Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki Napędu Elektrycznego i Robotyki

Badania wpływu pola magnetycznego magnesów trwałych na prąd krytyczny taśm nadprzewodnikowych HTS

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów prądów krytycznych w taśmach nadprzewodnikowych HTS znajdujących się w polu magnetycznym pochodzącym od magnesów trwałych. W celu zwiększenia wartości pola magnetycznego magnesy zostały ułożone w liniową macierz Halbacha. W ramach badań został przeanalizowany wpływ pola magnetycznego na wartość prądów krytycznych w taśmach pierwszej (1G) oraz drugiej (2G) generacji nadprzewodników. Przedstawiona analiza stanowi podstawę do opracowania nadprzewodnikowego silnika liniowego i ma na celu przebadanie taśm HTS znajdujących się w warunkach odpowiadających warunkom panującym w silnikach liniowych PM HTS.

Abstract. The results of measurements of critical currents in HTS superconducting tapes located in a magnetic field originating from permanent magnets are presented in the paper. In order to strengthen the magnetic flux, the magnets were arranged in a linear Halbach array. As a part of the study, the effect of magnetic flux density on the value of critical currents in first (1G) and second (2G) generation of superconducting tapes has been analyzed. The presented analysis is the basis for the development of a superconducting linear motor and is aimed at testing of HTS strips exposed for a conditions corresponding to the conditions prevailing in PM HTS linear motors. Critical currents in HTS superconducting tapes located in a magnetic field originating from permanent magnets

Słowa kluczowe: prąd krytyczny, taśmy HTS, magnesy trwałe, macierz Halbacha. Keywords: critical current, HTS tapes, permanents magnets, Halbach array.

Wstęp

Rozwój branży elektroenergetycznej, transportowej i automatyzacji procesów produkcyjnych sprawia, że w ostatnich latach widoczny jest wzrost zainteresowania nadprzewodnikami wysokotemperaturowymi (HTS) jako alternatywą do obecnie stosowanych materiałów.

Dzięki podstawowym zaletom przewodów i taśm HTS, jakimi są duża gęstość prądu, niskie straty mocy (bardzo niska rezystywność) w czasie normalnej pracy (77 K), możliwe jest opracowanie nowych aplikacji elektroenergetycznych takich jak ograniczniki prądu, silniki, transformatory lub systemy transportowe PRT [1], [2].

Charakterystyka materiałów nadprzewodnikowych wymaga od projektantów urządzeń operowania w ściśle określonym reżimie temperatury T_c , pola magnetycznego B_c i gęstości prądu krytycznego J_c . Parametry te zdefiniowane jako parametry krytyczne, ograniczają unikalną dla każdego nadprzewodnika powierzchnię, zwaną powierzchnią parametrów krytycznych.

Wzajemna korelacja parametrów krytycznych jest aktualnym przedmiotem badań w wielu ośrodkach na świecie, w których trakcie dąży się do najlepszego wykorzystania materiału HTS [3], [4]. Istotnym parametrem taśm jest wartość krytyczna gęstości prądu J_c , która jest ściśle uzależniona od pozostałych parametrów krytycznych i może być wyrażona za pomocą wzorów (1) i (2).

(1)
$$J_c(B) = \frac{J_{c0}}{1 + \frac{B}{B_0}}$$

(2)
$$J_{c0}(T) = \alpha \left[\left(1 - \frac{T}{T_c} \right)^2 \right]^{1.5}$$

gdzie: J_{c0} – wartość krytyczna gęstości prądu przy braku zewnętrznego pola magnetycznego; *B*– indukcja zewnętrznego pola magnetycznegi, B_{c0} – wartość krytyczna indukcji magnetycznej przy braku przepływającego prądu transportu; *T* – temperatura, *T*_c – temperatura krytyczna nadprzewodnika, α – współczynnik ekstrapolacyjny temperatury wyrażony w A/m².

W ramach zrealizowanych badań przeanalizowano wpływ zewnętrznego pola magnetycznego na gęstość prądu w próbkach badanych taśm HTS.

Scharakteryzowanie wartości prądu krytycznego *I*c jest uzależnione od szeregu czynników m.in.: ułożenia taśm w urządzeniu, układu chłodzenia, mechanicznych

uszkodzeń w strukturach taśm, które pośrednio wpływają na pozostałe wielkości krytyczne (temperaturę i pole magnetyczne). Dodatkowym czynnikiem branym pod uwagę jest rodzaj aplikacji pod względem wartości pola magnetycznego, w których można dokonać podziału na aplikacje z silnym polem magnetycznym (magnesy wielkich mocy) i ze słabym polem magnetycznym (kable HTS, ograniczniki prądu).

Opisane w artykule badania mają na celu określenie wpływu rozkładu zewnętrznego pola magnetycznego działającego na taśmę na wartość prądu krytycznego wykorzystujących magnesy w aplikacjach trwałe Przykładem takiej aplikacji jest silnik liniowy z magnesami trwałymi i uzwojeniami HTS. który może być systemach w nowoczesnych wykorzystywany transportowych typu [5].

Artykuł podzielono na cztery części. W pierwszej dokonano opisu badanych taśm nadprzewodnikowych oraz zawarto podstawowe parametry techniczne taśm 1G i 2G. W drugiej części dokonano opisu stanowiska testowego, systemu pomiarowego i systemu akwizycji danych wykorzystywanych podczas pomiarów. W kolejnej części przedstawiono charakterystyki napięciowo-prądowe, na podstawie których wyznaczono wartości prądu krytycznego *I*_c taśm BSCCO (1G) i YBCO (2G). Wartości prądów krytycznych wyznaczono jako funkcję odległości taśmy od magnesów trwałych oraz przeanalizowano wpływ ułożenia taśm względem linii sił pola magnetycznego.

W czwartej części porównano wyniki pomiarów pola magnetycznego na powierzchni magnesów trwałych z wynikami analizy numerycznej przeprowadzonej w programie ANSYS.W analizie numerycznej uwzględniono efekt zmiany kierunku wektora magnetyzacji magnesu trwałego po schłodzeniu do temperatury 77 K.

Charakterystyka taśm HTS

Analizie zostały poddane taśmy wykonane pierwszej wysokotemperaturowych z nadprzewodników (1G) oraz drugiej (2G) generacji. Taśmy 1G, BSCCO-2223 (Bismuth Strontium Calcium Copper Oxide) wyprodukowane przez American Superconductor zostały wykonane w technologii PIT (Powder In Tube), co wpływa znacząco na anizotropię struktury taśmy. Typowe taśmy o wymiarach przekroju poprzecznego 4 mm x 0,25 mm umożliwiają przewodzenie prądu o wartości powyżej 100 A.

Tabela 1. Wybrane parametry taśm HTS [6], [7].

BSCCO AMSC	
Min prąd krytyczny Ic, pole własne, 77 K	122 A
Średnia grubość	0,31 mm ± 0,02 mm
Średnia szerokość	4,16 mm ± 0,02 mm
Max. znamionowe odkształcenie rozciągające	0,35 %
Krytyczna średnica zagięcia	50 mm
YBCO SuperPower SCS4050	
Min prąd krytyczny Ic, pole własne, 77 K	80 A
Średnia grubość	0,1 mm
Średnia szerokość	4 mm
Max. znamionowe odkształcenie rozciągające	0,45 %
Krytyczna średnica zagiecia	11 mm

Inżynierska gęstość prądu w taśmach (będąca przybliżeniem, określa się ilorazem prądu krytycznego i przekroju poprzecznego), przewyższa 10 kA/cm². Istotnymi zaletami tej taśmy są stabilizacja termiczna oraz dobre właściwości mechaniczne, jej wady to: wysoki koszt wynikający z dużej ilości użytego srebra, niejednorodna gęstość prądu oraz silna anizotropia.

Taśmy 2G zostały wykonane z materiału YBCO (Yttrium Barium Copper Oxide), w technologii wielowarstwowej, w której warstwa materiału nadprzewodzącego (1-3 μm) została naniesiona na niklowe podłoże oraz otoczona miedzianym stabilizatorem. Taśmy warstwowe cechuje mniejsza anizotropia, są bardziej elastyczne, niestety proces produkcji wymaga zastosowania specjalistycznej aparatury a grubość materiału nadprzewodnikowego stanowi tylko 1-2 % grubości taśmy.

Przykładowe dane katalogowe taśm YBCO i BSCCO przedstawiono w tabeli nr 1 [6], [7].

Opis stanowiska testowego

Badania wpływu zewnętrznego pola magnetycznego na wartość prądu krytycznego w taśmach HTS zostały przeprowadzone na dedykowanym stanowisku testowym, które swoją budową miało odwzorowywać warunki panujące w silniku liniowym. W odróżnieniu od innych stanowisk, na których dokonywano charakteryzacji taśm w stałym polu magnetycznym [8], [9], [10], w opisywanym tutaj przypadku zastosowano dwie macierze Halbacha zbudowane z wykorzystaniem sześciennych magnesów trwałych klasy N42, o gęstości energii między 318 ÷ 342 kJ/m³ [16]. Do wykonania jednej macierzy Halbacha wykorzystano dziesięć magnesów o następujących parametrach: indukcja remanencji 1,28 T, indukcja magnetyczna w geometrycznym środku 0,7 T, wymiary 10 x 10 x 10 mm. Pomiędzy magnesami została umieszczona badana taśma HTS.



Rys. 1. Stanowisko testowe do badania wpływu pola magnetycznego pochodzącego od magnesów trwałych na wartość prądu krytycznego w taśmie HTS.



Rys. 2. Sposób pomiaru prądu krytycznego metodą czterozaciskową realizowaną dla dwóch długości taśmy 4 cm i 8 cm.

Każda z badanych taśm miała długość 14 cm, przy czym pomiar spadku napięcia dokonywany był jednocześnie na dwóch odcinkach o długości odpowiednio: 4 cm oraz 8 cm (Rys.2). W celu zniwelowania wpływu temperatury na pomiar prądu krytycznego zastosowano miedziane złącza pomiarowe, każde o długości 5 cm (Rys.1).

Do najpopularniejszych metod wyznaczania charakterystyk napięciowo-prądowych taśm HTS należy metoda czterozaciskowa [11], której użyto w badaniach. Wybór metody podyktowany był łatwością implementacji. Pomiar spadków napięć na badanych próbkach taśm został zrealizowany z wykorzystaniem dedykowanego stanowiska testowego. W celu wyznaczenia prądu krytycznego przyjęto napięciowe kryterium prądu krytycznego (3). Przyjęto, że prąd krytyczny I_c odpowiada spadkowi napięcia 1 μ V/cm pomiędzy punktami pomiaru.

$$(3) V = V_{c0} \left(\frac{I}{I_{c0}}\right)^n$$

gdzie: V_{c0} – spadek napięcia zgodnie z kryterium nadprzewodnictwa (1 μ V/cm), *n* – wykładnik określający ostrość przejścia pomiędzy stanem rezystywnym i nadprzewodzącym.

Stanowisko laboratoryjne wyposażone było w system akwizycji danych oparty o terminale National Instruments oraz dedykowane oprogramowanie opracowane w środowisku LabView. Wartość prądu zadawana była automatycznie ze stałym skokiem wynoszącym 5 A i kontrolowana pomiarowo poprzez pośredni pomiar prądu transportu. Prąd transportu wyznaczany był za pomocą pomiaru spadku napięcia na boczniku pomiarowym.



Rys. 3. Stanowisko pomiarowe do badania prądów krytycznych wyposażone w stanowisko testowe (Rys.1), system akwizycji danych National Instruments, mikrowoltomierz oraz komputer z oprogramowaniem LabView.

Pomiar prądów krytycznych

Pomiar prądów krytycznych został przeprowadzony dla dwóch taśm: BSCCO i YBCO. Wartość prądu krytycznego, przedstawiono na Rys. 5, obliczono na podstawie średniej z prądów krytycznych dla wszystkich badanych odcinków: 4cm, 8cm.

W przypadku pomiarów dla pola magnetycznego pochodzącego od jednej macierzy Halbacha umieszczonej zaobserwowano zmniejszenie nad taśmą pradu krytycznego o 35 % dla magnesów oddalonych o 9 mm, 59 % dla magnesów oddalonych o 6 mm oraz 68% dla magnesów oddalonych o 3 mm. W analizowanym przypadku kształt pola magnetycznego nie jest jednorodny na całej długości taśmy, przez co najbardziej podatnymi miejscami na taśmie, w których może dojść do utraty właściwości nadprzewodzących, są obszary znajdujące się pod magnesami mającymi swe bieguny skierowane bezpośrednio na badaną taśmę. Wówczas wektory pola magnetycznego skierowane są prostopadle do powierzchni taśmy.



Rys. 4. Zmierzone charakterystyki napięciowo-prądowe. Wyniki pomiarów prądu krytycznego (linia przerywana pionowa) *I*_c dla taśmy BSCCO o szerokości 4 mm, PW - pomiar dla pola własnego 1H - macierz Halbacha nad badaną próbką, 2H - próbka HTS umieszczona pomiędzy dwiema macierzami Halbacha. Odległości taśma-magnes, odpowiednio: 3 mm, 6 mm, 9 mm.



Rys. 5. Zmierzona charakterystyka napięciowo-prądowa. Wyniki pomiarów prądu krytycznego (linia przerywana pionowa) *I*_c dla taśmy YBCO o długości 4 mm, PW - pomiar dla pola własnego 1H - macierz Halbacha nad badaną próbką, 2H - próbka HTS umieszczona pomiędzy dwiema macierzami Halbacha. Odległości taśma-magnes, odpowiednio: 3 mm, 6 mm, 9 mm.



Rys. 6. Porównanie prądów krytycznych taśm w zależności od odległości względem macierzy Halbacha oraz liczby macierzy. Niebieski kolor - wyniki dla taśmy BSCCO, czerwony kolor - wyniki dla taśmy YBCO



Rys. 7. Wartość prądu krytycznego w zależności prądu transportu dla różnych orientacji taśmy względem pola magnetycznego.

Stosując podwójną macierzy Halbacha (2H) oraz taśmy BSCCO uzyskano zmniejszenie prądu krytycznego o blisko 90 % dla 3 mm, oraz 65 % dla 9 mm.

W przypadku analizy taśm YBCO, które charakteryzują się mniejszą anizotropią, wartość prądu krytycznego zmniejszyła się blisko o 30 % w przypadku oddalenia taśmy od magnesów na odległość 9 mm, oraz o 50 % w przypadku oddalenia taśmy od magnesów na odległość 3 mm. Wykorzystując podwójną macierz Halbacha spadek wartości prądu krytycznego nie był tak stromy, jak dla taśm BSCCO i wynosił 65 % wartości początkowej.

Wartość prądu krytycznego w taśmach HTS jest uzależniona również od orientacji pola magnetycznego względem taśmy [12], [13]. Jednym z najczęściej wykorzystywanych modeli do estymacji gęstości prądu krytycznego w zależności od rozkładu pola magnetycznego działającego na taśmę jest zmodyfikowany model Kima [14] określony wzorem (4).

(4)
$$J_c(B_R; B_P) = \frac{J_{co}}{\left[1 + \sqrt{(kB_R)^2 + B_P^2}\right]^b}$$

gdzie: B_R – składowa równoległa pola magnetycznego, B_P – składowa prostopadła pola magnetycznego, J_{c0}, B_c, k, b – stałe określające parametry taśmy HTS [1].

Zmodyfikowany model Kima (4) wykorzystany do modelowania z uwzględnieniem prostopadłego i równoległego komponentu pola magnetycznego zakłada, iż w całej badanej próbce pole jest jednorodne. W analizowanym przypadku pole magnetyczne na powierzchni taśmy nie jest jednorodne, przez co model Kima nie daje jednoznacznej odpowiedzi w zakresie lokalnej gęstości pradu estymacji krytycznego. W zależności od usytuowania taśmy względem wektora magnetyzacji magnesów trwałych występują lokalne ekstrema wartości pola magnetycznego, które wpływaja na lokalne zmiany wartości prądów krytycznych.

Analiza pola magnetycznego

Analizę pola magnetycznego przeprowadzono z wykorzystaniem programu ANSYS, w którym zamodelowano z zachowaniem wymiarów poszczególne elementy stanowiska pomiarowego. Model odwzorowywał macierze Halbacha oraz taśmę HTS. Źródłem zewnętrznego pola magnetycznego były magnesy trwałe.



Rys. 8. Uzyskany wynik symulacji w programie ANSYS rozkładu modułu indukcji magnetycznej wytworzonej przez dwie macierze Halbacha. a) magnesy "ciepłe" 294 K; b) magnesy "zimne" 77 K

Równanie opisujące magnetyzację magnesów trwałych dla magnesów N42 opisano następującą zależnością:

(5)
$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{B_r}$$

gdzie: \vec{B} – wektor indukcji magnetycznej, \vec{H} – natężenie pola magnetycznego, $\vec{B_r}$ – remanencja magnesu (1,28 T), μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni.

Założono statyczne pole magnetyczne generowane przez magnesy trwałe oraz wykorzystano równania Maxwella (6) (7):

$$(6) \qquad \nabla \times \vec{H} = \vec{J}$$

$$(7) \qquad \nabla \cdot \vec{B} = 0$$

Wykorzystując wektorowy potencjał magnetyczny \vec{A} oraz uwzględniając cechowanie Coulomba równanie (5) przyjmuje postać prawa Ampera (8).

(8)
$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu_0 (\vec{J}_f + \nabla \times \vec{M}_r)$$

gdzie: \vec{J}_f – gęstość prądu dla warunków brzegowych, \vec{M}_r – wektor magnetyzacji.



Rys. 9. Porównanie wyników symulacji modułu indukcji magnetycznej pola na powierzchni taśmy (A) - kolor niebieski oraz pomiarów (P) - kolor czerwony dla macierzy Halbacha. Pomiar przeprowadzony dla temp 21 °C.



Rys. 10. Porównanie pola magnetycznego wzdłuż powierzchni taśmy YBCO o długości 14 cm dla "ciepłej" (294 K) - kolor czerwony oraz "zimnej" (77 K) macierzy Halbacha - kolor niebieski. Odległości taśma-magnes: 3 mm, 6 mm, 9 mm.

Wyniki pomiarów numerycznych zestawiono z wynikami pomiarów punktowych przeprowadzonych na powierzchni macierzy, zrealizowanych z wykorzystaniem przyrządu Magnet-Physik FH-54. Porównując wyniki zaobserwowano stałą różnicę, pomiędzy wartością wyników pomiarowych a wynikami uzyskanymi numerycznie (Rys. 9). Wartość ta jest stała dla konkretnej odległości magnesnadprzewodnik i zmienna w zależności od odległości od magnesów. Przyczyną mogą być odstępstwa między katalogową a rzeczywistą indukcją i jednorodnością pola wytworzonego przez magnesy trwałe.

Dodatkowo analiza numeryczna pozwoliła zaobserwować lokalne ekstrema pola magnetycznego na styku magnesów. Zjawisko to szczególnie uwidocznione jest w przypadku małej szczeliny powietrznej, które należy wziąć pod uwagę w przypadku konstruowania silnika liniowego.

Porównanie wyników pola magnetycznego na powierzchni taśmy przeprowadzonych w programie ANSYS z wynikami pomiarowymi zrealizowanymi na badanym stanowisku uzyskano zadowalające zbieżności.

Analiza pola magnetycznego magnesów trwałych została przeprowadzona w temperaturze 294 K. Badając wartość prądu krytycznego, temperatura magnesów została zmniejszona do wartości 77 K. Zmiana temperatury wpływa znacząco na rozkład wytworzonego pola magnetycznego przez zmianę kierunku wektora magnetyzacji wewnątrz magnesów [15].



Rys. 10. Porównanie pola magnetycznego w poprzek powierzchni taśmy dla "ciepłej" (294 K) oraz "zimnej" (77 K) macierzy Halbacha

W celu zaprezentowania wpływu zmian wartości i kierunku wektora magnetyzacji w przypadku zmiany temperatury z pokojowej (294 K) na temperaturę pracy taśm HTS (77 K) zamodelowano układ taśmy HTS z dwiema macierzami Halbacha.

Wyniki symulacji przedstawiono na Rys. 9 i Rys. 10. W wyniku przesunięcia wektorów magnetyzacji nastąpiło przesuniecie ekstremum pola magnetycznego oraz zwiekszenie amplitudv indukcji magnetycznej. Dodatkowo schłodzenie magnesów trwałych powoduje zmniejszenie różnic w amplitudzie rozkładu indukcji magnetycznej, przez co pole wewnątrz stanowiska testowego staje się bardziej jednorodne. Jest to cecha korzystna, biorąc pod uwagę możliwości wykorzystania układów magnes trwały - nadprzewodnik przy konstrukcji m.in. silników liniowych.

Podsumowanie

W artykule przeprowadzono analizę wpływu pola magnetycznego generowanego przez magnesy trwałe na wartość prądu krytycznego komercyjnie dostępnych Wyznaczono wpływ taśm HTS. zewnetrznego. niejednorodnego pola magnetycznego na wartości prądów krytycznych w zależności od odległości magnesów trwałych od taśmy HTS (w zależności od pola magnetycznego na powierzchni taśmy). Na podstawie wyników pomiarów stwierdzono, że w zależności od wykorzystanej taśmy i szczeliny powietrznej wartość prądu krytycznego zostaje zmniejszona w porównaniu do wartości dla pola własnego taśmy. Takie ograniczenie z góry determinuje punkt pracy uzwojeń projektowanego silnika liniowego.

Porównując wpływ szczeliny powietrznej (odległości macierzy od taśmy) na wartość redukcji prądu krytycznego, można stwierdzić, iż taśmy YBCO są lepsze względem BSCCO do zastosowania w silnikach liniowych z uwagi na mniejszy spadek wartości prądu krytycznego.

Przeprowadzona analiza zmiany orientacji taśmy względem macierzy Halbacha pozwala stwierdzić, iż zmodyfikowany model Kima nie daje jednoznacznej odpowiedzi na wartość gęstości prądu krytycznego w badanym układzie, gdy rozkład pola jest niejednorodny.

Przeprowadzona w ramach badań analiza pola magnetycznego macierzy Halbacha w zależności od temperatury magnesów trwałych uwidoczniła interesujące zjawisko, które może stać się obszarem dalszych badań zarówno dla pojedynczych magnesów, jak i ich układów (Rys. 10).

Niniejsze opracowanie przedstawia możliwości aplikacyjne nadprzewodników wysokotemperaturowych w nowoczesnych urządzeniach energetycznych i transportowych. Autorzy: mgr inż. Krzysztof Habelok, mgr inż. Paweł Lasek, dr inż. Mariusz Stępień, Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: <u>krzysztof.habelok@polsl.pl</u>

LITERATURA

- [1] N. Kelly, M. Massi, and L. Masur, "Application of HTS wire and cables to power transmission: State of the art and opportunities", IEEE Trans. Applied Superconductivity, pp. 448–454, 2001.
- [2] J. E. Anderson, (1998). "Control of Personal Rapid Transit Systems", Journal of Advanced Transportation, 32:1: pp. 57-74.
- [3] M. Ciszek, A. M. Campbell, and B. A. Glowacki, "The effect of potential contact position on AC loss measurements in superconducting BSCCO tape", Phys. C Supercond., vol. 233, pp. 233–203, 1994.
- [4] F. Trillaud, K. Berger, B. Douine, and J. Leveque, "Comparison between modeling and experimental results of magnetic flux trapped in YBCO bulks", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 26, no. 3, Apr. 2016, Art. no. 6800305.
- [5] Y. G. Guo, W. Xu, J. G. Zhu, H. Y. Lu, and J. X. Jin, "Design and analysis of a linear induction motor drive for a prototype HTS maglev transportation system", in Proc. IEEE Int. Conf. App. Super. & Electromagnetic Devices, Chengdu, China, Sept. 2009, pp. 81-84.
- [6] AMSC BSCCO technical documentation 1G HTS wire.
- [7] SuperPower technical documentation 2G HTS wire.
- [8] M. Vojenciak, J. Souc, F. Gömöry, and E. Seiler, "Influence of DC mag-netic field on AC loss of YBCO coated conductor with ferromagnetic substrate", Polish Acad Sciences Inst Physics, pp. 359–362, 2008.
- [9] Q. J Zai, X. J. Jian, "Critical Current Measurement and Experimental Comparison of 1G and 2G HTS Tapes", Proceedings of 201 I IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices Sydney, December 14–16, 2011.
- [10] L. Rostila, J. Lehtonen, R. Mikkonen, J. Šouc, E. Seiler, T.Melíšek and M. Vojenčiak 2007 "How to determine critical current density in YBCO tapes from voltage–current measurements at low magnetic fields", Supercond. Sci.Technol. 20 1097–100.
- [11] PN-EN 61788-3:2007P Nadprzewodnictwo -Część 3: Pomiar prądu krytycznego - Prąd krytyczny stały nadprzewodników tlenkowych Bi-2212 i Bi-2223 pokrytych Ag i/lub stopem Ag.
- [12] E. Pardo, M. Vojenčiak, F. Gömöry and J. Šouc "Low magnetic-field dependence and anisotropy of the critical current density in coated conductors", 2011, Supercond. Sci.Technol. 24 65007.
- [13] P. M. Leys, M. Klaeser, F. Schleissinger, T. Schneider, "Angledependent U(I) measurements of HTS coated conductors", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23, no. 3, pp. 8000604, Jun. 2013.
- [14] H. Yong, Z. Jing, and Y. Zhou, "Analysis of Strain Effect on Critical Current Density in Superconductors With a Modified Semiempirical Kim Model", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 23, no. 5, October 2013.
- [15]M. Garcia, J. Chaboy, F. BartolomÈ and J. B. Goedkoop, "Orbital Magnetic Moment Instability at the Spin Reorientation Transition of Nd2Fe14B", Physical Review Letters, vol. 85, p. 429, 2000.
- [16] Karta katalogowa magnesów neodymowych N42 http://www.neodym.pl/wlasnosci.php.