

Zmodyfikowana metoda balistyczna do wyznaczania charakterystyki magnesowania

Streszczenie. Pomiar charakterystyk magnesowania można zrealizować na kilka sposobów. Jednym z nich jest metoda balistyczna (komutacyjna), która ze względów technicznych została zaniechana w ostatnich latach. Pojawiające się nowe możliwości techniczne, tj. klucze energoelektroniczne, przetworniki AC z krótkim czasem próbkowania, umożliwiły modyfikację znanej metody pomiarowej. Przedstawiono teoretyczne i praktyczne różnice w pomiarze krzywych magnesowania za pomocą popularnej metody transformatorowej, jak i nowej metodzie komutacyjnej.

Abstract. There are a number of ways to measure the parameters of the magnetic cores. One of them is the ballistic (commutation) method, which was rarely used for technical reasons in recent years. New technical possibilities, i.e. fast DAC and power electronic devices made it possible to create new measuring systems operating on the basis of the already known methods. Theoretical and practical differences of magnetization curves and parameters of the cores obtained by the AC and DC methods are presented. (The modified ballistic method for determining magnetic characteristic)

Słowa kluczowe: pierwotna krzywa magnesowania, histereza, metoda komutacyjna
Keywords: commutation B-H curve, hysteresis, commutation method

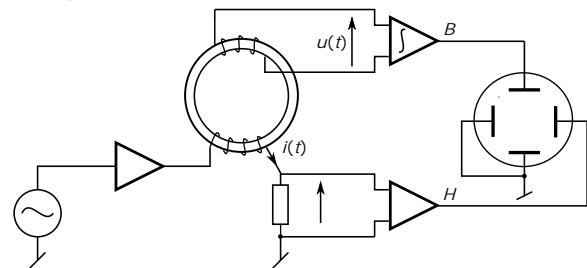
Wstęp

Pomiary właściwości materiałów magnetycznych ewoluowały przez lata. W większości przypadków zasada działania jest niezmienna, zmieniają się za to rozwiązania technologiczne. Istnieją dwie podstawowe metody pomiarowe umożliwiające wyznaczenie charakterystyk magnesowania oraz wtórnie podstawowych parametrów ferromagnetyka, tj. B_r , H_c , B_{max} , H_{max} , μ_{max} . Pierwsza z nich bazuje na wymuszeniu przebiegiem zmiennym – prądowym lub napięciowym. Metoda ta nazywana jest transformatorową ze względu na stosowanie sygnału przemiennego oraz wykonaniu dwóch uzwojeń. Drugi z przypadków jest to metoda komutacyjna, zwana również balistyczną ze względu na stosowane urządzenie pomiarowe - galvanometr balistyczny. Każda z metod ma określone właściwości dające przewagę nad drugą z nich. Wynika to z zastosowanego sygnału wymuszającego natężenie pola magnetycznego. W ostatnich latach metoda transformatorowa wiodła prym w badaniach materiałów magnetycznych. Przyczyną są dostępne na rynku pomiarowe wzmacniacze mocy o szerokim zakresie napięć, prądu oraz częstotliwości. Na rozwój metody wpłynęła również możliwość automatyzacji za pomocą szybkich kart pomiarowych oraz środowisk programistycznych umożliwiających realizację systemów pomiarowych. Wieloletnia stagnacja w rozwoju metody komutacyjnej wynika głównie z elementu pomiarowego, jakim jest urządzenie mierzące strumień magnetyczny, a wtórnie indukcję. Przez wiele lat stosowane były urządzenia analogowe, które zasadniczo spowalniały przeprowadzenia pomiaru. W ostatnich latach pojawiły się urządzenia, które nawiązują do powyższej metody. W artykule przedstawiono nową metodę komutacyjną oraz porównanie jej z dotychczas stosowaną powszechnie metodą transformatorową.

Metoda transformatorowa

Popularność tej metody wynika z łatwości pomiarów oraz szybkiej metody wizualizacji krzywej magnesowania. Możliwe jest to dzięki bezpośredniemu otrzymaniu sygnałów proporcjonalnych do natężenia pola magnetycznego oraz indukcji. Układ zbudowany jest ze źródła sygnału napięciowego lub prądowego, wzmacniacza, rdzenia z dwoma uzwojeniami, układu do pomiaru prądu (przykładowo bocznik oraz wzmacniacz), układu całkującego oraz układu pomiarowego będącego w tym wypadku wejściami X oraz Y

oscylloskopu [1]. Przykładowe rozwiązanie przedstawione jest na rysunku 1.



Rys. 1. Podstawowy schemat metody transformatorowej

Przy zasilaniu uzwojenia pierwotnego, prąd określany jako spadek napięcia na rezystorze pomiarowym, proporcjonalny jest bezpośrednio do H (rys.1). Wartości chwilowe indukcji proporcjonalne są do całki z napięcia uzwojenia wtórnego:

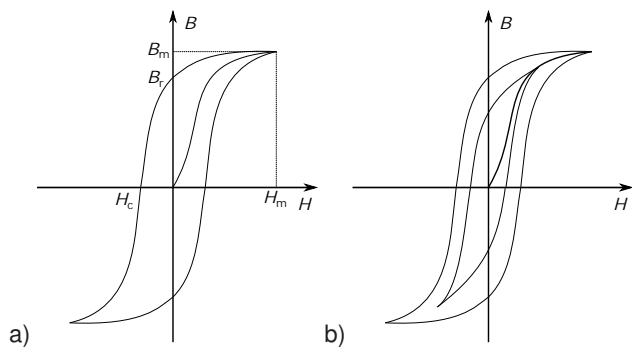
$$(1) \quad H(t) = \frac{N_1 i(t)}{l}$$

$$(2) \quad B(t) = \frac{1}{T} \int u(t) dt$$

W odosobnionych przypadkach możliwe jest jednak stosowanie tylko jednego uzwojenia [2] zwłaszcza gdy obiektem badanym jest gotowy dławik. Takie rozwiązanie jest rzadziej stosowane ze względu na błędy powstałe w wyniku spadku napięcia na rezystancji uzwojenia. Wykorzystanie uzwojenia wtórnego, przez który nie płynie prąd, eliminuje problemy ze spadkiem napięcia. Agregowane lub bezpośrednio przetwarzane wartości chwilowe $B(t)$ i $H(t)$ umożliwiają wyznaczenie krzywej magnesowania oraz określenie szerokości pętli histerezy (rys.2a). Pierwotna krzywa magnesowania otrzymywana jest poprzez wykonanie wielu serii pomiarowych dla różnych amplitud sygnału wejściowego. Połączenie wartości maksymalnych daje ostatecznie pierwotną krzywą magnesowania, zwaną również komutacyjną krzywą magnesowania (rys.2b).

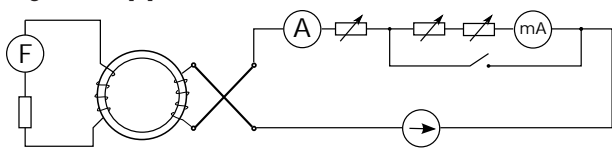
Metoda balistyczna

Badana próbka przygotowana jest podobnie, jak w poprzedniej metodzie. Zawiera dwa uzwojenia (rys.3). Różnica polega na zastosowaniu stałego wymuszenia



Rys. 2. Charakterystyki wyznaczone za pomocą metody transformatorowej: krzywa magnesowania (a), pierwotna magnesowania (b)

prądowego podłączanego na uzwojenie pierwotne. W części wtórnej sygnał mierzony jest za pomocą galwanometru balistycznego (oznaczenie F) lub pełznego, które pełnią rolę integratorów [3].



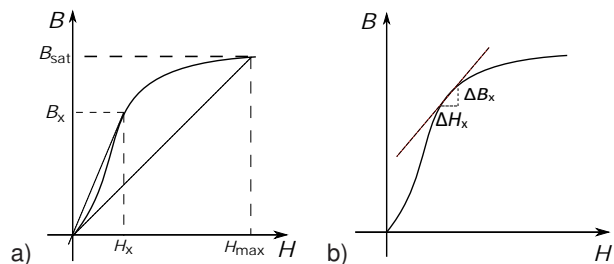
Rys. 3. Podstawowy schemat metody komutacyjnej

W celu wyznaczenia kolejnych punktów pierwotnej magnesowania, wymusza się kolejne skoki sygnału prądowego. Ważne jest, aby komutacje następowały w kolejnych sekwencjach – wartości dodatniej oraz ujemnej. W przypadku użycia wyłącznika jednokierunkowego wymuszenia, nastąpiłoby podmagnesowania próbki, co skutkowało błędnymi pomiarami ze względu na historię magnesowania. Główną przyczyną zaniechania powszechnego stosowania metody był wymóg stosowania analogowych układów analogowych, które umożliwiały pomiar strumienia po zadaniu kolejnej wartości prądu. W teraźniejszych rozwiązaniach możliwe jest wykorzystanie fluksometrów elektronicznych, których głównym elementem jest precyzyjny układ całkujący oparty o szybki wzmacniacz operacyjny z wysokoimpedancyjnym wejściem. Pomimo pojawienia się nowych urządzeń pomiarowych metoda nie zyskała aprobaty ze względu na brak automatyzacji.

Porównanie metod

Jak można zaobserwować, obie metody różnią się nie tylko sposobem pomiaru ale również i otrzymanymi wynikami. Metoda komutacyjna umożliwia określenie wyłącznie krzywej pierwotnej (rys.4a) oraz podstawowych parametrów (B_r, H_c). Pierwotna krzywa jest jednak bezpośrednim wynikiem pomiarów, a nie wtórnie jak to miało miejsce dla metody transformatorowej (rys.2b). Niewątpliwą zaletą metody jest możliwość uzyskania przenikalności różniczkowej w określonych punktach charakterystyki na podstawie bezpośrednich pomiarów (rys.4b). Niezbędne jest wówczas zastosowanie dodatkowego uzwojenia umożliwiającego wymuszenie małego przyrostu natężenia pola magnetycznego.

Można przyjąć, że metoda komutacyjna realizowana jest w dziedzinie czasowej, jako skok jednostkowy. Skutkuje to teoretycznie określeniem charakterystyki dla całego pasma częstotliwościowego. O ile z jednej strony jest to ograniczeniem, to sposób pomiaru odzwierciedla sposób funkcjonowania materiałów magnetycznych w dzisiejszych układach energoelektronicznych [4], czy też niektórych filtrach EMC [5]. Zaletą metody transformatorowej jest

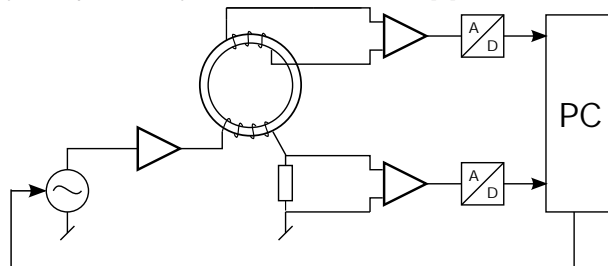


Rys. 4. Charakterystyki wykonane za pomocą metody komutacyjnej: a) pierwotna krzywa magnesowania, b) wyznaczenie przenikalności różniczkowej za pomocą dodatkowego wymuszenia.

możliwość określenia charakterystyki dla określonej częstotliwości, bądź pasma częstotliwości. Wtórą korzyścią jest możliwość określenia stratności badanego materiału w zależności od częstotliwości.

Współczesne realizacje urządzeń pomiarowych

Korzystając z szybkich kart pomiarowych i odpowiedniego wzmacniacza, w łatwy sposób możliwe jest przekształcenie ogólnie znanej metody transformatorowej na postać zautomatyzowaną (rys.5). Przykładem jest system pomiarowy REMACOMP C-1200 [6].



Rys. 5. Schemat budowy systemu pomiarowego REMACOMP C-1200

Elementem sterującym oraz agregującym dane jest w tym wypadku komputer osobisty. Parametry, jakie uzyskuje przedstawione urządzenie to: maksymalne napięcie 10 V, prąd maksymalny 32 A, pasmo przenoszenia (1 – 20 000) Hz.

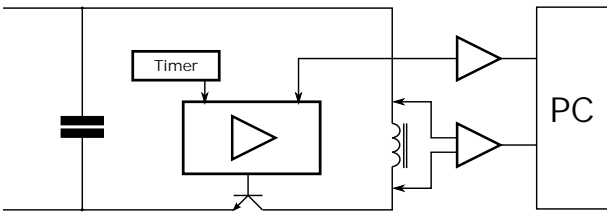
W ostatnim czasie pojawiła się zmodyfikowana metoda komutacyjna (rys.7). Bazuje również na szybkim załączeniu napięcia na uzwojenie rdzenia. Główną różnicą jest wykonanie tylko jednej sekwencji komutacyjnej (sygnał dodatni, sygnał ujemny). W tym czasie następuje szybkie próbkowanie sygnału napięciowego i prądu. Z kolejnych przyrostów obliczane są kolejne wartości B i H krzywej pierwotnej. Jako, że wymuszenie prądem o znaczących wartościach odbywa się za sprawą baterii kondensatorów, nie jest wymagane stosowanie zasilacza o dużej mocy. Pomimo znaczących wartości napięcia oraz prądu wymuszanego w uzwojeniu próbki, wydzielona energia jest stosunkowo mała za sprawą krótkiego czasu impulsu. Nie jest zatem wymagane stosowanie dużych przekrojów drutu do uzwojenia badanej próbki. Przykładem urządzenia realizującego pomiar w ten sposób jest EDK DPG-10 [7] (rys. 6).

Schemat rozwiązania przedstawiony jest na rys. 7. Maksymalne zakresy urządzenia: napięciowy do 300 V, prądowy 1500 A. Urządzenie złożone jest z kilku podstawowych bloków. Pierwszym z nich jest bateria kondensatorów, która ładowana jest do wcześniej określonego napięcia. Klucz energoelektroniczny jest drugim z elementów. Odpowiada za włączenie napięcia na zaciski wyjściowe, czyli zarazem na badany dławik lub inny element indukcyjny. Czas trwania sekwencji impulsów



Rys. 6. System pomiarowy EDK DPG-10

(ujemny, dodatni) może być regulowany. Pozostała część to układ akwizycji danych, sprzężony ze sterowaniem. Złożony jest z dwóch szybkich przetworników analogowo-cyfrowych o rozdzielczości 12 bitów, próbujących równoległe sygnał napięciowy i prądowy z szybkością 50 Ms/s.



Rys. 7. Schemat budowy systemu pomiarowego EDK DPG-10

Pierwotnie urządzenie przeznaczone było do określenia indukcyjności dławika lub transformatora. Dodano jednak możliwość wyznaczenia charakterystyk magnesowania.

Pomiary porównawcze

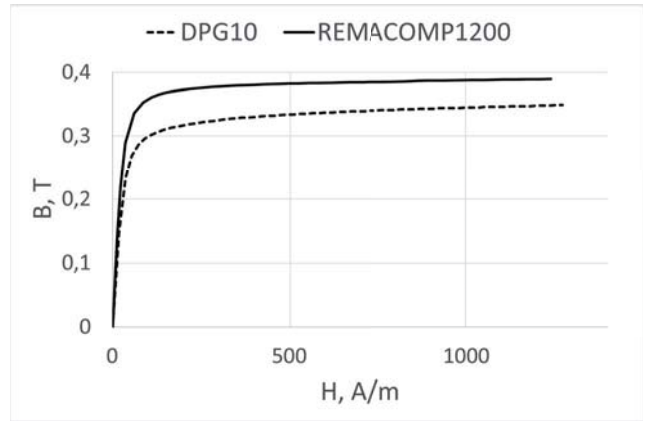
W celu sprawdzenia spójności pomiarowej, wykonano pomiary porównawcze przykładowych próbek pomiarowych. Jako urządzenie odniesienia wykorzystano stanowisko do pomiaru parametrów rdzeni magnetycznych REMACOMP C-1200 (rys.8).



Rys. 8. System pomiarowy REMACOMP C-1200

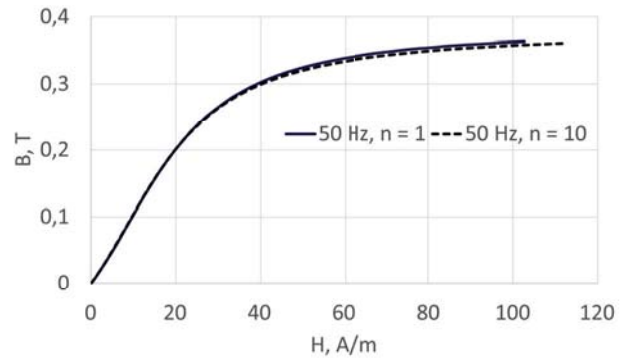
Pomiary metodą transformatorową dokonano dla częstotliwości 50 Hz. Obiektem referencyjnym był rdzeń z materiału MnZn HP2, o wymiarach: średnica zewnętrzna 47 mm, średnica wewnętrzna 27 mm, wysokość 15 mm. Indukcja nasycenia rdzenia wynosi 0,4 T, przy maksymalnej wartości natężenia pola magnetycznego 1200 A/m. Ze względu na niejednorodność danych wejściowych dla systemu DPG-10, określono maksymalny prąd na 13,2 A. Wyniki badania porównawczego przedstawiono na rysunku 9.

W części nasycenia charakterystyki można zauważyć błąd systematyczny rzędu 12%, co wynika z indukcji nasycenia: $B_s = 0,389$ (REMACOMP) oraz $B_s = 0,348$ T (DPG10). Oba pomiary były wyznaczone dla wartości natężenia pola $H = 1200$ A/m. Dodatkowo zweryfikowano wpływ liczby zwojów oraz ich rozmieszczenie dla obu urządzeń. Ze względu na niską częstotliwość przebiegu wymuszającego natężenie pola magnetycznego (50 Hz), nie



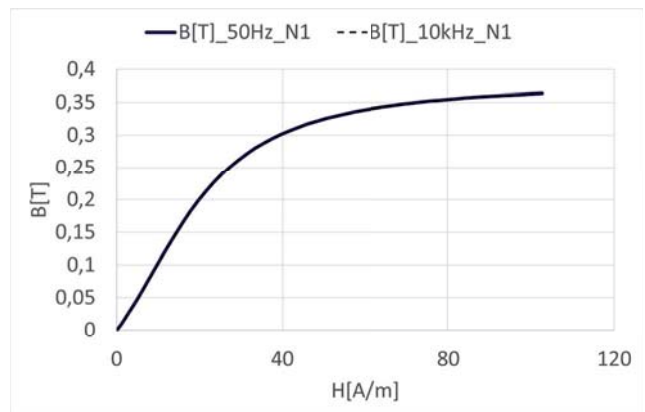
Rys. 9. Charakterystyki porównawcze systemu REMACOMP C-1200 i DPG-10

zauważono znaczących różnic w charakterystyce dla systemu REMACOMP — rysunek 10.



Rys. 10. Wpływ liczby zwojów na wyznaczenie krzywej pierwotnej dla systemu REMACOMP

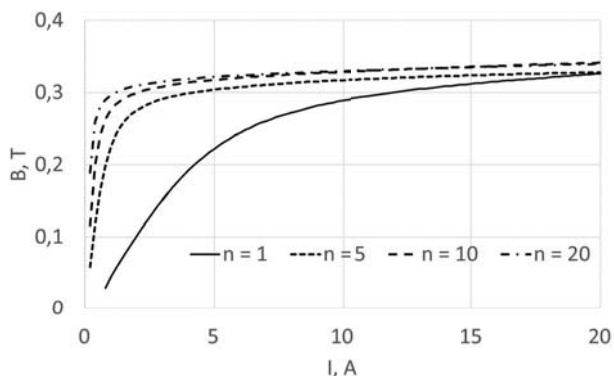
Z tego powodu zweryfikowano wpływ częstotliwości na krzywą magnesowania. Badanie przeprowadzono dla $f = 50$ Hz i $f = 1000$ Hz, co prezentuje rysunek 11. W przedstawionym zakresie częstotliwościowym nie zauważono zmian.



Rys. 11. Wpływ częstotliwości na kształt krzywej pierwotnej dla systemu REMACOMP

W systemie DPG-10 zweryfikowano dodatkowo wpływ sposobu uzwojenia na wyniki pomiarów — z rozmieszczeniem równomiernym oraz skompresowanym, usytuowanym w jednym miejscu (rys.12). Można zauważyć znaczące różnice, czego skutkiem może być: indukcja rozproszenia, pojemności międzyzwojowe oraz zjawisko naskórkowości drutu nawojowego. Wspomniane parametry

ujawniają się dla częstotliwości znacząco wyższych od 50 Hz, co wynika z widma częstotliwościowego skoku jednostkowego.



Rys. 12. Wpływ liczby zwojów na wyznaczenie krzywej pierwotnej dla systemu DPG-10

Wnioski

Zaprezentowane metody nie mogą być stosowane wymiennie ze względu na różnice w wynikach oraz w sposobie przeprowadzania samego pomiaru. Są jednak zbieżne co do kształtu charakterystyki. Dobrą praktyką jest weryfikacja tego samego rdzenia za pomocą obu metod pomiarowych. Możliwe jest wówczas wyeliminowanie m. in. błędów ludzkich. Metoda komutacyjna, wykorzystana w systemie DPG-10 została zmodyfikowana w stosunku do pierwotnej dzięki zastosowaniu nowych rozwiązań technologicznych, m.in. kluczy energoelektronicznych, szybkich przetworników DAC oraz układów przetwarzania danych. Uzyskano dzięki temu nową jakość, jednak ujawniły się nowe problemy. Jednym z nich jest przetwarzanie sygnału przetwornikami DAC - ich rozdzielczość która musi być wystarczająco duża, aby właściwie wyznaczyć silnie nieliniową charakterystykę. Pomimo zastosowania 12 bitowych przetworników, niewłaściwe ustalenie zakresów prądowego lub napięciowego będzie skutkowało znacznymi błędami na początku charakterystyki magnesowania. Obliczone parametry tj. przenikalność magnetyczna będą dalece rozbieżne z wartościami rzeczywistymi. Drugim czynnikiem wpływającym na dokładność pomiaru, jednocześnie zbieżnym z ustalonym napięciem lub prądem, jest czas przetwarzania. W przypadku małych indukcyjności dławika należy ustawić odpowiednio duże napięcie, aby czas trwania prądu zanikającego w cewce był odpowiednio długi. W przeciwnym wypadku liczba punktów pomiarowych będzie niewystarczająca do wyznaczenia poprawnej charakterystyki magnesowania.

Podsumowując, ze względu na specyfikę zmodyfikowanej metody pomiarowej (jak w przypadku DPG-10) istotne jest:

- właściwe określenie zakresów pomiarowych w celu uzyskania wysokiej rozdzielczości pomiarowej,
- weryfikacja pomiaru przy różnej liczbie zwojów oraz różnym ich rozmieszczeniu,
- właściwe podłączenie przewodów prądowych oraz napięciowych.

Wykorzystanie DPG-10 jest szczególnie zasadne ze względu na rozszerzenie zakresu pomiarowego laboratorium badawczego. Szczególnie ma to znaczenie przy weryfikacji rdzeni magnetycznych stosowanych w

energoelektronice lub energoelektronice dla układów o mocach większych od 1 kVA. W dalszych pracach planowane są próby zestawienia pierwotnego układu metody balistycznej i porównania jej wyników z uzyskanymi z DPG-10.

Prezentowany program badawczy został wsparty finansowo przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR), grant nr. TECHMATSTRATEG2/410941/4/NCBR/2019

Autorzy: dr inż. Adam Piłśniak, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Metali Nieżelaznych, ul. Sowińskiego 5, 44-100 Gliwice/Politechnika Śląska – Wydział Elektryczny, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, e-mail: adam.pilsniak@imn.lukasiewicz.gov.pl; mgr inż. Przemysław Zackiewicz, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Metali Nieżelaznych, ul. Sowińskiego 5, 44-100 Gliwice, e-mail: przemyslaw.zackiewicz@imn.lukasiewicz.gov.pl; dr hab. Aleksandra Kolano-Burian, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Metali Nieżelaznych, ul. Sowińskiego 5, 44-100 Gliwice, e-mail: aleksandra.kolano-burian@imn.lukasiewicz.gov.pl; dr inż. Szymon Pasko, Schaffner EMV AG, Industrie Nord, Nordstrasse 11e, 4542 Luterbach, e-mail: szymon.pasko@schaffner.com

LITERATURA

- [1] Tumański S.: Handbook of Magnetic Measurements, CRC Press Taylor & Francis Ltd, 34(5), London, New York, 2019.
- [2] Detka K. Górecki K.: Nowa metoda pomiaru krzywej magnesowania rdzenia dławika, 166 Przegląd Elektrotechniczny, R. 96, nr 11, 166–168, pp. 833–839, 2020.
- [3] Kuryłowicz: Badania materiałów magnetycznych, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa, 1962.
- [4] Bernacki K., Wybrańczyk D., Zygmantowski M., Latko A., Michalak J., Rymarski Z.: Badania materiałów magnetycznych, Electronics - Switz., vol. 8 iss. 4 s. 1-17 (art. no. 378), 2018.
- [5] Gonscz D., Urzędniczek H., Domański W.: Laboratory stand for the analysis of disturbances in the car electrical circuits, Measurement Automation Monitoring, no. 08, 271–274, vol. 63, 2017.
- [6] Remacomp C for computer controlled measurement of the dynamic characteristics of soft magnetic materials [web page] <https://www.magnet-physik.de/upload/72691424-Remacomp-e-3194.pdf>.
- [7] Power choke tester DPG-10 B-series Description & Technical Specifications [web page] https://www.ed-k.de/wp-content/uploads/2017/05/Power_Choke_Tester_DPG10-series_specification.pdf.