

Andrzej BUZE

BADANIA WŁAŚCIWOŚCI MAGNETYCZNYCH RDZENI TRANSFORMATORÓW I DŁAWIKÓW DO PRZEKSZTAŁTNIKÓW

STRESZCZENIE *W Zakładzie Trakcji Elektrycznej Instytutu Elektrotechniki prowadzone są systematyczne badania stosowanych rdzeni i materiałów magnetycznych. W artykule omówiono typowe przebiegi prądów i napięć, a następnie rodzaje wykonywanych badań specjalnych w nawiązaniu do ich wykorzystania. Podano także przykładowe wyniki pomiarów wykonywanych w laboratorium Instytutu.*

Słowa kluczowe: *przekształtniki mocy, transformatory specjalne, dławiki indukcyjne, badania właściwości magnetycznych*

1. WSTĘP

W Zakładzie Trakcji Elektrycznej (ZTE) Instytutu Elektrotechniki opracowano dotąd ponad 140 typów dławików i blisko 30 typów transformatorów do przekształtników mocy. Wyroby te są w większości produkowane w ZTE, po części w kooperacji z zakładami przemysłowymi. Powyższe urządzenia pracują przy częstotliwości wielokrotnie większej od 50 Hz, prądach i napięciach niesinusoidalnych. Stwarza to szczególne wymagania dla jakości stosowanych rdzeni magnetycznych. W związku z tym w ZTE są wykonywane systematyczne

dr inż. Andrzej BUZE

e-mail: a.buze@iel.waw.pl

Instytut Elektrotechniki, Zakład Trakcji Elektrycznej

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 261, 2013

i w miarę potrzeb, specjalne badania rdzeni. Potrzeba tych badań wynika z trzech okoliczności. Po pierwsze – informacje odnośnie właściwości materiałów podawane przez ich producentów są niewystarczające. Po drugie – zaleca się, aby próby odbiorcze wyrobów były dostosowane do różnorodnych warunków eksploatacji. Po trzecie – wymiarowanie magnetowodu na podstawie właściwości rdzenia jest bardziej precyzyjne niż na podstawie właściwości materiału, gdyż uwzględnia wpływ czynników konstrukcyjnych i technologicznych na jakość rdzenia.

Systematyczne badania właściwości rdzeni, jak również badania konstruktorskie dławików i transformatorów, są wykonywane w specjalistycznym laboratorium Zakładu.

Poniżej podano wybrane wyniki badań, przykłady badań specjalnych i ich praktyczne zastosowanie. Obiektami badań były rdzenie zwijane z blachy zimnowalcowanej oraz z taśmy amorficznej METGLAS. Pomiary wykonywano przy stałej częstotliwości, napięciu o przebiegu prostokątnym, który odpowiada warunkom pracy w przekształtnikach. Napięcie sinusoidalne było stosowane wyłącznie w przypadku $f = 50$ Hz.

2. WYPOSAŻENIE LABORATORIUM

Laboratorium ZTE jest wyposażone w specjalnie zaprojektowane źródła zasilania i stosowne przyrządy pomiarowe. Źródła zasilania o odpowiedniej mocy dają napięcie stałe, sinusoidalne bądź prostokątne z regulowaną częstotliwością od ok. 0,1 Hz do ponad 20 kHz. W przypadku napięcia prostokątnego, źródłem są falowniki o mocy do ok. 45 kW i regulowanym wypełnieniu w zakresie $0 < \gamma < 1$.

Laboratorium dysponuje wystarczającą ilością kondensatorów, dławików i transformatorów o rozmaitych parametrach znamionowych. W zastosowaniu do badań elementy te są wykorzystywane do tworzenia obwodów rezonansowych w celu uzyskiwania napięć i prądów praktycznie sinusoidalnych, a także gdy dziedziną badań są właściwości magnetyczne w polu pulsującym. W drugim przypadku stosuje się jednocześnie zasilanie prądem stałym i przemiennym, przy tym źródło DC jest blokowane dławikiem, zaś AC – baterią kondensatorów. Zmiana składowej stałej pola magnetycznego oraz współczynnika pulsacji jest uzyskiwana przez regulację napięcia powyższych źródeł.

Stosowana metoda określania właściwości magnetycznych rdzeni polega na pomiarze napięcia średniego, wartości skutecznej i maksymalnej prądu w uzwojeniach rdzenia oraz wydzielanej w nim mocy. Do wyposażenia spec-

jalistycznego stanowiska badań należy analizator mocy NORMA 4000, oscyloskop cyfrowy firmy TEKTRONIX, cewka Rogowskiego CWT firmy PEM Ltd. Powyższe wyposażenie pozwala na wykonywanie szeregu badań specjalnych.

Oprogramowanie komputerowe ułatwia opracowanie wyników. Warto tu wymienić autorski program archiwizacji i przetwarzania wyników (PA i PW) pomiarów właściwości magnetycznych. Są w nim zawarte wymiary i dane nawojowe, wyniki pomiarów różnorodnych rdzeni magnetycznych. Wartości mierzone stanowią cztery parametry: SEM uzwojenia pomiarowego, wartość skuteczna i amplituda prądu wzbudzenia oraz straty mocy.

Żądane charakterystyki uzyskuje się w formie wykresów lub aproksymowanych zależności matematycznych.

W laboratorium ZTE są również wykonywane badania zdawczo-odbiorcze transformatorów i dławików łącznie z próbami typu.

3. WSPÓŁCZYNNIK WYPEŁNIENIA RDZENIA

Badania właściwości rdzenia rozpoczyna się od wyznaczenia współczynnika wypełnienia k_{fe} . Obliczany jest on na podstawie pomiarów masy M_{fe} , objętości V według wzoru:

$$k_{fe} = \frac{M_{fe}}{m_{fe} \cdot V}$$

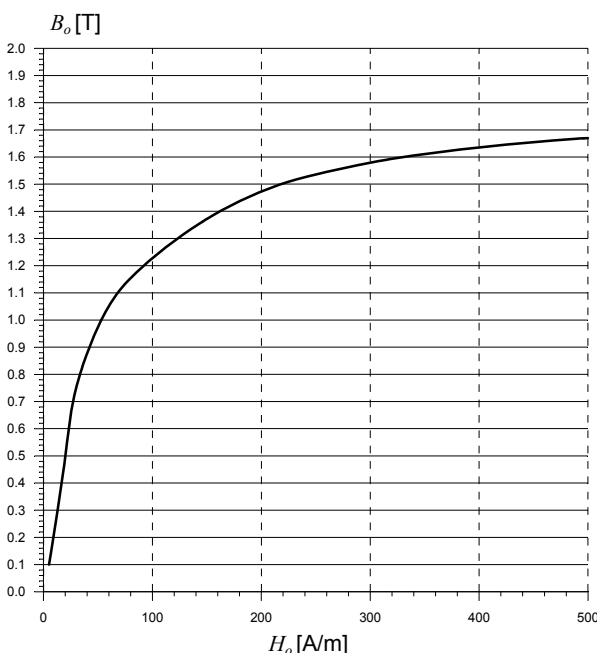
przy czym m_{fe} jest gęstością masy materiału.

Współczynnik wypełnienia jest jednym z czynników, który świadczy o jakości wykonania rdzenia. Uwzględnia się go przy wyznaczaniu charakterystyk będących przedmiotem artykułu.

4. STATYCZNA CHARAKTERYSTYKA MAGNESOWANIA

Pomiar statycznej charakterystyki magnesowania jest wykonywany metodą quasi-statyczną. Uzwojenie wzbudzenia zasila się napięciem przemienicznym o częstotliwości wielokrotnie mniejszej od 50 Hz. Do tego celu został zbudowany specjalny falownik o prostokątnym napięciu wyjściowym. Częstotliwość falownika jest regulowana począwszy od wartości 0,05 Hz. Indukcję

magnetyczną w rdzeniu oblicza się na podstawie średniej wartości SEM w uzwojeniu pomiarowym, zmierzonej w czasie połowy okresu.



Przykładowa charakterystyka magnesowania $B_o = f(H_o)$ rdzenia o masie 8,5 kg, zwijanego z blachy M150-30N, określona powyższą metodą, jest pokazana na rysunku 1.

Charakterystyką $B_o = f(H_o)$ posługujemy się przy wymiarowaniu rdzeni dławików prądu stałego lub prądu pulsującego o małej składowej zmiennej prądu.

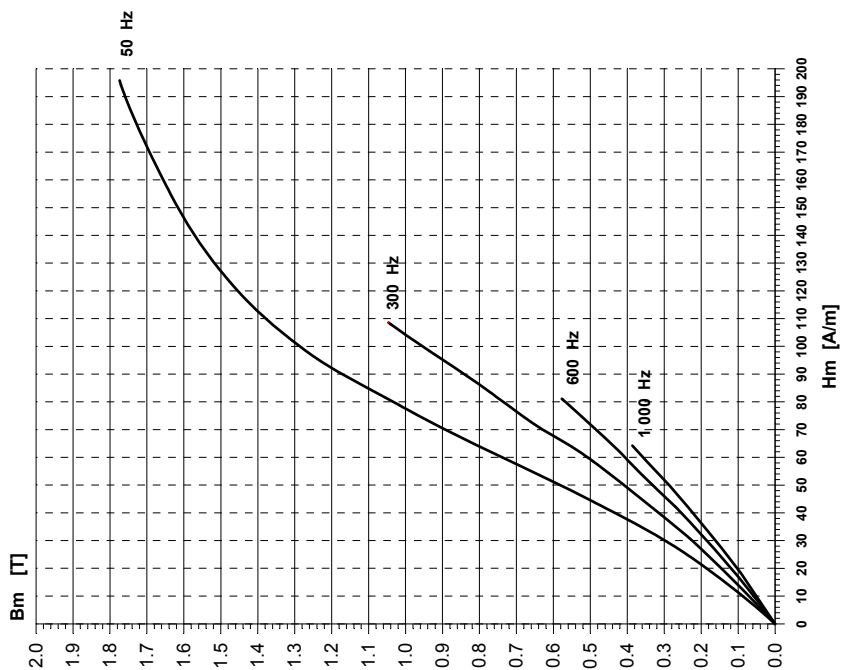
Rys. 1. Statyczna charakterystyka magnesowania $B_o = f(H_o)$

5. DYNAMICZNE CHARAKTERYSTYKI MAGNESOWANIA

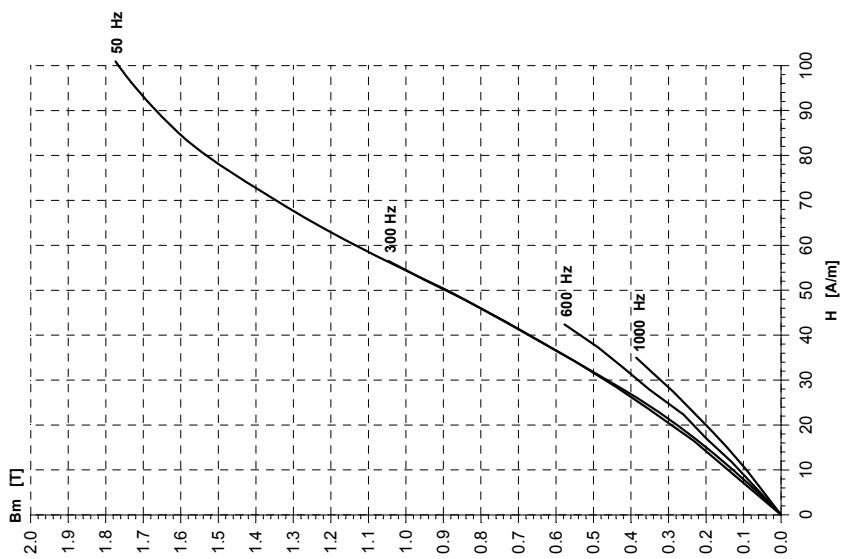
Stanowią je zależności amplitudy indukcji B_m od natężenia pola magnetycznego, przy prądzie przemiennym o częstotliwości f . Stosownie do rodzaju prądu mierzonego, tworzona jest charakterystyka indukcji B_m w funkcji skutecznej H lub maksymalnej wartości natężenia H_m pola magnetycznego:

$$B_m = f(H) \quad \text{albo} \quad B_m = f(H_m)$$

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono przykładowe charakterystyki dynamiczne rdzenia zwijanego ciętego z blachy M130-27N o masie 7,5 kg. Określono je przy częstotliwości 50, 300, 600 i 1000 Hz. Wraz ze wzrostem częstotliwości zmniejsza się wartość pochodnej dB_m/dH , a więc: obniża przewodność magnetyczna rdzenia.



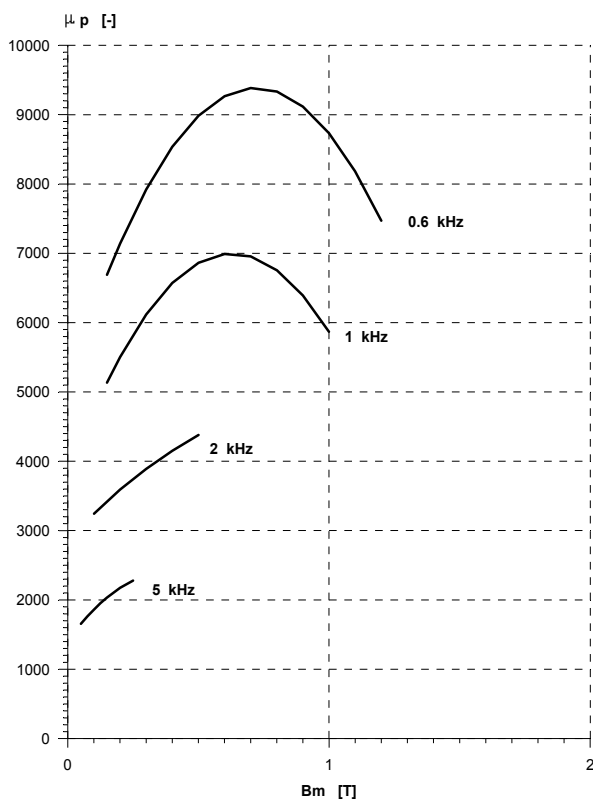
Rys. 3. Dynamiczna charakterystyka magnesowania $B_m = f(H_m)$



Rys. 2. Dynamiczna charakterystyka magnesowania $B_m = f(H)$

Charakterystyką $B_m = f(H)$ posługujemy się przy obliczaniu prądu transformatora w stanie jałowym. Charakterystyki $H_m = f(B_m)$ są przydatne do porównywania rdzeni pod kątem oceny współpracy transformatora z falownikiem.

6. PRZENIKALNOŚĆ MAGNETYCZNA WZGLĘDNA



Rys. 4. Względna przenikalność magnetyczna
 $\mu' = f(B_m)$

Stosując PA i PW uzyskuje się charakterystyki względnej przenikalności magnetycznej rdzenia. Przykładowe zależności otrzymane dla rdzenia z blachy M140-30N o grubości 0,3 mm i masie 2,22 kg, są przedstawione na rysunku 4. Zostały one wyznaczone przy czterech wartościach częstotliwości f .

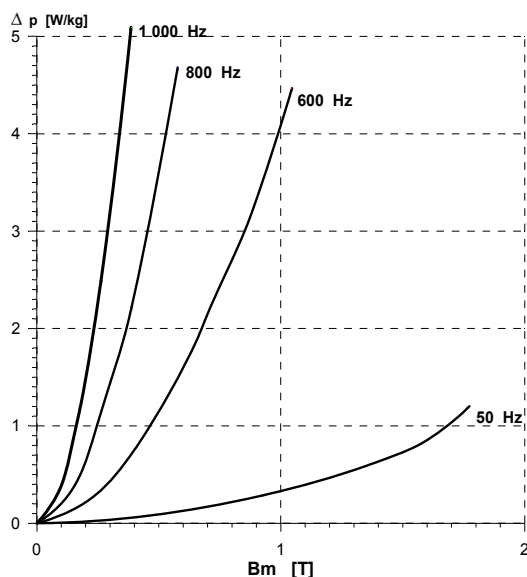
W przypadku badanego rdzenia występuje znaczne zmniejszenie przenikalności magnetycznej rdzenia wraz ze wzrostem częstotliwości. Zależności $\mu' = f(B_m)$ mają zastosowanie w niektórych obliczeniach projektowych i symulacyjnych.

7. STRATNOŚĆ

Stratność jest jednym z najważniejszych parametrów rdzeni. W przypadku elementów elektromagnetycznych przekształtników często decyduje ona o wymiarach, masie i koszcie.

Na rysunku 5 przedstawiono charakterystyki stratności rdzenia z blachy M130-27N o masie 7,5 kg, wyznaczone przy czterech wartościach częstotliwości. Charakterystyki stratności $\Delta p = f(B_m, f)$ są wykorzystywane w obliczeniach transformatorów i dławików prądu przemiennego, a także przy projektowaniu dławików prądu pulsującego o znacznej składowej zmiennej.

Wyżej omówione charakterystyki właściwości magnetycznych są wynikiem badań systematycznie prowadzonych. Pomierzone charakterystyki są przechowywane jako pliki komputerowe, zaś PA i PW umożliwia odczytywanie wartości przy dowolnej indukcji B_m i częstotliwości f .



Rys. 5. Stratność $\Delta p = f(B_m)$

8. BADANIA SPECJALNE

Wyposażenie laboratorium umożliwia prowadzenie rozmaitych badań specjalnych. Można wymienić badania wpływu czynników technologicznych na właściwości rdzenia. Pomiar porównawczy określający degradację właściwości na skutek cięcia, naprężeń mechanicznych powstałych w trakcie uzwojania czy sycenia rdzenia.

Następnym przykładem badań jest porównanie właściwości magnetycznych rdzeni przy sinusoidalnym i prostokątnym napięciu wzbudzenia. Przeprowadzono je, przyjmując równość średniej wartości SEM, a więc jednakowe wartości maksymalne indukcji.

Materiałem doświadczalnym były rdzenie wykonane z blachy zimnowalcowanej o grubości 0,3 mm i 0,1 mm oraz taśmy amorficznej.

Wnioski odnośnie charakterystyk magnesowania i charakterystyk stratności znajdują się w publikacji [6].

Kolejnym przykładem jest badanie strat w rdzeniu przy prostokątnym napięciu wzbudzenia i regulowanej wartości wypełnienia. Taki sposób regulacji stosuje się w przypadku transformatorów zasilanych z sieci trakcyjnej.

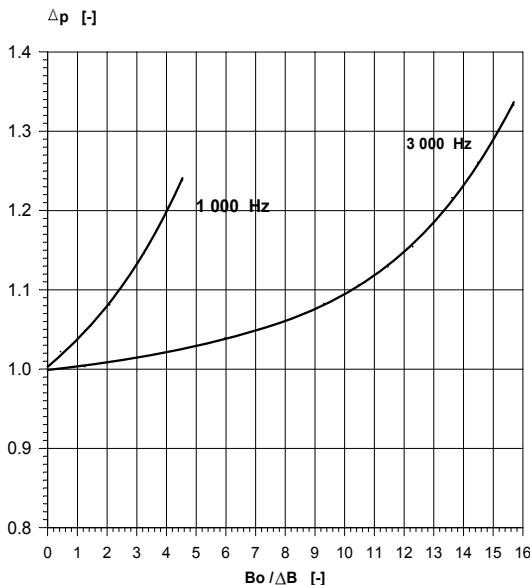
Obszerną dziedziną są badania przy złożonych przebiegach wzbudzenia rdzenia. Badania właściwości rdzeni w tych warunkach mają praktyczne znaczenie w przypadku dławików prądu pulsującego, pracujących przy względnie dużej wartości ilorazu amplitudy składowej zmiennej ΔB do wartości średniej indukcji B_o . Indukcję magnetyczną w rdzeniu można wówczas wyrazić wzorem:

$$B = B_o + \frac{4\Delta B}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin n\omega t$$

gdzie n jest ciągiem kolejnych liczb nieparzystych, a λ oznacza wypełnienie.

Złożony przebieg indukcji występuje w rdzeniu dławika zmiennoprądowego przy napięciu modulowanym impulsami z pulsacją ω_2 .

$$B = B_1 \sin \omega_1 t + \frac{4\Delta B}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin n\omega_2 t$$



Rys. 6. Zależność stratności od składowej stałej indukcji $\Delta p = f(B_o/\Delta B)$

Przykładowe wyniki badania stratności rdzenia w przypadku pola magnetycznego pulsującego przedstawia rysunek 6. Wykresy stanowią zależności stratności od ilorazu składowej stałej do składowej przemiennej. Otrzymano je na podstawie badań rdzenia z blachy M150-30N o masie 8.5 kg. Uzwojenie wzbudzenia było zasilane prądem pulsującym o regulowanej składowej stałej, przy której występuje indukcja B_o . Badania wykonano przy dwóch częstotliwościach składowej

przemiennej i regulowanej wartości (1000 Hz i 3000 Hz) składowej stałej ($\Delta B_o = 0.206$ T w pierwszym przypadku, zaś $\Delta B_o = 0.0726$ T w drugim). Wyniki są wyrażone w jednostkach względnych, przy tym stratność jest równa 1, gdy składowa stała B_o nie występuje. Zależność $\Delta p = f(B_o/\Delta B)$ należy traktować jako współczynnik zwiększenia strat w rdzeniu na skutek podmagnesowania składową stałą indukcji.

9. WNIOSKI

1. Projektowanie optymalnych rozwiązań transformatorów i dławików rdzeniowych do przekształtników wymaga rozszerzonych badań właściwości materiałów magnetycznych. Istnieje też potrzeba badań w trakcie wytwarzania urządzeń w celu dokonywania ewentualnych korekt wykonawczych. Powyższe badania są systematycznie wykonywane w specjalistycznym laboratorium Zakładu Trakcji Elektrycznej Instytutu Elektrotechniki.

2. Laboratorium Zakładu jest wyposażone w stosowne źródła zasilania i przyrządy pomiarowe, które umożliwiają wykonywanie badań przy sinusoidalnym i prostokątnym przebiegu napięcia, regulowanej częstotliwości, regulowanym wypełnieniu. Służy to ogólnemu zaleceniu, aby badania odbiorcze wyrobów wykonywać przy napięciach odpowiadających warunkom w eksploatacji.

3. Przedmiotem badań są w głównej mierze gotowe magnetowody, dzięki czemu w uzyskiwanych wynikach pomiarów uwzględniany jest wpływ czynników konstrukcyjnych i technologicznych.

4. Właściwości magnetyczne badanych rdzeni są określone w postaci charakterystyk: magnesowania, przenikalności magnetycznej oraz stratności. Przykładowe wyniki pomiarów podane w artykule dotyczą rdzeni zwijanych z blachy zimnowalcowanej i taśmy amorficznej.

5. Na potrzeby badań został opracowany autorski program archiwizacji i przetwarzania wyników pomiarów właściwości magnetycznych. Wprowadzane są do niego wyniki badań rozmaitych rdzeni. Żądane charakterystyki uzyskuje się w postaci wykresów lub aproksymowanych zależności matematycznych.

LITERATURA

1. Tunia H., Winiarski B: Podstawy energoelektroniki, WNT, 1987.
2. Dąbrowski M.: Analiza obwodów magnetycznych. Straty mocy w obwodach, PWN, 1981.
3. Soiński M.: Materiały magnetyczne w technice, Biblioteka COSiW SEP.
4. Pluta W., Rygał R., Soiński M.: Nowoczesne techniki określania właściwości materiałów miękkich, Wiadomości Elektrotechniczne, Nr 8, 1999.
5. Lejtes Ł.W.: Elektromagnitnye rasčety transformatorow i reaktorow, Energija, Moskwa, 1981.
6. Buze A., Zieliński A.: Właściwości magnetyczne rdzeni zwijanych przy sinusoidalnym i prostokątnym napięciu wzbudzenia, VIII Sympozjum Pomiarów magnetycznych, 2006.
7. Katalog: Elektrotechniczne blachy i taśmy ze stali krzemowej, STALPRODUKT S.A., Bochnia, 1998.
8. Katalog: Soft Ferrites and Accessories, FERROXCUBE, 2005.
9. Katalog: Cores and Components, VACUUMSCHMELZE, 1998.

Rękopis dostarczono dnia 26.03.2013 r.

INVESTIGATIONS INTO MAGNETIC PROPERTIES OF CORES OF TRANSFORMERS AND INDUCTORS FOR CONVERTERS

Andrzej BUZE

ABSTRACT *Systematic investigations of the cores and magnetic materials applied are conducted at the Department of Electric Traction of the Electrotechnical Institute. The paper discusses typical variations of currents and voltages and then the kinds of special investigations carried out with reference to their applications. Exemplary results of measurements performed at the laboratory of the Institute are also given.*

Keywords: *power static converters, special transformers, induction reactors, magnetic characteristics test*