Rys.1. Zależność grubości uzwojeń transformatora na procentowe napięcie zwarcia

Grubość uzwojeń w transformatorach nadprzewodnikowych jest znacznie mniejsza od grubości uzwojeń z miedzi, przy tej samej wielkości szczeliny powietrznej  $\delta$ , dlatego też jest mniejsze pole powierzchni trapezu. Mniejsze pole trapezu oznacza mniejsze procentowe napięcie zwarcia. W projektowaniu transformatora nadprzewodnikowego możemy założyć pominięcie grubości uzwojeń transformatorów nadprzewodnikowych gdyż są bardzo cienkie ( $a_{Cu} \gg a_{HTS}$ ), (rys.1). Procentowe napięcie zwarcia w transformatorach nadprzewodnikowych będzie zależało tylko od szerokości szczeliny powietrznej  $\delta$ . [5]

Dobór odpowiedniego procentowego napięcia zwarcia w transformatorach konwencjonalnych uzależnione jest od dopuszczalnej wartości prądu zwarcia. W transformatorach dużej mocy wartość prądu zwarcia powinna być jak najmniejsza żeby ograniczyć dynamiczne skutki zwarcia. Obecnie stosowaną metodą ograniczenia prądu zwarcia i im towarzyszących sił dynamicznych jest zwiększenie procentowego napięcia zwarcia w transformatorach. Z kolei zwiększenie napięcia zwarcia odbywa się poprzez zwiększenie szerokości szczeliny powietrznej  $\delta$  pomiędzy uzwojeniami. [1]

W transformatorach nadprzewodnikowych przekroczenie prądu krytycznego na skutek zwarcia, skutkuje tym, że nadprzewodnik przechodzi do stanu rezystywnego co powoduje powstanie efektu samoograniczenia prądu zwarcia. Przejście nadprzewodnika do stanu rezystywnego oraz czas przejścia zależy od charakterystyki prądowo napięciowej nadprzewodnika. Na rysunku 2 przedstawiony jest efekt samoograniczenia prądu zwarcia w uzwojeniu transformatora nadprzewodnikowego. [6]



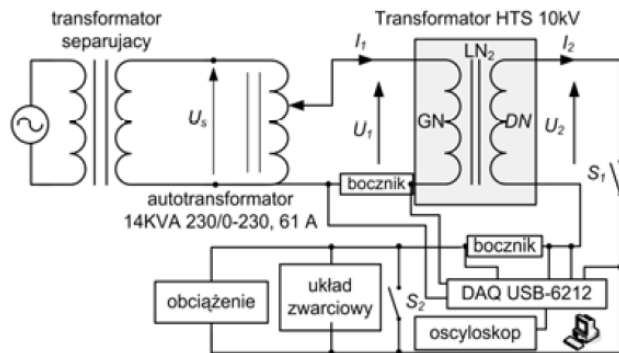
Rys. 2. Efekt samoograniczenia prądu zwarcia w uzwojeniu transformatora nadprzewodnikowego [7]

Uzwojenie nadprzewodnikowe w stanie nadprzewodzącym ma rezystancję  $R$  równą zero. W stanie nadprzewodzącym prąd znamionowy  $I_n$  nadprzewodnika jest mniejszym od prądu krytycznego  $I_c$  ( $I_n < I_c$ ). Podczas zwarcia prąd znamionowy  $I_n$  uzwojenia zaczyna rosnać i w czasie  $t_1$  osiąga wartość prądu krytycznego  $I_c$  ( $I_n = I_c$ ). Po przekroczeniu wartości prądu krytycznego uzwojenie nadprzewodnikowe przechodzi w stan przejściowy, który trwa do czasu  $t_2$ . W tym czasie uzwojenie nadprzewodnikowe ze stanu nadprzewodzącego przechodzi w stan rezystywny. Rezystancja uzwojenia osiąga wartość  $R \gg 0$  a prąd zwarcia zostaje ograniczony do wartości  $I_c > I > I_n$ . Czas trwania stanu przejściowego  $\Delta t$  pracy uzwojenia nadprzewodnikowego, jest znacznie krótszy od  $\frac{1}{4}$  czasu trwania okresu prądu zwarcia i nie przekracza 1 ms. [5], [8]

**Porównanie wyników obliczeń stanu jałowego oraz stanu zwarcia wykonanych za pomocą komputerowego modelu transformatora nadprzewodnikowego, a wynikami pomiarów eksperymentalnych uzyskanych przy pomocy fizycznego modelu transformatora nadprzewodnikowego o mocy 10 kVA**

Fizyczny model transformatora nadprzewodnikowego o mocy 10 kVA znajduje się w Pracowni Technologii Nadprzewodnikowych w Lublinie, którego uproszczony schemat przedstawiono na rys. 3. Fizyczny model

transformatora nadprzewodnikowego zasilany był z autotransformatora połączonego z siecią za pośrednictwem transformatora separującego [9].

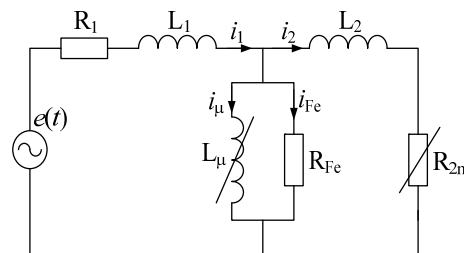


Rys. 3. Uproszczony schemat układu pomiarowego fizycznego modelu transformatora nadprzewodnikowego [9]

W celu porównania charakterystyk stanu jałowego fizycznego transformatora nadprzewodnikowego, wykonano komputerowy model transformatora nadprzewodnikowego, o tych samych parametrach elektrycznych tabela 2. Komputerowy model wykonano w programie PSpice (rys. 4).

Tabela 2. Parametry modelu fizycznego oraz komputerowego transformatora nadprzewodnikowego o mocy 10 kVA oraz szerokości szczeliny  $\delta$  [9]

Parametry transformatora	
prąd krytyczny taśmy, A	117
napięcie strony GN (pierwotne), V	230
napięcie strony DN (wtórne), V	115
prąd znamionowy uzwojenia GN (pierwotnego)	44
prąd znamionowy uzwojenia DN (wtórniego)	88
Indukcja robocza B, T	1,6
szerokość szczeliny $\delta$ (I wariant)	0,01
szerokość szczeliny $\delta$ (II wariant)	0,001



Rys. 4. Komputerowy model obwodowy transformatora w stanie zwarcia.(PSpice)

Dla zaproponowanego schematu zastępczego transformatora nadprzewodnikowego można zapisać równania różniczkowe stanu, które opisują jego działanie.

$$\begin{cases} \frac{di_{\mu}}{dt} = \frac{R'_{Fe} i'_{Fe}}{L_{\mu}} \\ \frac{di_1}{dt} = \frac{e(t) - (R_1) i_1 - R'_{Fe} i'_{Fe}}{L_1} \\ \frac{di_2}{dt} = \frac{R'_{Fe} i'_{Fe} - R_{2n} i_2}{L_2} \\ i'_{Fe} = i_1 - i_{\mu} - i_2 \end{cases}$$

gdzie poszczególne parametry modelu wyznaczone są z zależności:

$$L_1 = \frac{\mu_0 N_1^2 S}{l} - \text{związana ze strumieniem rozproszenia uzwojenia pierwotnego}$$

uzwojenia pierwotnego

$$L_2 = \frac{\mu_0 N_2^2 S}{l} - \text{związana ze strumieniem rozproszenia uzwojenia wtórnego}$$

uzwojenia wtórnego

$R_1$  - rezystancja uzwojenia pierwotnego

$R_{2n}$  - rezystancja nieliniowa uzwojenia nadprzewodnikowego

$$\text{przekładnia } \delta = \frac{N_1}{N_2}$$

- indukcyjności -  $L_2' = \delta^2 L_2$
- rezystancje -  $R_2' = \delta^2 R_2$ ,  $R_{Fe}' = \delta^2 R_{Fe}$
- prądy -  $i_2' = \frac{i_2}{\delta}$ ,  $i_{Fe}' = \frac{i_{Fe}}{\delta}$

Do równań opisujących przepływy prądu w analizowanym modelu dołożyć należy piąte równanie opisujące zmiany temperatury w nadprzewodnikowym uzwojeniu wtórnym [10].

$$R_{TN0} = \frac{1}{h_{konw} A_b}$$

$$\frac{dT_N}{dt} = \frac{1}{C_N} \left( R_{2n}' (i_2')^2 - \frac{T_N - T_0}{R_{TN0}} \right)$$

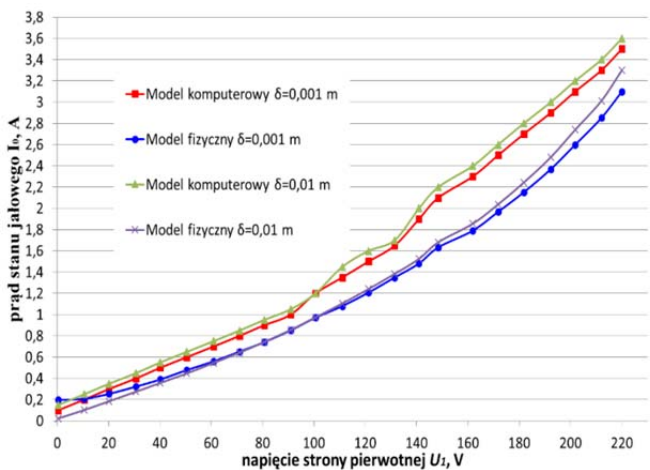
gdzie:  $h_{konw}$  – współczynnik konwekcji,  $A_b$  – pole powierzchni wymiany ciepła,  $C_N$  – ciepło właściwe nadprzewodnika,  $T_N$  – temperatura nadprzewodnika,  $T_0$  – temperatura medium chłodzącego (ciekły azot 77 K),  $R_{TN0}$  – rezystancja termiczna układu nadprzewodnik – ciekły azot.

Podstawowym celem próby stanu jałowego oraz próby zwarcia transformatora było upewnienie się czy zamodelowany transformator nadprzewodnikowy odzwierciedla, istniejący fizyczny model transformatora nadprzewodnikowego. Komputerowy model transformatora nadprzewodnikowego w późniejszym etapie ma służyć do projektowania optymalnego transformatora nadprzewodnikowego, dzięki któremu będzie możliwość ograniczania prądu w stanach przejściowych [9].

### Próba stanu jałowego

Próba stanu jałowego polega na zasilaniu transformatora i pomiarze pobranego przez transformator prądu. W czasie pomiarów uzwojenie wtórne jest otwarte. Charakterystykę stanu jałowego fizycznego modelu transformatora nadprzewodnikowego oraz komputerowego modelu transformatora dla dwóch wartości szczeliny powietrznej  $\delta$  przedstawia rys. 5. [9].

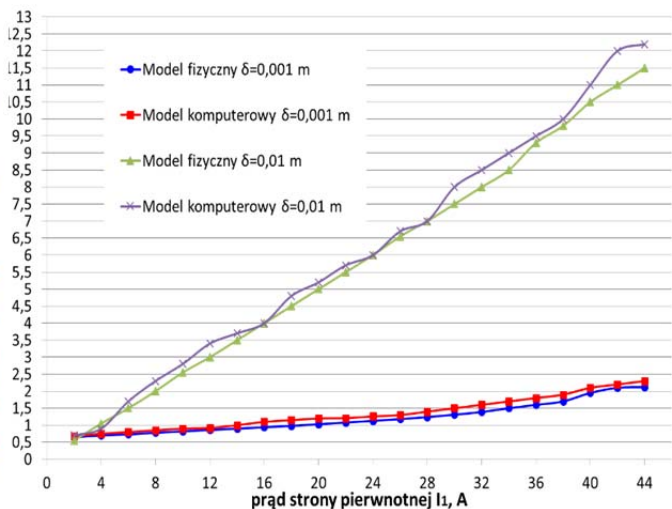
Prąd jałowy  $I_0$  w fizycznym modelu transformatora nadprzewodnikowego dla wartości znamionowej napięcia pierwotnego oraz szerokości szczeliny  $\delta$  równej 0,01 m i 0,001 m wynosi odpowiednio 3,3 A i 3,1 A. Natomiast w komputerowym modelu transformatora nadprzewodnikowego dla szerokości szczeliny  $\delta$  równej 0,01 m i 0,001 m prąd jałowy równy jest odpowiednio 3,6 A i 3,5 A.



Rys. 5. Porównanie wyników obliczeń i pomiarów próby stanu jałowego dla dwóch wartości szczeliny  $\delta = 0,01\text{m}$   $\delta = 0,001\text{m}$

### Próba stanu zwarcia

Próba stanu zwarcia polega na zasilaniu transformatora z dowolnej strony oraz pomiarze pobranego przez transformator prądu  $I_z$  i mocy  $P_z$  oraz napięcia zasilania. W czasie próby zwarte było uzwojenie wtórne. Wartości obliczeniowe dla przyjętych parametrów oraz wartości prądu uzwojenia pierwotnego 44 A oraz szerokości szczeliny  $\delta = 0,01\text{ m}$  i  $\delta = 0,001\text{ m}$  wynoszą odpowiednio 4,78% oraz 1,13%. Charakterystykę stanu zwarcia fizycznego i komputerowego modelu transformatora nadprzewodnikowego dla dwóch wartości szczeliny powietrznej  $\delta$  przedstawia rys. 6.



Rys. 6. Porównanie wyników obliczeń i pomiarów próby stanu zwarcia dla dwóch wartości szczeliny  $\delta = 0,01\text{m}$   $\delta = 0,001\text{m}$

Napięcie zwarcia dla fizycznego modelu transformatora nadprzewodnikowego dla szerokości szczeliny  $\delta$  równej 0,01 m i 0,001 m wynosi odpowiednio 4,95 % i 0,95 %. Bardzo zbliżone wyniki otrzymane są dla komputerowego modelu transformatora nadprzewodnikowego. Napięcie zwarcia w tym wypadku wynosi 4,8 % dla szerokości szczeliny  $\delta = 0,01\text{ m}$  oraz 1,15% dla szerokości szczeliny  $\delta = 0,001\text{ m}$ . Otrzymane wyniki wskazują dużą zgodność z wartościami obliczeniowymi.

Dla szerokości szczeliny  $\delta = 0,01\text{ m}$  napięcie zwarcia jest ponad 4 razy większe niż dla szerokości szczeliny  $\delta$  równej 0,001 m. Mniejsze napięcie zwarcia transformatora nadprzewodnikowego wpływa na zmniejszenie wahań napięcia w sieci

Różnica w wartości prądu jałowego  $I_0$  oraz napięcia zwarcia  $u_{z\%}$  dla modelu fizycznego i komputerowego transformatora nadprzewodnikowego wynika z pominięcia w modelu komputerowym takich parametrów jak wymiary rdzenia, długość taśmy, ilości warstw. Parametry te zostaną zaimplementowane w późniejszym etapie. Ponadto w fizycznym modelu transformatora nadprzewodnikowego była utrzymywana stała temperatura chłodzenia na poziomie 77 K. Na różnice wartości prądu jałowego  $I_0$  mogły wpłynąć również sposób zasilania. W fizycznym modelu transformatora nadprzewodnikowego zasilanie odbywało się poprzez autotransformator połączony z siecią za pośrednictwem transformatora separacyjnego, natomiast w komputerowym modelu transformatora nadprzewodnikowego zasilanie odbywało się za pomocą generatora. W tym przypadku nie występowały zakłócenia z sieci, których nie da się uniknąć w rzeczywistych warunkach.

### Wnioski

Prąd zwarcia w transformatorach nadprzewodnikowych zależy od rodzaju taśmy nadprzewodnikowej, długość i grubość uzwojenia, szerokość szczeliny, prąd krytyczny nadprzewodnika oraz procentowego napięcia zwarcia. Dlatego poprawny dobór tych parametrów pozwoli na etapie projektowania opracować optymalny transformator nadprzewodnikowy, dzięki któremu będzie możliwość ograniczenia prądu w stanach przejściowych (zwarcia transformatora, włączenie transformatora do sieci). Do tego celu potrzebne jest stworzenie aplikacji, który odzwierciedli rzeczywiste charakterystyki oraz zweryfikuje obliczenia w fazie projektowania.

#### Autorzy:

*mgr inż* Łukasz Woźniak

e-mail: [wozniak.lukasz1988@gmail.com](mailto:wozniak.lukasz1988@gmail.com). PhD student at Lublin University of Technology, Faculty of Electrical Eng. and Computer Science

*Dr hab. inż.* Paweł Surdacki, prof. PL

e-mail: [p.surdacki@pollub.pl](mailto:p.surdacki@pollub.pl). Lublin University of Technology, Institute of Electrical Engineering and Electrotechnologies  
*mgr inż* Rafał Kwoka

e-mail: [rafal\\_kwoka@wp.pl](mailto:rafal_kwoka@wp.pl). PhD student at Lublin University of Technology, Faculty of Electrical Eng. and Computer Science

*Dr inż.* Grzegorz Wojtasiewicz

e-mail: [g.wojtasiwicz@iel.waw.pl](mailto:g.wojtasiwicz@iel.waw.pl). Electrotechnical Institute in Warsaw ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa

*Dr inż.* Grzegorz Komarzyniec

e-mail: [g.komarzyniec@pollub.pl](mailto:g.komarzyniec@pollub.pl). Lublin University of Technology, Institute of Electrical Engineering and Electrotechnologies

### LITERATURA

- [1] Janowski T., Wojtasiewicz G., Transformatory nadprzewodnikowe odporne na zwarcia i ograniczające prądy zwarcia, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 88, no. 9 B, 269-272. 2012
- [2] Kalsi S.S, Application of high temperature superconductors to electrical power equipment Copyright © 2011 by John Wiley & Sons, Inc.
- [3] Jeziński E. Transformatory: Podstawy teoretyczne, WNT 1965.
- [4] Donnier-Valentin G., Tixador P., Vinot P., Consideration about HTS superconducting transformers, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 11, No.1, March 2001, pp. 1498-1501.
- [5] Rose-Innes A.C., Rhoderick E.H., Nadprzewodnictwo, PWN, Warszawa 2009.
- [6] Janowski T., Stryczewska H.D., Kozak S., Malinowski H., Wojtasiewicz G., Surdacki P., Kondratowicz-Kucewicz B., Kozak J., Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu, Wydawnictwo Drukarnia LIBER, Lublin 2002
- [7] Janowski T., Wojtasiewicz G., Transformatory nadprzewodnikowe ograniczające prądy zwarcia w sieciach elektroenergetycznych, Materiały konferencyjne, VIII Konferencja Naukowo-Techniczna: Transformatory energetyczne i specjalne; Kazimierz Dolny 13-15.X.2010, str.179-194, ISBN: 978-83-62742-00-4
- [8] Komarzyniec G., Janowski T., Majka M., Kozak J., Kozak S., Kondratowicz – Kucewicz B., Prąd włączania transformatora nadprzewodnikowego, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 89 NR 9/2013
- [9] Komarzyniec G., Majka M., Kozak J., Badania eksperymentalne transformatora nadprzewodnikowego 10 kVA, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 90 NR 3/2014, 153-156
- [10] Jaroszyński L., Czerwiński D.: Modelowanie numeryczne elementów nadprzewodnikowych, VIII Seminarium Zastosowania Nadprzewodników, p. 112-121, Nałęczów 2007