

Wyniki badań symulacyjnych elektromagnetycznego koncentratora pola dla komór procesowych

Streszczenie. Praca prezentuje wybrane wyniki symulacji elektromagnetycznego koncentratora pola magnetycznego dedykowanego dla komór procesowych. Na podstawie wyników badań polowych 2D/3D wykazano, że przedstawione: koncepcja budowy magnetowodu, sposób uzwojenia oraz prądowe sterowanie, wytwarza we wnętrzu urządzenia stałe lub zmienne w czasie pole magnetyczne o dowolnej kierunkowości oraz zadanej pulsacji. Prezentowany koncentrator pola może znaleźć zastosowanie m.in. w urządzeniach realizujących procesy chemiczne, biologiczne, termiczne oraz pomiarowe.

Abstract. The paper presents selected simulation results of an electromagnetic field concentrator dedicated to process chambers. Based on the 2D/3D FEA results have shown that the presented concept of magnetic circuit, the presented way of winding and suitable current control, generates inside the device a constant or time-varying vector of magnetic field in any direction and set pulsation. The presented field concentrator may be used, among others, in devices carrying out chemical, biological, thermal and measuring processes. (**Simulation results of an electromagnetic field concentrator for process chambers**).

Słowa kluczowe: komora procesowa, elektromagnetyczne wzbudzenie, koncentrator pola magnetycznego.

Keywords: process chamber, electromagnetic excitation, magnetic field concentrator.

Wstęp

Pole magnetyczne odgrywa ważną rolę w systemach elektrycznych, biologicznych, chemicznych i wielu innych. Istnieją badania związane z praktycznymi zastosowaniami zarówno pola elektrycznego, jak i magnetycznego. Na przykład w systemie biologicznym, bakterie magnetotaktyczne wytwarzające magnetosomy, składające się z dwóch rodzajów ferromagnetycznych minerałów, np. magnetytu, układają się wzdłuż linii pola magnetycznego Ziemi.

Obecnie prowadzonych jest wiele badań zarówno w Polsce jak i na świecie związanych z koncentratorami pola magnetycznego, które mają różne zastosowanie praktyczne [1-11]. Najczęściej budowane są stosunkowo proste urządzenia koncentrujące pole magnetyczne o zadanej częstotliwości, które stosowane są do powierzchniowego hartowania metali, indukcyjnego nagrzewania, czy na cele diagnostyczne. W systemach chemicznych pole magnetyczne może zmieniać szybkość, wydajność i rozkład produktu niektórych reakcji chemicznych. Można zatem twierdzić, że udoskonalanie urządzeń wytwarzających pole magnetyczne o oczekiwanym rozkładzie i natężeniu, jest wciąż aktualne.

Znane urządzenia wytwarzające pole magnetyczne stosowane w komorach procesowych wykorzystują pole magnetyczne wzbudzone magnesami trwałymi lub wzbudzone elektromagnetycznie przy użyciu dedykowanych cewek, tak jak to zostało zastosowane np. w generatorze mikro pola magnetycznego w wynalazku nr Pat. 240748, lub przy użyciu wielopasmowych uzwojeń. W tych urządzeniach wytwarzane jest jednokierunkowe stałe lub zmienne pole magnetyczne, które regulowane jest w ograniczonym zakresie.

Problem technicznym polega na budowie takiego urządzenia, które wytworzy pole magnetyczne o zadanym wektorze, natężeniu oraz pulsacji, i które będzie jednorodne w możliwie największym obszarze roboczym.

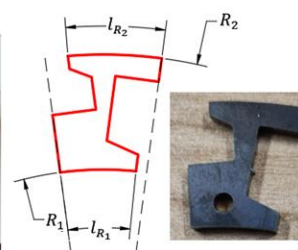
Koncepcja budowy elektromagnetycznego koncentratora pola

Na rys.1a przedstawiono rdzeń i uzwojenie prototypu koncentratora pola magnetycznego budowanego według

nowej koncepcji. Istota polega na budowie składanego rdzenia, który składa się z dwudziestu czterech jednakowych pakietów składanych z pojedynczych komponentów ferromagnetycznych, które zostały pokazane na rys.1b.



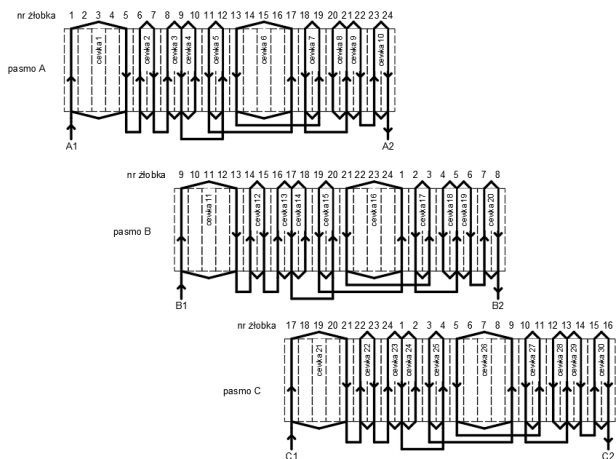
a)



b)

Rys.1. Magnetowód nowej koncepcji budowy koncentratora pola magnetycznego –a); komponenty rdzenia –b)

Użycie jednakowych komponentów ułatwia budowę rdzenia koncentratora, który ma 24 żłobki półotwarte. Dwanaście żłobków znajduje się zarówno po stronie wewnętrznej jak i zewnętrznej powstałego toroidu. W żłobki wprowadzone są cewki tworzące uzwojenie trójpasmostowe. Schemat rozwinięty uzwojenia pokazano rysunku 2.



Rys.2. Schemat rozwinięty uzwojenia pasma A, B i C.

W taki sposób powstaje dwustronnie użłobkowany pierścieniowy rdzeń, trójpasmostwo uzwojenie wzbudzające pole magnetyczne, a każde pasmo posiada dziesięć cewek połączonych szeregowo.

Cechą charakterystyczną dla powstałej konstrukcji jest geometria przekroju poprzecznego komponentu rdzenia pokazanego na rysunku 2b. Łuk wewnętrzny o długości l_{R1} powstaje na promieniu wewnętrznym R_1 , i jest równy:

$$l_{R1} = \frac{\pi R_1}{12} - l_{oR1} \quad (1)$$

gdzie: l_{oR1} – długość łukowa odpowiadająca połowie szerokości otwarcia żłobka wewnętrznego.

Łuk zewnętrzny o długości l_{R2} powstaje na promieniu wewnętrznym R_2 , i jest równy:

$$l_{R2} = \frac{\pi R_2}{12} - l_{oR2} \quad (2)$$

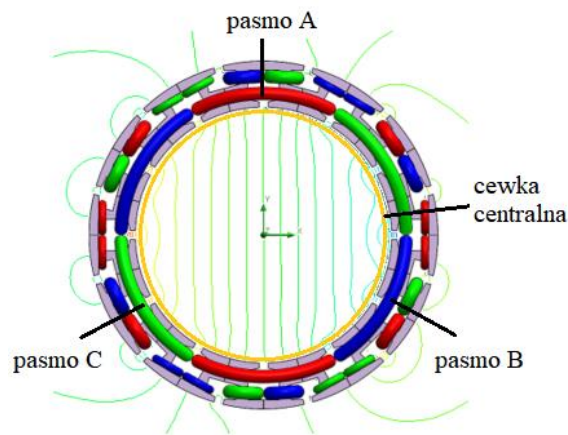
gdzie: l_{oR2} – długość łukowa odpowiadająca połowie szerokości otwarcia żłobka zewnętrznego.

Na rysunku 3 przedstawiono sposób rozłożenia cewek tworzących uzwojenie pasma A, B, C. Cewki pasma B względem cewek pasma A ułożone są w żłobkach rdzenia w taki sposób, że kąt położenia osi boków cewek pasma B w stosunku do kąta położenia osi boków cewek uzwojenia pasma A różni się w mierze stopniowej o kąt 120 stopni. Analogicznie: kąt położenia osi boków cewek pasma C w stosunku do kąta położenia osi boków cewek pasma A różni się w mierze stopniowej o kąt 240 stopni. Oprócz uzwojenia trójpasmostowego wewnątrz magnetowodu umieszczona jest cewka centralna.

Zasilenie prądem stałym DC uzwojeń wzbudzenia pasma A, B i C, w ten sposób, że prąd uzwojenia pasma A równy jest $I_A = I_w$, prąd uzwojenia pasma B oraz pasma C równy $I_B = I_C = -0.5 I_A$, gdzie I_w jest znamionowym prądem wzbudzenia, powoduje wytworzenie w obszarze roboczym wewnątrz komory procesowej stałego jednorodnego pola magnetycznego, którego linie układają się zgodnie z rozkładem pola pokazanym na rysunku 3. Rozkład otrzymano w wyniku symulacji MES, przy użyciu oprogramowania Ansys.

Należy dodać, że zasilenie uzwojeń prądem przemiennym AC w układzie trójfazowym wytworzy wewnątrz komory procesowej wirujące jednorodne pole magnetyczne, gdzie długość wektora indukcji tego pola będzie proporcjonalna do wartości natężenia prądu AC, a pulsacja wektora indukcji magnetycznej jest równa $2\pi f$,

gdzie f oznacza częstotliwość prądu. Ponadto zasilenie cewki centralnej prądem stałym DC spowoduje obrót wektora indukcji pola magnetycznego w kierunku osi komory procesowej, a zwrot wektora indukcji będzie zależny od polaryzacji prądu w cewce centralnej. W przypadku zasilenia cewki centralnej prądem AC, częstotliwość zmiany zwrotu wektora indukcji pola magnetycznego w komorze procesowej będzie proporcjonalna do częstotliwości f prądu AC zasilającego tę cewkę.



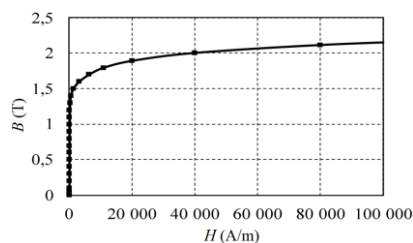
Rys.3. Linie pola magnetycznego wewnątrz koncentratora pola magnetycznego

Wyniki badań symulacyjnych

W celu potwierdzenia efektu koncentracji pola magnetycznego wewnątrz komory procesowej opracowano dwuwymiarowy model połowy koncentratora pola. Geometria komponentów ferromagnetycznych użyta w badanym modelu powstała przy wartościach geometrycznych podanych w tabeli 1. Komponentem ferromagnetycznym nadano właściwości materiałowe zgodne z charakterystyką B-H pokazaną na rysunku 4.

Tabela 1. Dane przyjęte w modelu 2D MES

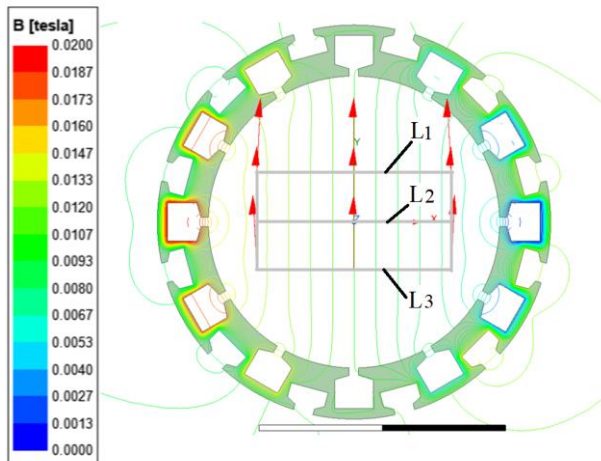
parametr	wartość
R_1 [mm]	60.0
R_2 [mm]	81.0
l_{oR1} [mm]	13.8
l_{oR2} [mm]	17.1
l_{R1} [mm]	2.0
l_{R2} [mm]	4.2
j_{Cu} [A/mm ²]	5.0



Rys.4. Charakterystyka B-H materiału komponentu ferromagnetycznego

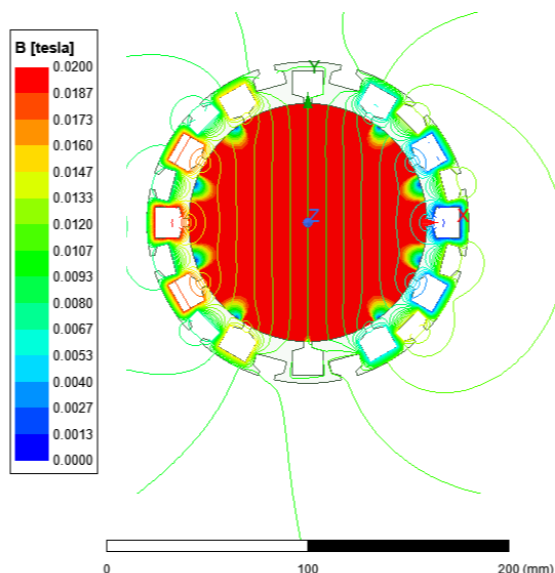
Na rysunku 5 przedstawiono rozkład linii pola magnetycznego oraz wektory indukcji pola magnetycznego wytwarzane w dziewięciu wybranych punktach modelu, które zostały uzyskane w badaniu statycznym przy obciążeniu uzwojeń pasmowych prądem stałym. Gęstość prądu uzwojenia pasma A wynosiła $j_A = 5 \text{ A/mm}^2$, gęstość

prądu uzwojenia pasma B oraz pasma C wynosiła $j_B = j_C = 2.5 \text{ A/mm}^2$.



Rys.5. Linie pola magnetycznego oraz wektory indukcji pola magnetycznej

Dodatkowo na rysunku 6 pokazano rozkład indukcji pola magnetycznego we wnętrzu koncentratora.

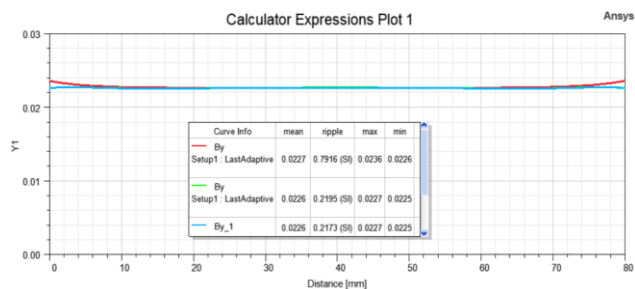


Rys.6. Rozkład indukcji pola magnetycznego we wnętrzu koncentratora

Przedstawione rozkłady pola magnetycznego wewnątrz urządzenia wykazały, że w całym zadanym obszarze roboczym o wymiarach 80x40mm, który został zaznaczony na rysunku 5 liniami szarymi tworzącymi widoczne dwa prostokąty, indukcja pola magnetycznego ma wartość nie mniej niż 20mT.

Jednorodność pola magnetycznego została zbadana na podstawie przebiegu zmian składowej podłużnej wektora indukcji magnetycznej B_y wyznaczonej wzdłuż linii L_1 , L_2 oraz L_3 , zgodnie rysunkiem 5. Długość tych poziomych linii, wzajemnie względem siebie równoległych, wynosiła 80mm, a odległość linii L_1 i L_3 od linii L_2 wynosiła 20mm.

Na rysunku 7 przedstawiono charakterystyki zmian długości wektora indukcji magnetycznej składowej podłużnej B_y wyznaczonej wzdłuż linii L_1 oraz L_3 w porównaniu ze charakterystyką zmian długości wektora indukcji magnetycznej składowej podłużnej wyznaczonej wzdłuż linii L_2 (linia środkowa).



Rys.7. Przebieg zmian długości wektora indukcji magnetycznej składowej podłużnej B_y wyznaczonej wzdłuż linii L_1 , L_2 i L_3 .

Uzyskane wyniki pokazują, że średnia wartość indukcji magnetycznej składowej podłużnej $B_{y_{sr}}$ wyznaczona na liniach L_1 oraz L_3 wynosi 22.7 mT i różni się od średniej wartości indukcji magnetycznej składowej podłużnej wyznaczonej na linii L_2 tylko o wartość 0.1 mT. Nieznacznie większe różnice wynoszące 0.9 mT występować będą we wszystkich narożnikach obszaru roboczego komory procesowej i widoczne są na rysunku 5 dla najdłuższych wektorów składowej podłużnej indukcji magnetycznej ($B_{y_{max}}$) wyznaczonych na liniach L_1 oraz L_3 w porównaniu z linią L_2 . W tabeli 2 podano charakterystyczne wartości składowej podłużnej (pionowej) B_y indukcji magnetycznej wyznaczone na liniach L_1 , L_2 oraz L_3 .

Tabela 2. Porównanie charakterystycznych wartości składowych wektora indukcji pola magnetycznego wyznaczonych na liniach L_1 , L_2 , L_3

	L_1	L_2	L_3
$B_{y_{max}}$ (mT)	23.6	22.7	23.6
$B_{y_{min}}$ (mT)	22.6	22.5	22.6
$B_{y_{sr}}$ (mT)	22.7	22.6	22.7

Uzyskane wyniki pozwoliły twierdzić, że koncentracja pola działa poprawnie.

Analiza 3D

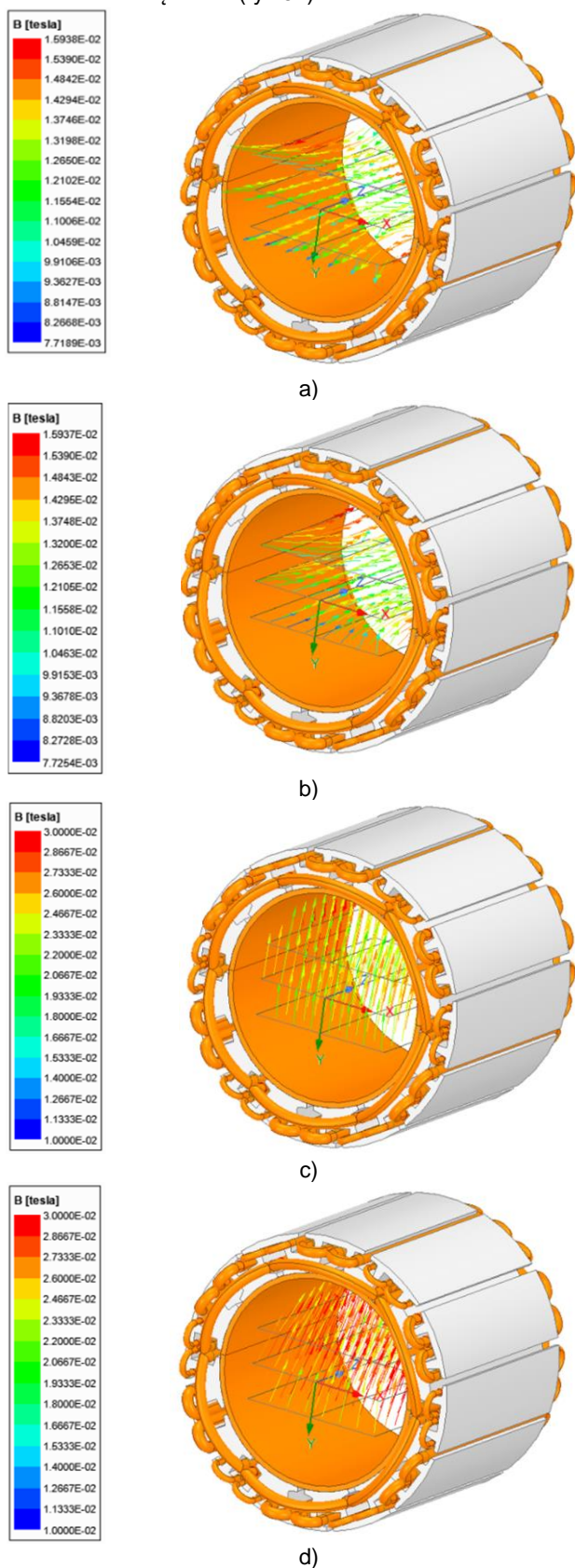
W celu potwierdzenia możliwości kierowania pola magnetycznego wzdłuż osi koncentratora opracowano model przestrzenny koncentratora. Na rysunku 8 przedstawiono cztery przypadki ustawienia wektorów indukcji pola magnetycznego widoczne na trzech płaszczyznach prostopadłych leżących wewnątrz komory. Widoczne na rysunkach wektory indukcji pola magnetycznego zostały wytworzone prądem cewki centralnej I_{CE} lub/i prądami w uzwojeniach pasmowych I_A , I_B , I_C zgodnie z algorytmem zasilania uzwojeń podanym w tabeli III, gdzie I_{WCE} oznacza znamionowy prąd wzbudzenia cewki centralnej.

Tabela 3. Algorytm zasilania uzwojeń

	Przypadek 1 (Rys.8a)	Przypadek 2 (Rys.8b)	Przypadek 3 (Rys.8c)	Przypadek 4 (Rys.8d)
I_{CE}	$+ I_{WCE}$	$- I_{WCE}$	0	$- I_{WCE}$
I_A	0	0	I_w	I_w
I_B	0	0	$- I_w/2$	$- I_w/2$
I_C	0	0	$- I_w/2$	$- I_w/2$

Uzyskane wyniki symulacji (rys. 8) jednoznacznie pokazują wpływ prądów wzbudzenia pola na zmianę wektorów indukcji magnetycznej wewnątrz komory procesowej. W zależności od polaryzacji prądu cewki centralnej możliwe jest dowolne ustawianie wektora indukcji pola magnetycznego wzdłuż osi urządzenia (rys. 8a-b). Dodatkowo zasilanie prądowe uzwojeń pasmowych wytwarza pole wewnątrz komory o zadanym kierunku z

dużą jednorodnością (rys.8c), natomiast w przypadku dowzbudzenia pola prądem cewki centralnej następujące obracanie wektorów indukcji pola magnetycznego w kierunku osi urządzenia (rys.8d).



Rys.8. Wektory indukcji pola magnetycznego wewnątrz komory dla czterech wybranych przypadków wzbudzenia pola magnetycznego prądem cewki centralnej I_{CE} oraz prądami w uzwojeniach pasmowych I_A , I_B oraz I_C

Podsumowanie

Przedstawiona koncepcja budowy obwodu elektromagnetycznego składającego się z 24 jednakowych komponentów ferromagnetycznych oraz przedstawiony sposób uzwojenia urządzenia może zapewnić budowę komór procesowych z polem magnetycznym o dużej jednorodności, regulowanej wartości i kierunku osi pola. W opinii autorów pracy przedstawiona koncepcja budowy koncentratora pola magnetycznego jest nowatorska, stąd podjęto decyzję o złożeniu wniosku do Urzędu Patentowego RP o udzielenie patentu na wynalazek (nr zgłoszenia P.448503).

Należy dodać, że przy opracowaniu urządzenia zdolnego do wytwarzania znacznych wartości natężenia pola magnetycznego wewnątrz komory procesowej, dużym wyzwaniem będzie utrzymanie stałej, relatywnie niskiej temperatury wewnątrz urządzenia.

Autorzy: mgr inż. Piotr Strobejko, E-mail: piotr.strobejko@zut.edu.pl; dr hab. inż. Piotr Paplicki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Maszyn i Napędów Elektrycznych, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, E-mail: piotr.paplicki@zut.edu.pl; mgr inż. Maciej Cieśla, E-mail: ciesla.maciej.94@gmail.com.

LITERATURA

- [1] M Glinka, S Gawron, A Sieroń, K Pawłowska-Góral, Test chambers for cell culture in static magnetic field, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 331, April 2013, Pages 208-215.
- [2] Ciecholewska-Juško, D., Żywicka, A., Junka, A. et al. The effects of rotating magnetic field and antiseptic on in vitro pathogenic biofilm and its milieu. Sci Rep 12, 8836 (2022).
- [3] Kwiatkowski et al., Regulatory and enterotoxin gene expression and enterotoxins production in Staphylococcus aureus FRI913 cultures exposed to a rotating magnetic field and trans-anethole, International Journal of Molecular Sciences, 23 (2022), p. 6327.
- [4] Tomasz J. Antosiewicz, Piotr Wróbel, and Tomasz Szoplik, "Magnetic field concentrator for probing optical magnetic metamaterials", Optics Express, Vol. 18, Issue 25, pp. 25906-25911 (2010), <https://doi.org/10.1364/OE.18.025906>
- [5] Z.Y.Zhang, S.Matsumoto, S.Choi, R.Teranishi, T.Kiyoshi, "A new structure for a magnetic field concentrator using NbTi sheet superconductors", Elsevier, Volume 71, Issues 21–22, November 2011, Pages 1547-1549, <https://doi.org/10.1016/j.physc.2011.05.235>
- [6] P. Zhang, M. Kimchi, H. Shao, J. E. Gould, G. S. Daehn, "Analysis of the Electromagnetic Impulse Joining Process with a Field Concentrator", AIP Conference Proceedings 712, 1253 (2004); <https://doi.org/10.1063/1.180631>.
- [7] Shahriar Jalal Nibir, Babak Parkhideh, "Magnetoresistor with Planar Magnetic Concentrator as Wideband Contactless Current Sensor for Power Electronics Applications", IEEE Transactions on Industrial Electronics (Volume: 65, Issue: 3, March 2018), DOI: 10.1109/TIE.2017.2739711
- [8] S.I.Bondarenko, A.A.Shablo, P.P.Pavlov, S.S.Perepelkin, "Ferromagnetic concentrator of a magnetic field for the planar HTSC SQUID", Elsevier, Volumes 372–376, Part 1, August 2002, Pages 158-161, [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(02\)00643-3](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(02)00643-3)
- [9] Piotr Wróbel, Tomasz J. Antosiewicz, Tomasz Stefaniuk, Tomasz Szoplik, "Plasmonic concentrator of magnetic field of light", Journal of Applied Physics 112, 074304 (2012); <https://doi.org/10.1063/1.4757033>
- [10] P Kwiatkowski, A Tabiś, K Fijałkowski, H Masiuk... Regulatory and Enterotoxin Gene Expression and Enterotoxins Production in Staphylococcus aureus FRI913 Cultures Exposed to a Rotating Magnetic Field and trans-Anethole, International Journal of Molecular Sciences, 2022.
- [11] M Woroszyło, D Ciecholewska-Juško, A Junka... Rotating Magnetic Field increases β -lactam antibiotic susceptibility of methicillin-resistant Staphylococcus aureus strains- International journal of molecular sciences, 2021