

Analiza właściwości rdzeni magnetycznych pracujących przy niesinusoidalnych (harmonicznych) przebiegach wymuszeń

Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę oddziaływania harmonicznych występujących w przebiegu indukcji magnetycznej na właściwości rdzeni wykonanych z kompozytów magnetycznych. W analizach uwzględniono rząd harmonicznej i jej parametry, tj. amplitudę i kąt przesunięcia fazowego. Potwierdzono istotne oddziaływanie harmonicznych na właściwości magnetyczne rdzeni.

Abstract. The influence of harmonic waveforms of magnetic flux density on magnetic core properties was analysed in the paper. The amplitude and phase angle of harmonics was considered in the analysis. The significant effect of harmonic waveforms on magnetic core properties was proved. (The analysis of magnetic core properties under non-sinusoidal excitation waveforms).

Słowa kluczowe: kompozyty magnetyczne, pętla histerezy, harmoniczne, energoelektronika

Keywords: magnetic composites, hysteresis loop, harmonics, power electronics

Wstęp

Rdzenie magnetyczne są integralnymi komponentami urządzeń elektrycznych. Ich właściwości, takie jak indukcja nasycenia B_s czy straty całkowite P_s , determinują warunki pracy i sprawność urządzeń elektrycznych. Międzynarodowe standardy IEC 60404 [1-2] określają, że właściwości materiałów magnetycznych powinny być mierzone przy sinusoidalnym kształcie przebiegu indukcji magnetycznej w próbce. Jednak znacząca część urządzeń elektrycznych, zwłaszcza w układach energoelektrycznych, pracuje przy wymuszeniach typu PWM lub zawierających harmoniczne (np. w przypadku rdzeni dławików AC stosowanych na wejściach prostowników), dla których kształt przebiegu indukcji magnetycznej w rdzeniu jest odkształcony od sinusoidy. Właściwości rdzeni pracujących przy takich wymuszeniach są inne niż przy sinusoidalnych przebiegach indukcji magnetycznej [3-9], co znacząco zmienia warunki pracy i sprawność urządzeń elektrycznych. Z tego powodu analiza właściwości rdzeni magnetycznych pracujących przy niesinusoidalnych przebiegach indukcji jest zagadnieniem istotnym zarówno w obszarze badań podstawowych, jak też badań aplikacyjnych realizowanych przez inżynierów zajmujących się projektowaniem urządzeń elektrycznych.

W pracy przedstawiono wyniki badań właściwości rdzeni magnetycznych przy harmonicznych przebiegach indukcji.

Materiały magnetyczne w energoelektronice

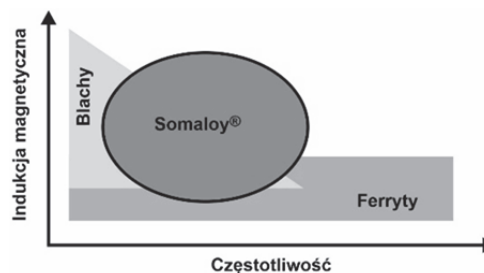
Rdzenie magnetyczne stosowane w układach energoelektrycznych są wykonywane głównie z miękkich ferrytów, czyli materiałów wytwarzanych w procesie spiekania sproszkowanych tlenków metali. Ferryty charakteryzują się niską indukcją nasycenia rzędu 0,3-0,5 T oraz wysokimi wartościami przenikalności magnetycznej [9-10]. Kolejną grupą materiałów magnetycznie miękkich stosowanych w energoelektronice stanowią materiały nanokrystaliczne. Materiały te otrzymuje się w procesie kontrolowanej krystalizacji taśm amorficznych, w wyniku którego w matrycy amorficznej tworzą się krystality α -Fe(Si) o rozmiarach nieprzekraczających 100 nm. Materiały nanokrystaliczne wykazują indukcję nasycenia około 1,2-1,5 T, niską koercję i wysokie wartości przenikalności magnetycznej [10, 12-15]. Stosunkowo najnowszą grupę materiałów magnetycznych, które są wykorzystywane do produkcji rdzeni w układach energoelektrycznych, stanowią kompozyty magnetyczne. Miękkie kompozyty magnetyczne wytwarza się z proszku magnetycznego (np.

amorficznego lub nanokrystalicznego) oraz spoiwa (np. żywicy epoksydowej), która wiąże ziarna proszku magnetycznego tworząc na ich powierzchni cienką warstwę dielektryczną, co schematycznie przedstawiono na rys. 1.



Rys.1. Struktura kompozytu magnetycznego

Występowanie warstw dielektrycznych istotnie wpływa na właściwości materiału kompozytowego, gdyż obecność domieszek nieferromagnetycznych skutkuje pogorszeniem właściwości magnetycznych, w tym niższymi wartościami indukcji nasycenia w porównaniu do materiału wyjściowego, zmieniającymi się w szerokim zakresie od 0,5 T do 1,4 T, w zależności od wielkości ziarna oraz typu i zawartości spoiwa. Jednocześnie ze względu na wysoką rezystywność warstw dielektrycznych, kompozyty magnetyczne posiadają niższą stratność, co warunkuje możliwość ich zastosowania na rdzenie magnetyczne urządzeń pracujących w wyższych częstotliwościach. Dodatkową zaletą kompozytów jest możliwość formowania z nich rdzeni o skomplikowanych kształtach [16-19]. Komercyjnymi reprezentantami grupy kompozytów magnetycznych są materiały typu Somaloy, których obszar zastosowania przedstawiono schematycznie na rysunku 2.



Rys.2. Obszary zastosowań kompozytów magnetycznych [16]

Pętłe histerezy przy wymuszeniach z harmonicznymi

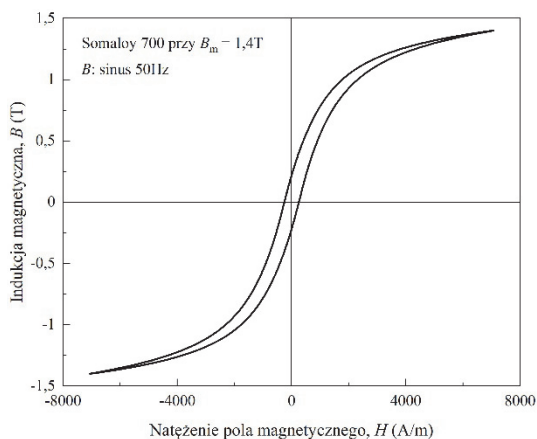
Analiza właściwości rdzeni magnetycznych pracujących przy odkształconych przebiegach indukcji magnetycznej zawierających harmoniczne została wykonana dla próbki toroidalnej wykonanej z kompozytu nanokrystalicznego typu Somaloy 700 o wymiarach: średnica zewnętrzna 75,20 mm, średnica wewnętrzna 55,03 mm, wysokość 10,02 mm oraz gęstości 7,33 g/cm³ [19]. Pętłe histerezy magnetycznej dla badanego rdzenia zostały zmierzone z wykorzystaniem systemu pomiarowego MPG200 firmy Brockhaus [20], zarówno dla sinusoidalnego przebiegu indukcji, jak też dla wybranych przebiegów odkształconych, tj. zawierającego harmoniczne rzędu 3, 5, 7 i 9.

Kształt przebiegu indukcji magnetycznej zawierający harmoniczne opisany jest powszechnie znaną zależnością w postaci:

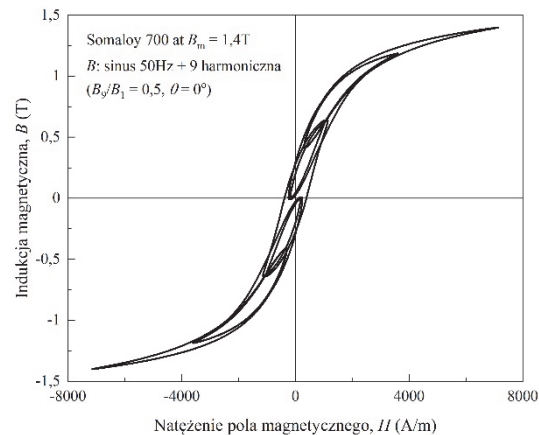
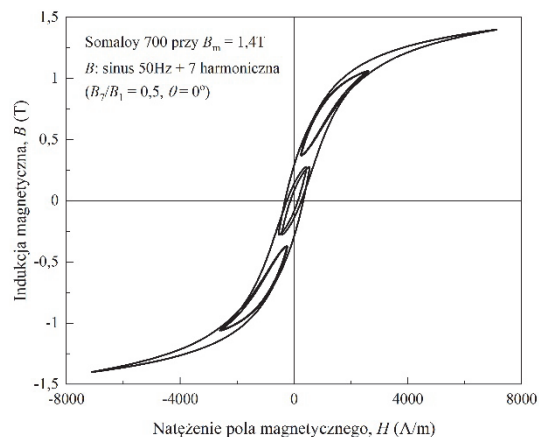
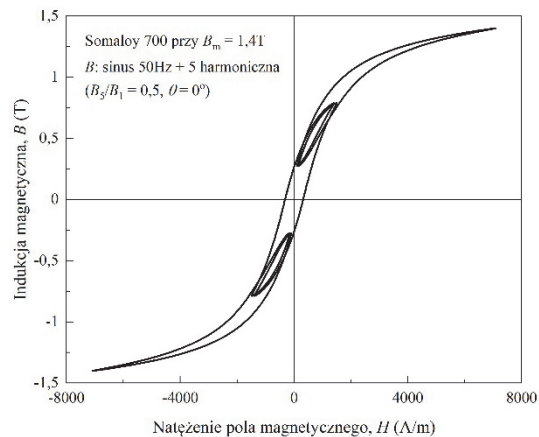
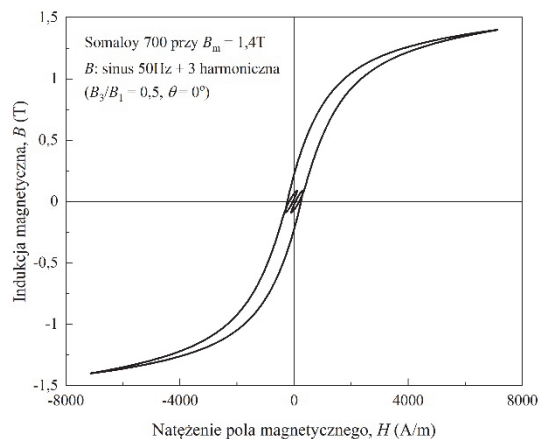
$$(1) \quad B = B_1 \sin \omega t + \sum_n B_n \sin(n\omega t + \theta_n),$$

gdzie: B_1 i B_n – amplituda składowej podstawowego i n-tej harmonicznej przebiegu indukcji magnetycznej, θ_n – kąt przesunięcia fazowego n-tej harmonicznej, ω – pulsacja.

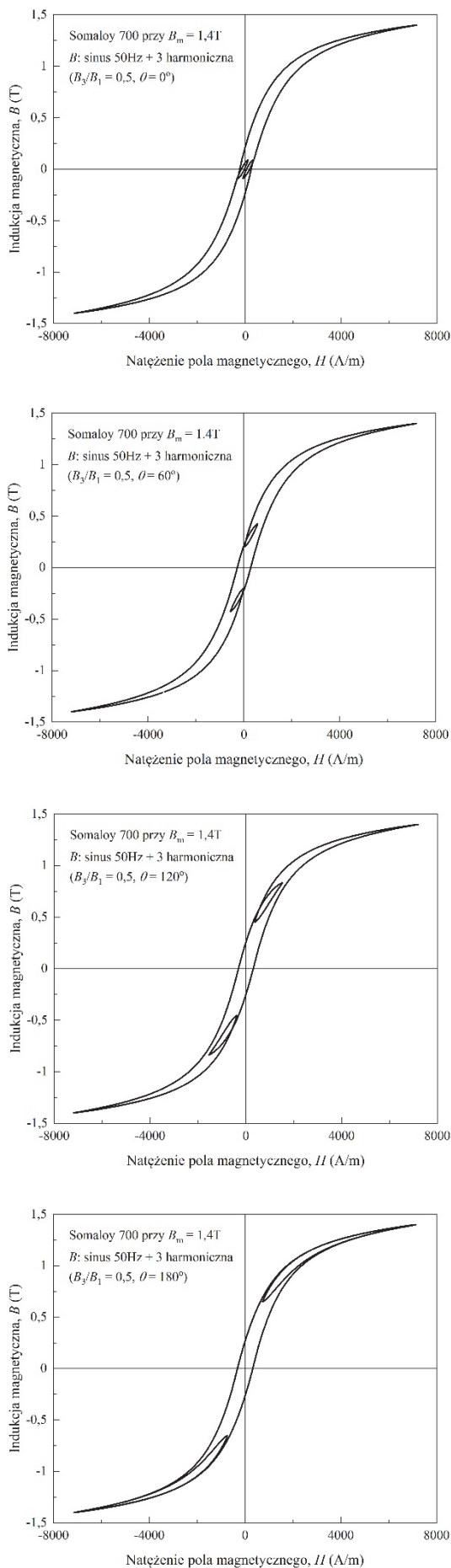
Z powyższej zależności wynika, że istotny wpływ na właściwości magnetyczne materiału, które reprezentowane są przez pętlę histerezy, mają nie tylko parametry przebiegu podstawowego, ale również amplitudy harmonicznych (lub wyrażone jako stosunek do amplitudy podstawowej) i kąty przesunięć fazowych. W celu analizy wpływu harmonicznych indukcji na właściwości magnetyczne rdzenia, w pomiarach uwzględniono wskazane powyżej parametry w szerokim zakresie ich zmienności. Pomiar pętli histerezy wykonano dla indukcji maksymalnej zmieniającej się w zakresie się od 0,2 T do 1,4 T, przy różnych stosunkach amplitud B_n/B_1 oraz wartościach kąta przesunięcia fazowego θ_n . Na rysunku 3 przedstawiono pętlę histerezy zmierzoną przy sinusoidalnym przebiegu indukcji magnetycznej, natomiast na rysunku 4 pętle zmierzone dla wybranych przebiegów zawierających harmoniczne przy stałej relacji $B_n/B_1 = 0,5$ i $\theta_n = 0^\circ$. Można zauważyć, że występowanie harmonicznych w przebiegu indukcji magnetycznej generuje w obszarze pętli głównej dodatkowe pętli cząstkowe, których wielkość i położenie jest zależne od rzędu harmonicznej. Potwierdza to istotny wpływ harmonicznych na właściwości magnetyczne materiału. Największe zagęszczenie pętli cząstkowych występuje przy harmonicznej rzędu 9, co wskazuje, że efekt ten wzrasta wraz z rzędem harmonicznej. Zmiany wartości kąta przesunięcia fazowego θ_n dla danej harmonicznej nie zwiększają liczby pętli cząstkowych, powodując jedynie zmianę ich powierzchni oraz położenia względem pętli głównej, co przedstawiono na rysunku 5.



Rys.3. Pętla histerezy przy sinusoidalnym przebiegu indukcji



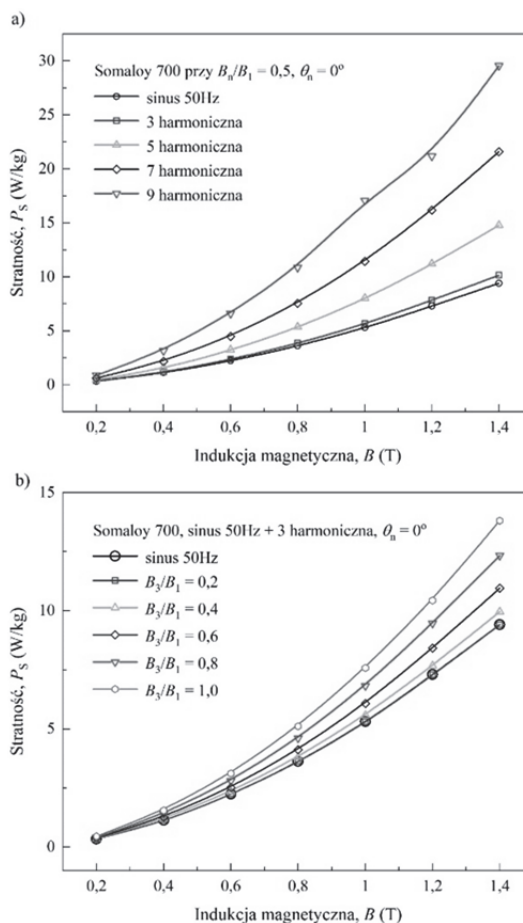
Rys.4. Pętłe histerezy przy harmonicznym przebiegach indukcji



Rys.5. Pętle histerezy przy różnych wartości kąta θ_n

Straty energii przy wymuszeniach z harmonicznymi

Występowanie dodatkowych cząstkowych pętli histerezy przy przebiegach indukcji zawierających harmoniczne ma zasadnicze znaczenie w kontekście analizy właściwości materiałów magnetycznie miękkich. Jedną z podstawowych właściwości materiałów magnetycznych, warunkujących ich zastosowania praktyczne, jest poziom strat energii. Należy pamiętać, że powierzchnia pętli histerezy reprezentuje straty powstające w procesie przemagnesowywania materiału, a zatem występowanie cząstkowych pętli histerezy w istotny sposób zmienia poziom tych strat. Efekty tego oddziaływania w funkcji amplitudy indukcji maksymalnej, przy której zostały wykonane pomiary, przedstawiono na rysunku 6. Natomiast na rysunku 7 przedstawiono wpływ parametrów przebiegów harmonicznymi indukcji na poziom stratności dla pomiarów wykonany w warunkach zbliżonych do nasycenia $B_m = 1,4$ T. Z przedstawionych wykresów oraz danych pomiarowych zestawionych w tabeli 1 jednoznacznie wynika, że stratność rdzeni kompozytowych mierzona przy przebiegach indukcji zawierających harmoniczne jest znacznie wyższa od wartości osiągniętych dla przebiegów sinusoidalnych. Wzrost ten jest szczególnie wysoki przy wymuszeniach o wysokich amplitudach, w których rdzeń pracuje w obszarze zbliżonym do nasycenia, i dla harmonicznymi wysokiego rzędu (rys. 6). Analogiczny efekt obserwuje się w przypadku przebiegów indukcji o zmieniającym się stosunku amplitud B_n/B_1 – im wyższy jest rząd harmonicznymi, tym bardziej widoczny jest jej wpływ na poziom stratności (rys. 7a). Natomiast wpływ kąta przesunięcia fazowego θ_n na poziom stratności nie jest tak istotny (rys. 7b).

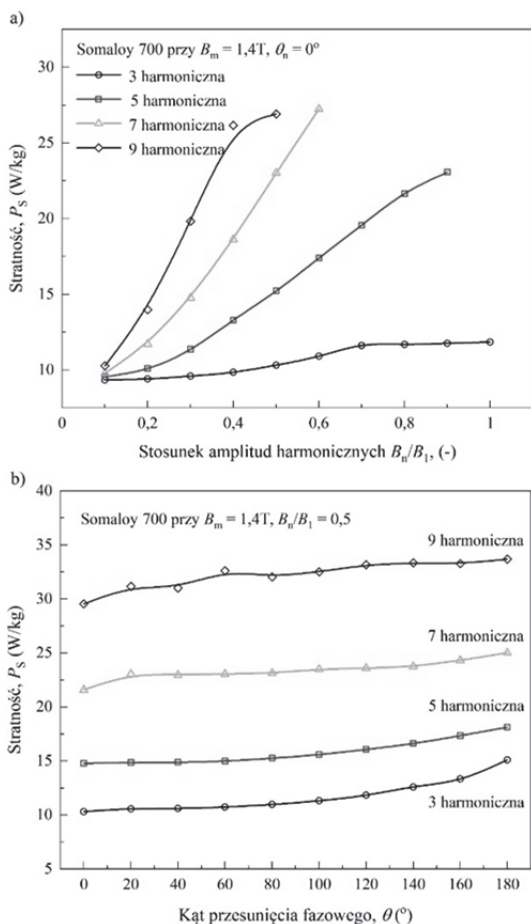


Rys.6. Stratność materiału magnetycznego przy harmonicznymi przebiegach indukcji: a) wpływ rzędu harmonicznymi, b) wpływ amplitudy harmonicznymi

Tabela 1. Procentowy współczynnik stratności $P_{S,harm}/P_{S,sin}$ dla wybranych parametrów przebiegów harmonicznich indukcji magnetycznej

		Stosunek amplitud harmonicznich B_n/B_1									
Harmoniczna		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
3		99,24%	100,05%	101,92%	104,71%	109,63%	115,99%	123,38%	124,20%	125,01%	125,83%
5		101,43%	107,43%	120,74%	141,13%	157,03%	184,82%	207,92%	229,95%	244,99%	–
7		103,94%	124,44%	156,88%	197,94%	229,44%	289,42%	–	–	–	–
9		109,19%	148,47%	210,53%	277,90%	313,93%	–	–	–	–	–

		Kąt przesunięcia fazowego harmonicznnej θ_n									
Harmoniczna		0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°	160°	180°
3		109,63%	112,12%	112,80%	114,17%	116,65%	120,38%	125,83%	133,80%	141,79%	160,54%
5		157,03%	157,75%	158,08%	159,40%	162,14%	165,81%	170,69%	176,57%	184,30%	192,58%
7		229,44%	244,88%	244,03%	245,01%	245,73%	249,64%	250,71%	252,10%	258,27%	268,85%
9		313,93%	331,05%	329,48%	346,51%	340,45%	345,48%	352,24%	354,16%	353,30%	357,75%



Rys. 7. Wpływ parametrów przebiegów harmonicznich indukcji na stratność materiału magnetycznego: a) stosunek amplitud B_n/B_1 , b) kąt przesunięcia fazowego θ_n

Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań potwierdzają istotny wpływ harmonicznich występujących w przebiegach indukcji na właściwości magnetycznych rdzeni kompozytowych. Wyniki te wskazują na konieczność uwzględnienia w projektowaniu obwodów magnetycznych właściwości materiałowych, które odpowiadają rzeczywistym warunkom pracy urządzenia.

Projekt finansowany w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki pod nazwą „Regionalna Inicjatywa Doskonałości” w latach 2019 – 2023, nr projektu 020/RID/2018/19, kwota finansowania 12 000 000 PLN.

Autorzy: dr hab. inż. Mariusz Najgebauer, mgr inż. Damian Gziel (doktorant), Politechnika Częstochowska, Katedra Elektroenergetyki ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: mariusz.najgebauer@pcz.pl; damian.gziel@pcz.pl

LITERATURA

- [1] IEC 60404-2/3/6, Magnetic materials, Part 2/3/6, *International Electrotechnical Commission*, (2008/2010/2018)
- [2] Gryś Sł., Najgebauer M., An attempt of accuracy assessment of the hysteresis loop and power loss in magnetic materials during control measurements”, *Measurement*, 174 (2021), 108962
- [3] Lavers J.D., Biringier P.P., Hollitscher H.: A simple method of estimating the minor loop hysteresis loss in thin laminations, *IEEE Trans. Magn.*, Mag-14 (1978), no. 5, 386–388
- [4] Lavers J.D., Biringier P.P.: The effect of third harmonic flux on the core loss in a magnetic frequency multiplier, *IEEE Trans. Magn.*, Mag-14 (1978), no. 5, 993–995
- [5] Amar M., Kaczmarek R.: A general formula for prediction of iron losses under nonsinusoidal voltage waveform, *IEEE Trans. Magn.*, 31 (1995), no. 5, 2504–2509
- [6] Mosses A.J., Leicht J., Anderson P., Iron losses in electrical machines excited by non-sinusoidal voltages, *International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, Conf. Publ. No. 487 (2002), 252–254
- [7] Van den Bossche A., Valchev V.C., Van den Sype D.M., Van den Bossche L.P.: Ferrite losses of cores with square wave voltage and dc bias, *J. Appl. Phys.*, 99 (2006), no. 8, 08M908
- [8] Górecki K., Detka K.: Improved method for measuring power losses in the inductor core, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 70 (2021), 1500710
- [9] Petrescu L.-G., Petrescu M.-C., Cazacu E., Constantinescu C.-D.: Estimation of energy losses in nanocrystalline FINEMET alloys working at high frequency, *Materials*, 14 (2021), 7745
- [10] Fiorillo F., Bertotti G., Appino C., Pasquale M., Soft magnetic materials, *Wiley Online Library* (2016)
- [11] Verma A., Alam M.I., Chatterjee R., Goel T.C., Mendiratta R.G., Development of a new soft ferrite core for power applications, *J. Magg. Magn. Mater.*, 300 (2006), 500–505
- [12] McHenry M.E., Williard M.A., Laughlin D.E., Amorphous and nanocrystalline materials for applications as soft magnets, *Prog. Mater. Sci.*, 44 (1999), 291–433
- [13] Petzold J., Advantages of soft magnetic nanocrystalline materials for modern electronic applications, *J. Magn. Magn. Mater.*, 242-245 (2002), 84–89
- [14] Varga L.K., Soft magnetic nanocomposites for high-frequency and high-temperature applications, *J. Magn. Magn. Mater.*, 316, (2007), 442–447
- [15] Najgebauer M., Szczygłowski J., Nowoczesne tendencje rozwojowe w inżynierii materiałów magnetycznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 84 (2008), nr 4, 136–139
- [16] Shokrollahi H., Janghorban K., Soft magnetic composite materials (SMCs), *J. Mater. Process. Tech.*, 189 (2007), 1–12
- [17] Najgebauer M., Szczygłowski J., Ślusarek B., Przybylski M., Kapton A., Rolek J. Magnetic composites in electric motors, *Lecture Notes in Electrical Engineering: “Analysis and Simulation of Electrical and Computer Systems”*, Springer, 452 (2008), 15–28
- [18] Périgo E.A., Nakahara S., Pittini-Yamada Y., de Hazan Y. Graule T., Magnetic properties of soft magnetic composites prepared with crystalline and amorphous powder, *J. Magn. Magn. Mater.*, 323 (2011), no. 15, 1938–1944
- [19] Najgebauer M., Szczygłowski J., Ślusarek B., Przybylski M., Scaling algorithms in modelling of power loss in soft magnetic composites, *Compel*, 39 (2019), no. 4, 1064–1074
- [20] Manual for software operation of the MPG 200 D, *Brockhaus Measurements* (2018)