

## Charakterystyki wybranych materiałów ferromagnetycznych przy zasilaniu niesinusoidalnym

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki eksperymentów przeprowadzonych na stanowisku badawczym pozwalającym wyznaczyć przebieg pętli histerezy materiałów ferromagnetycznych. Badaniom poddano materiały ze stali węglowej litej i stali zimnowalcowanej wyżarzanej i niewyżarzanej przy wymuszeniach napięciem sinusoidalnym wyprostowanym jednopółkowo i dwupółkowo. Pomiar napięcia pola magnetycznego i indukcji magnetycznej przeprowadzono z zastosowaniem oscyloskopu cyfrowego, dzięki czemu możliwe było zarejestrowanie ww. przebiegów oraz przeprowadzić analizę fourierowską. Analiza pokazała harmoniczne wygenerowane w nieliniowym układzie..

**Abstract.** The paper presents the results of experiments carried out on a test bench to determine the hysteresis loop of ferromagnetic materials. The materials tested were solid carbon steel and cold-rolled annealed and non-annealed steel at sinusoidal voltage forcing with half-wave and full-wave rectification. Magnetic field strength and magnetic induction were measured using a digital oscilloscope, which made it possible to record the aforementioned waveforms and perform a Fourier analysis. The analysis showed the harmonics generated in the non-linear system. (**Hysteresis loop in distorted voltage supply**)

**Słowa kluczowe:** histereza, ferromagnetyzm, stal lita, wymuszenie sinusoidalne.

**Keywords:** hysteresis, ferromagnetism, solid steel, sinusoidal forcing.

### Wstęp

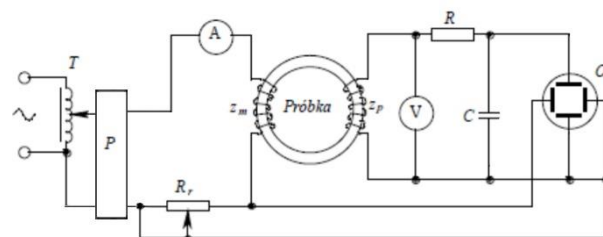
Materiały magnetyczne to materiały łatwo magnesujące się pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego. Głównym celem zastosowań ferromagnetyków w polach zmiennych są dławiki, maszyny elektryczne i transformatory. Stosuje się je tam w celu zwiększenia strumienia magnetycznego, tzn. w celu zwiększenia wartości napięcia indukowanego przez pole magnetyczne. Istotnym zagadnieniem jest analiza obwodów elektrycznych z rdzeniami ferromagnetycznymi pakietowanymi z blach. Scharakteryzowanie własności dynamicznych obwodu magnetycznego wymaga podania rodziny dynamicznych pętli histerezy, które są jednoznacznymi charakterystykami materiału tylko przy ustalonej grubości blachy, częstotliwości i ustalonym kształcie czasowego przebiegu pola magnetycznego. [1-3]

Własności dynamiczne ferromagnetyka bada się na próbkach zamkniętych lub otwartych umieszczonych w jarzmowych obwodach magnetycznych. [4,5]

W pracy przedstawiono wyniki eksperymentów przeprowadzonych na stanowisku badawczym pozwalającym wyznaczyć przebieg pętli histerezy materiałów ferromagnetycznych. Badaniom poddano materiały ze stali węglowej litej i stali zimnowalcowanej wyżarzanej i niewyżarzanej przy wymuszeniach napięciem sinusoidalnym wyprostowanym jednopółkowo i dwupółkowo. [6]

### Badania

Badaniom eksperymentalnym poddano próbki obwodów magnetycznych. Badania przeprowadzono metodą oscylograficzną. Metoda ta pozwala na wyznaczenie dynamicznej pętli histerezy badanego materiału magnetycznego drogą pomiaru odpowiadających sobie wartości chwilowych prądu magnesującego w uzwojeniu magnesującym oraz całki z napięcia na uzwojeniu pomiarowym próbki. [7,8] Schemat układu do pomiaru dynamicznych pętli histerezy magnetycznej przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat układu do pomiaru dynamicznych pętli histerezy magnetycznej: T - transformator regulacyjny, P - prostownik bez filtra jednopółkowy lub dwupółkowy,  $R_r$  - rezystor regulacyjny (suwakowy),  $z_m$  - uzwojenie magnesujące,  $z_p$  - uzwojenie pomiarowe, R i C - rezystor i kondensator układu całkującego, Os - oscyloskop

Pętlę histerezy badanej próbki otrzymano na ekranie oscyloskopu doprowadzając do jego płytek sygnał napięciowy proporcjonalny do natężenia pola magnetycznego. [9-11] W celu skalowania osi H zmierzono wartość prądu magnesującego płynącego przez uzwojenie pomiarowe (pierwotne) próbki i wyznaczono wartość natężenia pola magnetycznego ze wzoru [4]:

$$(1) \quad H = \frac{z_m I}{l_{sr}}$$

gdzie:  $z_m$  - liczba zwojów uzwojenia magnesującego, I - wartość prądu magnesującego w A,  $l_{sr}$  - średnia długość drogi magnetycznej strumienia w rdzeniu w m, H - natężenie pola magnetycznego w A/m.

W opisie osi natężenia pola magnetycznego H na kolejnych rysunkach występuje współczynnik proporcjonalności  $a$ , który wynosi:

$$(2) \quad a = \frac{R_r l_{sr}}{z_m}$$

Napięcie proporcjonalne do natężenia pola magnetycznego otrzymano z rezystora  $R_r$  połączonego szeregowo z uzwojeniem magnesującym próbki.

Sygnał proporcjonalny do indukcji magnetycznej dołączono do płytek odchylenia pionowego. Napięcie proporcjonalne do chwilowych wartości indukcji otrzymuje się podając przebieg siły elektromotorycznej uzwojenia pomiarowego na układ całkujący RC [12-13]. Stąd współczynnik proporcjonalności równy jest:

$$(3) \quad b = 4fz_p S$$

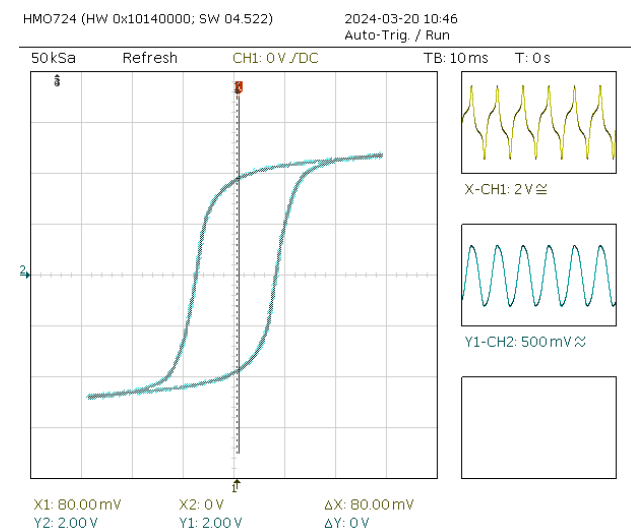
gdzie:  $z_p$  - liczba zwojów uzwojenia pomiarowego,  $f$  - częstotliwość w Hz,  $S$  - przekrój rdzenia  $m^2$ .

Badania przeprowadzono przy wymuszeniach napięciem sinusoidalnym wyprostowanym jednopółkowo i dwupółkowo dla trzech rodzajach próbek o następujących wymiarach:

1. **Próbka nr 1.** Próbka zamknięta pierścieniowa zwijana z taśmy magnetycznej ze stali krzemowej walcowanej na zimno. Szerokość taśmy 20 mm, średnica zewnętrzna 71 mm, wewnętrzna 57 mm. Nawinięty rdzeń został wyżarzony w temperaturze  $800^\circ C$  w czasie 0,5 godziny.
2. **Próbka nr 2.** Próbka zamknięta pierścieniowa lita wykonana ze stali węglowej. Wymiary próbki takie jak próbki nr 1.
3. **Próbka nr 3.** Podobnie jak próbka nr 1 zwijana z taśmy magnetycznej ze stali krzemowej zimnowalcowanej. W przeciwieństwie do próbki nr 1 nie wyżarzona.

Wymiary oraz liczba zwojów wszystkich próbek użytych do badań były jednakowe i wynosiły:  $Z_m$  - uzwojenie magnesujące: 335 zw.,  $z_p$  - uzwojenie pomiarowe: 200 zw.,  $l_{sr}$  - średnia długość drogi magnetycznej strumienia w rdzeniu: 20,1 cm,  $S$  - przekrój próbki:  $2.10 \text{ cm}^2$ .

Dla próbki nr 1 (stal zimnowalcowana wyżarzana w  $800^\circ C$ ) dla wymuszenia sinusoidalnego uzyskano oscylogram przedstawiony na rys.2

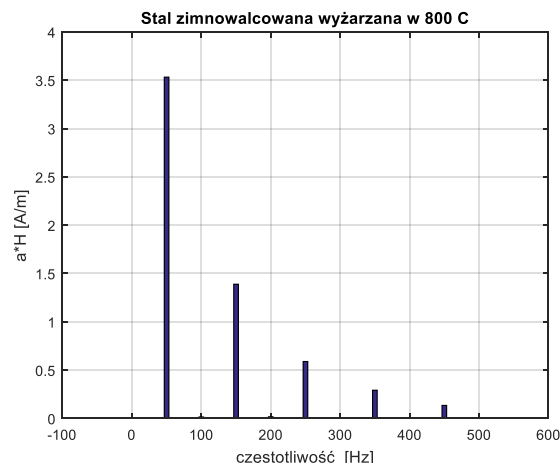


Rys.2. Oscylogram pętli histerezy próbki nr 1 przy wymuszeniu sinusoidalnym

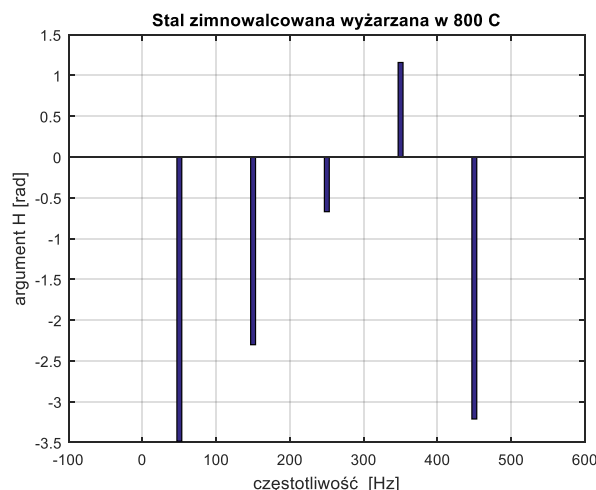
Dysponując danymi (6000 próbek) przebiegu  $H$  - natężenia pola magnetycznego dokonano analizy fourierskiej FFT przy pomocy pakietu MATLAB i uzyskano widmo amplitudowe (rys. 3) i fazowe (rys.4).

Następnie odtworzono funkcję natężenia pola magnetycznego  $H$  na podstawie widm - wzięto pod uwagę harmoniczne - 1, 3, 5, 7, 9, 4, 2, 10 i 8 (w kolejności od

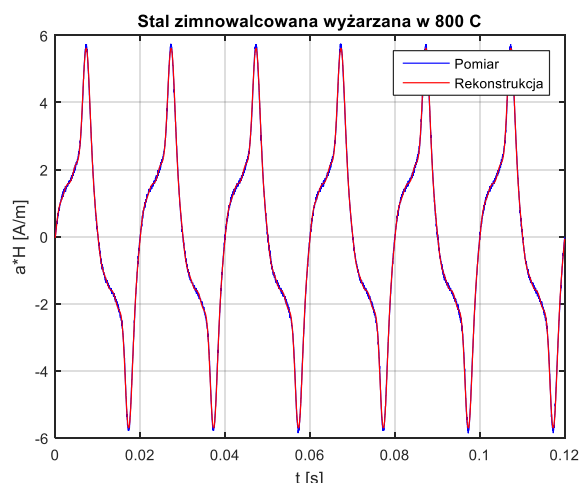
największej wartości amplitudy) i porównano ją z funkcją pomiarową. Wyniki przedstawiono na rys.5.



Rys.3. Widmo amplitudowe przebiegu natężenia pola magnetycznego  $H$



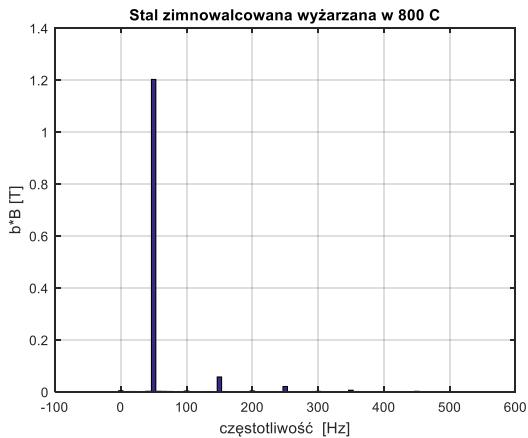
Rys.4. Widmo fazowe przebiegu natężenia pola magnetycznego  $H$



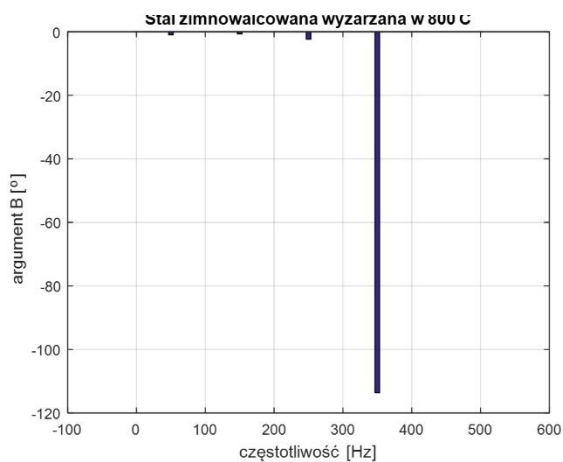
Rys.5. Przebiegi funkcji  $H$  na podstawie pomiarów i rekonstrukcji na podstawie widma

Z rysunku 5 wynika, że uwzględniając harmoniczne nieparzyste od 1 do 9 oraz wybrane harmoniczne parzyste uzyskano bardzo dobrą zgodność przebiegów.

Analogicznie postąpiono z przebiegami B – indukcji magnetycznej i uzyskano widmo amplitudowe (rys.6) i fazowe (rys.7).

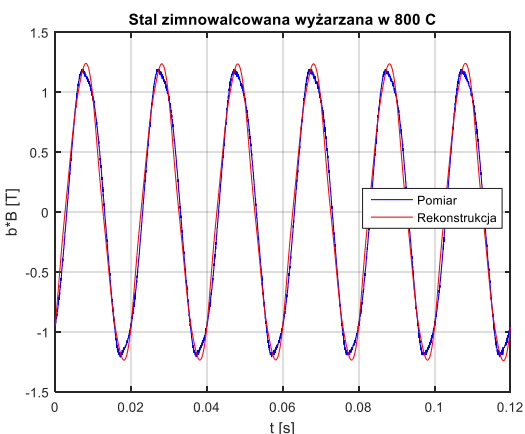


Rys.6. Widmo amplitudowe przebiegu indukcji magnetycznej B



Rys.7. Widmo fazowe przebiegu indukcji magnetycznej B.

I tu również odtworzono funkcję B na podstawie widma - wzięto pod uwagę harmoniczne – 1, 3, 5, 7, 4, 2, 6 (w kolejności od największej wartości amplitudy) i porównano ją z funkcją pomiarową. Wyniki przedstawiono na rys.8.

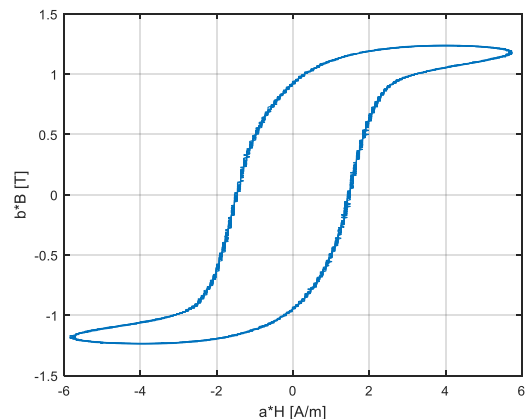


Rys.8. Przebiegi funkcji indukcji magnetycznej B na podstawie pomiarów i rekonstrukcji na podstawie widma

I tu dla przebiegu funkcji B po uwzględnieniu harmonicznych nieparzystych oraz wybranych harmonicznych parzystych uzyskano gorszą zgodność

przebiegów szczególnie w okolicy wartości maksymalnych i minimalnych.

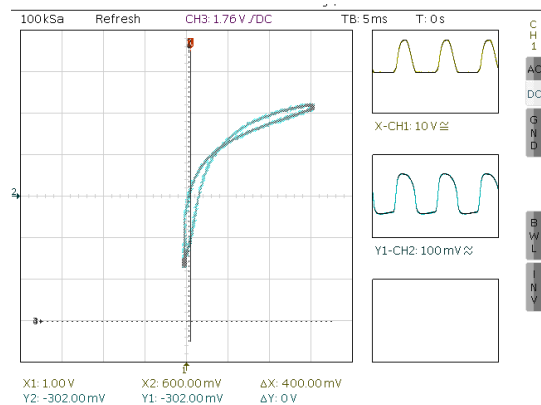
Na rysunku 9. przedstawiono pętlę histerezy uzyskaną na podstawie zrekonstruowanych przebiegów



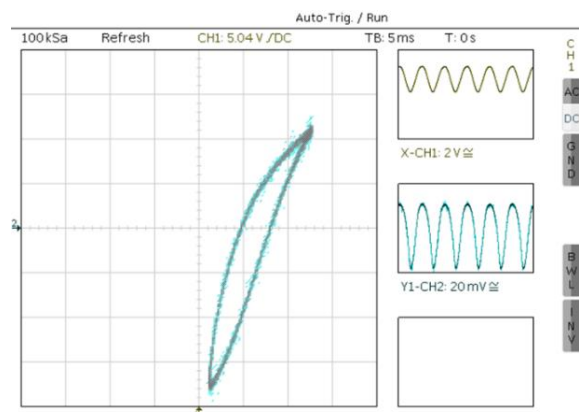
Rys. 9. Pętlę histerezy uzyskaną na podstawie zrekonstruowanych przebiegów H i B

Jak to można zauważyć, zrekonstruowana pętla histerezy różni się od histerezy pomiarowej w zakresie maksymalnych i minimalnych wartości indukcji – mają na to wpływ niedokładności w odtworzeniu indukcji w tych zakresach (rys.8.)

Poniżej przedstawiono oscylogramy próbek przy wymuszeniu napięciem sinusoidalnym wyprostowanym jednopółkowo i dwupółkowo.



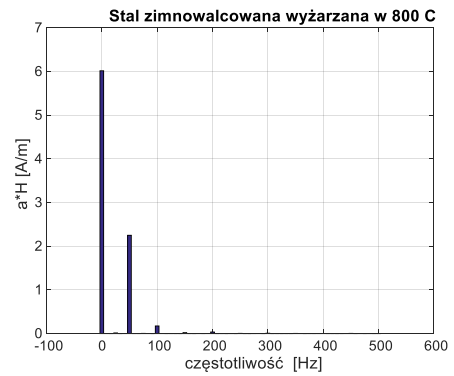
Rys. 10. Oscylogram pętli histerezy próbki nr 3 przy wymuszeniu sinusoidalnym wyprostowanym jednopółkowo



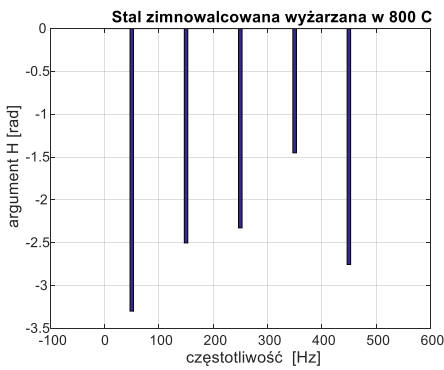
Rys. 11. Oscylogram pętli histerezy próbki nr 2 przy wymuszeniu sinusoidalnym wyprostowanym dwupółkowo



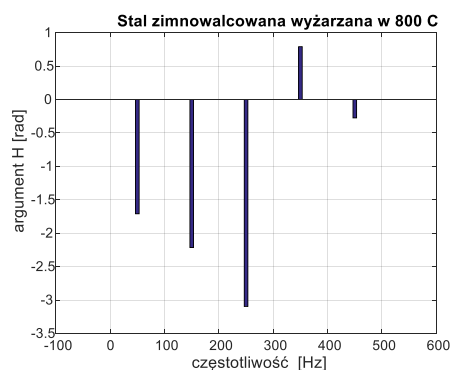
Rys. 12a. Widmo amplitudowe przebiegu natężenia pola magnetycznego w próbce nr 1 przy wymuszeniu sinusoidalnym wyprostowanym jednopółkowo



Rys. 14a. Widmo amplitudowe przebiegu natężenia pola magnetycznego w próbce nr 1 przy wymuszeniu sinusoidalnym wyprostowanym dwupółkowo



Rys. 12b. Widmo fazowe, przebiegu natężenia pola magnetycznego w próbce nr 1 przy wymuszeniu sinusoidalnym wyprostowanym jednopółkowo



Rys. 14b. Widmo fazowe, przebiegu natężenia pola magnetycznego w próbce nr 1 przy wymuszeniu sinusoidalnym wyprostowanym dwupółkowo.



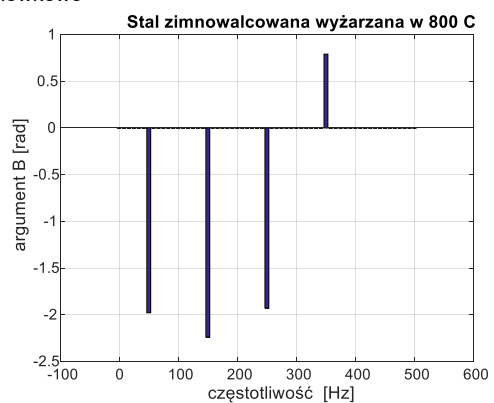
Rys. 13a. Widmo amplitudowe przebiegu indukcji magnetycznej w próbce nr 1 przy wymuszeniu sinusoidalnym wyprostowanym jednopółkowo



Rys. 15a. Widmo amplitudowe przebiegu indukcji magnetycznej w próbce nr 1 przy wymuszeniu sinusoidalnym wyprostowanym dwupółkowo



Rys. 13b. Widmo fazowe, przebiegu indukcji magnetycznej w próbce nr b1 przy wymuszeniu sinusoidalnym wyprostowanym jednopółkowo



Rys. 15b. Widmo fazowe, przebiegu indukcji magnetycznej w próbce nr 1 przy wymuszeniu sinusoidalnym wyprostowanym dwupółkowo

## Wnioski

Z analiz widma zwłaszcza amplitudowego wynika, że wbrew powszechnie przyjętym poglądom przebiegi H i B obok harmonicznych nieparzystych zawierają również harmoniczne parzyste, które pomimo ich znikomych wartości mają duży wpływ na kształtowanie ostatecznych kształtów przebiegów zwłaszcza w okolicy ich wartości ekstremalnych, co ma istotne znaczenie dla kształtu pętli histerezy w pobliżu nasycenia. Dla wymuszenia napięciem wyprostowanym jednopółkowo przebiegi natężenia pola magnetycznego i indukcji magnetycznej wykazują większą liczbę harmonicznych niż w przypadku wymuszenia napięciem wyprostowanym dwupółkowo.

**Autorzy:** dr hab. inż. Sebastian Różowicz prof. PŚk, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Automatyki; Al. Tysiąclecia P. P. 7, 25-314 Kielce, e-mail: s.rozowicz@tu.kielce.pl; dr hab. inż. Andrzej Zawadzki prof. PŚk, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Automatyki; Al. Tysiąclecia P. P. 7, 25-314 Kielce, e-mail: a.zawadzki@tu.kielce.pl; dr hab. inż. Maciej Włodarczyk prof. PŚk, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Informatyki, Elektroniki i Elektrotechniki, Al. Tysiąclecia P. P. 7, 25-314 Kielce, Poland, e-mail: m.wlodarczyk@tu.kielce.pl; dr inż. Henryk Wachta, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, Ul. W Pola 2; 35-959 Rzeszów; e-mail: hwachta@prz.edu.pl; dr inż. Krzysztof Baran, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, Ul. W Pola 2, 35-959 Rzeszów; e-mail: kbaran@prz.edu

## LITERATURA

- [1]. Brailsford F.: *Materiały magnetyczne*. PWN, Warszawa 1964
- [2]. Różowicz, S.; Tofil, Sz. And Zrak, A.; *An analysis of the microstructure, macrostructure and microhardness of NiCr-Ir joints produced by laser welding with and without preheat*, Archives Of Metallurgy And Materials; Jun 2016; Volume 61, Issue 2, Page 1157-1162; doi:10.1515/amm-2016-0193.
- [3]. Celiński Z.: *Materiałoznawstwo elektrotechniczne*. Politechnika Warszawska, wyd. 3, 2005
- [4]. Nałęcz M., Jaworski J.: *Miernictwo magnetyczne*. WNT, Warszawa 1968
- [5]. Różowicz, S. The effect of different ignition cables on spark plug durability. (in Polish) Przegląd Elektrotechniczny 2018, 94, 191–195; doi:10.15199/48.2018.04.43.
- [6]. Osowski S., Cichocki A., Siwek K.: *MATLAB w zastosowaniu do obliczeń obwodowych i przetwarzania sygnałów*, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2006
- [7]. Mayergoyz I. D.: *Mathematical models of hysteresis*, IEEE Transactions on Magnetism, Vol. MAG-22, No. 5, Sept. 1986, pp. 603-608.
- [8]. Różowicz S., Tofil Sz.: *The influence of impurities on the operation of selected fuel ignition systems in combustion engines*, Archives of Electrical Engineering, Vol. 65(2), pp.349-360, doi:10.1515/aee-2016-0026
- [9]. Bertotti G.: *Dynamic generalization of the scalar Preisach model of hysteresis*. IEEE Transactions on Magnetism, Vol. 28, No. 5, September 1992, pp. 2599-2601.
- [10]. Bertotti G., Pasquale M.: *Physical interpretation of induction and frequency dependence of power losses in soft magnetic materials*. IEEE Transactions on Magnetism, Vol. 28, No. 5, September 1992, pp. 2787-2789.
- [11]. Mayergoyz I.D.: *Dynamic Preisach models of hysteresis*, IEEE Transactions on Magnetism, Vol.24. No.6, Nov. 1988, pp. 2925-2927.
- [12]. Rouve L.L., Waeckerle T., Kedous-Lebouc A., Coulomb J.L.: *Determination of parameter k of the generalized dynamic Preisach model*. IEEE Transactions on Magnetism, Vol. 32, No. 3, May 1996. pp. 1124-1127.
- [13]. Różowicz S., Zawadzki A., Włodarczyk M., Wachta H. and Baran K.: *Properties of fractional-order magnetic coupling Energies MDPI; Energies 2020 , 13, 1539; ISSN 1996-1073; doi:10.3390/en13071539.*