

Stanisław Gawron, Marek Glinka, Tomasz Wolnik
BOBRME KOMEL, Katowice

MAGNETYCZNA KOMORA BADAWCZA DEDYKOWANA DO HODOWLI KOMÓREK

MAGNETIC CHAMBER DEDICATED TO RESEARCH OF THE CELL CULTURE

Abstract: At present the most popular, and most commonly applied, permanent magnets are ferrite and neodymium magnets. Their broader and broader industrial use connected with the drop of the costs of their production is connected with the need to broaden the basic tests evaluating their influence upon the functions of living organisms. So far only few studies cited in the world's medical literature have been devoted to the problem of evaluating the activity of permanent magnetic fields onto cell cultures. The permanent magnets used in the studies had no descriptions of their characteristics nor previously prepared spatial models of distribution of the permanent magnetic field intensities. Our goal was an attempt to optimize these studies. We created computer simulations of 3D distribution of the intensities of the permanent magnetic field for several permanent magnets, which, as we assumed, could be used for tests with cell cultures. The next step was the construction of model circuits for several sizes of magnets on the basis of the spatial parameters of a standard plastic container used for growing cell cultures. We compared the assumptions of the intensity simulations with real measurements carried out on models of real circuits. Our research is to be developed in a proposal of a model for testing the impact of permanent magnetic fields on various factors of cell cultures in vitro. Our assumptions are based on the existing 3D simulations carried out for permanent magnets used in the production of electric engines. The calculations of the magnetic induction were carried out with the application of the 3D finite elements method. The results of the measurements were presented in a form of visualization of 3D distribution of the simulations and the real measurements. The measurement differences were statistically compared; no statistically significant differences in the computer simulations (on the basis of the producer's assumptions) and the real measurements were revealed. 3D simulations allow to select appropriate parameters of magnets and to provide design preparation of stations for testing the impact of permanent magnetic fields onto cell cultures.

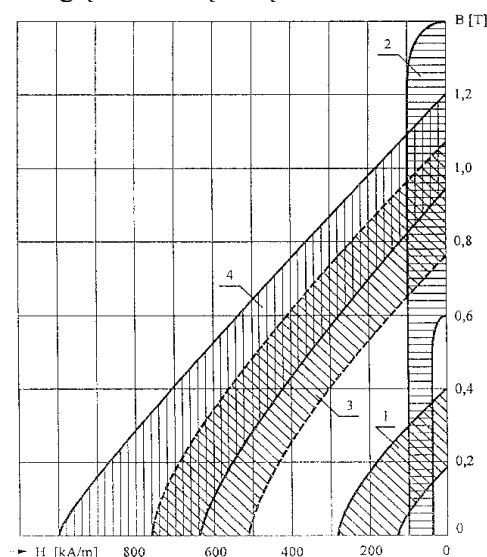
1. Wstęp

Organizmy żywe, w tym ludzie, od początku istnienia życia na ziemi, żyją w polu magnetycznym ziemi, są zatem genetycznie do tego pola przystosowane. Pole magnetyczne ziemi jest polem stałym o parametrach: natężenie $H_z = 24 \text{ A/m}$, indukcja $B_z = 30 \text{ } \mu\text{T}$. Na terenach, gdzie znajdują się duże pokłady rud żelaza oraz w okolicach bieguna wartości H_z i B_z są większe, jednak nie przekraczają dwukrotnie podanych wartości.

W wieku XIX i XX powstała i rozwinęła się elektrotechnika, która stymulowała rozwój inżynierii materiałowej magnesów trwałych.

Współcześnie najbardziej popularnymi i najszerzej stosowanymi magnesami trwałymi są magnesy ferrytowe (1–rys.1) i magnesy neodymowe (4–rys.1). Magnesy ferrytowe od kilkudziesięciu lat są stosowane powszechnie w maszynach elektrycznych małej mocy instalowanych między innymi w sprzęcie AGD. Magnesy neodymowe (NdFeB) wynaleziono w 1985 roku i od początku XXI wieku, są coraz szerzej stosowane w urządzeniach elektromechanicz-

nych średnich i dużych mocy, co jest związane z ich względnie niską ceną.



Rys. 1. Przedziały, w których zawierają się charakterystyki odmagnesowania magnesów trwałych: 1 – ferryty baru i ferryty strątu, 2 – alnico, 3 – samar-cobalt, 4- neodym-żelazo-bor

Z polem magnetycznym magnesów trwałych styczność mają ludzie, występuje zatem potrzeba rozszerzenia badań podstawowych oceniających wpływ pola magnetycznego generowanego przez magnesy trwałe na funkcjonowanie organizmów żywych. Dotychczas tylko kilka prac cytowanych w światowej literaturze medycznej zajmowało się problemem oceny oddziaływania stałych pól magnetycznych na komórki żywe. Badano hodowle komórek w termostatach, w których wzbudzano pole magnetyczne magnesami trwałymi bądź elektromagnetycznie. Rozkład pola magnetycznego w przestrzeni termostatu zajmowanego przez ekspozycję hodowanych komórek nie zawsze był jednoznacznie zidentyfikowany, ani obliczeniowo, ani pomiarowo. Opracowane przez autorów magnetyczne komory badawcze mają pełną identyfikację rozkładu indukcji magnetycznej w przestrzeni ekspozycji komórek. Zaprojektowano kilka komór o tych samych wymiarach zewnętrznych. Komory te różnią się grubością l_m magnesów trwałych NdFeB, co powoduje, że w każdej z nich, w przestrzeni badawczej, jest inna wartość indukcji magnetycznej. W każdej z komór, z dokładnością kilku procent, wartość indukcji jest stała. Komory konstrukcyjnie zostały dopasowane do wymiarów termostatu, w którym prowadzone są badania i do wymiarów kolby, w której hodowane są komórki. Termostat ma regulację i stabilizację temperatury. Dla każdej z zaprojektowanych komór wykonane zostały, metodą elementów skończonych MES, trójwymiarowe symulacje komputerowe rozkładu pola magnetycznego. Komory zostały wykonane, a rozkłady indukcji magnetycznej w komorach zostały zmierzone. Wyniki obliczeń MES 2D i 3D, zostały porównane z wynikami badań laboratoryjnych. Efektem końcowym wykonanych prac są standardowe komory do badań wpływu stałych pól magnetycznych do hodowli komórkowych w warunkach *in vitro*.

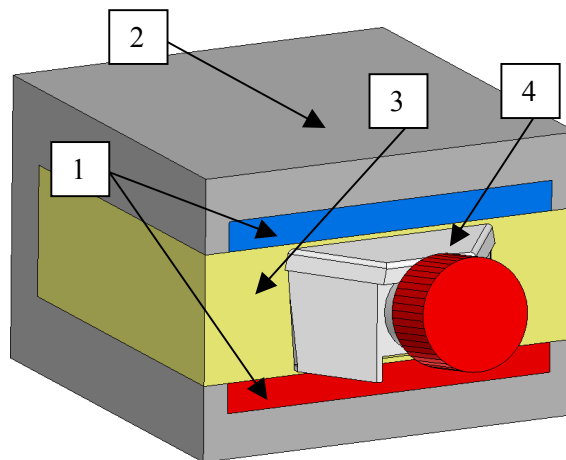
2. Komora magnetyczna

Symulacje komputerowe zostały wykonane w programie MES umożliwiającym przeprowadzenie dwu- i trój- wymiarowych obliczeń polowych. W modelach obliczeniowych wykorzystano magnesy trwałe NdFeB, stosowane także w maszynach elektrycznych [1]. Duże doświadczenie w przeprowadzaniu symulacji MES 3D obwodów magnetycznych wykorzystywanych do różnych celów [2, 3], pozwoliło zbudować

modele obwodów magnetycznych komór do badań wpływu stałego pola magnetycznego na hodowle komórkowe. Aby zaprojektować odpowiednie modele należało uwzględnić specyfikę badań biologicznych:

- komora magnetyczna powinna być dopasowana i do termostatu i do kolby hodowlanej [4], by zapewnić sprawne jej wkładania i wyjmowania kolby,
- w powierzchni hodowlanej kolby powinien być możliwie jednorodny rozkład pola magnetycznego,
- konstrukcja komory powinna być prosta i niezawodna, by po przeszkoleniu, obsługujący eksperyment technik, wykonywał wszystkie czynności poprawnie,
- pole magnetyczne w przestrzeni kolby nie powinno być wrażliwe na zmianę temperatury w zakresie pracy termostatu w czasie badań,
- materiał kolby powinien dopuszczać dezynfekcję i czyszczenie środkami chemicznymi.

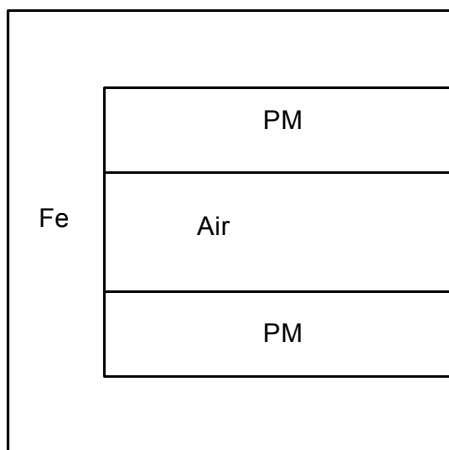
Na rysunku 2 pokazano komorę magnetyczną do hodowli komórek, dla której zbudowano algorytm i program obliczeń obwodu magnetycznego[4].



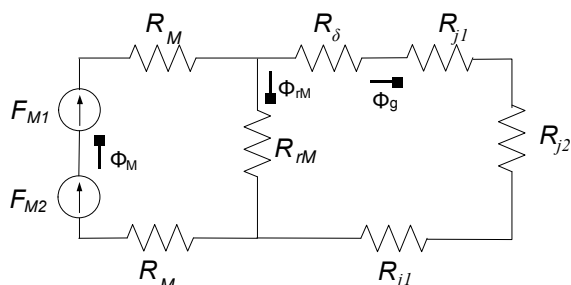
Rys. 2. Komora magnetyczna do hodowli komórek:

- 1 – magnesy trwałe,
- 2 – jarzmo obwodu magnetycznego,
- 3 – materiał niemagnetyczny,
- 4 – kolba do hodowli komórek.

Na rysunku 3 przedstawiono obwód magnetyczny komory badawczej w przekroju poprzecznym. Dla obwodu magnetycznego z rys. 3 zbudowano schemat zastępczy rozprężu strumienia magnetycznego, który przedstawiono na rys.4. Obliczenia analityczne obwodu magnetycznego przeprowadzono w programie Mathcad.



Rys. 3. Obwód magnetyczny komory magnetycznej



Rys. 4. Schemat zastępczy obwodu magnetycznego z rysunku 3

Dla schematu przedstawionego na rysunku 4 można zapisać następujące równania:

$$\phi_M = \phi_g + \phi_{rM} \quad (1)$$

$$F_{M1} + F_{M2} - 2\phi_M \cdot R_M - \phi_g \cdot R_\delta \Rightarrow \quad (2)$$

$$\Rightarrow -2\phi_g \cdot R_{j1} - \phi_g \cdot R_{j2} = 0$$

$$F_{M1} + F_{M2} - 2\phi_M \cdot R_M - \phi_{rM} \cdot R_{rM} = 0 \quad (3)$$

gdzie:

$F_{M1}; F_{M2}$ – siła magnetomotoryczna wzbudzana przez magnesy trwałe,

$R_M; R_{rM}; R_\delta; R_{j1}; R_{j2}$ – reluktancja magnetyczna: magnesu trwałego, strumienia rozproszenia, szczeliny powietrznej, jarzma 1 i jarzma 2,

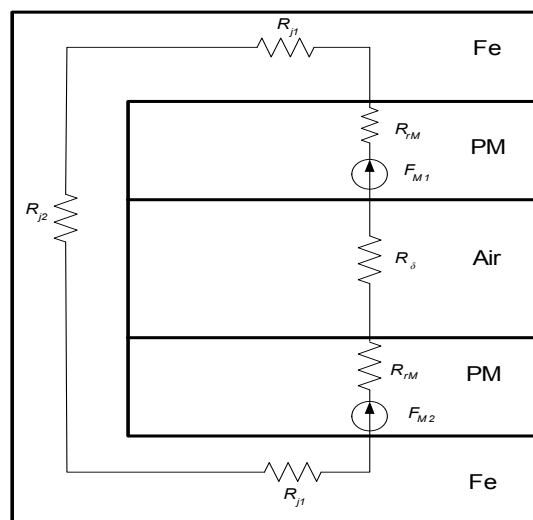
$\phi_M; \phi_g; \phi_{rM}$ – strumień magnetyczny wzbudzany magnesami trwałymi, strumień magnetyczny rozproszenia i strumień magnetyczny główny.

Magnes trwały w analogii elektrycznej jest źródłem prądowym. Źródło prądowe ma rezystancję nieskończenie dużą, gdyż w gałęzi prądowej jest wymuszany prąd. W obwodzie magnetycznym magnesu trwałego wymuszony jest strumień ϕ_M , a o jego wartości decyduje reluktancja obwodu zewnętrznego. Magnesy trwałe nie mają jednak reluktancji nieskończenie dużej. Reluktancja R_M jest jego reluktancją

wewnętrzną magnesu trwałego, która determinuje wpływ zewnętrznych pól magnetycznych na pole wzbudzone przez magnes trwały. Rozwiązując równania 1, 2, 3 oblicza się strumień magnetyczny główny:

$$\phi_g = \frac{(F_{M1} + F_{M2}) \cdot (-R_{rM})}{2R_{rM} \cdot R_M + (R_\delta + R_{j2} + 2R_{j1}) \cdot (2R_M - R_{rM})} \quad (4)$$

Z uwagi na trudność w jednoznacznym określeniu reluktancji magnetycznej na drodze strumienia rozproszenia schemat z rysunku nr 4 można uprościć do jednego obwodu, jak na rysunku nr 5. Wpływ strumienia rozproszenia na strumień główny, w przestrzeni kolby, uwzględnia się poprzez współczynnik rozproszenia k_r , który zmniejsza wartość głównego strumienia magnetycznego.

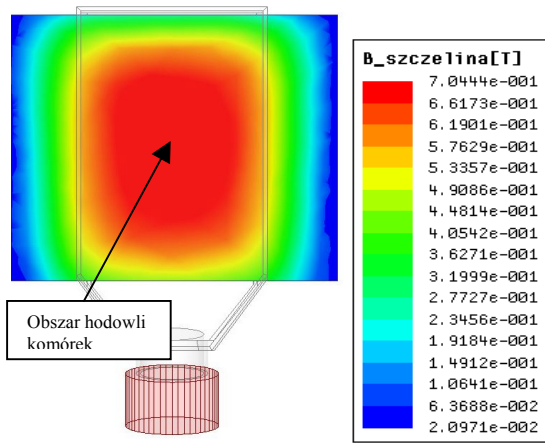


Rys. 5. Obwód magnetyczny z poglądowo naniessonym schematem zastępczym

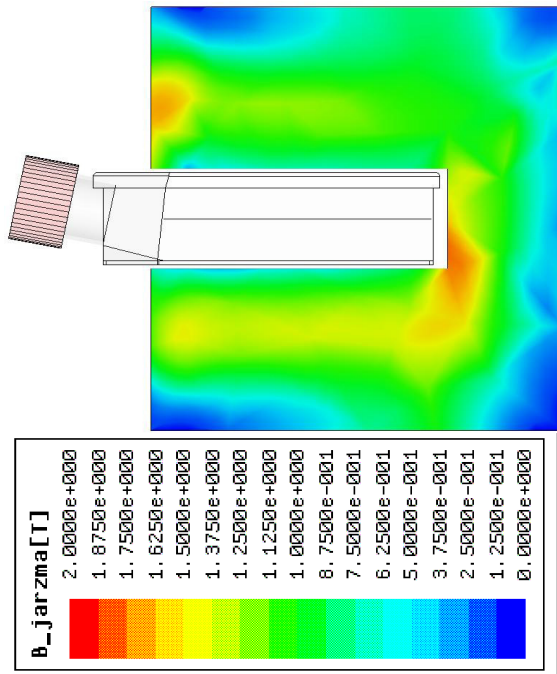
Dla schematu zastępczego z rysunku 5 równanie (4) upraszcza się do postaci:

$$\phi_g = \frac{k_r (F_{M1} + F_{M2})}{2R_M + R_\delta + R_{j2} + 2R_{j1}} \quad (5)$$

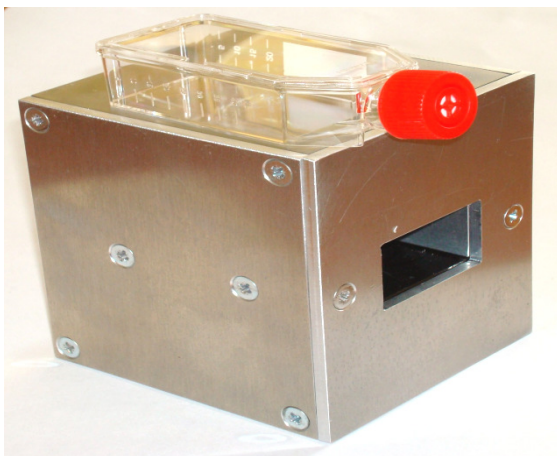
Na rys. 6 i 7 przedstawiono obliczone metodą elementów skończonych 3D rozkłady pola magnetycznego odpowiednio w przekroju poziomym kolby (rys.6) oraz w przekroju pionowym (rys.7) [5]. Natomiast na rysunku 8 pokazano fotografię zbudowanej komory pomiarowej. Wymiary komory zostały dopasowane do wymiarów zewnętrznych kolby 66x40x24 mm, w tym przestrzeń wewnętrzna (ekspozycyjna) kolby ma wymiary 60x35x27 mm.



Rys. 6. Obliczony metodą 3D rozkład indukcji magnetycznej w płaszczyźnie poziomej komory



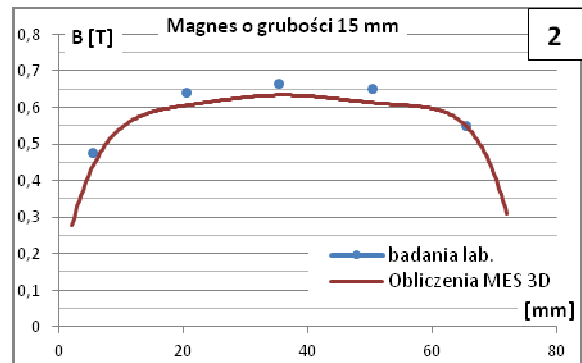
Rys. 7. Obliczony metodą 3D rozkład indukcji magnetycznej w płaszczyźnie pionowej komory



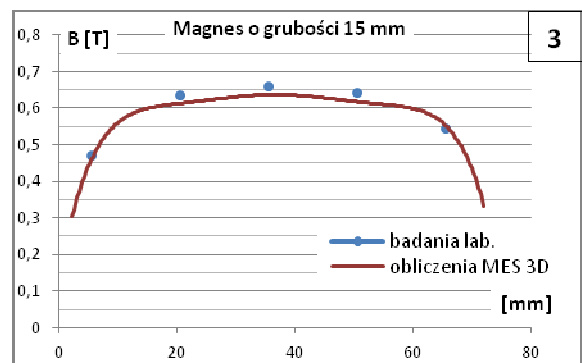
Rys. 8. Model fizyczny komory

badania	0.46	0.48	0.47	0.44
obliczenia	0.45	0.45	0.47	0.44
	0.61	0.64	0.64	0.59
	0.59	0.62	0.62	0.60
	0.64	0.67	0.66	0.62
	0.60	0.63	0.63	0.62
	0.62	0.65	0.64	0.60
	0.59	0.62	0.62	0.61
	0.53	0.55	0.54	0.51
	0.51	0.56	0.55	0.53
	1	2	3	4

Rys. 9. Porównanie wyników obliczeń z wynikami pomiarów indukcji magnetycznej w [T] w płaszczyźnie poziomej wewnątrz kolby; punkty skrajne leżą przy krawędziach kolby



Rys. 10. Rozkład indukcji w przekroju pokazanym na rysunku 9, kolumna 2



Rys. 11. Rozkład indukcji w przekroju pokazanym na rysunku 9, kolumna 3

W tabeli 1 zestawiono obliczone i zmierzone wartości indukcji, w punktach środkowych z rys. 9, dla różnych grubości magnesów trwałych.

Tabela 1. Maksymalne wartości indukcji magnetycznej dla poszczególnych komór badawczych.

Grubość magnesu	Maksymalna indukcja w szczelinie [T]		
	Obliczenia analityczne	Obliczenia 2D	Obliczenia 3D
4 mm	0,29	0,29	0,27
6 mm	0,40	0,39	0,36
8 mm	0,48	0,46	0,43
11 mm	0,58	0,56	0,52
15 mm	0,68	0,64	0,60
20 mm	0,71	0,69	0,65

3. Dyskusja

Celem prac było zaprojektowanie i wykonanie komór magnetycznych z wykorzystaniem magnesów neodymowych, o zidentyfikowanych rozkładach indukcji magnetycznej, przeznaczonych do badań wpływu stałego pola magnetycznego na hodowlę komórkową *in vitro*.

Publikowane w literaturze wyniki badań, z tematyki oddziaływanie stałych pól magnetycznych, nie miały jednoznacznie zidentyfikowanych rozkładów indukcji magnetycznej, ponadto pole magnetyczne generowane przez elektromagnes nie sprzyjało utrzymaniu stałej temperatury ekspozycji komórkowej.

Przykładem jest publikacja [7] Rosen i wsp., w której oceniano wpływ stałego pola magnetycznego o wartości 125 mT na aktywację kanału Na⁺ linii komórkowej GH3. Badania były prowadzone w polu magnetycznym generowanym przez elektromagnes. Jednorodność rozkładu pola, potwierdzona pomiarami, była zadowalająca, jednak problemem był efekt termiczny, generowany przez elektromagnes i jego wpływ na hodowlę komórek. Badania wykonano tylko przy jednej wartości indukcji magnetycznej, stąd nie oceniano wpływu różnych wartości indukcji na hodowlę. Ze względu na nagrzewanie się elektromagnesu, badania w komorze nie mogły być prowadzone w cyklu ciągłym 24 godziny na dobę. Takie warunki badań nie pozwalały na poprawną ocenę wydłu-

żonego w czasie oddziaływania stałego pola magnetycznego na hodowlę komórek.

Hughes i wsp.[8] oceniając wpływ stałych pól magnetycznych na aktywację kanałów jonowych w liposomach bakterii *E.coli*, wykorzystali magnesy trwałe NdFeB. Określili oni rozkłady indukcji magnetycznej gausometrem w płaszczyźnie ekspozycyjnej 2D, a hodowane komórki w pojemnikach zajmują przestrzeń 3D. Hodowla była prowadzona przy jednej wartości natężenia pola magnetycznego, gdyż komora nie miała możliwości zmiany indukcji magnetycznej.

Jae Seok Choi i wsp. (J.Magn Magn Materials 2010) [9] zaproponowali modele stanowisk badawczych z wykorzystaniem magnesów trwałych, które pozwalają na prowadzenie badań, oddziaływania stałego pola magnetycznego o rozkładzie przestrzennych, na ekspozycje komórkowe. Badania były prowadzone w temperaturze otoczenia, a nie w termostacie, ponadto komora była jedna bez możliwości zmiany indukcji magnetycznej.

Vokoun i wsp. (J.Magn Magn Materials 2011) [10] są autorami stanowiska badawczego bazującego na cylindrycznych magnesach trwałych. Także w tym przypadku komora była jedna bez możliwości zmiany indukcji magnetycznej, ponadto w ich modelach rozbieżność wyników, wartości indukcji magnetycznej, z obliczeń i z pomiarów przekraczała 10%

Podane przykłady uzasadniają teoretyczne podejście do poprawnego zaprojektowania stanowisk badawczych i do ich konstrukcji.

W naszym przypadku, do symulacji komputerowych 2D i 3D, wykorzystano parametry magnesów trwałych podane w katalogach przez producenta magnesów. Weryfikacja pomiarowa obliczeń indukcji magnetycznej wykazała, że dane katalogowe są wystarczające do poprawnego zaprojektowania stanowiska badawczego.

4. Wnioski

Komory magnetyczne wzbudzone magnesami trwałymi są dobrym urządzeniem do badania wpływu stałego pola magnetycznego na hodowlę komórek, gdyż nie generują ciepła i umożliwiają uzyskanie rozkładu indukcji magnetycznej w przestrzeni badawczej o wartości stałej. Zmianę wartości indukcji magnetycznej, w omawianych w artykule modelach, uzyskano poprzez budowę kilku komór, przy czym w każdej z nich magnesy trwałe miały inną grubość. Wartości indukcji magnetycznej uzyskane

w tych komorach zamieszczono w tabeli 1. Wyniki obliczeń polowych 2D jak i 3D są zbliżone, a różnice w wartościach w stosunku do pomiarów nie przekraczają 10%. Należy mieć jednak na uwadze, że jedynie trójwymiarowe obliczenia metodą polową pozwalają na ocenę jednorodności pola magnetycznego w całej przestrzeni komory badawczej, co w przypadku prowadzenia badań na hodowli komórkowej ma znaczenie. Symulacje 3D pozwalają na odpowiedni dobór parametrów magnesów trwałych i poprawne zaprojektowanie stanowiska do badań. Symulacje 3D stanowią użyteczny punkt wyjścia do konstrukcji komór badawczych do badania i oceny wpływu stałych pól magnetycznych na hodowle komórkowe.

Literatura

- [1]. Glinka T., „Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi”, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [2]. Bernatt J.: „Obwody elektryczne i magnetyczne maszyn elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi” Wydawnictwo BOBRME KOMEL Katowice 2010. PL ISBN 978-83-910585-9-6.
- [3]. Bernatt J., Gawron S., „Problemy projektowania i konstrukcji maszyn wzbudzanych magnesami trwałymi”. Jubileusz 90 – lecia Akademii Górniczo-Hutniczej. Materiały Konferencyjne, str. 23-26.
- [4]. Gawron S., Glinka M., Sieroń A., Cieślak G., Pawłowska-Góral K.: „Opracowanie projektu i wykonanie stanowiska badawczego obejmującego: inkubator do hodowli komórek, płyty magnetycznej z magnesami trwałymi i kolbami do hodowli komórek”. Niepublikowane opracowanie BOBRME KOMEL nr CG4-050049, Katowice, grudzień 2010.
- [5]. Gawron S., Glinka M., Sieroń A., Cieślak G., Pawłowska-Góral, K. Wolnik T.: „Rozkłady pola magnetycznego 3D w przestrzeni komory cieplarnianej: obliczenia metodą elementów skończonych, weryfikacja pomiarowa”. Niepublikowane opracowanie BOBRME KOMEL nr CG4-050062, Katowice, lipiec 2011.
- [6]. Bernatt J., Gawron S., Król E.: „Zastosowania trakcyjne nowoczesnych silników z magnesami trwałymi”, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review) nr 12/2009.
- [7]. Rosen AD „Effects of a 125 mT static magnetic field on the kinetics voltage activated Na⁺ channels in GH3 cells” Bioelectromagnetics 2003 Oct; 24(7): 517-23.
- [8]. Hughes S., Haj El AJ., Dobson J., Martinac B. “The influence of static magnetic fields on mechanosensitive ion channel activity in artificial liposomes” European Biophysics Journal 2005; 34: 461-68.
- [9]. Choi JS., Yoo J.: “Optimal design method for magnetization directions of permanent magnet array” Journal of Magnetism and Magnetic Materials 2010; 323: 2145-51.
- [10]. Vokoun D., Tomassetti G., Beleggia M, Stachiv I. “Magnetic forces between arrays of cylindrical permanent magnets” Journal of Magnetism and Magnetic Materials 2011 Jan; 323(1): 55-60.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010-2012 jako projekt badawczy nr N N510 533839.

Przedstawione w artykule urządzenie badawcze zgłoszono do ochrony patentowej Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej pod nr P.396639.

Autorzy

mgr inż. Stanisław Gawron

BOBRME KOMEL

tel. (032) 258 20 41 w.24

e-mail: s.gawron@komel.katowice.pl

dr n.med. Marek Glinka

BOBRME KOMEL

e-mail: mag@iq.pl

mgr inż. Tomasz Wolnik

BOBRME KOMEL

tel. (032) 258 20 41 w.34

e-mail: t.wolnik @komel.katowice.pl