

## Wykorzystanie modelowania pętli histerezy do opisu właściwości magnetycznych nanokrystalicznych rdzeni kompozytowych

**Streszczenie.** Potrzeba opracowania nowych i bardziej wydajnych materiałów wykonywanych z odpadów powinno być głównym celem w XXI wieku. W pracy te warunki prowadziły do badań nad wykorzystaniem materiałów odpadowych do produkcji magnetycznie miękkich rdzeni kompozytowych (SMC). Równie ważna jest możliwość wykorzystania modelu pętli histerezy do opisu właściwości magnetycznych wykonanych rdzeni. W pracy badaniom poddano model GRUCAD.

**Abstract.** Need to develop new and more performed materials which are obtained from waste should be main goal in XXI century. In paper this conditions are lead to research on using waste material to develop soft magnetic composite (SMC) core. Equally important is ability to use hysteresis loop model to description magnetic properties of developed cores. In this work to modeling hysteresis loop of self developed SMC cores based on nanocrystalline material the GRUCAD model was tested. (**Application of hysteresis loop modelling to description of soft magnetic composites cores based on nanocrystalic material**).

**Słowa kluczowe:** pętla histerezy, model GRUCAD, magnetycznie miękkie kompozyty, rdzenie kompozytowe.

**Keywords:** hysteresis loop, GRUCAD model, soft magnetic composite, composite cores.

### Wstęp

Rozwój inżynierii materiałowej i elektrotechniki prowadzi do poszukiwania coraz to doskonalszych materiałów magnetycznych. Efektem tego jest szerszy zakres dostępnych materiałów magnetycznie miękkich. Dodatkowo współczesny świat mierzy się z niezmiernie istotnym problemem rosnącej ilości różnego rodzaju odpadów. Należy zauważyć, że znaczna część odpadów to nie tylko materiały pochodzące z zużytych urządzeń elektrycznych i elektronicznych ale także materiały pochodzące z różnych procesów technologicznych np. obróbka skrawaniem materiałów metalowych.

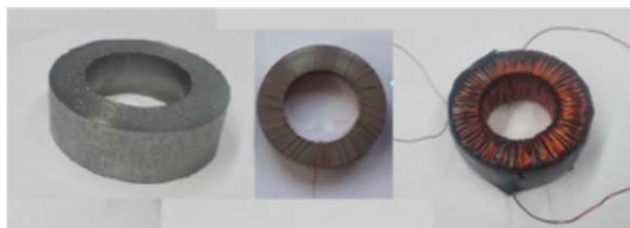
W ostatnich latach obserwuje się szczególny nacisk na rozwój magnetycznie miękkich materiałów kompozytowych (ang. Soft Magnetic Composites – SMCs) [1-4]. Istotnymi problemami leżącymi w zakresie badań nad nowoczesnymi kompozytowymi materiałami magnetycznymi jest po pierwsze możliwość wykorzystania do ich produkcji materiałów, pozyskanych na drodze odzysku różnego rodzaju odpadów pozostałych po procesach technologicznych. Po drugie istotnym jest możliwość opisu ich właściwości przy pomocy różnych modeli pętli histerezy, przedstawionych między innymi w pracach [5-8].

W ramach prowadzonych badań jako materiały odpadowe wykorzystywano żelazo oraz materiał nanokrystaliczny w różnych proporcjach i oceniono wpływ proporcji na właściwości magnetyczne wykonanych rdzeni. W dalszej części badań ocenie poddano zdolność do odwzorowania pętli histerezy wykonanych rdzeni przy pomocy modelu GRUCAD, a następnie analizie poddano wpływ proporcji na zachowanie się parametrów modelu.

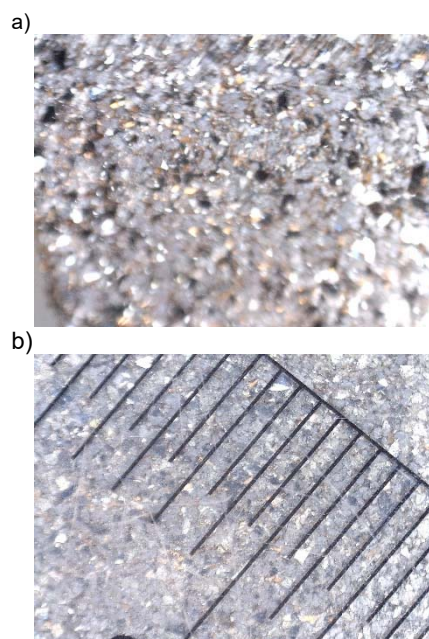
### Wykorzystane surowce i opis próbek

W ramach prowadzonych badań wykonywano próbki o kształcie toroidalnym w skład których wchodziła żywica fenolowo-akrylową stanowiąca 1% masy całkowitej, pełniąca rolę lepiszcza. Pozostałe 99% masy próbki to materiał nanokrystaliczny i żelazo w różnych proporcjach. W pracy przyjęto nomenklaturę oznaczeń próbek w następującej postaci NK100 – oznacza materiał zawierający tylko materiał nanokrystaliczny i lepiszcze. NK30 – oznacza materiał zawierający 30% materiału nanokrystalicznego i 70% żelaza. Przy czym łączna masa żelaza i materiału

nanokrystalicznego stanowi 99% całkowitej masy próbki. Tak przygotowane mieszaniny zostały poddane prasowaniu przy pomocy ręcznej prasy hydraulicznej poddając mieszaninę naciskowi 65 ton po wcześniejszym jej podgrzaniu do temperatury 165 °C.



Rys.1. Przykładowe zdjęcia wykonanych rdzeni. Przed nawinięciem, w trakcie nawijania i po nawinięciu uzwojeń pomiarowych.





Rys.2. Przykładowe zdjęcia powierzchni wykonanych próbek.

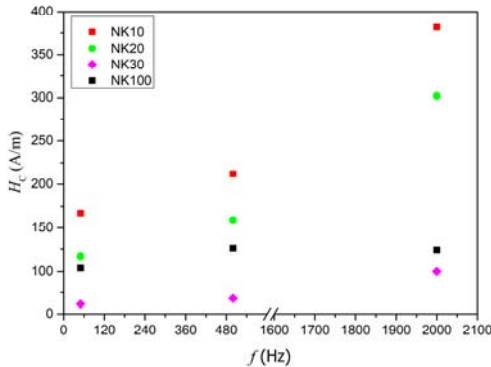
### Analiza właściwości magnetycznych uzyskanych rdzeni

Przygotowane próbki poddano pomiarom pętli histerezy magnetycznej oraz jej punktów charakterystycznych przy wykorzystaniu komputerowego systemu pomiarowego RemaComp C-200. Pomiary wykonano na następujących próbkach: NK10, NK20, NK30, NK50, NK80, NK85, NK90, NK100.

Z uwagi na zakres zastosowań materiałów nanokrystalicznych i kompozytowych wykonano pomiary charakterystyk  $B = f(H)$  dla częstotliwości 50 Hz, 500 Hz oraz 2000 Hz. Do oceny zachowania nanokrystalicznego materiału kompozytowego wykorzystano próbki NK10, NK20, NK30 oraz NK100. Wynik stratności oraz natężenia koercji przedstawiono w tabeli poniżej.

Tabela 1. Porównanie stratności oraz natężenia koercji dla wybranych próbek względem częstotliwości,  $B = 0,1$  T.

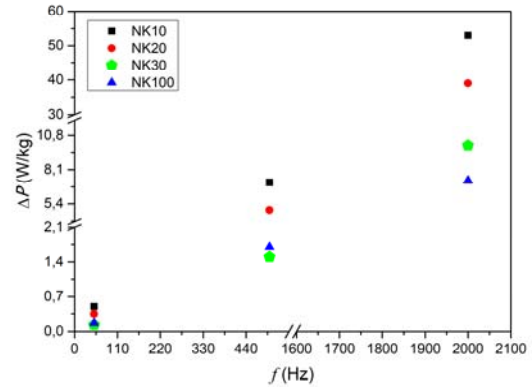
$f$ [Hz]	NK10		NK20		NK30		NK100	
	$H_c$ [A/m]	$\Delta P$ [W/kg]	$H_c$ [A/m]	$\Delta P$ [W/kg]	$H_c$ [A/m]	$\Delta P$ [W/kg]	$H_c$ [A/m]	$\Delta P$ [W/kg]
50	167	0,5	117	0,35	61,5	0,13	104	0,17
500	212	7,1	159	4,9	68	1,5	126	1,7
2000	382	53	302	39	100	10	124	7,24



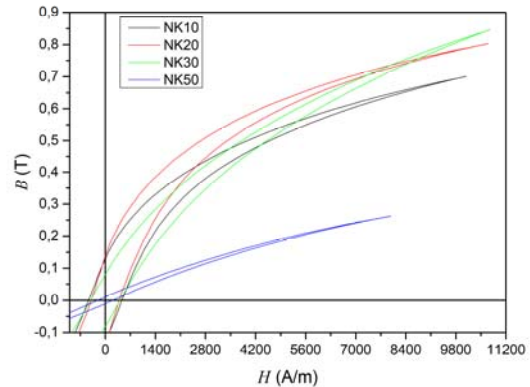
Rys.3. Graficzna prezentacja zależności  $H_c$  względem częstotliwości dla wybranych rdzeni.

W tabeli 1 zestawiono wartości natężenia koercji oraz wartości stratności wykonanych rdzeni dla indukcji 0,1 T. Analizując powyższe dane zauważono, spodziewaną zależność zmniejszania się wartości koercji wraz ze wzrostem zawartości materiału nanokrystalicznego w przygotowanych próbkach. Należy zauważyć, że trend tej zmiany występował tylko w próbkach od NK10 do NK30, dalszy wzrost materiału nanokrystalicznego w próbkach powodował odwrócenie trendu i wzrost wartości natężenia koercji ale do wartości znacznie niższych niż dla próbek NK10 i NK20. Analizując zachowanie się punktu koercji względem częstotliwości przedstawionych próbek – rysunek 3 – można zauważyć, że zwiększanie zawartości nanokrystalika w próbce powoduje mniejszą wrażliwość natężenia koercji na zmianę częstotliwości. Dla próbki NK10 czterdziestokrotny wzrost częstotliwości pociągał za

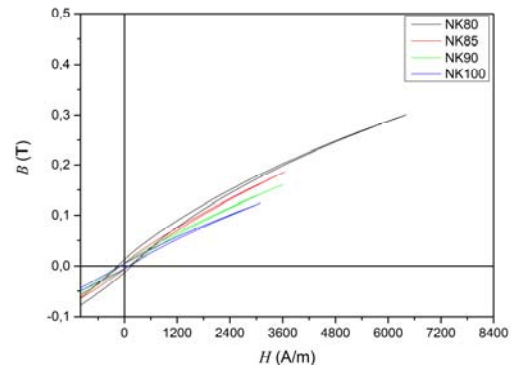
sobą 128% wzrost natężenia koercji, natomiast dla próbki NK100 wzrost ten wynosił tylko 19%. Ma to swoje odzwierciedlenie podczas analizy stratności badanych rdzeni. Obserwowano około stukrotny wzrost stratności dla próbek NK10 i NK20, natomiast dla próbek NK30 zaobserwowano 76-krotny wzrost stratności przy czterdziestokrotnym zwiększeniu częstotliwości. Ponownie najlepiej pod tym względem wypadła próbka NK100 w przypadku której wzrost ten wynosił 42 razy dla indukcji 0,1 T i 52 razy dla indukcji 0,26 T.



Rys.4. Graficzna prezentacja zależności stratności względem częstotliwości dla wybranych rdzeni,  $B = 0,1$  T.



Rys.5. Porównanie krzywych magnesowania dla próbek dla próbek NK10, NK20, NK30 NK50,  $f = 50$  Hz.



Rys.6. Porównanie krzywych magnesowania dla próbek dla próbek NK10, NK20, NK30 NK50,  $f = 50$  Hz.

Ponieważ stratność przy określonej indukcji oraz wartość natężenia koercji nie mogą być jedynymi wyznacznikami ogólnej oceny właściwości magnetycznych wykonanych rdzeni, należy przeanalizować ogólny kształt oraz wartości maksymalne osiąganych indukcji przez

wykonane rdzenie. Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono krzywe magnesowania wykonanych próbek z których wynika, że najlepszą indukcję maksymalną osiągnęła próbka NK30, a jej wartość wyniosła 0,85 T.

### Model GRUCAD

Najczęściej wykorzystywanym modelem pętli histerezy jest opis zaproponowany w ubiegłym wieku przez Jilesa i Athertona (JA). Popularność modelu wynika z stosunkowo prostej budowy i łatwości implementacji numerycznej co przełożyło się na wiele badań w zakresie zachowania się samego modelu jak i możliwości jego wykorzystania do opisu różnych materiałów magnetycznych [9-10].

W niniejszej pracy skupiono się na alternatywnym modelu pętli histerezy, który został zaproponowany przez brazylijski zespół badawczy GRUCAD na początku tego wieku. Oryginalna nazwa modelu to „Zmodyfikowanego modelu Jilesa – Athertona” [11]. Sam model GRUCAD eliminował szereg niedoskonałości które dotyczył modelu JA. Model GRUCAD buduje pętlę histerezy wprowadzając offset wzdłuż osi  $H$ , a wartością wejściową jest indukcja magnetyczna, natomiast w oryginalnym modelu JA pętla była uzyskiwana po przez nałożenie offsetu wzdłuż osi magnetyzacji, która sama w sobie była zmienną niezależną – co z punktu widzenia elektrotechniki jest dość kłopotliwe.

Model GRUCAD opisany jest następującymi równaniami:

$$(1) \quad H_{an} = B/\mu_0 - M_s(\coth \lambda - 1/\lambda)$$

$$(2) \quad \lambda = \frac{1}{a} \left[ (1 - \alpha)H_{an} + \alpha \frac{B}{\mu_0} \right]$$

$$(3) \quad H_n = H_{HS}(\coth \lambda_H - 1/\lambda_H)$$

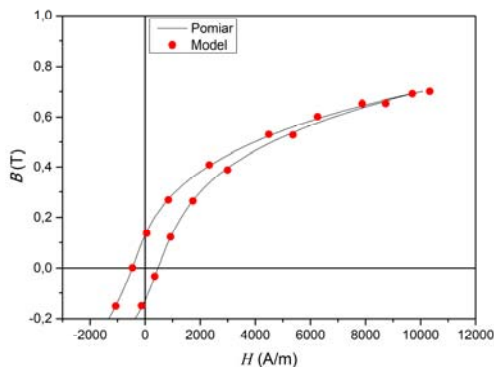
$$(4) \quad \lambda_H = \frac{H_n + \delta H_{HS}}{\gamma}$$

$$(5) \quad H = H_{an} + H_n$$

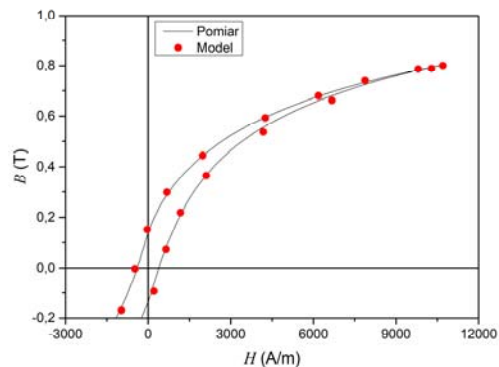
gdzie:  $a$ ,  $\alpha$ ,  $M_s$ ,  $\gamma$ ,  $H_{HS}$  są parametrami modelu,  $\delta = \pm 1$  jest znakiem pochodnej  $dB/dt$ .

### Wyniki modelowania

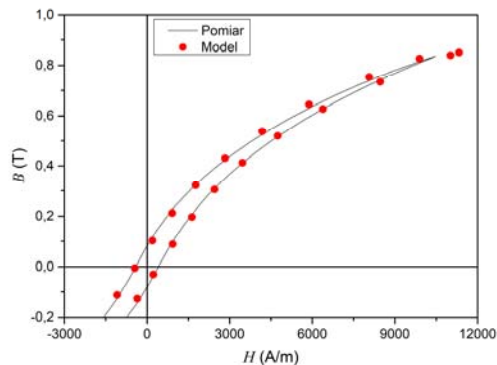
Podczas oceny modelowania przyjęto dwie metodologie jej wykonania. Pierwsza zakładała ocenę jakościowego odwzorowania krzywych magnesowania i błędów w punktach charakterystycznych jak  $H_C$ ,  $H_{max}$ ,  $B_{max}$ ,  $B_r$ . Kolejnym krokiem było wykonanie pomiarów pętli przy ujednocionej i zredukowanej indukcji, która wynosiła 0,1 Tesli, a następnie wykonano ponowną estymację parametrów modelu i porównano ich zmiany względem zmian zawartości żelaza i materiału nanokrystalicznego w próbce. Do estymacji parametrów modelu wykorzystano algorytm Optymalizacji Rojem Cząstek (ang. Particle Swarm Optimization).



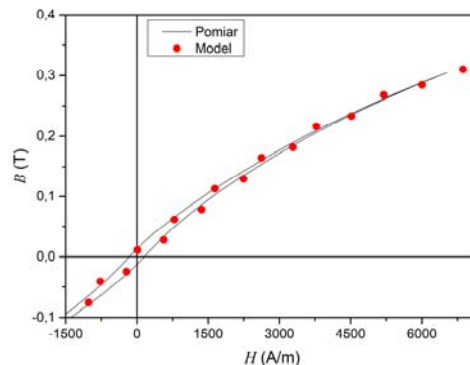
Rys. 7. Porównanie pętli pomiarowej i modelowanej dla próbki NK10,  $f= 50$  Hz.



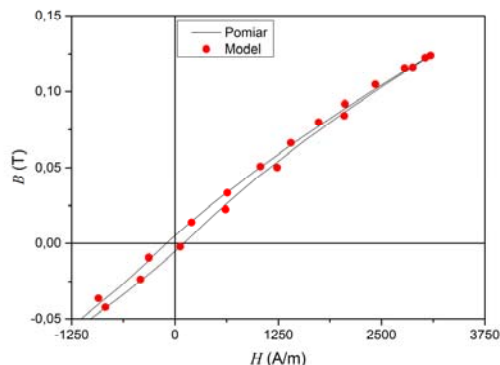
Rys. 8. Porównanie pętli pomiarowej i modelowanej dla próbki NK20,  $f= 50$  Hz.



Rys. 9. Porównanie pętli pomiarowej i modelowanej dla próbki NK30,  $f= 50$  Hz.



Rys. 10. Porównanie pętli pomiarowej i modelowanej dla próbki NK80,  $f= 50$  Hz.



Rys. 11. Porównanie pętli pomiarowej i modelowanej dla próbki NK100,  $f= 50$  Hz.

Tabela 2. Wyniki błędów określonych parametrów pętli histerezy modelowania w odniesieniu do wartości pomiarowych dla wybranych próbek, dla  $B_{max}$

Sample	Error [%]			
	$H_{max}$	$H_c$	$B_r$	$\Delta P$
NK10	2	0,22	0,78	23
NK20	0,02	0,76	16	30
NK30	8	0,24	22	24
NK50	2,27	1,93	14,42	53
NK80	5	5	20	46
NK100	0,33	1,92	27	86

Tabela 3. Wyniki błędów określonych parametrów pętli histerezy modelowania w odniesieniu do wartości pomiarowych dla wybranych próbek, dla  $B = 0.1T$

Sample	Error [%]			
	$H_{max}$	$H_c$	$B_r$	$\Delta P$
NK10	1,25	1	11	3
NK20	2,79	3	20	5
NK30	0,6	3,5	26	7
NK50	0,04	0,7	18,7	50
NK60	0,13	4,1	42	8
NK70	4,5	4	42,1	10
NK80	0,9	4,3	53	22
NK85	4	10,1	8,2	90
NK95	0,3	10,5	36	69
NK100	0,03	5,6	48	89

Tabela 4. Zmiana wartości parametrów modelu względem zmiany zawartości materiału nanokrystalicznego w próbce

Sample	$a$	$a$	$M_s$	$\gamma$	$H_{HS}$
NK10	0,0041	272	79577	0,0235	95,2
NK20	0,0038	230		0,0210	63,2
NK30	0,0033	304		0,0278	57
NK50	0,0007	495		0,0116	75,5
NK60	0,0073	534		0,0302	100
NK70	0,0092	670		0,0282	100
NK80	0,0113	763		0,0296	112
NK85	0,0131	907		0,0012	70
NK95	0,0113	999		0,0155	80
NK100	0,0001	826		0,0133	92

Na rysunkach od 7 do 11 przedstawiono porównanie kształtów pętli modelowanych z pętlami pomiarowymi. Następnie w tabelach 3 i 4 przedstawiono błędy modelowania oraz zamianę wartości parametrów względem zmiany zawartości materiału nanokrystalicznego i żelaza w próbce.

### Podsumowanie

Według powyższego można stwierdzić, że jakość modelowego odtworzenia kształtów pętli histerezy w stosunku do pętli uzyskanych na drodze pomiaru jest dobra. Można bez problemu ocenić poziom nachylenia pętli oraz ocenić wartości przyłożonego pola dla danej indukcji. W przypadku oceny błędów modelowania zauważono, że najlepsze wyniki uzyskano dla próbek od NK10 do NK80 z wyłączeniem próbki NK50 – z uwagi na wartości błędów przy ocenie stratności. Natomiast w przypadku błędów indukcji remanencji należy mieć na uwadze, że dla badanych próbek wartości te były bardzo niskie i niewielka odchyłka liczbowo powodowała dość znaczny błąd procentowy, a dodatkowo wzrost zawartości materiału nanokrystalicznego powodował systematyczne obniżanie wartości indukcji remanencji. Na uwagę zasługuje fakt, że najmniejsze błędy uzyskano dla próbki NK30, która osiągnęła najwyższą wartość indukcji. A która na podstawie pozyskanych danych pomiarowych reprezentuje optymalną proporcję mieszaniny żelazo – nanokrystalik. Choć należy mieć na uwadze, że dokładne proporcje mieszaniny mogą zależeć od dokładnych wymagań aplikacyjnych.

Analizując zmianę parametrów modelu, zauważono niewielką zmianę wartości parametru  $M_s$ . W związku z tym postanowiono zablokować go na stałym poziomie. Zauważyć można trend malejący parametru  $a$  dla próbek od NK10 do NK50, a następnie odwrócenie trendu aż do NK95. Obserwowano stały wzrost parametru  $a$  dla próbek od NK10 do NK95. Parametr  $H_{HS}$  był w ścisłej korelacji z natężeniem koercji badanych próbek. Parametr  $\gamma$  nie wykazywał stałych i zauważalnych trendów zmian względem zmian mieszaniny żelazo – nanokrystalik w próbce.

Badania zostały wsparte z grantu NCBR LIDER X, pt. *Eko-innowacyjne materiały kompozytowe wykorzystujące surowce pochodzące z recyklingu do zastosowań elektrotechnicznych*. Nr LIDER/11/0049/L-10/18/NCBR/2019

**Autorzy:** dr hab. inż. Adam Jakubas, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: [adam.jakubas@pcz.pl](mailto:adam.jakubas@pcz.pl), dr hab. inż. Mariusz Najgebauer, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: [mariusz.najgebauer@pcz.pl](mailto:mariusz.najgebauer@pcz.pl), dr inż. Radosław Jastrzębski, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: [radoslaw.jastrzebski@pcz.pl](mailto:radoslaw.jastrzebski@pcz.pl)

### LITERATURA

- [1] Jakubas, A., Łada-Tondyra, E., Makówka, M., Chyra, M., Jastrzębski, R., Suchecki, Ł. Koncepcja wykorzystania surowców pochodzących z recyklingu do produkcji kompozytowych materiałów miękkich magnetycznie. *Przegląd Elektrotechniczny*, 97, 2021, 132-135.
- [2] Węgliński B, Sinters for Magnetic Applications, Reviews on Powder Metallurgy and Physical Ceramics – *Elsevier Applied Science*, Vol. 5 (1), 1992, 1–79.
- [3] Jakubas A., Gębara P., Seme S., Gnatowski A., Chwastek K., Magnetic Properties of SMC Cores Produced at a Low Compacting Temperature, *Acta Physica Polonica A*, Vol. 131 (5), 2017, 1289–1293.
- [4] Jastrzębski R., Jakubas A., Wpływ wielkości ziarna na właściwości magnetycznie miękkich materiałów kompozytowych, XLIX Międzyuczelniana Konferencja Metrologów (MKM 2017), Częstochowa - Koszęcin, Polska (04 do 06 września 2017 r.). *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, Vol. 54, 2017, 109 – 111.
- [5] Ślusarek B., Chwastek K., Szczygłowski J., Jankowski B., Modelling hysteresis loops of SMC cores, *Solid State Phenomena*. Vols. 220–221, 2015, 652–660.
- [6] Mayergoz I. D., Friedman G., Generalized Preisach model of Hysteresis, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 24(1), 1988, 212– 217.
- [7] Jankowski B., Ślusarek B., Szczygłowski J., Chwastek K., Modelling Hysteresis Loops in Fe-Based Soft Magnetic Composites Using Takács Description, *Acta Physica Polonica A*, Vol. 128 (1), 2015, 116–119.
- [8] Takács J., A phenomenological mathematical model of hysteresis, *Compel*, Vol. 20, 2001, 1014–1022.
- [9] Carpenter K. H., A differential equation approach to minor loops in the Jiles-Atherton hysteresis model. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 27, 1991, 4404 – 4406.
- [10] Zirka S. E., Moroz Y. I., Harrison R. G., Chwastek K., On physical aspects of the Jiles-Atherton hysteresis models, *Journal of Applied Physics*, Vol. 112, 2012, 043916.
- [11] Koltermann P.I., Righi L.A., Bastos J.P.A., Carlson R., Sadowski N., Batistela N.J., A modified Jiles method for hysteresis computation including minor loops, *Physica B*, 275, 2000, 233-237.