

Streszczenie rozprawy doktorskiej
mgr inż. Michała Bereźnickiego pt.
Wpływ zjawiska histerezy magnetycznej na straty wiropądowe
w materiałach magnetycznie miękkich

W pracy zbadano wpływ zjawiska histerezy magnetycznej na klasyczne straty wiropądowe w materiałach magnetycznie miękkich. Motywacją podjęcia tematyki była rozbieżność między wartościami strat wyznaczonymi teoretycznie oraz na drodze eksperymentu. Stosowane obecnie formuły teoretyczne wyprowadzone są po przyjęciu szeregu założeń upraszczających. W szczególności, straty wiropądowe oblicza się przy pominięciu zjawiska histerezy magnetycznej, które w istotny sposób może wpływać na wartość tych strat. Dlatego celem pracy było zbadanie, w jaki sposób zjawisko histerezy magnetycznej wpływa na wartość strat wiropądowych. Postawiono tezę, że *„istnieje możliwość uwzględnienia procesu magnesowania w opisie strat wiropądowych w materiałach magnetycznie miękkich poprzez włączenie rodziny pomiarowych pętli histerezy do obliczeń czasowo-przestrzennego rozkładu pola magnetycznego w materiale”*.


Po krótkim wprowadzeniu sformułowano cel, tezę i zakres pracy. W początkowych rozdziałach pracy opisano niezbędne zagadnienia dotyczące klasyfikacji materiałów magnetycznych i ich właściwości magnetycznych oraz zjawiska histerezy magnetycznej. W rozdziale czwartym dokonano analizy najczęściej stosowanych teorii i formuł dotyczących opisu strat w materiałach magnetycznych. W dalszej części pracy skupiono się na wyznaczaniu klasycznych strat wiropądowych z uwzględnieniem pomiarowej rodziny pętli histerezy. Aby to osiągnąć, skonstruowano algorytm rozwiązywania równań Maxwella, pozwalający na włączenie do obliczeń dynamicznych charakterystyk magnesowania otrzymanych w drodze pomiaru dla różnych blach rdzeniowych. Ten rdzeń pracy opisany jest w podrozdziałach 5.1-5.5. Następnie algorytm zaimplementowano w postaci programu komputerowego i przetestowano na wyidealizowanej pętli (punkt 5.6.1) oraz na rzeczywistych rodzinie pętli zdjętej w drodze pomiaru (punkt 5.6.2). Stwierdzono, że w przypadku grubszych blach oraz większych częstotliwości zbieżność algorytmu nie jest wystarczająca. Aby ją poprawić, wprowadzono szereg modyfikacji i ulepszeń, takich jak eliminacja szumu numerycznego czy zmiana sposobu wykorzystania pomiarowych pętli histerezy.

Opracowany program zastosowano do wyznaczenia strat wiropądowych dla pięciu typowych blach elektrotechnicznych w różnym zakresie indukcji i częstotliwości (rozdział 6). Straty obliczono w trzech wariantach: stosując wzór klasyczny z pominięciem zjawiska histerezy oraz nieliniowości, stosując charakterystykę magnesowania w postaci krzywej wierzchołkowej oraz stosując charakterystyki w postaci rodzin pętli histerezy. Stwierdzono, że wskutek zjawiska histerezy magnetycznej straty wiropądowe są na ogół mniejsze niż wynika to ze wzoru klasycznego. Błąd



względny strat klasycznych rośnie zwykle wraz z częstotliwością i osiąga największe wartości, gdy amplituda indukcji magnetycznej wynosi od 0,2 do 0,8 T, a więc w przedziale indukcji, dla której w materiale zachodzą nieodwracalne zmiany magnetyzacji. Dla rozpatrywanych materiałów błąd względny wynosi do około 30%. Jeśli chodzi o wpływ samej nieliniowości (bez uwzględniania zjawiska histerezy magnetycznej), to jest on niewielki i wynosił do 3,5%.

Wyniki uzyskane w pracy potwierdzają postawioną tezę. Wskazują także, że zjawisko histerezy magnetycznej powoduje zwykle straty wiroprądowe mniejsze niż obliczone z pominięciem tego zjawiska. Jest to tym bardziej widoczne, im silniejszy jest efekt wypierania pola.

Michał
Berejnia


**Abstract of the doctoral thesis of
mgr inż. Michał Bereźnicki**
Effect of magnetic hysteresis on eddy current losses in soft magnetic materials

The paper investigates the effect of magnetic hysteresis on classical eddy current losses in soft magnetic materials. The motivation for undertaking the subject matter was the discrepancy between the loss values determined theoretically and via experiment. The currently used theoretical formulas are derived within a series of simplifying assumptions. In particular, eddy current losses are calculated by omitting the magnetic hysteresis phenomenon, which can significantly influence the value of these losses. Therefore, the aim of the work was to investigate how the phenomenon of magnetic hysteresis influences the value of eddy current losses. The thesis was stated that "there is a possibility of taking into account the magnetization process in the description of eddy current losses in soft magnetic materials by including the family of measured hysteresis loops into the time-space calculations of the magnetic field distribution in the material".

After a short introduction, the aim, thesis and scope of work were formulated. The initial chapters of the work describe the necessary issues regarding the classification of magnetic materials and their magnetic properties as well as the phenomenon of magnetic hysteresis. The fourth chapter analyzes the most commonly used theories and formulas concerning the description of losses in magnetic materials. In the further part of the work, the focus was put on determining the classical eddy current losses with the measured hysteresis loop family taken into account. To achieve this, an algorithm for solving Maxwell equations was constructed, which allows the magnetization characteristics obtained by measurement for different electrical steels to be included into the calculations. This core of the work is described in subsections 5.1-5.5. Next, the algorithm was implemented in the form of a computer program and tested on an idealized loop (point 5.6.1) and on the real family of hysteresis loop obtained by measurement (section 5.6.2). It was found that in the case of thicker sheets and higher frequencies the convergence of the algorithm was not sufficient. To improve it, a number of modifications and improvements have been introduced, such as the elimination of numeric noise or a change in the way the hysteresis measurements are used.

The developed program was used to determine eddy current losses for five typical electrical steels in various ranges of induction and frequency (Chapter 6). The losses were calculated in three variants: using the classical formula, which omits both the hysteresis and non-linearity, using magnetization characteristics in the form of anhysteretic curve, and using characteristics in the form of hysteresis loop families. It was found that, due to the phenomenon of magnetic hysteresis, eddy current losses are generally smaller than those resulting from the classical formula. The relative error of classical losses usually increases with frequency and reaches the highest values, when the



amplitude of the magnetic induction is from 0.2 to 0.8 T, i.e. in the induction interval, for which irreversible changes in magnetization occur in the material. For materials considered, the relative error is up to 30%. As for the effect of non-linearity (i.e. without taking into account the phenomenon of magnetic hysteresis), it is small and results in errors up to 3.5%.

The results obtained in the work confirm the thesis. They also indicate that the phenomenon of magnetic hysteresis usually causes eddy current losses less than those calculated without considering this phenomenon. This is all the more evident, the stronger the skin effect.

Mirko
Bencur

