

Fundamenty Elektroniki

Mam nadzieję, że z pomocą powtórki z poprzedniego listu, uporządkowałeś sobie w głowie wszystkie zagadnienia, które ci podałem wcześniej.

Sporo już wiesz o cewkach, rozumiesz z grubsza, jak działa przetwornica, jesteś świadomy występujących ograniczeń, ale do pełnego zrozumienia działania przetwornic jeszcze trochę wiedzy ci brakuje. Niby znasz podstawowe wzory na obliczanie energii (np. $E = LI^2 / 2$), ale jeszcze nie bardzo wyczuwasz rządzące tu zależności.

Przed miesiącem obiecałem ci, że w miarę bezboleśnie zapoznam cię ze straszidłami w rodzaju μ , H , B , Φ , Ψ i podobnymi. Jeśli się ich okropnie boisz, to zaciśnij zęby i czytaj...

Natężenie pola, indukcja i inne potworki

Żeby bezboleśnie zrozumieć sprawę wspomnianych potworków, które uczniom wkuwającym fizykę i elektrotechnikę śnią się po nocach, znów naszym starym zwyczajem znajdziemy jakąś łatwą do zrozumienia analogię. To za chwilę.

Wcześniej mówiłem ci, że praca przetwornicy indukcyjnej przypomina przelewanie wody za pomocą naczynia. Tym naczyniem jest oczywiście cewka: w jednej fazie cyklu „napelniamy” cewkę jakąś ilością energii, w drugiej przekazujemy energię do obciążenia. Teraz zajmiemy się wyłącznie fazą „napelniania”, czyli gromadzenia energii. Założmy, że nasza cewka ma uzwojenie o zerowej rezystancji – dzięki temu założeniu ominiemy temat strat w uzwojeniu.

Na **rysunku 7a** znajdziesz uproszczony schemat obwodu ładowania. Po zamknięciu wyłącznika przez cewkę zacznie płynąć prąd. Przebieg tego prądu pokazany jest na **rysunku 7b** – podobne rysunki pojawiały się już wcześniej. Żeby dobrać się do interesujących nas wielkości, spróbujemy obliczyć energię, jaka zgromadzi się w cewce przez czas równy t_1 .

Wcześniej podałem ci prosty wzór:

$$E = \frac{LI^2}{2}$$

Na razie zapomnij o tym wzorze. Spróbujemy innej drogi.

Przez cały czas t_1 , do cewki dołączone jest napięcie U_B . W tym czasie prąd wzrasta od zera do wartości I_1 . Jaka jest średnia wartość tego prądu w czasie t_1 ? Oczywiście jest równa połowie prądu maksymalnego I_1 .

$$I_{SR} = \frac{I_1}{2}$$



Przetwornice impulsowe Potworki i straszydła

Zapewne znasz wzór na moc w obwodach elektrycznych:

$$P = U \times I$$

Wiesz także, że energia to moc pomnożona przez czas:

$$E = P \times t$$

Nas interesuje porcja energii, jaka zgromadzi się w naszej cewce w czasie t_1 . Wszystkie dane mamy. Podstawiamy:

$$E = U_B \times I_{SR} \times t_1 = U_B \times \frac{I_1}{2} \times t_1 = \frac{U_B \times t_1 \times I_1}{2}$$

Niby wszystko jasne, ale zastanówmy się nad U_B . W zasadzie jest to napięcie zasilające, napięcie baterii. Ale jak ustaliliśmy wcześniej, przy zmianach prądu w cewce powstaje napięcie samoindukcji. Ponieważ przyjęliśmy, że uzwojenie jest idealne i nie ma na nim żadnego spadku napięcia ani strat, więc przez cały

czas t_1 indukuje się w nim napięcie samoindukcji o wartości... no tak – dokładnie równej wartości napięcia U_B .

To napięcie samoindukcji ma przeciwną biegunowość, niż napięcie U_B . Może to ci się wydaje dziwne, że wypadkowe napięcie jest równe zero, ale właśnie w cewce tak jest. Natomiast w rzeczywistej cewce wartość napięcia samoindukcji jest nieco mniejsza niż U_B , a niezerowa różnica obu tych napięć (oznaczmy ją U_R) zapewnia przepływ prądu przez rezystancję cewki, zgodnie z prawem Ohma:

$$I = \frac{U_R}{R}$$

gdzie R to rezystancja cewki. Jeśli coś ci się tu nie zgadza to przeanalizuj temat samodzielnie. Ta sama zależność daje o sobie znać także w obwodzie, gdzie szeregowo połączysz idealną cewkę i rezystor – napięcie samoindukcji jest mniejsze od napięcia baterii o spadek napięcia na szeregowym rezystorze.

Nie będziemy tego analizować, bo teraz ważny jest dla nas jeden wniosek, że przez cały czas „ładowania” (t_1) napięcie samoindukcji w idealnej cewce musi być równe napięciu baterii U_B .

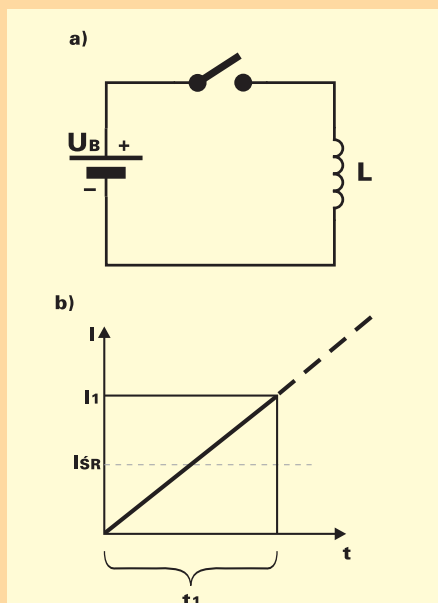
Idziemy dalej.

A czym wyznaczone jest napięcie samoindukcji?

Wiesz, że jest ono proporcjonalne do prędkości zmian siły pola magnetycznego. Ale co dokładnie znaczy określenie „zmiany siły pola magnetycznego”?

Wcześniej mówiliśmy, że możemy to sobie wyobrazić jako stopień uporządkowania elementarnych magnesików. Teraz jednak chcemy przedstawić to za pomocą wzorów i musimy rzecz uściślić.

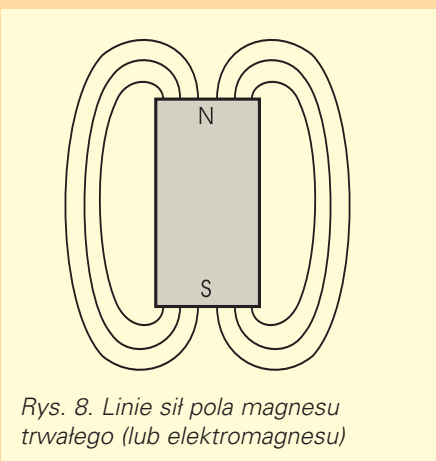
Zanim dojdziemy do sedna sprawy jeszcze jedno unaocznienie.



Rys. 7. Gromadzenie energii w cewce

Linie

Przypomnę ci mianowicie sprawę linii sił pola magnetycznego. W podręcznikach fizyki i elektrotechniki opisuje się pewne doświadczenie. Jeśli w pobliżu magnesu (obojętnie czy jest to magnes stały, czy elektromagnes, a więc cewka przez którą płynie prąd) umieści się kartkę z rozsypanymi opiłkami żelaznymi (stalowymi), to po leciutkim potrząśnięciu kartką, opiłki wyraźnie ustawią się jakby wzdłuż pewnych linii – zobacz **rysunek 8**. Stąd mówi się o liniach sił pola magnetycznego. Nieprzypadkowo pojawia się tu określenie siła, ale my nie będziemy teraz wspominać o żadnych siłach. Trochę uproszczę zagadnienie. Przez jakiś czas potrzebne nam będzie pojęcie samych tych linii, dlatego w artykule wyraziennie będę używał określeń „linie sił pola magnetycznego”, „linie pola magnetycznego”, czy po prostu „linie”.



Rys. 8. Linie sił pola magnesu trwałego (lub elektromagnesu)

Do szczegółów jeszcze powrócimy, ale teraz pojęcie linii pola magnetycznego znakomicie ułatwi nam zrozumienie pewnych zjawisk i wzorów. Na **rysunku 9** pokazałem ci przebieg „linii pola” w kilku różnych rdzeniach.

Jak myślisz, czym różnią się dwa (elektro)magnesy o jednakowym kształcie?

Czy bez zastrzeżeń zgodzisz się z wnioskiem, że silniejszy (elektro)magnes wytwarza po prostu więcej linii pola magnetycznego?

Niech będzie!

A więc przyjmujemy, że ilość tych linii wskazuje na siłę magnesu. Ale jak powiązać te hipotetyczne linie z elementarnymi magnesikami na sprężynkach, o których mówiliśmy wcześniej?

Nic specjalnie trudnego: ilość tych linii wskazuje zapewne zarówno stopień uporządkowania elementarnych magnesików, jak i ich ilość. Niech ci to wystarczy – nie szukaj na razie bliższych zależności, bo jeszcze wszystkiego nie wiesz.

A więc teraz na pewien czas zapomniemy o magnesikach i wprowadzamy nowe, pokrewne pojęcie, równie łatwo wyczuwalne intuicyjnie – pojęcie linii sił pola magnetycznego.

Dlaczego te linie mają kluczową rolę w dalszych rozważaniach?

Jak myślisz, czy linie te mają jakiś związek z tak ważną dla nas ilością magazynowanej energii?

Masz rację! Ilość tych linii odpowiada ilości magazynowanej energii – czym więcej linii sił pola magnetycznego, tym więcej energii zmagazynowane jest w cewce.

Kolejne pytanie: co się będzie działo przy zmianie ilości linii pola magnetycznego?

Słusznie wykombinowałeś, że chodzi o zjawisko samoindukcji. W uzwojeniu cewki będzie się indukować napięcie samoindukcji.

Teraz trudniejsze pytanie: od czego będzie zależeć wartość napięcia indukowanego w cewce?

Pomyśl chwilę.

Jeśli odpowiedziałeś, że od szybkości zmian ilości linii, to trafiłeś w dziesiątkę!

Tak jest w istocie – napięcie jest proporcjonalne do zmian ilości linii w jednostce czasu. Jeśli ilość linii jest stała, żadne napięcie się nie indukuje. To chyba zgadza się z twoją intuicją?

Jeśli tak, to czy zgodzisz się ze mną, że te nasze hipotetyczne linie mają jakiś związek z napięciem i czasem? Z napięciem (bo w cewce indukuje się napięcie) i z czasem (bo wartość napięcia zależy od szybkości zmian, czyli w sumie od czasu). Zapamiętaj ten na pierwszy rzut oka dziwny, ale ciekawy wniosek!

A co będzie się działo, gdy ilość linii się zwiększa, a co, gdy zmniejsza?

Oczywiście zmieni się znak napięcia indukowanego w cewce: raz będzie to napięcie – powiedzmy umownie – dodatnie, a raz ujemne.

A może jeszcze trzeba zapytać, czy linie pola magnetycznego mogą być jakby

dodatnie lub ujemne? Stop! Na razie nie idźmy w tym kierunku dalej, bo ci się wszystko poplącze. Na razie cały czas mówimy o prądzie stałym, płynącym w jednym kierunku, i nie ma potrzeby sięgać dalej, do prądów i pól przemiennych.

W tym miejscu muszę ci zdradzić tajemnicę: może cię rozczaruję, gdy powiem, że tak naprawdę, to nie ma żadnych tajemniczych „linii pola”. Można co prawda mówić o liniach sił i to ma głęboki sens, ale musisz pamiętać, że „linie pola”, czy „ilość linii pola” to tylko pewna łatwa do zrozumienia analogia. Prawdziwi elektronicy, do których i ty od tej chwili będziesz należał, nie mówią o „ilości linii sił pola”, tylko o strumieniu magnetycznym. Strumień magnetyczny oznaczamy dużą grecką literą fi – Φ . Dwa zdania dla bardziej zaawansowanych: jednostką strumienia jest... a jakże – volt razy sekunda czyli woltosekunda zwana również weberem (od nazwiska fizyka Webera). Woltosekunda... trochę to dziwne, ale trudno – przelknij pigułkę i czytaj dalej.

W każdym razie nic nie stoi na przeszkodzie, byś strumień magnetyczny Φ wyobrażał sobie jako ilość hipotetycznych „linii pola”. Tak jest po prostu łatwiej pojąć rzecz intuicyjnie. Wierz mi, że na początku znacznie lepiej jest rozumieć strumień magnetyczny jako ilość hipotetycznych „linii pola”, niż zgodnie z podręcznikami wyobrażać sobie strumień jako przepływ jakiegoś tajemniczego „magnetycznego prądu” (choć pojęcie strumienia magnetycznego jako „prądu magnetycznego” wcale nie jest bez sensu). Niedługo się o tym przekonasz.

Teraz powrócimy do głównego wątku naszych rozważań.

Utknęliśmy na wzorze

$$E = U_B \times t_1 \times \frac{l_1}{2}$$

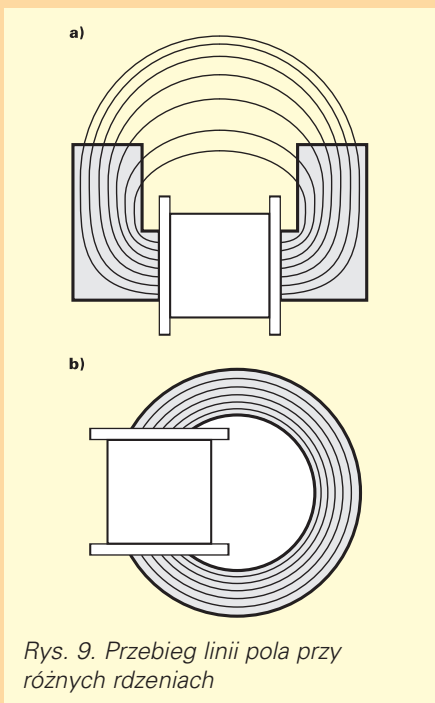
i wniosku, że napięcie samoindukcji w normalnych warunkach musi być równe napięciu U_B . Nie wiedzieliśmy, jak wyrazić wzorem napięcie samoindukcji. Teraz już chyba mamy dość wiadomości.

Oto wzór na napięcie samoindukcji spotykany we wszystkich podręcznikach:

$$u = -z \frac{d\Phi}{dt}$$

Nie bój się tego straszego $d\Phi/dt$. To jest tylko matematyczny zapis oznaczający: szybkość zmian strumienia Φ w czasie (t). Niech cię też nie przeraża znak minus.

Zaskoczeniem może być wystąpienie we wzorze liczby zwojów z . Ale zastanów się – nic w tym dziwnego, bo napięcie indukuje się w każdym pojedynczym zwoju – czym więcej zwojów, tym wyższe napięcie. Najprościej by było, gdybyśmy zawsze mieli do czynienia z jednym zwojem, ale cóż, jest inaczej – stąd to nieszczęsne z .



Rys. 9. Przebieg linii pola przy różnych rdzeniach

Ponieważ ostatni wzór mógł cię trochę przestraszyć, spróbujmy go uprościć.

Jest to wzór ogólny, słuszny na przykład także przy niejednostajnych zmianach strumienia w czasie. Jak pokazuje rysunek 7 w naszym przypadku zmiany prądu są jednostajne, czyli liniowe. Należy się więc spodziewać, że zmiany strumienia też są jednostajne – liniowe. W takim razie zmiany strumienia naszej cewki w czasie t_1 będą wyglądać, jak na **rysunku 10**. Jeśli tak, to napięcie samoindukcji w naszej cewce możemy opisać wzorem:

$$U = - \frac{z \times \Phi}{t_1}$$

Napięcie to musi być równe napięciu baterii, więc:

$$E = - \frac{z \times \Phi}{t_1} \times t_1 \times \frac{l_1}{2}$$

Zauważ, że czas t_1 skróci się, a znak minus możemy spokojnie pominąć, bo wskazuje on tylko, że cewka pobiera energię. Otrzymamy:

$$E = \frac{z \times \Phi \times l_1}{2}$$

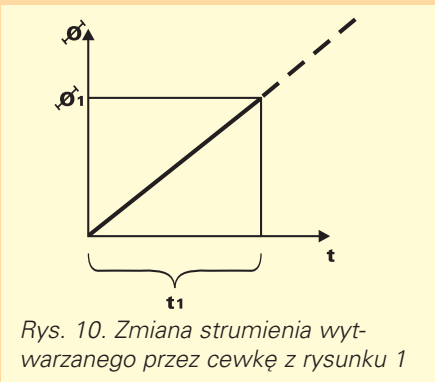
Nieźle nam to poszło! Ale na razie niewiele z tego wzoru wynika. Wróćmy do niego za chwilę.

Na razie przyjmij do wiadomości, że w obliczeniach obwodów magnetycznych używa się pojęcia strumienia skojarzonego. Sam strumień to w naszej analogii, ilość „linii pola” wytworzonych przez cewkę. Strumień skojarzony to wielkość uwzględniająca ilość zwojów tej cewki. Strumień skojarzony oznaczamy dużą grecką literą psi Ψ

$$\Psi = z \times \Phi$$

Jaki jest sens Ψ ? Nie musisz za bardzo wczuwać się w ten problem – jeśli chcesz, to możesz uważać, że chodzi tu o zastąpienie obwodu magnetycznego z cewką o zwojach i strumieniem Φ , obwodem magnetycznym o jednym zwoju i strumieniu Ψ . W każdym razie Ψ to też strumień, tylko jakby współdziałający z cewką „elementarną”, jednozwojową. Dalej się w ten temat nie wglębiaj, bo się beznadziejnie zapłaczesz.

Teraz wracamy do wzoru



Rys. 10. Zmiana strumienia wytwarzanego przez cewkę z rysunku 1

$$E = \frac{z \times \Phi \times l_1}{2}$$

Wszystko byłoby fajnie, ale dalej czegoś nam brak. Nie znamy wzoru na strumień magnetyczny.

Uważaj teraz!

Zapomnij na chwilę o powyższym wzorze na energię i pomyśl.

Skąd w ogóle biorą się linie pola?

Niewątpliwie przyczyną jest przepływ prądu przez uzwojenie cewki (pomijamy magnes trwały, gdzie te linie „po prostu są”).

A od czego twoim zdaniem zależy wielkość powstałego strumienia magnetycznego (ilość linii sił)?

Najprawdopodobniej od natężenia prądu, być może także od ilości zwojów, być może od materiału i wymiarów rdzenia. Być może...

Żeby to zrozumieć, wprowadzimy kolejną łatwą do zrozumienia analogię.

Obwód magnetyczny

Popatrz na **rysunek 11a**. Masz tu beznadziejnie prosty układ elektryczny: bateria o napięciu U i rezystor o wartości R . Oczywiście przez rezystor popłynie prąd o wartości wynikającej z prawa Ohma

$$I = \frac{U}{R}$$

Robimy następny krok. Niech nasza bateria składa się z pewnej liczby ogniw o napięciu U_1 . Przypuśćmy, że tych ogniw jest z . Niech nasz rezystor będzie metalowym, okrągłym prętem o długości l . Pole przekroju naszego pręta wynosi S . Przypuśćmy, że pręt jest wykonany z aluminium.

Co prawda nie mamy podanej rezystancji R , ale możemy ją łatwo obliczyć. Rezystancję pręta (lub drutu) obliczamy z jednego ze znanych wzorów:

$$R = \rho \times \frac{l}{S}$$

$$R = \frac{l}{\gamma \times S}$$

gdzie l – długość przewodnika, S – jego pole przekroju poprzecznego, oraz parametr określający właściwości materiału: ρ – rezystywność, γ – konduktywność ($\gamma = 1/\rho$). Przykładowo dla aluminium rezystywność wynosi $0,0265 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$, co odpowiada konduktywności $38 \text{m}/\Omega \text{mm}^2$.

Możemy skorzystać z pierwszego albo drugiego wzoru, ale jak się za chwilę okaże, do naszej analogii bardziej pasuje ten drugi. (Nie pomyśl się: litera l to „małe el” a nie „duże i”.)

Teraz ważne zdanie:

Mając U_1 , z , l , S oraz γ , możemy obliczyć prąd płynący przez pręt z rysunku 11b (celowo pomijamy przy tym rezystancję przewodów łączących go z baterią).

Prąd ten ma wartość:

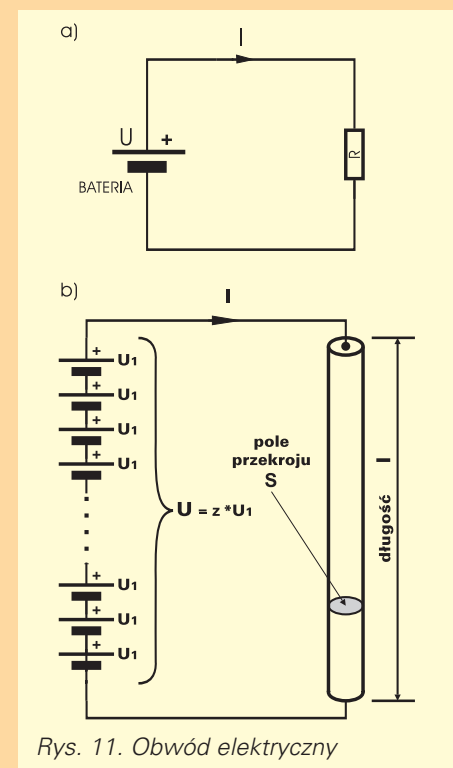
$$I = \frac{U}{R} = \frac{z \times U_1}{\frac{l}{\gamma \times S}} = \frac{z \times U_1 \times \gamma \times S}{l}$$

I co z tego?

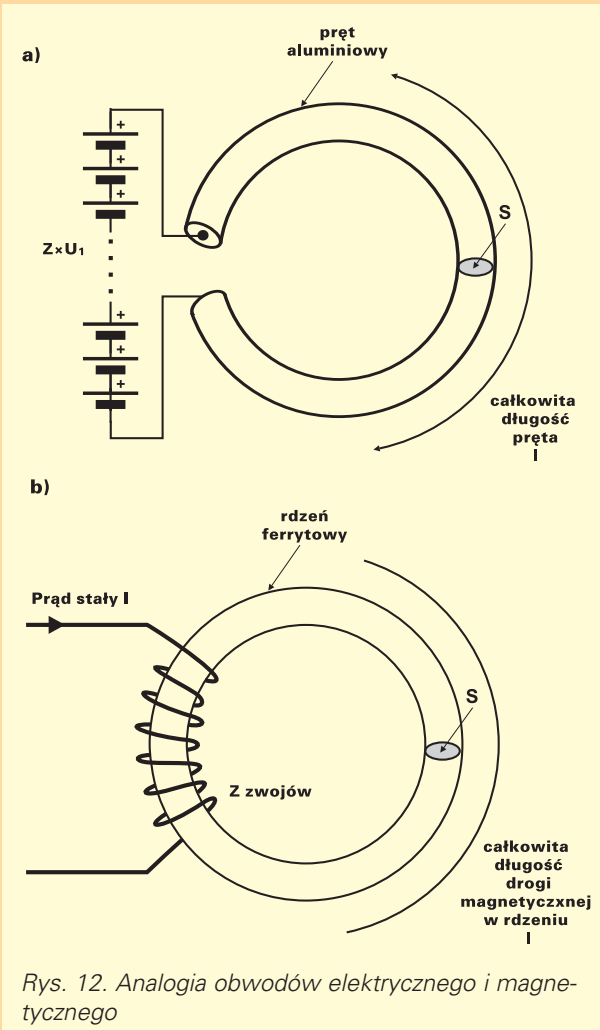
Okazuje się, że powyższy wzór bardzo przypomina zależności w obwodzie magnetycznym. Nie wierzysz?

Na **rysunku 12** masz dwa analogiczne obwody: elektryczny i magnetyczny. Żeby obwód elektryczny bardziej przypominał obwód magnetyczny, zagiąłem nasz aluminiowy pręt na kształt... no właśnie, jak fachowo nazywa się taki kształt? Jest to po prostu toroid. Toroid? Przecież tak nazywamy rdzenie magnetyczne w kształcie pierścienia! Ta rysunku 12b masz cewkę z rdzeniem toroidalnym. Dlaczego toroidalnym? Ponieważ praktycznie wszystkie „linie pola”, czyli wytworzony strumień magnetyczny, zamykają się w rdzeniu toroidalnym. W przypadku rdzenia o innych kształtach, część „linii pola” (strumienia) przebiega nie w rdzeniu, tylko w powietrzu. Na razie nie musisz znać szczegółów, tyle wystarczy – wszystkie wytworzone linie pola przebiegają w rdzeniu. Kropka.

Tym razem w obwodzie z cewką nie ma wyłącznika, nie interesuje nas narastanie prądu, tylko przepływ prądu I o ustalonej, niezmienniej wartości. Podczas przepływu tego prądu ilość „linii pola” w rdzeniu jest stała. Tym samym nie indukuje się żadne napięcie samoindukcji. Dlatego nie zaznaczyłem też baterii, bo napięcie nie ma tu znaczenia (w idealnym przypadku jest równe zeru, a w rzeczywistym jest spadkiem napięcia na rezystancji uzwojenia).



Rys. 11. Obwód elektryczny



Rys. 12. Analogia obwodów elektrycznego i magnetycznego

Wymiary: przekrój S i długość l w obu przypadkach są jednakowe.

Interesuje nas, co dzieje się we wnętrzach obu toroidów.

Niewątpliwie w aluminiowym pręcie z rysunku 12a płynie prąd elektryczny I.

A co płynie toroidalnym pręciem z rysunku 12b?

Na pewno nie prąd elektryczny (bo ten płynie tylko przez uzwojenie cewki). Ten prąd elektryczny powoduje jednak powstanie w rdzeniu linii pola. Czy zgodziłbyś się ze sformułowaniem, że w rdzeniu też coś płynie, i że jest to... prąd magnetyczny?

Czyli... odpowiednikiem prądu w obwodzie elektrycznym jest w obwodzie magnetycznym ilość linii pola, czyli strumień Φ ! Nie będę ci tego udowadniał, musisz mi uwierzyć, że tak jest.

Spróbujmy więc jakoś dopasować wzory dla obu obwodów:

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

$$\Phi = ?$$

Domyślasz się, że we wzorze na strumień powinna pojawić się liczba zwojów z. Na rysunku 12a też masz z – liczbę elementarnych ogniw.

W przypadku obwodu magnetycznego (ściślej rdzenia toroidalnego) sens przekroju S i długości l jest taki sam, jak w obwodzie elektrycznym.

Co jest odpowiednikiem U_1 ? To może być dla ciebie najtrudniejsze do przelknięcia – na rysunku 12b odpowiednikiem napięcia U_1 jest prąd I płynący przez cewkę (przez każdy jej zwoj). Dlaczego prąd?

Pomyśl – w obwodzie elektrycznym czynnikiem wymuszającym jest napięcie. Pod wpływem tego napięcia w obwodzie płynie prąd zależny od oporu stawianego przez materiał. Co jest czynnikiem wymuszającym w obwodzie magnetycznym? Niewątpliwie prąd elektryczny I! Ale nie tylko. Wszystko byłoby fajnie, gdyby cewka składała się z jednego zwoju – wtedy rzeczywiście nic innego nie wchodziłoby w grę.

Nieprzypadkowo wcześniej poświęciłem sporo uwagi ilości zwojów, i nieprzypadkowo podzieliłem źródło napięcia z rysunku 12a na szereg elementarnych źródeł.

Intuicja powinna ci podpowiedzieć, że w obwodzie magnetycznym, tym czynnikiem wymuszającym jest iloczyn prądu i liczby zwojów: $I \times z$.

Wielkość tę nazywamy przepływem i często oznaczamy dużą grecką literą theta (teta) Θ . Jednostką przepływu jest amper, bo liczba zwojów nie ma miana. Podobnie, jak w przypadku strumienia skojarzonego, śmiało możesz sobie wyobrazić, że przepływ to prąd, który płynąc przez jeden zwoj wywoła takie same skutki, jak prąd I płynący przez z zwojów. Nie ma jednak potrzeby, żebyś głębiej wgrzyzał się w to zagadnienie.

Idziemy dalej. A co w obwodzie magnetycznym jest odpowiednikiem γ . Konduktywność (γ) wyraża właściwości materiału jeśli chodzi o skłonność do przewodzenia prądu. A jaki parametr wyraża właściwości materiału pod względem magnetycznym? Na pewno jest taki parametr. Nazywa się go przenikalnością magnetyczną i oznacza małą grecką literą mi – μ . Na razie nie musisz znać szczegółów na temat przenikalności.

A więc:

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

Świetnie!

W przypadku obwodu elektrycznego z rys. 12a zaczęliśmy od prawa Ohma wyrażonego wzorem:

$$I = \frac{U}{R}$$

Pod wpływem czynnika wymuszającego $U = z \times U_1$ w rezystancji R płynie prąd I.

Czy w obwodzie magnetycznym też można mówić o podobnej zależności?

Zauważ, że możemy trochę inaczej zapisać nasz wzór na strumień magnetyczny tak, by oddzielić czynnik wymuszający $I \times z$:

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

Nie gwałcąc żadnych zasad matematyki możemy ten wzór zapisać jeszcze inaczej:

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

I oto masz przed sobą wzór wyrażający prawo Ohma dla obwodu magnetycznego! Masz pełną analogię obwodów z rysunku 12!

Czynnik wymuszający – przepływ $I \times z$ nazywamy napięciem magnetycznym lub siłą magnetomotoryczną, natomiast wielkość $\frac{l}{\mu} \times S$ to opór magnetyczny, zwany reluktancją.

Napiszmy więc prawo Ohma dla obwodu magnetycznego:

$$\Phi = \frac{SMM}{Rm}$$

gdzie SMM = $I \times z$ to siła magnetomotoryczna (napięcie magnetyczne), natomiast $Rm = \frac{l}{\mu} \times S$ to opór magnetyczny (reluktancja).

Ciekawe, prawda?

Czy nadążasz za mną? A może teraz dopiero zaczynasz mieć młyn w głowie i zastanawiasz się, po co te całe wywoły? Bo niby co wspólnego ma prąd pomnożony przez liczbę zwojów z rysunku 12b z napięciem z rysunku 12a?

Jeśli jesteś bardzo młody, to może myślisz, że ta cała żonglerka wzorami, to jakieś hochsztaplerskie sztuczki. Nie! Wszystko to się zgadza z rzeczywistością. Powiem więcej – dopiero te ostatnie wzory są ściśle i nie ma tu przybliżeń, uproszczeń, tajemniczych magnesików, „linii pola”, ani żadnych innych analogii.

Wszystko to pięknie, ale właśnie w tym miejscu muszę cię zmartwić: te wzory na prawo Ohma dla obwodu elektrycznego są może piękne, ale w praktyce wcale nie będziesz ich używał.

Musiłem jednak ci to przedstawić, bo po pierwsze pokazuje to swego rodzaju jedność elektroniki, a po drugie potrzebne ci jest do zrozumienia sensu kolejnych wielkości używanych przy obliczaniu obwodów magnetycznych. Zajmiemy się tym za miesiąc.

Piotr Górecki

Zanim jednak zajmiemy się indukcją magnetyczną i natężeniem pola magnetycznego, wróćmy do wzoru na energię, na którym wcześniej utknęliśmy:

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

Teraz już wiemy, że:

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

Podstawiamy do pierwszego wzoru:

$$E = z \times \frac{\frac{z \times I \times \mu \times S}{l} \times I_1}{2}$$

Spokojnie! Nie bój się! Zauważ, że prąd I ze wzoru na strumień to prąd I_1 . W cewce płynie tylko jeden prąd (ściślej biorąc chodzi o chwilową wartość prądu na koniec czasu t_{12} rysunku 7). Możemy więc uporządkować równanie:

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

Równanie to można zapisać troszeczkę inaczej:

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

Przyjrzyj się 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, tak strasznie cię męczyłem? Skądże!

Masz teraz 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 μ – czym większa przenikalność, tym większa indukcyjność.

A więc wygląda na to, że dobra cewka powinna mieć możliwie gruby i „pękaty” rdzeń (duża wartość S , mała l) wykonany

z materiału o dużej przenikalności magnetycznej μ .

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. Jeśli nie wiesz, to rozwiń poniższy wzór:

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

W praktyce wzór taki nie będzie ci potrzebny i 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

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

Ta omosekunda dodatkowo maści początkującym obraz sprawy, sugerując, że henr ma jakiś związek z omem.

Nie daj się na to nabrać – nie mieszaj tu żadnej rezystancji. Zależności i związki związane z magnetyzmem są rzeczywiście zadziwiające. Nieprzypadkowo wspomniałem ci wcześniej, że strumień Φ ma związek z napięciem i czasem – wymiarem strumienia jest voltosekunda (Vs), zwana również weberem.

Dziwne, prawda? Co to jest voltosekunda, jak to rozumieć? Nie przejmuj się tym (nawet jeśli jesteś nowicjuszem i nie bardzo wiesz, co to jest ten wymiar)! Wcale nie musisz do końca rozumieć tych spraw.

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 tu być.

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

Zróbmy więc kolejny krok – spróbujmy rozprawić się z przenikalnością.

Wróć do rysunku 12. Jeszcze raz wróćmy do wzorów

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

$$F = \frac{SMM}{Rm} = \frac{l \times z}{\frac{l}{\mu} \times S}$$

W obwodzie elektrycznym wraz ze wzrostem napięcia ($U = z \times U_1$), proporcjonalnie wzrasta prąd I . Zaznaczmy 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 (bo S i l są niezmiennymi). Wartość jest stała.

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

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

Analogicznie, jak na poprzednim rysunku, przedstawiona linia reprezentuje rezystancję magnetyczną, w tym także właściwości materiału, czyli przenikalność μ . Ściślej biorąc, o wartości μ dla danego prądu świadczy nachylenie linii i w punkcie odpowiadającym temu prądowi.

Co bardzo ważne, wartość μ zależy od wartości prądu. Jak widzisz, przy nadmiernym wzroście prądu (ściślej – przepływu), linia przebiega bardzo płasko, czyli przenikalność radykalnie się zmniejsza (oczywiście zmniejsza się także indukcyjność cewki).

Listy od Piotra

Jeśli chcesz zaprojektować cewkę do jakiegoś konkretnego zastosowania, musisz zmieścić się w początkowym, stromym obszarze charakterystyki. Nie jest to takie proste, bo jak skrętnie zaznaczyłem na rysunku 13b, wykres dotyczy rdzenia o konkretnych wymiarach S , l z cewką o liczbie zwojów z . Jak znam życie, gdy będziesz próbował zaprojektować cewkę, inne będą wartości S , l i z , a tym samym rysunek 13b okaże się zupełnie bezużyteczny.

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

Co robić?

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

Jak to zrobić?

Zajmiemy się tym za miesiąc.

Piotr Górecki

