



W ubiegłym miesiącu zapoznałem cię wstępnie z pojęciem napięcia magnetycznego, czyli siły magnetomotorycznej SMM (prąd płynący w uzwojeniu cewki pomnożony przez liczbę jej zwojów) i prądu magnetycznego (strumień magnetyczny).

Strumień magnetyczny wyobrażamy sobie trochę dziwnie: nie jako przepływ jakichś „magnetycznych elektronów”, tylko jako ilość wytworzonych linii pola magnetycznego. Pamiętaj tylko, że te „linie” są jedynie pewną analogią, która ma nam pomóc zrozumieć następne ważne pojęcie, mianowicie pojęcie indukcji magnetycznej.

Zanim dojdziemy do indukcji magnetycznej i natężenia pola magnetycznego, niejako przy okazji, bliżej zapoznamy się z pojęciem indukcyjności.

Wróćmy więc do wzoru na energię, na którym wcześniej utknęliśmy:

$$E = \frac{z \times \Phi \times I_1}{2}$$

Ponieważ teraz już wiemy, że:

$$\Phi = \frac{z \times I \times \mu \times S}{l}$$

Podstawiamy  $\Phi$  do wzoru na energię:

$$E = \frac{z \times \left[ \frac{z \times I \times \mu \times S}{l} \right] \times I_1}{2}$$

Spokojnie! Nie bój się! Zauważ, że prąd  $I$  ze wzoru na strumień to przecież prąd  $I_1$ . W cewce płynie tylko jeden prąd (ściślej biorąc chodzi o chwilową wartość prądu na koniec czasu  $t_1$  z rysunku 7). Możemy więc uporządkować równanie:

$$E = \frac{z^2 \times I^2 \times \mu \times S}{2l}$$



## Przetwornice impulsowe Potworki i straszzydła

Równanie to można zapisać troszeczkę inaczej:

$$E = \frac{z^2 \times \mu \times S}{2} \times I^2$$

Przyjrzyj się dobrze temu wzorowi. Zatrzybiłeś?

Przecież to jest znany ci od dawna wzór

$$E = \frac{L \times I^2}{2}$$

gdzie

$$L = \frac{z^2 \times \mu \times S}{l}$$

Czy jednak tylko po to, by wyprowadzić ten znany wzór na indukcyjność, tak strasznie cię męczyłem? Skądże! Wzór mogliśmy po prostu wziąć z jakiejś mądrej książki. Ja chciałem, byś zobaczył czarno na białym (prawie białym), co to jest indukcyjność. Obaj czuliśmy przez skórę, że indukcyjność cewki nie jest pojęciem pierwotnym, tylko czymś bardziej złożonym – teraz masz tego dowód.

Jak widzisz, indukcyjność cewki rośnie z kwadratem (drugą potęgą) liczby zwojów  $z$ . Indukcyjność zależy od wymiarów rdzenia: tak zwanej drogi magnetycznej  $l$  i przekroju rdzenia  $S$ . Zależy też od przenikalności materiału rdzenia  $\mu$  – czym większa przenikalność, tym większa indukcyjność.

A więc wygląda na to, że dobra cewka powinna mieć możliwie grubą i „pękaty” rdzeń (duża wartość  $S$ , mała  $l$ ) wykonany z materiału o dużej przenikalności magnetycznej  $\mu$ .

Zbyttno się nie ciesz, że poznałeś ten wzór. Niestety, prawie wcale nie używa się go w praktyce. Przyczyną jest przeni-

kalność  $\mu$ , której wartość dla materiałów ferromagnetycznych, jak się jeszcze dowiesz, wcale nie jest stała, ani jednoznacznie określona.

Jeśli weszliśmy w temat tak głęboko, to informuję, że indukcyjność, którą do tej pory ogólnie określaliśmy „zdolnością cewki do przeciwstawiania się zmianom prądu”, teraz możemy ściślej nazwać współczynnikiem proporcjonalności między strumieniem (skojarzonym) a prądem wywołującym ten strumień. Mówiąc obrazowo, indukcyjność wskazuje, jak skutecznie dana cewka „zamienia” prąd elektryczny w uzwojeniu, na prąd magnetyczny, czyli strumień w rdzeniu.

Jeśli nie wierzysz i chcesz się przekonać, że tak jest, to rozwiń poniższy wzór:

$$L = \frac{\Phi}{I}$$

W praktyce ani ostatni wzór, ani podana przed chwilą definicja nie będą ci potrzebne, więc potraktuj to jako ciekawostkę.

Jako ciekawostkę możesz potraktować także poniższe informacje.

Dobrze wiesz, że jednostką indukcyjności jest henr. Być może spotkałeś się z definicją henra: cewka ma indukcyjność jednego henra, jeśli przy jednostajnej zmianie prądu o 1 amper w ciągu jednej sekundy, indukuje się w niej napięcie samoindukcji równe 1 volt.

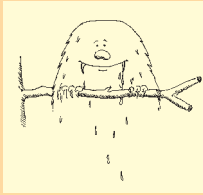
A więc mówiąc fachowo – wymiarem indukcyjności jest volt razy sekunda przez amper. A ponieważ volt przez amper to om, mówi się, że henr to omosekunda

$$[L] = \frac{V \times s}{A} = \frac{V}{A} \times s = \Omega \times s$$

## Listy od Piotra

Ta omosekunda strasznie mąci początkującym obraz sprawy, sugerując, że henr ma bliski związek z omem.

Nie daj się na to nabrać – nie mieszaj tu żadnej rezystancji i żadnych omów. Żeby sobie nie zamieszać w głowie, możesz spokojnie przyjąć,



że henr nie ma praktycznie żadnego związku z omem (choć nie jest to tak do końca prawdą; wystarczy przypomnieć sobie wzór na reaktancję cewki).

Nieprzypadkowo wspomniałem ci też wcześniej, że strumień  $\Phi$  ma związek z napięciem i czasem – proszę bardzo: wymiarem strumienia jest voltosekunda (Vs), zwana również weberem.

Dziwne, prawda? Co to jest voltosekunda? Co to jest omosekunda? Jak to rozumieć intuicyjnie? Jak to sobie wyobrazić?

Nie przejmuj się zbytnio (tym bardziej, jeśli jesteś nowicjuszem i zupełnie nie wiesz, co to jest ten wymiar, o którym wspomniałem)! Pocieszę cię. Wcale nie musisz do końca rozumieć tych spraw. Wystarczy, że zrozumiesz ogólne zależności, które właśnie ci tłumaczę.

W każdym razie widzisz, że zależności związane z magnetyzmem są rzeczywiście zadziwiające i wcale nie najłatwiejsze. Dlatego na temat cewek piszę ci już n-ty list, a z takimi na przykład kondensatorami poradziliśmy sobie w dwóch krótkich listach.

Teraz przechodzimy dalej.

W poprzednich miesiącach doszliśmy do wniosku, że w danej cewce można zmagazynować ograniczoną ilość energii, i że dla każdej cewki możemy określić pewien prąd maksymalny. Wyszło nam, że zwiększanie prądu powyżej tej maksymalnej wartości nie powoduje zwiększania ilości zgromadzonej energii. W analogii z magnesikami wszystko było jasne (równoległe ustawienie wszystkich magnesików). A teraz?

Gdzie we wzorze na energię

$$E = \frac{z^2 \times \mu \times S}{2} \times I^2$$

masz to ograniczenie?

Pomyśl! Powinno, a nawet musi tu być.

Jeśli twierdzisz, że to ograniczenie musi tkwić w przenikalności  $\mu$ , masz rację! Właśnie przenikalność reprezentuje właściwości materiału, czyli w naszej wcześniejszej analogii – sprężystość i kąt odchylenia elementarnych „magnesików na sprężynkach”.

Zróbmy więc kolejny krok – spróbujemy rozprawić się z przenikalnością.

Wróć do rysunków 11 i 12. Jeszcze raz przypomnę wzory

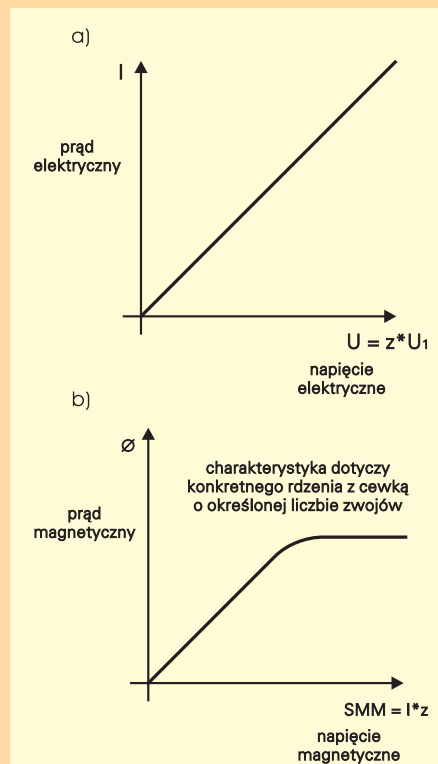
$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_1 \times z}{\gamma \times S}$$

$$\Phi = \frac{SMM}{R_m} = \frac{I \times z}{\gamma \times S}$$

W obwodzie elektrycznym wraz ze wzrostem napięcia ( $U = z \times U_1$ ), proporcjonalnie wzrasta prąd  $I$ . Zaznaczymy to na **rysunku 13a**. Wykresem zależności prądu od napięcia jest prosta. Dla konkretnego obwodu elektrycznego prosta ta (a właściwie jej nachylenie) reprezentuje rezystancję  $R$ , a także właściwości materiału, czyli współczynnik  $\gamma$  (bo  $S$  i  $I$  są niezmiennie). Wartość  $\gamma$  jest stała.

Inaczej jest w obwodzie magnetycznym. Tu prąd magnetyczny, czyli strumień nie będzie liniowo wzrastał ze wzrostem czynnika wymuszającego, czyli napięcia magnetycznego ( $SMM = I \times z$ ). Kłaniają się nasze „magnesiki na sprężynkach”. Gdy wszystkie się wyprostują, dalsze zwiększanie czynnika wymuszającego nic, albo niewiele zmieni.

A więc jedynie w zakresie zmian prądu od zera do pewnej wartości, strumień magnetyczny proporcjonalnie rośnie. Dla pewnej wartości prądu osiągniemy stan nasycenia i dalsze zwiększanie prądu nie zmienia znacząco wartości strumienia. Spróbujmy to zaznaczyć na **rysunku 13b**.

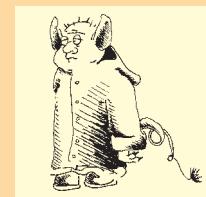


Rys. 13. Zależność prądu od napięcia w obwodach elektrycznym i magnetycznym

Analogicznie, jak na poprzednim rysunku, przedstawiona linia reprezentuje rezystancję magnetyczną, w tym także właściwości materiału, czyli przenikalność  $\mu$ . Ścisłej biorąc, o rezystancji magnetycznej  $R_m$  (a tym samym o wartości  $\mu$ ) dla danego prądu  $I$  świadczy nachylenie charakterystyki w punkcie odpowiadającym temu prądowi.

Uwaga! To bardzo ważne: wartość  $\mu$  zależy od wartości prądu! Jak widzisz, przy nadmiernym wzroście prądu (ściślej – przepływu), linia na rysunku 13b przebiega bardzo płasko, czyli przenikalność  $\mu$  radykalnie się zmniejsza. Oczywiście tym samym zmniejsza się także indukcyjność cewki.

Teraz pomału przechodzimy do praktyki. Czy już widzisz, że jeśli chcesz zaprojektować cewkę do jakiegoś konkretnego zastosowania, będziesz musiał zmieścić się w początkowym, stromym obszarze charakterystyki. Jedyne w takim



zakresie prądu w cewce i strumienia w rdzeniu, cewka ma, powiedzmy najprościej – dobre właściwości. Jeśli przekroczysz ten liniowy zakres, cewka radykalnie straci swoje właściwości (indukcyjność) i zapewne przestanie pełnić przepisaną rolę.

Co robić? Zapewne intuicja ci odpowiada, że dla bezpieczeństwa trzeba zwiększyć rdzeń. Bardzo słusznie! Ale chyba nie o to chodzi – zgodnie z powszechnymi tendencjami, twoim zadaniem jest zaprojektować cewkę możliwie małą.

Zaprojektować cewkę...

Czyli w zależności od konkretnych potrzeb, musisz dobrać rdzeń, liczbę zwojów, grubość drutu, żeby ci się wszystko zmieściło na karkasie, żeby pracować na początkowym, liniowym odcinku charakterystyki (magnesowania).

Nie jest to wcale takie proste, bo jak skrętnie zaznaczyłem na rysunku 13b, wykres dotyczy rdzenia o konkretnych wymiarach  $S$ ,  $I$  z cewką o liczbie zwojów  $z$ . Jak znam życie, gdy będziesz próbował zaprojektować cewkę, inne będą wartości  $S$ ,  $I$  i  $z$ , a tym samym rysunek 13b okaże się zupełnie bezużyteczny.

Fatalna sprawa! Tu właśnie zaczynają się schody i to dość strome schody.

Co robić?

Uważaj! Jedynym ratunkiem byłoby takie przedstawienie zależności czynnika wymuszającego od czynnika wymuszającego, które charakteryzowałoby tylko właściwości materiału, a w jakiś sposób omijało zależność od powierzchni  $S$ , długości  $I$  i liczby zwojów  $z$ .

Jak to zrobić?

Poszukamy jakiegoś uogólnienia.

Za chwilę dowiesz się, dlaczego w praktyce używa się pojęcia natężenia pola magnetycznego  $H$  i indukcji magnetycznej  $B$ , a znacznie rzadziej strumienia  $\Phi$  i przepływu  $\Theta$ .

## Indukcja magnetyczna

Zacznijmy od wzoru

$$\Phi = \frac{SMM}{R_m} = \frac{I \times z}{\mu \times S}$$

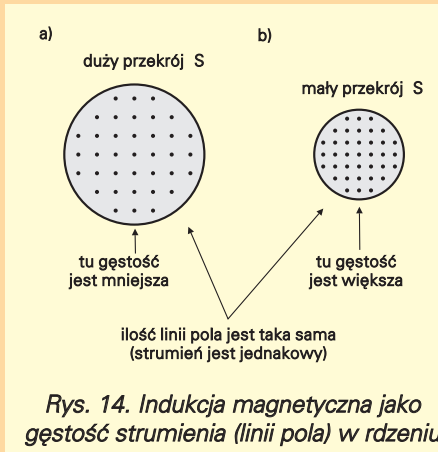
Przeanalizujmy jeszcze raz powyższy wzór i rysunki 9 i 12b (z poprzedniego odcinka).

Spróbujmy pozbyć się zależności od powierzchni  $S$ .

Nic trudnego!

Zauważ, że strumień  $\Phi$  zamyka się w rdzeniu o powierzchni przekroju poprzecznego  $S$ . Inaczej mówiąc, pewna ilość „linii pola” przypada na powierzchnię przekroju poprzecznego rdzenia. Zakładając, że linie te rozmieszczone są w rdzeniu równomiernie, możemy mówić o **gęstości linii pola**, jako ilości linii przypadającej na jednostkę powierzchni.

Pewna ilość linii przy dużej powierzchni przekroju daje małą gęstość. Ta sama ilość linii pola przy małym przekroju rdzenia daje dużą gęstość linii. Pokazałem ci to na **rysunku 14**.



Rys. 14. Indukcja magnetyczna jako gęstość strumienia (linii pola) w rdzeniu

I właściwie dopiero w tym miejscu mamy bardziej precyzyjne odniesienie do analogii z magnesikami i sprężynkami. Stopień odchylenia magnesików to nie tyle ilość linii pola, ale właśnie ich gęstość, czyli ilość linii przypadających na pole przekroju poprzecznego rdzenia. Gdy wszystkie magnesiki ustawią się już równolegle, to uzyskuje się maksymalną dla danego materiału gęstość linii pola. Większej gęstości praktycznie nie da się już osiągnąć.

Nadążasz za mną?

Żebyś się nie zgubił przypominam: o ilości zgromadzonej energii decyduje ilość linii (czyli strumień magnetyczny  $\Phi$ ). Ale dla każdego materiału ferromagnetycznego istnieje pewna granica. Nie cho-

dzi tu jednak o ilość linii, czyli strumień, tylko o wspomnianą gęstość.

Dlaczego gęstość, a nie ilość?

Jeśli będziemy zwiększać pole przekroju poprzecznego rdzenia (czyli w sumie objętość materiału i ilość „elementarnych magnesików”), to możemy uzyskać praktycznie dowolnie duży strumień. Ale my szukamy teraz sposobu scharakteryzowania materiału, a nie konkretnego rdzenia z tego materiału o przekroju  $S$ .

Właśnie po to, by uniezależnić się od powierzchni przekroju trzeba mówić nie o **ilości**, tylko o maksymalnej **gęstości linii** (ilość linii przypadającej na jednostkę powierzchni przekroju poprzecznego  $S$ ).

A jak fachowo nazwać tę gęstość linii?

„Ilość linii” to w rzeczywistości strumień  $\Phi$ . Wprowadzamy oto pojęcie gęstości strumienia, czyli iloraz

$$\frac{\Phi}{S}$$

gdzie  $S$  to oczywiście pole przekroju poprzecznego rdzenia.

Ten iloraz nazywa się fachowo **indukcją magnetyczną i oznacza dużą literą  $B$** .

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

Proste?

O wielkości zwanej indukcją magnetyczną na pewno już kiedyś słyszałeś, tylko prawdopodobnie nie wyobrażałeś jej sobie jako gęstości linii pola magnetycznego. I jeszcze jedno: Nie pomył tej wielkości, zwanej indukcją magnetyczną, z omawianym wcześniej zjawiskiem indukcji elektromagnetycznej, czyli z powstawaniem napięcia w przewodniku (cewce) pod wpływem zmian pola magnetycznego. To są dwie zupełnie odrębne sprawy. Tak samo nie myl indukcji z indukcją.

Jednostką indukcji magnetycznej  $B$  jest tesla – nazwa pochodzi od nazwiska kolejnego znanego odkrywcy. Jeśli jednostką strumienia jest weber – woltosekunda, więc tesla to weber na metr kwadratowy, lub inaczej woltosekunda na metr kwadratowy. Nie przestrasz się – nawet nie musisz tego pamiętać.

Powinieneś natomiast dokładnie, raz na zawsze zrozumieć sens pojęcia indukcji magnetycznej  $B$ .

Powtarzam jeszcze raz: indukcja to stosunek strumienia do powierzchni przekroju obejmującego ten strumień. Śmiało możesz sobie wyobrazić indukcję jako gęstość linii pola. W analogii z magnesikami i sprężynkami stopień uporządkowania magnesików odpowiada właśnie indukcji. Gdy wszystkie magnesiki ustawione są równolegle, gęstość linii, czyli indukcja, jest największa z możli-

wych (większa być nie może). To jest bardzo ważny wniosek praktyczny – dla każdego materiału magnetycznego istnieje jakaś maksymalna indukcja. Nazywa się ją indukcją nasycenia.

Uff! Zapoznałeś się z bardzo ważną wielkością – indukcją magnetyczną.

Jest to ważny parametr. Czego? Ano właśnie – nie konkretnego rdzenia, tylko



materiału, z którego zbudowany jest rdzeń.

Świetnie, o to nam chodziło!

Jeśli znamy indukcję, to dla dowolnego rdzenia możemy zmierzyć jego pole przekroju  $S$  i wtedy bez trudu obliczymy strumień:

$$\Phi = B \times S$$

Nasze nowe pojęcie, indukcja  $B$ , ma oczywiście swój odpowiednik w obwodzie elektrycznym – jest to gęstość prądu. Taki parametr (wyrażany w amperach na metr kwadratowy) jest używany w praktyce, na przykład przez elektryków przy obliczaniu minimalnej grubości przewodów, które mają przewodzić prąd o określonym natężeniu.

Przykładowo, do niektórych zastosowań przyjmuje się dopuszczalną gęstość prądu w przewodzie miedzianym równą  $6A/mm^2$ . Co się stanie po przekroczeniu tej gęstości prądu w przewodzie? W zasadzie niewiele. Chodzi tu przede wszystkim o wzrost temperatury wskutek wydzielania się mocy strat na rezystancji miedzi. Krótko mówiąc, nadmierne zwiększenie gęstości prądu może jedynie doprowadzić do stopienia izolacji i ewentualnie do zwarcia z innym przewodem.

A w obwodzie magnetycznym? Zastanów się sam!

No i do jakiego wniosku doszedłeś?

Tym razem nie chodzi o straty cieplne, tylko o bardzo dziwne zjawisko (nasycenie), które nie występuje w obwodzie elektrycznym. Co by się stało, gdyby takie zjawisko nasycenia występowało w obwodzie elektrycznym?

Usiądź wygodnie. Dziwna rzecz – nie można byłoby wtedy przekroczyć określonej gęstości prądu. Przy próbie zwiększenia prądu w przewodzie, na przykład przez zwiększenie napięcia, prąd by nie wzrastał, bo... rosłaby oporność tego przewodu. Nie byłoby innego sposobu na zwiększenie prądu, jak tylko zwiększenie przekroju (by uzyskać mniejszą gęstość prądu).

Taki właśnie zjawisko ma miejsce w obwodach magnetycznych, a przyczyn możemy upatrywać we wspomnianych wcześniej elementarnych magnesikach.

Mam nadzieję, że zmieści ci się to w głowie.

Piotr Górecki