



---

---

## Model hybrydowego nadprzewodzącego ekranu magnetycznego

AUTORZY: Łukasz Tomków<sup>a,\*</sup>

REKOMENDOWANE PRZEZ: Marian Ciszek<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Zakład Automatyki i Kriogeniki, Instytut Inżynierii Lotniczej, Procesowej i Maszyn Energetycznych, Politechnika Wrocławska

\* Adres do korespondencji: lukasz.tomkow@pwr.edu.pl, tel. 71 320 46 45

---

### STRESZCZENIE

Rozwój technik pomiarowych pola magnetycznego za pomocą superczułych sensorów wymaga stosowania technik ekranowania medycznego by zminimalizować wpływ zewnętrznych pól magnetycznych. Zastosowanie nadprzewodników wysokotemperaturowych pozwala na uzyskanie próżni magnetycznej dla stałego i niskoczęstotliwościowego zewnętrznego pola magnetycznego. Obecnie stosowane lite ekrany umożliwiają ekranowanie tylko pól magnetycznych o stosunkowo niskim natężeniu. Niniejsza praca zawiera opis modelu hybrydowego ekranu wykorzystującego dodatkowo pierścienie z powlekaną taśmą nadprzewodzącą dla zwiększenia efektywności ekranowania.

**SŁOWA KLUCZOWE:** *nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe, ekranowanie, elektromagnetyzm*

---

### 1. WPROWADZENIE

Wraz ze zwiększaniem się zapotrzebowania na dokładne pomiary magnetyczne efektywne ekranowanie pól magnetycznych staje się coraz ważniejsze. Propagacja silnych pól magnetycznych powstających w niektórych urządzeniach również powinna być zatrzymywana w celu ochrony obsługującego je personelu. Obecnie stosowane ekrany ferromagnetyczne nie umożliwiają pełnego ekranowania oraz są nieefektywne w przypadku pól stałych i o niskiej częstotliwości. Efekt Meissnera występujący w nadprzewodnikach umożliwia skuteczne zatrzymywanie pól magnetycznych do natężenia rzędu 5-20 mT, zależnego od geometrii i rodzaju zastosowanego ekranu. Prądy ekranujące płynące w warstwie przypowierzchniowej nadprzewodnika zatrzymują propagację pola. Denis i inni oraz Kvitkovic i inni [1,2] pokazali, że zastosowanie nadprzewodników wysokotemperaturowych (HTS) jako materiału na ekrany jest możliwe i efektywne.

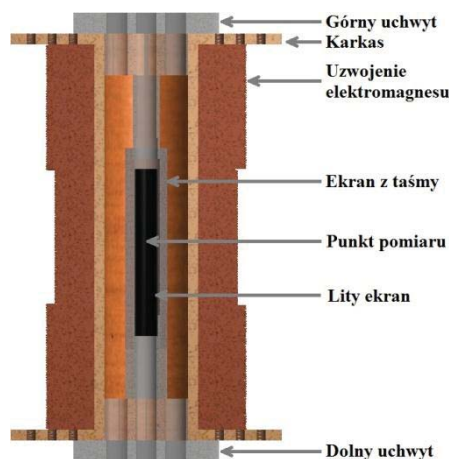
W chwili obecnej właściwości ekranów z HTS są szeroko badane. Gozzelino i inni, Seki i inni oraz Mori i inni [3,4,5] analizują zastosowanie tego typu ekranów dla zwiększenia

szenia efektywności konwencjonalnych rozwiązań wykorzystując element nadprzewodzący i ferromagnetyczny. Badania nad wpływem kształtu ekranu na jego efektywność zostały przeprowadzone przez Kvitkovic i inni oraz Wérę i inni [6,7]. Arsénio i inni [8] proponowali zastosowanie komercyjnie dostępnych taśm z nadprzewodników wysokotemperaturowych jako materiału dla indukcyjnego ogranicznika prądu zwarcia. Przeprowadzone były również badania nad wpływem niskich częstotliwości na zachowanie komercyjnych taśm nadprzewodzących. Kvitkovic i inni [2,6] przeprowadzili pomiary współczynnika ekranowania w różnych częstotliwościach. Uglietti i inni [9] analizowali negatywny efekt ekranowania w cewkach z YBCO. Ohta i inni [10] zastosowali nadprzewodzące tarcze magnetyczne dla badań hipokampu za pomocą czujnika SQUID.

W tej pracy opisany został komputerowy model ekranu hybrydowego złożonego z dwóch elementów nadprzewodzących ułożonych współosiowo. Wewnętrznym elementem jest lity cylinder wykonany z Bi-2223 umożliwiający pełne ekranowanie poniżej pierwszego pola krytycznego. Zewnętrzny element składa się z pierścieni utworzonych z taśm nadprzewodzących poprzez zlutowanie ich końców. Tarcza stworzona z takich pierścieni nie jest zdolna do samodzielnego pełnego ekranowania. Umożliwia jednak redukcję pól niskiej częstotliwości, co można wykorzystać do zmniejszenia natężenia pola wpływającego na lity nadprzewodnik. Efekt ten wykorzystywany jest do ulepszenia efektywności całego układu poprzez rozszerzenie obszaru pełnego ekranowania.

## 2. MODEL

Model opisywanego ekranu stworzony został na bazie rzeczywistego układu eksperymentalnego pokazanego na rysunku 1. Do jego stworzenia wykorzystano program Matlab.

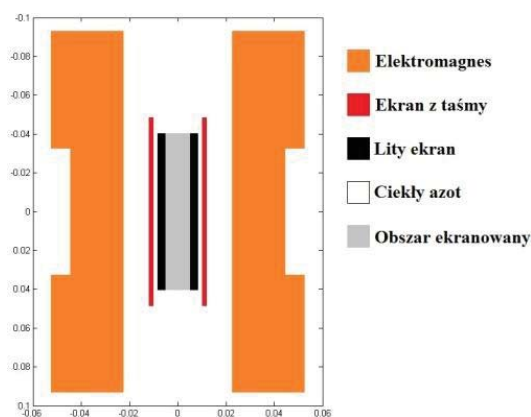


Rys. 1. Rzeczywisty układ eksperymentalny

W pokazanym układzie ekran umieszczony jest w osi elektromagnesu i poddany działaniu pól magnetycznych o różnym natężeniu i częstotliwości, którego linie są równoległe do osi. Elektromagnes zasilany jest prądem o znanych parametrach. Mierzona wartość to

natężenie pola magnetycznego w środku długości ekranu. By uzyskać temperaturę nadprzewodnika niższą niż krytyczną, cały układ zanurzony jest w ciekłym azocie.

Przyjęto założenie, że względna przenikalność magnetyczna wszystkich elementów układu wynosi 1. W związku z tym oddzielnie modelowane są tylko obszary, przez które przepływa prąd elektryczny - elektromagnes i ekrany. Reszta traktowana jest jako ciekły azot. Ze względu na osiową geometrię układu modelowany jest pojedynczy przekrój osiowy, który podzielony jest na określoną liczbę kwadratowych elementów zależną od pożądanej dokładności. Układ wykorzystywanej siatki oraz różne regiony modelu zostały pokazane na rysunku 2.



Rys. 2. Siatka wykorzystywana w modelu

Podstawowym równaniem używanym w modelu do wyznaczenia indukcji magnetycznej  $dB$  produkowanej przez pojedynczy przewodzący element  $Idl$  jest równanie Biota-Savarta, przedstawione poniżej:

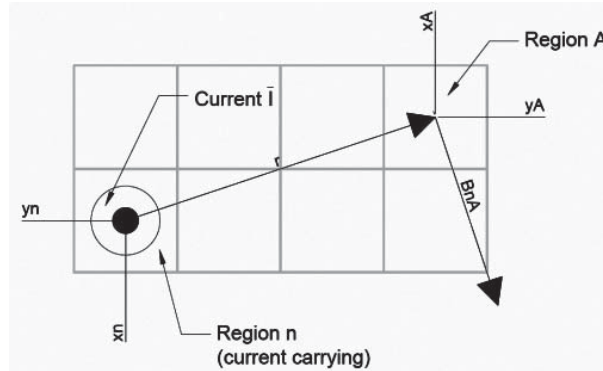
$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{|\vec{r}|^3} \quad (1)$$

Gdzie:  $\mu_0$  to przenikalność magnetyczna próżni,  $r$  zaś jest wektorem łączącym przewodzący element z punktem, w którym obliczana jest indukcja.

Równanie to zostało scałkowane względem przewodzącego półkola, którego środek znajduje się w płaszczyźnie modelu, w wyniku czego uzyskano relację pomiędzy prądem przepływającym w obszarze magnesu  $n$ , a regionem  $A$  w którym wyznaczana jest indukcja. Wynikiem tych obliczeń jest równanie 2. Rysunek 3 pokazuje relacje geometryczne w nim występujące - współrzędne i wektory. Pojawiająca się w równaniu funkcja  $r_x(x_n, x_A)$  określa średnią odległość poziomą punktu o współrzędnej  $x_A$  od półkola o promieniu  $x_n$  i jest dana równaniem 3.

$$\vec{B} = \int_{-\pi}^{\pi} \vec{I} \frac{\mu_0}{4\pi} dl \times \frac{\hat{r}}{|r|^2} = I_n \frac{\mu_0}{4} \frac{|x_n| \cdot \hat{r} \times \hat{I}}{(y_n - y_A)^2 + r_x(x_n, x_A)^2} \quad (2)$$

$$r_x(x_n, x_A)^2 = x_n^2 - x_n x_A + x_A^2 \quad (3)$$



Rys. 3. Współrzędne używane w równaniu 2

Założono, że rozkład prądu we wszystkich elementach elektromagnesu jest równomierny. Prąd definiowany jest przez natężenie i częstotliwość. Równanie 4 określa całkowitą indukcję magnetyczną w punkcie A poprzez zsumowanie wkładów wszystkich elementów układu przez które przepływa prąd elektryczny:

$$\vec{B}_A = \sum_{x,y=0}^n I_n \frac{\mu_0}{4} \frac{|x_n| \cdot \hat{r} \times \hat{I}}{(y_n - y_A)^2 + r_x(x_n, x_A)^2} \quad (4)$$

Do wyznaczenia prądu ekranującego  $I_{ind}$  w ekranie z taśmy nadprzewodzącej użyte zostało równanie 5:

$$I_{ind} = -\frac{B_m \cdot \omega}{R} \cdot \sin(\varphi) \quad (5)$$

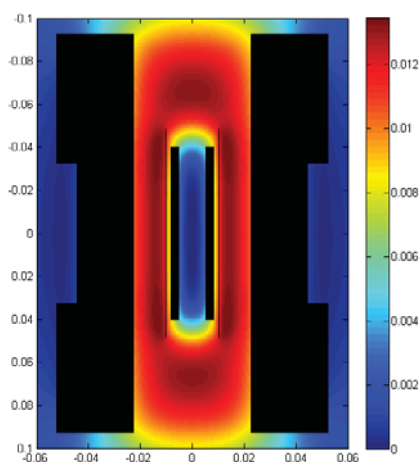
$B_m$  w tym równaniu to wielkość indukcji magnetycznej w kierunku osi ekranu,  $\omega$  to pulsacja pola,  $R$  - opór ekranu, obliczony jako opór luty oraz warstwy Hastelloyu będącego podstawą taśmy. Wielkość fazy  $\varphi$  jest ustalana eksperymentalnie. Natężenie prądu ekranującego w litym ekranie z BSCCO uzyskiwane jest poprzez minimalizację indukcji magnetycznej w obszarze ekranowanym. W obu przypadkach prądy ekranujące porównywane są z prądem krytycznym  $J_c$  obliczonym za pomocą równania 6 pokazującego jego zależność od zewnętrznego pola magnetycznego  $B_i$ .

$$J_c = -\frac{J_{c0}}{1 + \frac{B_i}{B_1}} \quad (6)$$

$B_1$  i  $J_{c0}$  w tym równaniu to wielkości związane z materiałem i wyznaczone eksperymentalnie. W przypadku gdy gęstość prądu ekranującego przekracza gęstość prądu krytycznego w obliczeniach wykorzystywana jest niższa wartość. Ekran z taśmy modelowany jest jako pojedyncza warstwa, natomiast ekran lity jako kilka warstw, ich ilość zależna jest od grubości ekranu i założonej dokładności modelu.

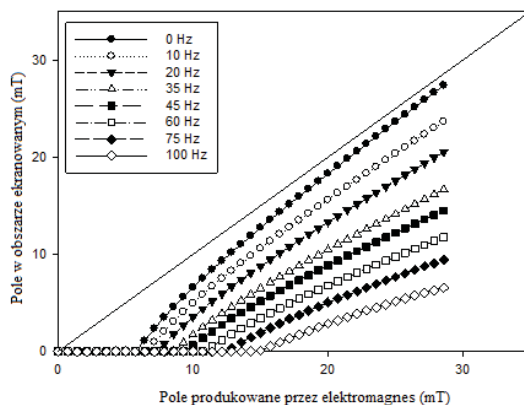
### 3. WYNIKI

Rysunek 4 przedstawia przykładowy rozkład indukcji magnetycznej uzyskanej dzięki wykorzystaniu opisanego modelu. Symulację przeprowadzono dla zewnętrznego pola magnetycznego o amplitudzie 14,3 mT i częstotliwości 70 Hz. Obszar pełnego ekranowania jest wyraźnie widoczny w środkowej części rysunku. Zauważalny jest również przyrost indukcji na zewnątrz ekranu.



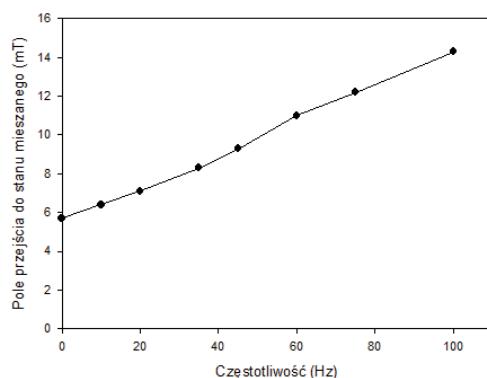
Rys. 4. Rozkład indukcji magnetycznej. Elektromagnes i ekrany magnetyczne zostały oznaczone kolorem czarnym. Indukcja magnetyczna została podana w T, wymiary geometryczne w m

Celem prowadzonych symulacji jest znalezienie zewnętrznego pola magnetycznego w którym występuje przejście ze stanu Meissnera umożliwiającego pełne ekranowanie do stanu mieszanego, w którym część linii pola magnetycznego jest w stanie penetrować objętość nadprzewodnika. Następnie analizowana jest zależność wielkości pola przejścia od częstotliwości. Na rysunku 5 pokazano wyniki symulacji dla różnych amplitud i częstotliwości zewnętrznego pola magnetycznego. Odczytywano wielkość indukcji magnetycznej w centralnej części obszaru ekranowanego.



Rys. 5. Wyniki symulacji - wielkość indukcji magnetycznej wewnątrz obszaru ekranowanego w zależności od zewnętrznej indukcji magnetycznej i jej częstotliwości

Punkt przejścia jest wyraźnie widoczny na każdym z wykresów jako koniec obszaru pełnego ekranowania. Na rysunku 6 przedstawiono wyniki odczytane z rysunku 5 ukazujące zależność punktu przejścia do stanu mieszanego od częstotliwości.



Rys. 6. Zależność punktu przejścia ekranu nadprzewodzącego do stanu mieszanego od częstotliwości zewnętrznego pola magnetycznego

#### 4. DYSKUSJA

Uzyskane wyniki symulacji pokazują, że zastosowanie hybrydowego ekranu magnetycznego jest efektywne oraz umożliwia skuteczną redukcję pola magnetycznego w pożądanym obszarze. Proponowany ekran hybrydowy umożliwia rozwiązanie kilku problemów występujących przy ekranowaniu z wykorzystaniem konwencjonalnych urządzeń ferromagnetycznych.

Dzięki zastosowaniu litego ekranu ekranowanie pól magnetycznych niższych, niż pierwsze pole krytyczne jest całkowite. Pole magnetyczne wewnątrz obszaru ekranowanego pozostaje niezmiennie i identyczne do występującego w momencie przejścia ekranu

do stanu nadprzewodzącego. Eliminowane są wszelkie zewnętrzne szумы mogące zakłócać pomiary magnetyczne prowadzone wewnątrz obszaru ekranowanego. Problemem jest niska wartość pierwszego pola krytycznego, rzędu 5-10 mT, która wymusza znalezienie dodatkowych sposobów redukcji zewnętrznej indukcji magnetycznej.

Ekran wykonany z taśmy umożliwia zwiększenie zdolności ekranowania wraz ze wzrostem częstotliwości zewnętrznego pola magnetycznego. Zgodnie z regułą Lenza płynące w nim prądy produkują pole działające w kierunku przeciwnym niż indukujące. Natężenie prądów ekranujących zależy od częstotliwości. W szczególności, powyżej pewnej częstotliwości granicznej zależnej od kształtu i materiału, pętla prądu nadprzewodzącego zamyka się i pojawia się dodatkowy efekt ekranujący.

Spadek krytycznej gęstości prądu ekranującego wraz z zewnętrznym polem magnetycznym jest wyraźnie zauważalny jako zbliżanie się charakterystyki pola magnetycznego wewnątrz ekranowanego obszaru do linii równego pola. Zmniejszenie krytycznej gęstości prądu skutkuje redukcją zdolności ekranowania zarówno ekranu litego, jak i z taśmy. Gdy maksymalna gęstość krytyczna prądu w ekranie z taśmy zostanie osiągnięta, zwiększanie częstotliwości nie będzie umożliwiać dalszej redukcji pola magnetycznego w obszarze ekranowanym.

Proponowany ekran hybrydowy może znaleźć zastosowanie w urządzeniach elektrycznych produkujących przemienne pole magnetyczne o niskiej i średniej częstotliwości, takich jak silniki i generatory. Umożliwiają one kontrolę środowiska magnetycznego, co może być korzystne w skomplikowanych konstrukcjach. Oferowana przez ekran całkowita redukcja szumów jest ważna w przypadku pomiarów magnetycznych superczułymi sensorami typu SQUID. Badania ludzkiego ciała oraz pomiar słabych prądów powstających w korodujących materiałach mogą zwiększyć swoją dokładność dzięki właściwościom opisanych w tej pracy urządzeń.

Podstawowym problemem związanym ze stosowaniem nadprzewodzących ekranów magnetycznych jest konieczność chłodzenia ich do temperatury poniżej krytycznej nadprzewodnika. Urządzenia muszą w czasie pracy znajdować się w kriostacie, co zwiększa koszty pracy i ogranicza możliwości powszechnego stosowania.

## **5. PODSUMOWANIE**

Nadprzewodzące ekrany magnetyczne oferują możliwości ekranowania niedostępne konwencjonalnym rozwiązaniom - pełne ekranowanie oraz zatrzymywanie pól niskiej częstotliwości. Opisany w tej pracy ekran hybrydowy wykorzystuje właściwości taśm nadprzewodzących do zwiększenia zakresu pełnego ekranowania litego ekranu. Wykonanie ekranu z taśmy jest łatwe i tanie. Stworzony model dobrze symuluje właściwości tego typu ekranów oraz pozwala na wyciągnięcie wniosków potwierdzających powyższe założenia.

## LITERATURA

- [1] Denis S., Dusoulier L., Dirickx M., Vanderbemden P., Cloots R., Ausloos M., Vanderheyden B.: *Magnetic shielding properties of high-temperature superconducting tubes subjected to axial fields*, *Superconductor Science and Technology*, 20, 3, 192–201, 2007, doi:10.1088/0953-2048/20/3/014.
- [2] Kvitkovic J., Pamidi S., Voccio J.: *Shielding of AC magnetic fields by coils and sheets of superconducting tapes*, *Superconductor Science and Technology* 22, 12, 2009, doi:10.1088/0953-2048/22/12/125009.
- [3] Gozzelino L., Agostino a Gerbaldo R., Ghigo G., Laviano F.: *Magnetic shielding efficiency of superconducting/ferromagnetic systems*, *Superconductor Science and Technology*, 25, 11, 2012, doi:10.1088/0953-2048/25/11/115013.
- [4] Seki Y., Suzuki D., Ogata K., Tsukada K.: *Open-type hybrid magnetic shield using high-TC superconducting wire and flexible magnetic sheets*, *Applied Physics Letters*, 82, 6, 940, 2003, doi: 10.1063/1.1544064.
- [5] Mori K., Minemoto T.: *Magnetic shielding of the superposition of a hybrid ferromagnetic cylinder over a BPSCCO cylinder*, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 7, 2, 378–381, 1997, doi: 10.1109/77.614508.
- [6] Kvitkovic J., Davis D., Zhang M., Pamidi S.: *Influence of Interlayer Separation on Magnetic Shielding Properties of 2G HTS Sheets Made of 46 mm Wide RABiTS Tape*, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 23, 3, 8200605, 2013, doi: 10.1109/TASC.2012.2234818.
- [7] Wéra L., Fagnard J., Levin G., Vanderheyden B., Vanderbemden P.: *Magnetic Shielding With YBCO Coated Conductors: Influence of the Geometry on Its Performances*, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 23, 3, 8200504, 2013, doi:10.1109/TASC.2012.2235514.
- [8] Arsénio P., Silva T., Vilhena N., Pina J.: *Analysis of Characteristic Hysteresis Loops of Magnetic Shielding Inductive Fault Current Limiters*, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 23, 2, 5601004, 2013, doi: 10.1109/TASC.2012.2235896.
- [9] Uglietti D., Yanagisawa Y., Maeda H., Kiyoshi T.: *Measurements of magnetic field induced by screening currents in YBCO solenoid coils*, *Superconductor Science and Technology* 23, 11, 2010, doi:10.1088/0953-2048/23/11/115002.
- [10] Ohta H., Matsui T., Uchikawa Y.: *Studies on Response of Human Hippocampus to Random Somatosensory Stimuli by a SQUID System in a Superconducting Magnetic Shield*, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 21, 3, 469-472, 2011, doi:10.1109/TASC.2010.2086411.