

***"Poznanie zjawisk w materiałach magnetycznych warunkiem obniżenia strat energii  
w magnetowodach urządzeń elektromagnetycznych".***

Jakkolwiek urządzenia stosowane w elektroenergetyce charakteryzują się dużą sprawnością, to całkowite straty energii systemu elektroenergetycznego są bardzo duże, co prowadzi do szybkiego ubytku zasobów energii pierwotnej i wysokich kosztów energii elektrycznej. Najważniejszym materiałem stosowanym w urządzeniach elektrycznych jest elektrotechniczna blacha stalowa wykorzystywana do przenoszenia strumienia magnetycznego. Podczas magnesowania blachy elektrotechnicznej, część energii ulega rozproszeniu w postaci ciepła. Straty te, określane jako straty w stali, są zwykle podzielone na dwie składowe, straty histerezowe i straty wiroprądowe.

W rzeczywistości energia nie jest tracona, a zmieniana w inną formę, głównie w ciepło, ale w przypadku systemów magnetycznych termin ten jest powszechnie stosowany. Aby pokryć straty energii w magnetowodach, należy zużyć więcej paliwa, przez co wzrasta koszt wytworzenia energii elektrycznej. Większość elektrycznych urządzeń mocy zawiera stal elektrotechniczną. Urządzenia te obejmują zarówno małej mocy sprzęt powszechnego użytku, taki jak: zawory, łączniki, oraz elektryczne maszyny wirujące i transformatory energetyczne wielkich mocy. Mimo, że pojedyncze małej mocy jednostki wykazują mniejsze straty rdzeniowe, to straty energii spowodowane ich łącznym działaniem są również znaczące. Nic dziwnego, że w ciągu ostatnich 30 lat badania naukowe nad stalą elektrotechniczną skoncentrowały się na udoskonaleniu urządzeń o większych mocach, co stwarza potencjalnie większe korzyści. Powinniśmy być świadomi tego, że urządzenia takie jak transformatory mocy są zasilane w sposób ciągły w dzień i w nocy i bez względu na to, czy są obciążone czy nie, występujące w nich straty rdzeniowe w takim samym stopniu obciążają źródło zasilające. Magnetyczne straty mocy w miękkich materiałach magnetycznych stanowią ponad 5% wytwarzanej energii. Badania, które prowadzi od 30 lat, mają na celu lepsze poznanie procesów magnesowania powodujących te straty w tradycyjnych i nowych materiałach, ulepszenie metod charakteryzujących ich magnetyczne właściwości oraz określenie czynników, które zmniejszają straty w przypadku ich zastosowania w urządzeniach elektrycznych, takich jak silniki, transformatory i czujniki.

Ma to znaczenie dla przemysłu miękkich materiałów magnetycznych. Na świecie produkuje się rocznie ponad 6 mln ton materiałów magnetycznie miękkich o wartości ponad 5x10<sup>10</sup> Euro. Są one częścią systemów o wartości prawdopodobnie stokrotnie wyższej. Występujące w materiałach magnetycznych straty energii można zredukować zarówno poprzez ulepszenie ich podstawowych właściwości magnetycznych lub przez poprawę ich wykorzystania w urządzeniach elektrycznych.

Wykład podzieliłem na trzy części, w których dokonam krótkiego przeglądu mojego wkładu w badania nad samymi materiałami magnetycznymi, metodami określania ich właściwości oraz opisem ich charakterystyk w takich urządzeniach jak maszyny elektryczne i transformatory. Mam nadzieję, że uda mi się przedstawić ścisły związek wymienionych badań ze sobą. I tak, ulepszanie podstawowych właściwości metalurgicznych czy chemicznych materiałów w celu nadania im lepszych właściwości magnetycznych nie przynosi spodziewanego rezultatu w przypadku, gdy są one częścią urządzenia, w którym materiał nie ulega magnesowaniu, w taki sposób, aby w pełni wykorzystać jego lepsze właściwości magnetyczne. Podobnie jak odpowiedni dobór geometrii układu magnetycznego jest konieczny, aby uniknąć szkodliwych efektów występujących podczas konstrukcji urządzeń elektrycznych, tak samo istotne jest określenie rodzaju tych efektów i możliwości ich uniknięcia, jak też określenie ich wpływu na podstawowe właściwości magnetyczne materiału. Elektrotechniczna blacha stalowa jest materiałem dominującym na rynku miękkich materiałów magnetycznych i jest wielce prawdopodobne, że tendencja taka utrzyma się w ciągu najbliższych lat.

Obecnie, elektrotechniczne blachy stalowe są produkowane w formie arkuszy o grubości od 0,15 do 0,65 mm. Ze względów ekonomicznych, w tanich silnikach stosuje się niskogatunkową stal węglową. Transformatory mocy wymagają zastosowania materiałów o małej stratności, dlatego też od 1940r. znaczący postęp był skierowany na produkcję blachy stalowej teksturowanej. Charakteryzuje się ona małą stratnością, gdy jest magnesowana w kierunku, w którym jest walcowana. Na początku lat 70-tych pojawiły się teksturowane blachy żelazowo-krzemowe charakteryzujące się dużą przenikalnością magnetyczną i małą stratnością, które znajdują obecnie szerokie zastosowanie. Ostatnio, dostępna jest również amorficzna taśma magnetyczna produkowana przy wykorzystaniu całkowicie nowej technologii. Materiał ten wykazuje stratność równą zaledwie 25% stratności najlepszej blachy stalowej teksturowanej i stanowi główne wyzwanie dla projektantów zamierzających wykorzystać go efektywnie w transformatorach.

Straty magnetyczne zależą od takich czynników jak: grubość blachy, opór właściwy, skład chemiczny, struktura metalurgiczna i częstotliwość, przy której materiał jest magnesowany. Niektóre z moich badań miały na celu określenie sposobu zmniejszenia tych strat poprzez zastosowanie obróbki cieplnej, lub dodatkową obróbkę blachy. Jedną z metod polega na obróbce termicznej materiału w polu magnetycznym w celu osiągnięcia tzw.

uporządkowania magnetycznego cząstek prowadzącego do wytworzenia w materiale anizotropii magnetycznej, co może obniżyć straty mocy o 5% i sprawia, że materiał poddaje się łatwiej magnesowaniu.

Niektóre blachy elektrotechniczne posiadają niemagnetyczną powłokę nanoszoną w procesie ich produkcji. Wykazałem, że powoduje to efekt podobny do obróbki cieplnej i może ulepszyć jakość materiału, dzięki wytworzeniu w nim korzystnych naprężeń mechanicznych.

Badania nad wpływem powłoki zapoczątkowały dalsze prace mające na celu scharakteryzowanie i określenie wielkości niekorzystnego wpływu naprężeń mechanicznych na właściwości wielu materiałów magnetycznych. Jest to bardzo ważny czynnik, zwłaszcza przy projektowaniu maszyn, ponieważ w trakcie montażu materiał podlega różnym naprężeniom. Badania nad naprężeniami liniowymi, zginającymi i złożonymi potwierdziły ich szkodliwy wpływ na wiele właściwości magnetycznych o dużym znaczeniu dla pracy urządzeń elektromagnetycznych.

Przeprowadzono wiele zakończonych pomyślnie prób, które miały na celu dyfuzję aluminium i krzemu w powierzchnię blachy elektrotechnicznej w celu zmiany jej rezystywności i zredukowania strat. Technika ta, oparta na chemicznej dyfuzji próżniowej, została wprowadzona na rynek. Stwierdziliśmy, że technika dyfuzji ulepsza właściwości materiałów podczas procesu magnetyzacji prowadzonej w sposób złożony, tak jak to następuje w nowoczesnych systemach elektronicznych, nawet w większym stopniu niż przypuszczaliśmy.

Korzyści wynikające z tego faktu znajdują zastosowanie w nowej generacji systemach napędowych, w których rdzeń magnetyczny ulega namagnesowaniu w sposób złożony, co zwykle znacząco zwiększa ich stratność.

Momentem zwrotnym w pracach nad wpływem naprężeń mechanicznych stały się badania nad stopami kobaltu i żelaza. Znajdują one zastosowanie w sprzęcie lotniczym ze względu na wysokie nasycenie magnetyczne i dobre właściwości wytrzymałościowe. W normalnych warunkach, dobór optymalnych właściwości magnetycznych i mechanicznych jednocześnie, a takie wymagania narzuca przemysł lotniczy, jest niemożliwy, jednak nasze badania pozwoliły na wyjaśnienie i określenie, w jaki sposób można je zoptymalizować poprzez specjalną obróbkę termiczną. Jednocześnie zmniejsza się, niekorzystną w tych zastosowaniach, wrażliwość materiału magnetycznego na naprężenia.

Pomiary magnetyczne są uważane za znacznie trudniejsze do przeprowadzenia niż inne typy pomiarów i wymagają zastosowania ulepszonych i nowoczesnych technik. Nasze badania wykazały, że do pomiarów nowoczesnych materiałów magnetycznych, ze względu na ich zróżnicowane zastosowania i konieczność określenia różnego rodzaju właściwości, nie można wykorzystać wielu stosowanych dotychczas tradycyjnych metod pomiarowych.

Rezultatem naszej pracy w zakresie pomiarów właściwości magnetycznych było określenie jak dużą rolę odgrywają pola obrotowe w magnesowaniu rdzeni magnetycznych. Badania te doprowadziły do rozwoju systemów magnesowania, z nowoczesnymi czujnikami pomiarowymi, które służą do pomiaru właściwości materiałów magnetycznych poddawanych różnym rodzajom magnesowania obrotowego, takim jakie występują w maszynach wirujących i transformatorach.

Dotychczas w większości badań zakładano, że magnesowanie rdzenia odbywa się przy sinusoidalnym strumieniu i dla takich warunków określano właściwości magnetyczne rdzenia. Moje badania, jako jedne z pierwszych, dowiodły, że takie założenie jest dalekie od rzeczywistości, a straty mocy w wielu urządzeniach spowodowane wyższymi harmonicznymi strumienia magnetycznego mogą być o ponad 20% wyższe niż przy magnesowaniu sinusoidalnym strumieniem.

W celu zbadania powyższych zagadnień, opracowano szereg metod eksperymentalnych stosowanych do pomiarów miejscowych właściwości magnetycznych w modelu silnika i w rdzeniach transformatora. Badania eksperymentalne nad miejscową gęstością strumienia magnetycznego i odnoszącymi się do niej stratami mocy, zostały uzupełnione analizą teoretyczną, wykorzystującą głównie metodę elementów skończonych. Zidentyfikowano problemy występujące w opisie analitycznym tych złożonych zagadnień i zaproponowano sposoby ich przezwyciężenia. Są one oparte, przede wszystkim, na metodach hybrydowych, łączących ze sobą dane eksperymentalne i teoretyczne, co prowadzi do lepszego zrozumienia wpływu przybliżeń i błędów występujących przy projektowaniu modelu bazującego wyłącznie na podejściu teoretycznym.

Przeprowadzono wiele badań eksperymentalnych natężenia pola magnetycznego na powierzchni blachy wykorzystując różne czujniki magnetyczne nowej generacji. Pozwoliły one na interpretację strat mocy i gęstości strumienia magnetycznego w pojedynczych ziarnach blachy elektrotechnicznej.

Na podstawie otrzymanych wyników określono rolę, jaką odgrywają pojedyncze ziarna obszaru granicznego w zjawiskach histerezy i strat wiroprądowych. Wyniki tych ogólnych rozważań stanowią pomoc dla pracowników sektora przemysłowego w ustaleniu, jaki rozmiar pojedynczych ziaren i jaka ich orientacja pozwoli uzyskać najlepsze właściwości magnetyczne materiału rdzeniowego.

W początkowym etapie moich badań wprowadziłem współczynnik konstrukcyjny, jako sposób uwzględnienia wpływu czynników, które sprawiają, że parametry rdzenia magnetycznego są gorsze w porównaniu z obliczonymi na podstawie właściwości magnetycznych użytych do budowy rdzenia gatunków stali. Określiłem i poddałem analizie wpływ wprowadzonego współczynnika konstrukcyjnego na zjawiska, które wcześniej nie były rozpoznane i analizowane ilościowo, takie jak: obrotowa harmoniczna strumienia, strumień między warstwami, nierównomierność strumienia magnetycznego, zakłócenia w narożach i połączeniach typu T, a także wcześniej wymienione naprężenia mechaniczne oraz wpływ magnesowania harmonicznego i obrotowego.

Pozwala to projektantom urządzeń przewidzieć dokładniej jak zachowa się materiał i pomóc im projektować bardziej sprawne energetycznie i tańsze produkty końcowe, także poprzez optymalizację wykorzystania materiałów magnetycznych.

Wiele wyników tych badań znalazło komercyjne zastosowanie. Badania nad współczynnikiem konstrukcji w sposób naturalny doprowadziły do opracowania nowych geometrii rdzenia. Zastosowanie do budowy rdzenia kilku typów materiałów magnetycznych o różniących się przenikalnościach magnetycznych można wykorzystać do zwiększenia równomierności rozkładu strumienia magnetycznego w rdzeniu i do obniżenia strat mocy. Wykazano, że podział rdzenia na równoległe obwody magnetyczne redukuje straty w jego narożach. Jakkolwiek, całkowite straty energii w rdzeniach o takim kształcie są większe, to ich składanie odbywa się w nowoczesny sposób, co skraca czas ich produkcji nawet ponad dziesięciokrotnie, zapewniając jednocześnie energooszczędny rynek zbytu dla niższej klasy materiałów magnetycznych.

Kolejnym sposobem ograniczania strat mocy w gotowych rdzeniach transformatorów jest metoda obróbki powierzchniowej, określana jako rozdrabnianie ziaren struktury krystalicznej materiału. Blachy elektrotechniczne o zorientowanym ziarnie mają dzięki budowie krystalicznej doskonałe właściwości magnetyczne w wybranych kierunkach, ale kosztem dużych rozmiarów ziaren a tym samym domen magnetycznych, występują w nich relatywnie wysokie straty mocy. Staranna obróbka powierzchniowa blachy stalowej prowadzi do zwężenia domen magnetycznych. Udowodniono, że można uzyskać doskonałe właściwości magnetyczne, poddając obróbce powierzchniowej jedynie krytyczne obszary rdzenia.

Związek pomiędzy strukturą domenową materiałów magnetycznych i ich stratnością był przedmiotem moich badań przez wiele lat. Domeny można obserwować na powierzchni materiału magnetycznego wykorzystując metody magnetoopcyjne, można analizować ich strukturę i ruch podczas procesu magnesowania, co prowadzi do lepszego zrozumienia zjawisk decydujących o właściwościach magnetycznych materiału oraz do wyjaśnienia wpływu naprężeń mechanicznych. Badania te stały się pomocne do analizy udziału strat od prądów wirowych i strat histerezy w ogólnym bilansie strat energii w rdzeniu i pozwoliły sformułować zalecenia dotyczące doboru wielkości ziaren, grubości i składu chemicznego blachy oraz parametrów obróbki termiczno-magnetycznej w celu optymalizacji właściwości magnetycznych.

Moje obecne badania skoncentrowane są na przewidywaniu przyszłych trendów rozwoju materiałów konstrukcyjnych z uwzględnieniem wyzwań, jakie stawia współczesny Świat w zakresie zrównoważonego gospodarowania zasobami energii. Wykorzystanie nowoczesnych narzędzi analizy numerycznej, takich jak sztuczne sieci neuronowe, z wyrafinowanymi systemami pomiarowymi, w których materiał ulega magnesowaniu w warunkach silnych odkształceń jest przedmiotem badań, które dostarczają zarówno dokładniejszych charakterystyk pracy urządzeń elektromagnetycznych oraz są źródłem danych dla metody elementów skończonych wykorzystywanej przez ich projektantów.

Uważam, że badacze, projektanci i użytkownicy stali elektrotechnicznych oraz innych miękkich materiałów magnetycznych, mogą w kilku następnych dekadach odegrać ważną rolę w rozsądnym gospodarowaniu energią i jej stratami, przysparzając znaczących korzyści dla użytkowników materiałów magnetycznych oraz dla całej populacji.