

# Fundamenty Elektroniki

Przed dwoma miesiącami katowałem cię liczbami zespolonymi. Wiem, że jest to temat zniechęcający przez uczniów i studentów. Jeśli akurat jesteś uczniem lub studentem, nie ma rady, musisz niestety przebić się przez to zagadnienie. Jeśli nie, dobrze byłoby choć z grubsza rozumieć ten temat. Jeśli zechcesz, jeszcze do wykorzystania liczb zespolonych w elektronice powrócimy (napisz do mnie, jeśli masz jakieś spostrzeżenia na ten temat), a dziś sięgamy do rozpoczętego przed kilku miesiącami tematu cewek.

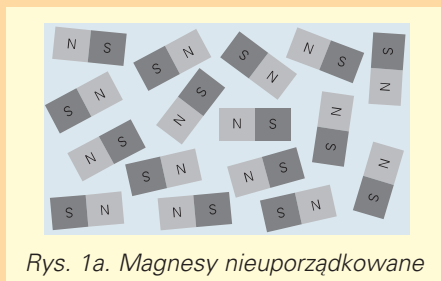
Temat cewek rozciągnął się nam jak dobrej jakości guma do żucia. W niniejszym materiale podejmiemy do cewek trochę z innej strony. Zajmiemy się pewnym ważnym wycinkiem szerokiego zagadnienia – spróbuję łagodnie wprowadzić cię w temat zasilaczy i przetwornic impulsowych – temat, który powszechnie uważany jest za potwornie trudny.

Obiecuję, że będę w miarę możliwości unikał wzorów, a maksymalnie opierał się na intuicji. Schematy i niezbędne wzory podam ci później.

Na początek spróbuję zapoznać cię z ogólnym zarysem zagadnienia i przypomnieć uproszczony model budowy materiału (ferro)magnetycznego. Zaczynamy.

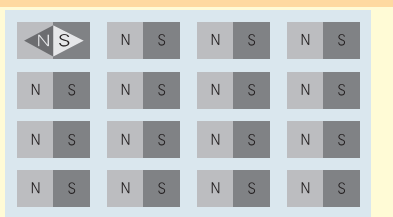
## Magnesiki i sprężynki

Zazwyczaj wyobrażamy sobie, że materiał magnetyczny rdzenia składa się z elementarnych, miniaturowych magnesików. W stanie spoczynku te elementarne magnesiki są nieuporządkowane, ich kierunki są przypadkowe, a ich pola się znoszą – zobacz **rysunek 1a**. W konsekwencji materiał nie ma właściwości magnesu trwałego, czyli nie wytwarza pola magnetycznego i nie przyciąga przedmiotów metalowych.



Rys. 1a. Magnesiki nieuporządkowane

Jeśli jednak taki rdzeń umieścimy w polu magnetycznym (wytwarzanym przez magnes trwały, albo przez cewkę przez którą płynie prąd), to elementarne magnesiki rdzenia ustawią się w jednym kierunku, powiedzmy wzdłuż linii sił pola magnetycznego – zobacz **rysunek 1b**.



Rys. 1b. Magnesiki uporządkowane

## Przetwornice impulsowe Znowu o cewkach

Chciałbym ci teraz zwrócić uwagę na ważną sprawę, którą musisz przyjąć bez dowodu czy uzasadnienia.

Może będziesz zaskoczony takim ujęciem, ale na razie nie protestuj – takie podejście znakomicie uprości nam pewne dalsze rozważania.

Uważaj! Przepływ prądu elektrycznego przez uzwojenie cewki nie jest sam w sobie źródłem pola magnetycznego. Jest to tylko jakby czynnik pośredni, wymuszający. Natomiast „prawdziwym” źródłem pola są elementarne magnesiki rdzenia. Pola wytwarzane przez poszczególne magnesiki się zawsze dodają. Gdy magnesiki ustawione są chaotycznie, czyli w różnych kierunkach, ich elementarne pola się znoszą. Gdy są uporządkowane w jednym kierunku – pole jest wyraźne i silne. Stopień magnetyzacji materiału jest więc miarą uporządkowania magnesików.

Po zaniku zewnętrznego pola magnetycznego zdecydowana większość elementarnych magnesików znów powróci do wcześniejszych przypadkowych pozycji, niektóre jednak nie wrócą dokładnie do pozycji początkowej, tylko pozostaną w pozycjach wymuszonych wcześniej przez to pole magnetyczne. W efekcie po jednokrotnym umieszczeniu w silnym po-

lu magnetycznym materiał zostanie częściowo, w niewielkim stopniu namagnesowany. Tak zachowują się materiały używane do budowy rdzeni cewek i dławików – są to tak zwane materiały magnetycznie miękkie. Istnieją też materiały magnetycznie twarde – po silnym namagnesowaniu utrzymują one stan uporządkowania magnesików – są używane do wytwarzania magnesów trwałych. Teraz przy okazji omawiania zasilaczy impulsowych, interesują nas jedynie materiały magnetycznie miękkie.

Oczywiście w magnecie trwałym, te elementarne magnesiki są na stałe uporządkowane – wszystkie ustawione są w jednym kierunku, jak na rysunku 1b. Pola wytwarzane przez te magnesiki sumują się, dając w efekcie stałe pole magnetyczne. Magnes trwały przyciąga przedmioty metalowe i przyciąga lub odpycha inne magnesy, zależnie od wzajemnego ustawienia ich biegunów.

Teraz pora, bym ci przedstawił prosty model budowy materiału magnetycznego, ułatwiający zrozumienie sprawy.

Mówiąc wielkim uproszczeniem, ale wystarczającym dla naszych rozważań, możemy sobie wyobrazić, że każdy elementarny magnesik jest „zamocowany” w materiale magnetycznym za pomocą maleńkiej sprężynki, a ponadto przy jego obracaniu występuje tarcie. Ilustruje to **rysunek 2a**.

Jeśli materiał umieścimy w polu magnetycznym, którego „siła” będzie powoli wzrastać, to nieuporządkowane, chaotycznie skierowane magnesiki zaczną powoli ustawiać się zgodnie z kierunkiem linii sił wymuszającego pola magnetycznego. W końcu, przy odpowiednio silnym

polu magnetycznym, wszystkie magnesiki ustawią się zgodnie w jednym kierunku (zobacz rysunki 1b i 2b). Ponieważ wszystkie magnesiki ustawią się równoległe do siebie, dalsze zwiększanie siły (natężenia) pola nic już nie zmieni – materiał dojdzie do tak zwanego stanu nasycenia.

Ponieważ nasze elementarne magnesiki zamocowane są na sprężynkach, do ich odchylenia od pierwotnego, przypadkowego położenia, potrzebna jest pewna ilość energii. Energia ta jest magazynowana w napiętych sprężynkach, a potem może być oddawana.

Wspomniałem, że przy obracaniu naszych magnesików występuje niewielkie tarcie. A jak wiadomo, przy tarcu praca zamienia się na ciepło. Wszelkie zmiany pola magnetycznego i ustawienia magnesików wiążą się więc ze stratami energii i w postaci ciepła. Za chwilę zajmiemy się tym bliżej.

Ale najpierw powróćmy do magazynowania energii.

Jeszcze raz o magazynowaniu energii. Wiesz już, że zarówno kondensator i cewka mogą magazynować energię. Tłumaczyłem ci to w swoich listach z grudnia 96 i stycznia 97. Dziś spróbujemy dokładniej odpowiedzieć na pytanie:

Ile energii można tam zmagazynować? Jaki występują przy tym ograniczenia?

W przypadku kondensatora sprawa jest w miarę prosta. Wzór

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

nie pozostawia wątpliwości. Decyduje o tym pojemność kondensatora i napięcie.

Oczywiście mówimy tu o napięciu stałym.

Jak zapewne pamiętasz z innego książkowego wzoru, pojemność jest proporcjonalna do powierzchni okładzin, i do przenikalności dielektryka, a odwrotnie proporcjonalna do odległości między okładkami, czyli grubości dielektryka. Dla uzyskania dużej pojemności (i dużej energii magazynowanej) należałoby jak najbardziej zmniejszać grubość dielektryka.

Stop! Właśnie to jest bariera!

Czym cieńszy dielektryk, tym mniej odporny na przebicie (zniszczenie).

Dopuszczalna, bezpieczna wielkość napięcia wyznaczona jest więc grubością dielektryka – czym grubszy dielektryk, tym wytrzyma wyższe napięcie, ale jednocześnie pojemność kondensatora będzie mała.

O maksymalnej ilości energii, jaką można zgromadzić w kondensatorze decyduje więc w sumie dielektryk.

Przy obecnej tendencji do miniaturyzacji chcielibyśmy magazynować jak największą energię w kondensatorach o jak najmniejszych wymiarach. Niestety, jak już chyba czujesz, występują tu istotne ograniczenia, których nie da się ominąć. Ponieważ występują tu przeciwstawne wymagania, nie ma rozwiązania idealnego.

Nie trzeba tu wchodzić w szczegóły, chodzi o wyciągnięcie z tej analogii i pewnego wniosku, który przyda się nam przy analizie właściwości cewki. Wyciągnijmy ten bardzo prosty (może nawet zbyt uproszczony) wniosek:

o maksymalnej ilości energii zgromadzonej w kondensatorze decyduje wielkość tego kondensatora, a w sumie ilość i właściwości dielektryka zawartego w tym kondensatorze.

Może jesteś zaskoczony takim sformułowaniem! Nie protestuj jednak, prześl myśl to dokładnie i czytaj dalej.

Bierzemy teraz na warsztat cewkę, zbudowaną z pewnej ilości zwojów drutu, nawiniętych na jakimś rdzeniu.

Jak ma się sprawa z energią zgromadzoną w cewce?

Wzór:

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

pokazuje, że decyduje o tym zarówno indukcyjność cewki, jak i wartość prądu (oczywiście znów chodzi o prąd stały (lub o szczytową wartość prądu zmiennego)).

Czy ta sytuacja nie jest lepsza, niż w przypadku kondensatora?

Tam nie można było nadmiernie zwiększać napięcia, bo dielektryk uległ w końcu przebiciu. A w cewce? Chyba można dowolnie zwiększać wartość prądu? Co najwyżej trzeba będzie nawinąć cewkę grubszym drutem, żeby nie było nadmiernych strat cieplnych wynikających z przepływu prądu przez rezystancję drutu.

I tu mam dla ciebie pytanie testowe: jak sądzisz, czy można bez ograniczeń zwiększać prąd w cewce?

Pomyśl uważnie!

Jeśli odpowiedziałeś, że nie można, masz rację!

Wytłumacz mi teraz, dlaczego nie można zwiększać prądu bez ograniczeń?

Wiesz już?

Jeśli odpowiedziałeś: prądu nie można zwiększać, bo...

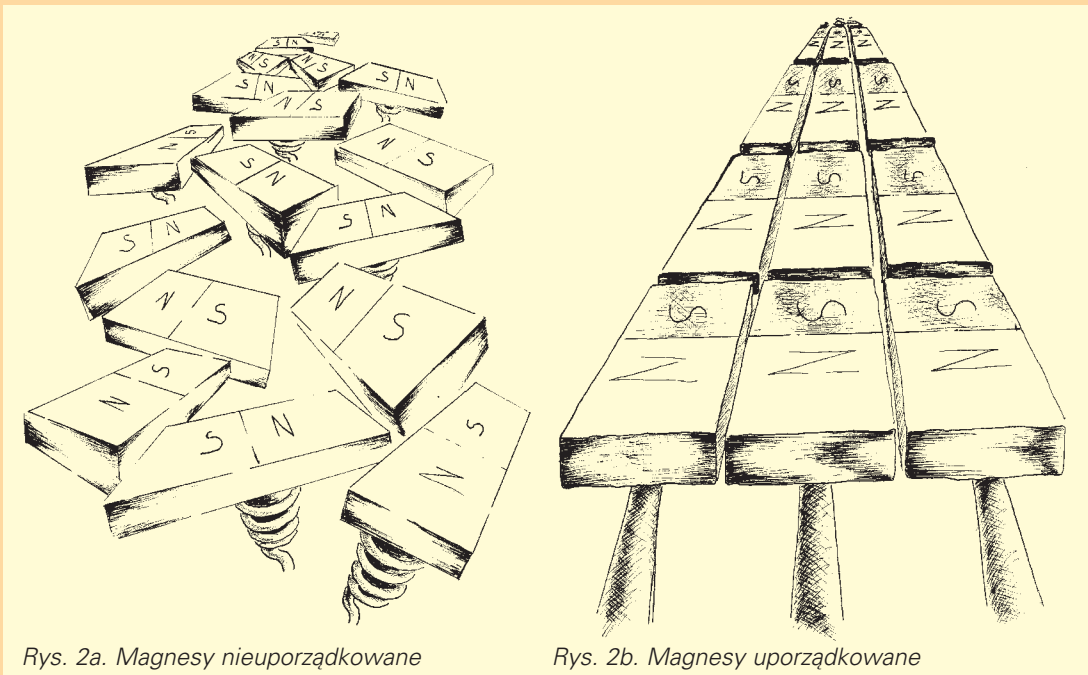
rdzeń cewki ulegnie uszkodzeniu – trafięś kulą w płot!

Rzeczywiście, między kondensatorami i cewkami istnieją liczne podobieństwa, ale niestety nie

chodzi tu o uszkodzenie rdzenia! W przypadku przepływu przez cewkę prądu stałego, rdzeń raczej ani nie wybuchnie, ani nie pęknie, ani się nie rozsypie..

No to jak jest z tym ograniczeniem? Pomyśl o naszych magnesikach i sprężynkach!

No tak, nie można zapominać, co dzieje się w rdzeniu. Wzór wzorem, ale w naszym modelu energia jest przecież magazynowana „w sprężynkach”. Zależnie od tego, czy sprężynki są delikatne, czy silne, w danym rdzeniu można zmagazynować więcej lub mniej energii.



Rys. 2a. Magnesiki nieuporządkowane

Rys. 2b. Magnesiki uporządkowane



Tu widzisz jak na dłoni, że rzeczywiście, maksymalna ilość energii, jaką może zmagazynować dana cewka, zależy właśnie od parametrów i objętości rdzenia (a właściwie od ilości i siły „sprężynek”)!

Nie masz wątpliwości, że ta ilość energii zależy od właściwości rdzenia (pewnie słyszałeś już o takim parametrze, jak przenikalność magnetyczna rdzenia), ale zwróć uwagę, że zależy także właśnie od ilości sprężynek, czyli w sumie od objętości rdzenia.

A wspomniana przenikalność (oznaczana zwykle literką  $\mu$ ) jest po prostu miarą siły owych sprężynek: duża przenikalność – delikatne sprężynki, mała przenikalność – silne sprężynki.

Nie masz chyba wątpliwości, że ten wniosek są prawdziwe. Może mi nawet zarzucisz, że niepotrzebnie nudzę, bo już to dawno wiedziałeś.

Nie denerwuj się. Właśnie tu tkwi istota sprawy i klucz do zrozumienia działania zasilaczy i przetwornic impulsowych.

Wniosek jest istotnie prosty, ale w rzeczywistości podsumowuje on wyliczenia, jakie musieliśmy przeprowadzić za pomocą licznych wzorów, których sensu, jak znam życie, zupełnie nie rozumiesz. Zauważ, że stosując nasze proste rozumowanie, nie musieliśmy wgłębiać się w zawiłości obliczeniowe. W przeciwnym wypadku musieliśmy obliczać indukcyjność, natężenie pola magnetycznego, indukcję i strumień magnetyczny, żeby obliczyć prąd maksymalny i gromadzoną maksymalną energię dla cewek o różnej liczbie zwojów.

Do wspomnianych wielkości może wrócimy, ale najpierw chciałbym przygotować grunt twojego umysłu na ich przyjęcie, zrozumienie i zaakceptowanie. To trochę potrwa – okaż cierpliwość.

Na razie podsumujmy:

Teraz wreszcie możesz sobie wyobrazić, co to właściwie znaczy, że w cewce magazynowana jest energia. Energia w rzeczywistości jest magazynowana nie w uzwojeniu, tylko w rdzeniu (w sprężynkach).

Wychodzi na to, że uzwojenie cewki pełni tylko rolę pomocniczą – mówiąc w uproszczeniu służy ono do zamiany prądu na pole magnetyczne i na odwrót. Zajmiemy się tym za chwilę nieco bliżej.

Zauważ, że na razie nie zajmujemy się bliżej indukcyjnością – nie jest to nam potrzebne. Z dotychczasowych rozważań wynika, że wartość indukcyjności ma znaczenie drugorzędne – intuicja podpowiada, że o maksymalnej ilości gromadzonej w cewce energii decyduje wyłączenie rdzeń.

Jeśli bliżej przyjrzyś się wzorowi

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

już na pierwszy rzut oka znajdziesz potwierdzenie wysnuwanych wniosków. Przecież już na tak zwane wycucie wiadać, że jeśli zwiększysz liczbę zwojów, to siłę potrzebną do „wyprostowania” wszystkich magnesików uzyskasz przy mniejszym prądzie. Z kolei jeśli liczba zwojów, a tym samym indukcyjność cewki będzie mała, to wyprostowanie „magnesików” uzyskasz dopiero przy dużym prądzie.

Jeśli do tego przypomnisz sobie jeszcze szkolny wzór na indukcyjność cewki, gdzie przecież liczba zwojów występuje w drugiej potęgce – powyższe wnioski staną się jeszcze bardziej wiarygodne.

Zapamiętaj więc:

O maksymalnej ilości energii, jaką można zgromadzić w danej cewce decyduje rdzeń: jego przenikalność i objętość.

Teraz zrobimy następny krok w stronę zrozumienia pracy przetwornic i zasilaczy impulsowych. Przypomnę ci zjawisko o fundamentalnym znaczeniu dla elektrotechniki i elektroniki.

### Napięcia w cewce

Dotychczasowe rozważania nie budzą chyba twoich wątpliwości.

Teraz jednak wróćmy do pytania, co dzieje się w cewce przy zmianach prądu. Przypuszczam, że nigdy nie byłeś i nie jesteś miłośnikiem analiz i obliczeń obwodów magnetycznych. Szczerze mówiąc, ja też, jeśli mogę, to unikam cewek.

Ale o paru podstawowych sprawach musimy pamiętać.

Jeśli przez cewkę płynie prąd stały, elementarne „magnesiki” ustawiają się w jednym kierunku i całość zachowuje się dokładnie tak, jak magnes trwały – wytwarza pole magnetyczne. Możesz to sprawdzić praktycznie, bo zjawisko wykorzystane jest do budowy elektromagnesów.

Chyba jest dla ciebie jasne, że kluczowe znaczenie ma tu prąd płynący przez cewkę: czym większe natężenie prądu, tym bardziej uporządkowane są elementarne magnesiki i tym silniejsze jest wytwarzane przez nie pole magnetyczne.

A napięcie zasilające cewkę?

O, to zależy! Wyraźnie rozdzielmy dwa przypadki:

- sytuacja tuż po włączeniu zasilania, gdy prąd zaczyna rosnąć,
- sytuacja w stanie ustalonym, gdy cewka bardzo długo pozostaje pod napięciem.

Najpierw rozprawimy się z tym drugim przypadkiem.

Może cię tu zaskoczę: w zasadzie w stanie ustalonym, napięcie zasilające zupełnie nie powinno nas obchodzić! Skup się! Mówimy o stanie ustalonym. Napięcie jest potrzebne tylko ze względu

na występowanie rezystancji drutu uzwojenia. Uważaj! Jeśli udałoby się stworzyć uzwojenie o zerowej rezystancji (czyli nie występowałyby tam żadne straty energii), wtedy można wykonać coś niesamowitego: wpuścilibyśmy do tego uzwojenia prąd, żeby sobie w kółko w nieskończoność krążył w uzwojeniu i uzyskalibyśmy elektromagnes nie potrzebujący zasilania z wewnątrz! Można powiedzieć, że byłby to nawet swego rodzaju magnes trwały.

Powiem więcej! Coś takiego robi się dziś w praktyce! Czy słyszałeś o nadprzewodzących elektromagnesach (stosowanych na przykład w ośrodkach badawczych fizyki jądrowej do budowy największych akceleratorów)? To jest właśnie to!

Nie myśl jednak, że magnes z nadprzewodzącym uzwojeniem to jakieś perpetuum mobile, gdzie coś uzyskuje się za darmo. Absolutnie nie! Na pewno nie uzyskuje się tam „energii z niczego”. Zastosowanie nadprzewodzącego uzwojenia umożliwia jedynie osiągnięcie bardzo dużej wartości prądu, bez szkodliwych efektów ubocznych w postaci wydzielania się ogromnych ilości ciepła strat uzwojenia.

Nie musisz wchodzić w szczegóły, utrwal tylko sobie w głowie nieco uproszczony wniosek: (stałe) pole magnetyczne w rdzeniu cewki zależy jedynie od wartości płynącego prądu, natomiast napięcie zasilania cewki nie gra przy tym żadnej roli.

Czy aby na pewno? Na pewno! Tyle, że dotyczy to warunków statycznych, czyli prądu stałego, niezmiennego w czasie.

Może jeszcze zapytasz: a elektromagnes? Przecież musi on być zasilany jakimś napięciem stałym!

Nie marudź! Z tego co ci do tej pory powiedziałem powinieneś sam wyluskać odpowiedź, jak to jest z elektromagnesem. Przecież to jest proste: żeby ustawić równolegle wszystkie elementarne magnesiki w rdzeniu elektromagnesu, musisz przez uzwojenie przepuścić określony prąd. Musisz dobrać liczbę zwojów i wartość prądu. Klasyczny elektromagnes rzeczywiście zasilany jest napięciem stałym i o wartości prądu będzie decydować rezystancja uzwojenia. Najprościej mówiąc, jeśli użyjesz grubego drutu (i na karkasie zmieści się stosunkowo niewiele zwojów), otrzymasz elektromagnes do pracy przy małym napięciu zasilania – już przy małym napięciu popłynie duży prąd, który wytworzy odpowiednio silne pole magnetyczne. Z kolei, jeśli zapełnisz karkas cienkim drutem, da ci to wiele zwojów i rezystancja uzwojenia będzie znaczna. Taki elektromagnes zasilisz wyższym napięciem.

Ostatnie rozważania są bardzo uproszczone (może nawet za bardzo), ale chcę ci pokazać, że także w przypadku elektromagnesu właściwości magnetyczne określone są jedynie przez wartość prądu i ilość zwojów, natomiast napięcie zasilania związane jest jedynie z rezystancją uzwojenia i potrzebą wymuszenia w uzwojeniu potrzebnego prądu.

Zapamiętaj więc raz na zawsze, że wartość prądu elektromagnesu jest wyznaczona napięciem zasilania i rezystancją uzwojenia. Nie masz też chyba wątpliwości, że jedynie w pierwszej chwili po włączeniu elektromagnesu, część doprowadzonej mocy służy do namagnesowania rdzenia, czyli do równoległego ustawienia elementarnych magnesików. Potem, gdy to już nastąpi, cała moc pobierana przez działający elektromagnes ( $P = U_{zas} \times I$ ) jest tracona w postaci ciepła w rezystancji uzwojenia. Moc ta jest po prostu marnowana! W tym miejscu jeszcze raz wspomnę ci o elektromagnesach z uzwojeniem o zerowej rezystancji, zbudowanym z nadprzewodnika – tam dzięki zerowej rezystancji uzwojenia nie występują straty mocy i nie trzeba takiego elektromagnesu ciągle zasilać – wystarczy jednorazowo wzbudzić prąd w zamkniętym uzwojeniu.

W praktyce praktycznie nigdy cewka nie pracuje (nie powinna pracować) w stanie ustalonym czyli stanie nasycenia – jedynym wyjątkiem są elektromagnesy na prąd stały. Choć więc napięcie zasilające w stanie ustalonym w zasadzie nie powinno nas interesować, powinienieś rozumieć tę sprawę. Ale to nie wszystko o napięciach w cewce.

## Zjawisko samoindukcji

Przypomnijmy teraz pana Faradaya, który w pierwszej połowie XIX wieku zajmował się elektrycznością i magnetyzmem. Porozmawiajmy o zjawisku, zwanym indukcją elektromagnetyczną.

Właśnie Michael Faraday, jeden z najgenialniejszych uczonych w historii ludzkości, odkrył prawo rządzące zjawiskiem indukcji elektromagnetycznej. Uważaj teraz – jak cię znam, nie pamiętasz tego ze szkoły: jeśli w zmiennym polu magnetycznym umieścimy przewód lub lepiej cewkę, to w tej cewce zaindukuje się napięcie (i popłynie prąd jeśli obwód będzie zamknięty).

Mamy tu dwie wielkości:  
– zmianę „siły” pola magnetycznego w czasie  
– powstające w cewce napięcie.

Faraday ustalił, że napięcie, a ściślej siła elektromotoryczna, powstająca w obwodzie, jest wprost proporcjonalna do

szybkości zmian strumienia magnetycznego, związanego z tym obwodem.

Skoncentruj się! Mówiąc ogólnie, to zmiany pola magnetycznego, a nie sama obecność tego pola, wywołują powstawanie tego napięcia.

Ale przed chwilą wkładałem ci do głowy, że napięcie w cewce nie gra żadnej roli – czy tu nie ma sprzeczności?

Nie ma sprzeczności – o napięciu indukowanym, czyli powstającym w cewce mówimy jedynie w przypadku zmian pola magnetycznego. Przy niezmiennym polu magnetycznym żadne napięcie się nie indukuje.

Ale dlaczego tak szeroko zacząłem ci tłumaczyć sprawę napięć w cewce?

Zaraz się przekonasz!

W przypadku elektromagnesu, rezystancja jego cewki jest tak dobrana, by przy danym napięciu zasilającym przez uzwojenie popłynął taki prąd, który ustawi równoległe wszystkie elementarne magnesiki. Nie ma potrzeby, by ten prąd był większy – zwiększanie prądu już nic nie da, bo wszystkie magnesiki są już ustawione. A ponadto i tak cała moc dostarczana do elektromagnesu jest marnowana w postaci ciepła wydzielającego się w rezystancji uzwojenia.

Inaczej jest w przypadku cewki przeznaczonej do zasilacza impulsowego (przetwornicy). Tu chcielibyśmy zmagać się z cewką jak najwięcej energii, ale jednocześnie chcielibyśmy zminimalizować straty mocy w rezystancji uzwojenia.

Nic trudnego! Wystarczy nawinąć naszą cewkę odpowiednio grubym drutem. To oczywiście zwiększy wymiary (objętość) cewki, ale za to unikniemy nadmiernych strat mocy w uzwojeniu.

Wiesz już, że nasza cewka do przetwornicy powinna mieć niewielką rezystancję.

Teraz jeszcze raz zastanowimy się wspólnie, co się stanie, gdy do naszej rzeczywistej cewki z rdzeniem dołączymy napięcie zasilające.

W EdW 1/97 na stronie 59 na rysunkach 11 i 12 (przy okazji: na rysunku 11 powinno być  $U = \text{const}$ ) pokazałem ci, jak to wyglądałoby w przypadku cewki idealnej. Teraz mówimy o rzeczywistej cewce z rdzeniem.

Do tej cewki dołączamy jakieś napięcie zasilające  $U$ . Rezystancja uzwojenia cewki wynosi, powiedzmy  $R$ . Wiesz już, że w pierwszej chwili po dołączeniu do cewki napięcia, przez cewkę wcale nie popłynie wielki prąd o wartości  $I R = U_{zas} / R_{uzw}$ . Przed kilkoma miesiącami tłumaczyłem ci, że cewka wykazuje pewną bezwładność. Teraz popatrzymy na to uwzględniając wiadomości o indukcji elektromagnetycznej.

Tuż po włączeniu zasilania, przez cewkę niewątpliwie „będzie chciał” popłynąć prąd. Gdy ten prąd się pojawi się w uzwojeniu, zacznie „prostować magnesiki”... Stop! Tu tkwi sedno sprawy!

“Prostowanie magnesików” to nic innego jak namagnesowanie rdzenia – a więc w rdzeniu pojawi się pole magnetyczne i jego „siła” zacznie rosnać. A te zmiany, zgodnie z zasadą indukcji magnetycznej spowodują zaindukowanie się w uzwojeniu napięcia.

Mamy więc dwa napięcia: *zasilające* – nazwijmy go wymuszającym *indukowane w cewce* – wymuszane przez zjawisko samoindukcji wskutek zmian pola magnetycznego.

Czy te napięcia się dodadzą, czy odejmą?

Odejmą się!

Tu w grę wchodzi druga ważna zasada, o której też pewnie słyszałeś – reguła przekory Lenza. (Występowaniu w przyrodzie przekory chyba się nie dziwisz – sam dość często zdradzasz przecież jej objawy.)

A jaka będzie wartość zaindukowanego napięcia?

Występuje tu ciekawa zależność. Zapewne już wiesz, że w pierwszej chwili po dołączeniu napięcia zasilającego, w uzwojeniu zaindukuje się napięcie niemal równe temu napięciu zasilającemu. Napięcia te odejmą się. Ich wypadkowa wartość będzie bardzo mała – taka, żeby w obwodzie popłynął jednak niewielki prąd.

I tu masz odpowiedź, skąd cewka „wie”, jakie to powinno być napięcie: mianowicie występuje tu wzajemna zależność między szybkością wzrostu prądu, a indukowanym napięciem. Czym szybszy wzrost prądu, tym szybciej „ustawiają się” magnesiki i tym szybsze są zmiany siły pola magnetycznego. Szybsze zmiany pola to większe indukowane napięcie, które przecież zgodnie z regułą przekory, odejmuje się od napięcia zasilającego i tym samym uniemożliwia szybkie narastanie prądu.

Jest to coś w rodzaju ujemnego sprzężenia zwrotnego:

Prąd nie może narastać szybciej, bo przeszkadza temu większe napięcie indukowane, które przecież odejmuje się od napięcia zasilającego.

Prąd nie może też narastać wolniej, bo zbyt małe napięcie samoindukcji momentalnie spowodowałoby zwiększenie wypadkowego napięcia działającego w cewce i tym samym wzrost prądu.

Żeby to lepiej zrozumieć, przypomnij sobie, co dzieje się w cewce, w której przepływ prądu zostanie całkowicie i gwałtownie przerwany. Prąd „wymuszający” gwałtownie zanika. Tym samym odchyłone do tej pory magnesiki

## Listy od Piotra

na sprężynkach wracają gwałtownie do położenia spoczynkowych – tym samym gwałtownie zanika też pole magnetyczne. Zgodnie z zasadą Faradaya, bardzo szybkie zmiany pola wywołują powstanie napięcia o bardzo dużej wartości. Wszystko się zgadza!

Czy już teraz czujesz intuicyjnie, dlaczego po dołączeniu cewki do źródła napięcia, prąd nie wzrasta gwałtownie, tylko stopniowo?

Ale to jeszcze nie wszystko. Co się stanie, gdy podczas przepływu prądu, wszystkie magnesiki stopniowo się „wyprostują”?

To jest bardzo ważna sprawa, którą musisz dobrze rozumieć.

Przed chwilą tłumaczyłem ci, że po dołączeniu napięcia zasilającego do cewki, występuje tam coś w rodzaju sprzężenia zwrotnego. W każdym razie to zmiana pola magnetycznego hamuje wzrost prądu. A przecież pole magnetyczne jest wypadkową pól magnetycznych elementarnych magnesików. Jeszcze raz ci przypomnę, że przepływ prądu w cewce sam w sobie nie jest bezpośrednim źródłem pola magnetycznego, tylko czynnikiem pośrednim, porządkującym ustawienie magnesików rdzenia. Dopiero te magnesiki są źródłem pola magnetycznego. Jeśli więc wszystkie magnesiki zostały po pewnym czasie przepływu prądu „ustawione na baczność” nie ma dalszej możliwości wzrostu siły pola. Oczywiście, prawda?

Ale nie zapomnij, że zmiany pola hamowały wzrost prądu (indukując napięcie samoindukcji). Teraz, gdy zmiany siły pola są niemożliwe, w cewce nie może już powstawać napięcie samoindukcji. To znaczy, że zabraknie czynnika hamującego wzrost prądu... Nadążasz?

To sam powiedz, co się wtedy stanie z prądem w cewce?

Nieprzypadkowo kilka razy przypominał ci, że to nie przepływ prądu przez cewkę jest bezpośrednim źródłem pola magnetycznego...

To jak z tym prądem?

Oczywiście, po zaniku czynnika hamującego prąd gwałtownie wzrośnie, do wartości ni mniej ni więcej, tylko

$$I_R = \frac{U_{zas}}{R_{uzw}}$$

Po dołączeniu napięcia zasilającego, przebieg prądu w cewce z rdzeniem będzie więc ostatecznie wyglądał, jak na **rysunku 3**.

Oczywiście, dla cewek o innych wymiarach, o innej indukcyjności i innym materiale rdzenia przebiegi prądu po dołączeniu napięcia będą inne. Szczegółami zajmiemy się w przyszłości, na razie na **ry-**

**sunku 4** możesz zobaczyć przebiegi prądu dla rzeczywistych cewek o różnych indukcyjnościach i różnej budowie.

W każdym przypadku nachylenie początkowej prostej jest miarą indukcyjności, maksymalna wartość prądu  $I_R$  świadczy o rezystancji uzwojenia, a prąd użyteczny  $I_{max}$  wynika z właściwości (wymiarów i materiału) rdzenia. Domyślasz się, że te wszystkie parametry są jakoś od siebie zależne...

Trochę to skomplikowane, ale nie bój się – pomału wszystko zrozumiesz.

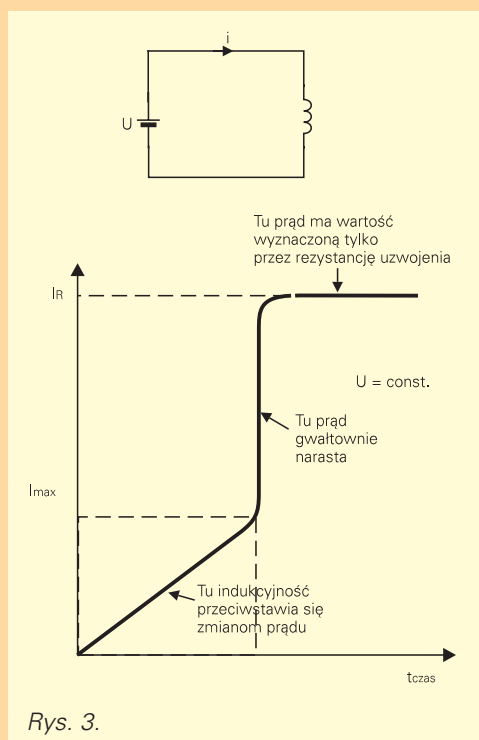
Co jednak wynika z tych rysunków?

Niewątpliwie w praktyce będzie nas interesować jedynie praca cewki przy prądach nie większych od prądu  $I_{max}$ . Przy większych prądach cewka wchodzi w stan nasycenia. A co to oznacza?

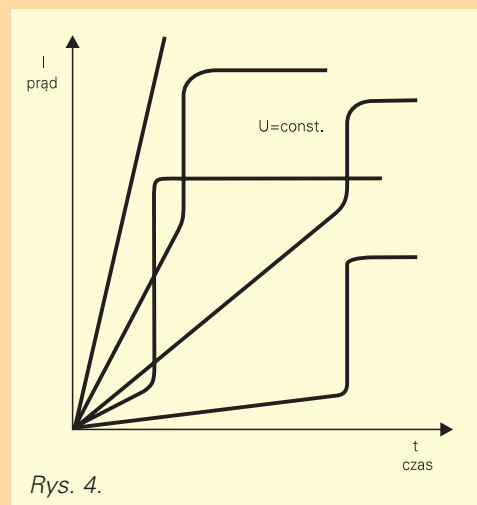
Jeśli wcześniej mówiliśmy, że indukcyjność jest miarą przeciwstawiania się wzrostowi prądu, to teraz możemy powiedzieć, że w stanie nasycenia cewka takich właściwości nie ma. czyli po prostu radykalnie traci indukcyjność. Może jesteś zdumiony, jaką drogą doszliśmy do tego stwierdzenia! Właśnie tą drogą doszliśmy do niego najprościej – gdybym zaczął od próby wytłumaczenia ci, czym jest indukcyjność, od czego zależy, to już dawno obaj pogubilibyśmy się w gąszczu wzorów i wzajemnych zależności.

Być może już czujesz przez skórę, że pojęcie indukcyjności, jako miary przeciwstawiania się zmianom prądu, jest niejako wtórne i wynika z wielu czynników. Tak jest. Do tej sprawy wrócimy później.

Niezły galimatias, prawda? Nie dziw się więc, że nie od razu podam ci wzory



Rys. 3.



Rys. 4.

potrzebne do obliczania praktycznych przetwornic i zasilaczy impulsowych. Sporo się jeszcze musisz dowiedzieć, a potem powinieneś jeszcze dobrze uporządkować tę wiedzę.

Na razie musisz zapamiętać jeden prosty wniosek wynikający z analizy rysunków 3 i 4:

Dla każdej cewki z rdzeniem istnieje pewna maksymalna wartość prądu  $I_{max}$ , której nie powinno się przekraczać. Przy takim prądzie w cewce zostanie zmagazynowana ilość energii, największa dla danej cewki. Ilość tej energii zależy przede wszystkim od właściwości i objętości rdzenia.

Prostą ilustracją tej zasady jest działanie zwykłego transformatora sieciowego, zasilanego napięciem przemiennym 220V. W pewnym niewielkim uproszczeniu możemy to rozumieć następująco: w czasie każdej połówki przebiegu 50Hz, w rdzeniu jest magazynowana jakaś porcja energii. Potem energia ta jest przekazywana do uzwojenia wtórnego i do obciążenia. Nie trzeba nikogo przekonywać, że moc transformatora zależy od wielkości rdzenia.

Spróbuj sobie pomału poukładać w głowie cały ten materiał. Zrozum, że wszelkie zmiany, zarówno prądu jak i pola magnetycznego są ze sobą jakby podwójnie powiązane. Zmiany prądu (wymuszającego) w cewce wywołują zmiany pola; te zmiany pola wywołują powstanie napięcia, które z kolei powoduje powstanie napięcia o takim kierunku, by przeciwstawić się (wymuszającym) zmianom prądu. Wszystko to jest prawdą, o ile elementarne magnesiki nie zostały ustawione w jednym kierunku, czyli dopóki materiał rdzenia nie został w pełni uporządkowany.

Za miesiąc przedstawię ci ogólną zasadę pracy zasilaczy impulsowych oraz pokażę ci pewne ograniczenia.

Piotr Górecki

grafika: Małgorzata Zackiewicz