

W kilku moich pierwszych listach starałem się przybliżyć Ci ze strony praktycznej tak popularne elementy jak rezystory i kondensatory. Po przedłużonej przerwie wakacyjnej, podczas której przedstawiłem Ci garść rad na temat wykorzystania podzespołów zastępczych, powracam do elementów podstawowych. Na warsztat bierzemy elementy indukcyjne: dławiki, cewki i transformatory.



W najbliższych dwóch odcinkach, niejako przy okazji omawiania cewek, powrócę też do pewnych wiadomości podstawowych. Do redakcji nadchodzi bowiem mnóstwo listów z prośbami o informacje dla zupełnie początkujących.

Wiem dobrze, że większość elektroników nie rozumie do końca zagadnień związanych z magnetyzmem. Powiem więcej - nawet wielu inżynierów, którzy na studiach musieli zdawać z tego egzaminu, ma kłopoty z praktycznym wykorzystaniem swej wiedzy o magnetyzmie. Nie dziwię się temu - wszystkie podręczniki i opracowania, jakie dotychczas napotkałem, przedstawiają sprawę w sposób, powiedziałbym suchy i niepraktyczny. Co prawda podane informacje są rzetelne i prawdziwe, ale nie bardzo wiadomo,

jak je ugryźć, czyli jak je dopasować do praktyki.

Mam więc świadomość, że stoję przed trudnym zadaniem - spróbuję bowiem przystępnie wytłumaczyć Ci podstawy magnetyzmu i pokazać, że w działaniu cewek i transformatorów nie ma nic magicznego czy niepojętego.

Ponieważ temat jest rzeczywiście niełatwy, podejść do niego kilkakrotnie:

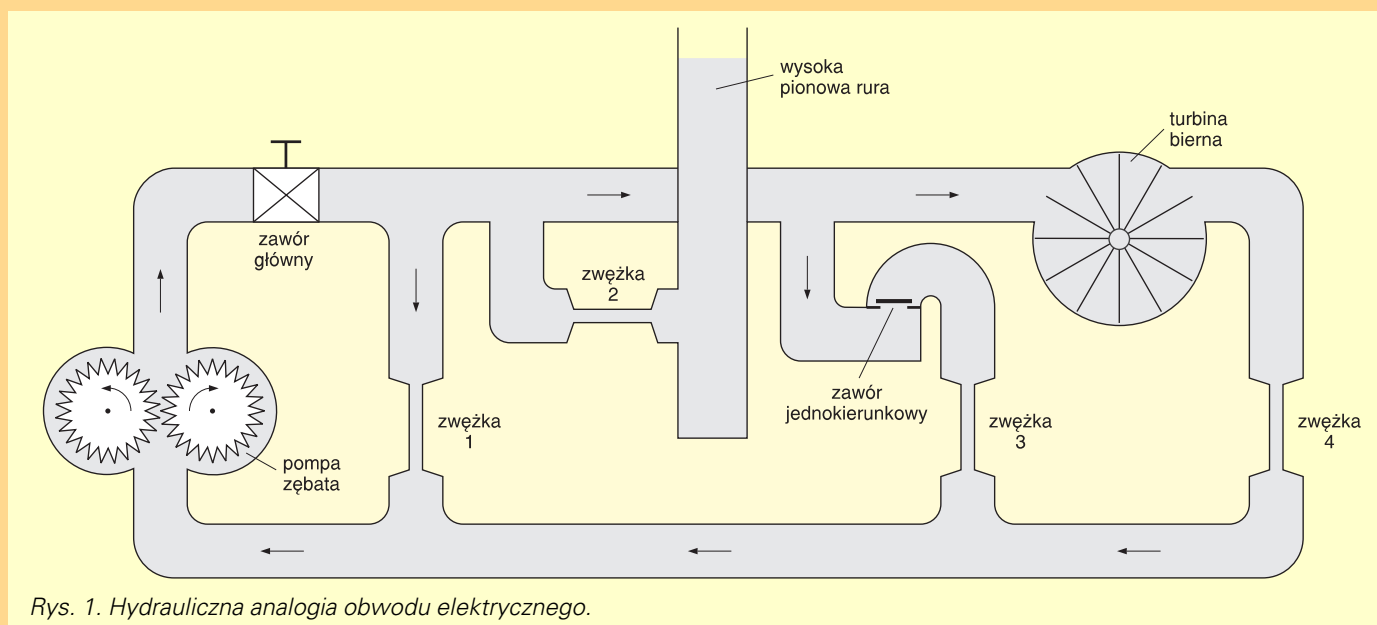
Najpierw na przykładzie modelu hydraulicznego pokażę Ci zarys zagadnienia. Będzie to tłumaczenie wręcz łopatologiczne - nie irytuj się, że sięgam do takich przykładów - list ten będą czytać także zupełnie początkujący. W tej części podane będą najważniejsze zasady i zjawiska dotyczące indukcyjności oraz niezbędne wzory.

W drugim podejściu przedstawię minimum wiedzy o elementach indukcyjnych, jaka jest potrzebna średnio zaawansowanemu elektronikowi-hobbyście.

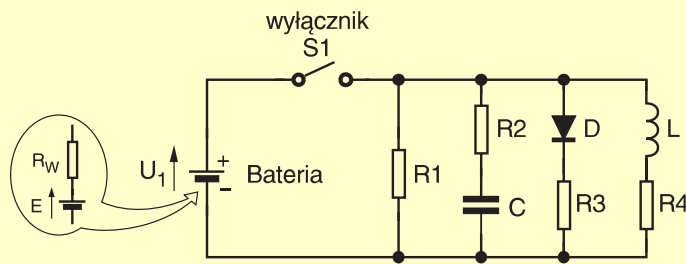
W miarę możliwości postaram się przybliżyć podstawy fizyczne, żebyś zrozumiał, co dzieje się w rdzeniu cewki czy transformatora, i jak to wpływa na parametry danego elementu indukcyjnego.

Zaczynamy!

Na pewno wiesz, co to jest cewka indukcyjna. Najprościej mówiąc jest to element składający się z pewnej ilości zwojów drutu. Zwykle cewka nawinięta jest na jakimś plastikowym korpusie (karkasie); najczęściej zawiera rdzeń z materiału ferromagnetycznego (ferrytowy lub z blach transformatorowych). Podstawo-



Rys. 1. Hydrauliczna analogia obwodu elektrycznego.



Rys. 2. Układ elektryczny analogiczny do układu z rysunku 1.

wym parametrem cewki jest indukcyjność, wyrażana w henrach (lub milihenrach, czy mikrohenrach). Na schematach elektrycznych cewki oznacza się symbolem L; L to również oznaczenie indukcyjności.

## Model hydrauliczny

W książkach dla początkujących, dla łatwego wprowadzenia i zilustrowania pojęć z dziedziny elektryczności, często przedstawia się hydrauliczną analogię obwodu elektrycznego. Jest to oczywiście spore uproszczenie, jednak znakomicie pokazuje najważniejsze zagadnienia i zależności. Taki prosty model instalacji wodnej zobaczysz na **rysunku 1**. Mamy na nim pompę, zawór główny, cztery zwężki, długą pionową rurę (otwartą na górnym koncu), zawór jednokierunkowy i turbinę. Na **rysunku 2** pokazałem elektryczny odpowiednik takiego obwodu.

W obwodach elektrycznych mówimy o napięciu zasilania układu; napięcie oznacza się w skrócie literą U. Jednostką napięcia elektrycznego jest volt, oznaczany w skrócie V (od nazwiska fizyka włoskiego Giovanni Volta).

W obwodach elektrycznych może płynąć prąd. Prąd elektryczny jest to w pierwszym przybliżeniu ruch elektronów. Natężenie prądu, czyli w uproszczeniu ilość elektronów przepływających w jednostce czasu, oznaczamy literą I, jednostką natężenia prądu jest amper (w skrócie A), wywodzący się od nazwiska francuskiego fizyka Andre M. Ampere. W codziennej praktyce zamiast: natężenie prądu, mówimy w skrócie: prąd.

A teraz bardzo ważna informacja: odpowiednikiem napięcia elektrycznego jest ciśnienie wody, a odpowiednikiem natężenia prądu - przepływ, czyli po prostu ilość przepływającej wody.

Pompa hydrauliczna wytwarza pewne ciśnienie. Jeśli zamkniemy zawór główny (co w obwodzie elektrycznym odpowiada rozłączeniu przełącznika S1), wtedy woda nie będzie mogła płynąć i pracująca pompa wytworzy pewne ciśnienie maksymalne, zależne od konstrukcji pompy. To ciśnienie maksymalne, w obwodzie elektrycznym można porównać do siły elektromotorycznej, oznaczanej

SEM lub E - stąd na rysunku 2 pokazano obok źródła napięcia jako szeregowo połączenie źródła napięciowego o sile elektromotorycznej E i rezystancji wewnętrznej  $R_w$ .

Jeśli otworzymy zawór główny (zwrzemy styki przełącznika S1), to w obwodzie zacznie płynąć woda (prąd). Jakaś część wody (prądu), popłynie przez zwężkę 1 (rezystor R1). Czym większy opór, czyli cieńsza zwężka (większa rezystancja R1), tym mniejszy przepływ wody (prąd) - doskonale czujemy to intuicyjnie. Dobrze ilustruje to prawo Ohma, mówiące iż prąd płynący przez rezystor jest wprost proporcjonalny do napięcia, a odwrotnie proporcjonalny do oporu (rezystancji) tego rezystora.

Podobnie łączenie szeregowo i równoległe zwęzek odpowiada łączeniu rezystorów.

Zauważ, że może istnieć ciśnienie bez przepływu wody (pompa pracuje, zawór zamknięty), ale nie może wystąpić przepływ bez różnicy ciśnień.

Tak samo w obwodzie elektrycznym może występować napięcie, a prąd nie będzie płynął (np. niepodłączona bateria), ale nie może popłynąć prąd, jeśli nie wystąpi napięcie.

Idźmy dalej. Po otwarciu zaworu (zwarciu S1), woda płynąca przez zwężkę 2 (prąd płynący przez rezystor R2) będzie powodowała podnoszenie poziomu wody w pionowej rurze (ładowanie kondensatora C1). Poziom wody w rurze (napięcie na kondensatorze C1) nie będzie podnosić się w nieskończoność, a tylko do momentu, aż ciśnienie słupa wody zrówna się z ciśnieniem wytwarzanym przez pompę (napięcie na kondensatorze zrówna się z napięciem baterii). Wtedy

w zwężce 2 (rezystorze R2) przestanie płynąć woda (prąd). W stanie ustalonym, w obwodzie zwężki 2 i rury (R2 C1) nic się nie będzie działo. Ale gdybyśmy zamknęli zawór (rozłączyli przełącznik S1), wtedy przez zwężkę 2 (rezystor R2) zacznie płynąć woda (prąd), tyle że w prze-

ciwnym kierunku. Poziom wody w rurze stopniowo opadnie (napięcie na kondensatorze obniży się do zera; kondensator się rozładuje).

Znów jest to dobra analogia ładowania i rozładowania obwodu RC. Zauważ - czym większa wysokość słupa wody, tym większe wytwarza on ciśnienie - poziom wody w pionowej otwartej rurze odpowiada więc napięciu.

Natomiast pojemność kondensatora możemy zilustrować grubością, czy średnicą rury. Jeśli rura będzie cienka, to wystarczy mała ilość wody, żeby ją napełnić do określonej wysokości.

W obwodach hydraulicznych często stosuje się zawory jednokierunkowe. W najprostszej postaci jest to metalowy krążek, który w stanie spoczynku leży na gnieździe i zamyka przekrój rury. Gdy ciśnienie wody na wejściu zaworu będzie większe niż na jego wyjściu, to krążek zostanie podniesiony i przez zwężkę 3 popłynie woda. Oczywiście ilustruje to działanie diody D z rysunku 2. Znów analogia jest dobra, bowiem podniesienie krążka wymaga pewnej energii. Energia nie może wziąć się z niczego - krążek zostanie podniesiony kosztem energii niesionej przez wodę, inaczej mówiąc zaobserwujemy spadek ciśnienia na zaworze. Tak samo na diodzie półprzewodnikowej występuje przy przepływie prądu pewien spadek napięcia (dla zwykłych diod krzemowych 0,5...0,8V, zależnie od wartości prądu).

A teraz wreszcie przechodzimy do indukcyjności. Wyobraź sobie, że turbina pokazana na rysunku 1 nie jest napędzana i może obracać się swobodnie w obu kierunkach. Na wale tej turbiny zainstalowano koło zamachowe. Jak zareaguje turbina, gdy otworzymy zawór główny? Woda nie popłynie przez nią od razu - turbina z uwagi na ciężkie koło zamachowe zacznie się pomału obracać i stopniowo nabierać prędkości. Z czasem prędkość obrotowa ustali się - przepływ wody przez zwężkę 4 ustabilizuje się na odpowiedniej wartości zależnej tylko od przekroju zwężki. Gdyby to była turbina idealna, pracująca bez

*Cewka indukcyjna ma zdolność przeciwstawiania się zmianom prądu w obwodzie. Indukcyjność jest miarą tej zdolności.*

strat wywołanych tarciem, wtedy w stanie ustalonym, między jej wejściem, a wyjściem nie wystąpiłby spadek ciśnienia. W praktyce, część energii wody będzie zużywana na pokonanie tarcia w elementach turbiny, więc zaobserwujemy pewien niewielki spadek ciśnienia między wejściem a wyjściem turbiny.

Znów mamy dobrą analogię - turbina z kołem zamachowym świetnie ilustruje

działanie cewki indukcyjnej. Po zwarceniu przełącznika S1 zacznie narastać prąd płynący w obwodzie L R4. Po pewnym czasie, zależnym od indukcyjności cewki i rezystancji rezystora R4, natężenie prądu ustabilizuje się na jakiejś wartości zależnej tylko od napięcia zasilającego U i rezystancji R4. Gdyby cewka była idealna, nie wystąpiłby na niej spadek napięcia. W praktyce w każdej cewce występują jakieś straty (między innymi na rezystancji uzwojenia cewki).

Zauważ, że turbina z kołem zamachowym ma ciekawą właściwość - przeciwstawia się zmianom przepływu prądu. Tak samo cewka indukcyjna ma właściwość przeciwstawiania się zmianom natężenia prądu. I to musisz wbić sobie do głowy raz na zawsze: cewka indukcyjna przeciwstawia się zmianom prądu w obwodzie.

I stąd tylko krok do zrozumienia, co to jest indukcyjność: indukcyjność jest to w sumie zdolność do przeciwstawiania się zmianom prądu. W naszym modelu hydraulicznym indukcyjności odpowiada bezwładność, czyli w uproszczeniu masa koła zamachowego. Czym większa bezwładność (indukcyjność), tym wolniej wzrasta przepływ wody (prąd w obwodzie) po otwarciu zaworu (zamknięciu przełącznika S1). Proste, prawda?

### Magazynowanie energii

Powróć teraz do rysunku 1. Masz chyba świadomość, że zarówno w napełnionej wodą rurze, jak i obracającej się turbinie, można zgromadzić jakąś ilość energii. Energię tę można potem odzyskać. Pomyśl - nie ma różnicy, czy ciśnienie zostało wytworzone przez pompę, czy przez wysoki słup wody.

Tak samo jest z naładowanym kondensatorem i cewką, przez którą płynie prąd. Inaczej mówiąc, kondensator i cewka może w pewnych warunkach pełnić rolę źródła energii.

A od czego zależy ilość zgromadzonej energii? Czujesz chyba intuicyjnie, że energia zgromadzona w rurze (kondensatorze) zależy od wysokości słupa wody, czyli ciśnienia (napięcia na kondensatorze) oraz od grubości rury (pojemności kondensatora). Podobnie energia zgromadzona w turbinie (cewce) zależy od bezwładności koła zamachowego (indukcyjności) oraz od prędkości obrotowej wynikającej z przepływu (od natężenia prądu).

Teraz już masz jak na dłoni sens znanych ze szkoły wzorów na energię zgromadzoną w kondensatorze i cewce:

$$E = CU^2/2$$

$$E = LI^2/2$$

Na razie wspomnę Ci tylko, że kondensator gromadzi energię w polu elektrycznym, a cewka w polu magnetycznym. Nie przejmuj się, jeśli nie wiesz, co to jest pole elektryczne i magnetyczne. Szczerze mówiąc, ja też nie potrafię ci tego do końca wyjaśnić. Definicja książkowa niewiele mówi, a na podstawie materiału podawanego w szkole nie bardzo potrafimy sobie wyobrazić mechanizmu przenoszenia energii w próżni. Dogłębne wyjaśnienie zjawisk elektromagnetycznych naprawdę nie jest takie proste - opisuje je teoria pola elektromagnetycznego wykorzystująca wyższą matematykę. Może coś słyszałeś o równaniach Maxwella? A tak naprawdę, to chyba żaden fizyk na świecie nie ma pełnego obrazu sprawy. Oczekujemy wielkiego przełomu w fizyce, odkryć na miarę Kopernika i Einsteina. Na razie mamy tylko przybliżony obraz, sporo hipotez i wciąż czekamy na Wielką Teorię Unifikacji, która miejmy nadzieję, wyjaśni w przystępny i względnie prosty sposób także sprawy związane z magnetyzmem.

Ponieważ zarówno kondensator, jak i cewka mogą magazynować energię, a więc w pewnych sytuacjach będą stanowić źródło zasilania. Pisałem ci, że produkowane są kondensatory o pojemnościach rzędu 1 farada, przeznaczone do roli baterii rezerwowej dla podtrzymywania zawartości pamięci w systemach komputerowych. Innym przykładem są przetwornice pojemnościowe (np. przetwornica opisana w EdW 7/96 str. 43), zwykłe transformatory sieciowe, oraz wszelkiego typu zasilacze i przetwornice impulsowe zawierające indukcyjności.

Choć w kondensatorach i cewkach, z jakimi zwykle mamy do czynienia, jednorazowo można zgromadzić tylko niewielką ilość energii, istnieje prosty sposób, aby mimo wszystko przemieścić znaczne moce - wystarczy zwiększyć częstotliwość, czyli ilość cykli ładowania/rozładowania w jednostce czasu. Tą sprawą bliżej zajmiemy się za jakiś czas przy omawianiu zasilaczy impulsowych.

Teraz osobiście przekonaj się o możliwościach gromadzenia energii w kondensatorach i koniecznie przeprowadź prosty eksperyment: naładuj kondensator elektrolityczny o pojemności 220...2200 mikrofardów, dołączając go na kilka minut do zasilacza 12V (żeby go przy okazji uformować), a potem rozładuj używając jakiegokolwiek diody LED połączonej szeregowo z rezystorem 470Ω...1kΩ. Jak widzisz czas błysku jest krótki. Spróbuj

tego samego z kondensatorem stałym o pojemności 47...220nF. Czy w ogóle dostrzegasz błysk? Porównaj rozmiary kondensatorów z rozmiarami małych ogniw zegarkowych. Możesz też dołączyć zieloną lub żółtą diodę LED bezpośrednio do dwóch połączonych szeregowo ogniw zegarkowych, a przekonasz się, jak dużo energii zawierają takie małe baterie.

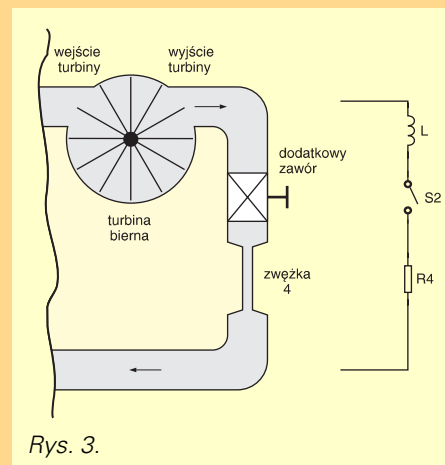
A teraz masz zadanie do samodzielnego przemyślenia - jak myślisz, co jest ograniczeniem, nie pozwalającym gromadzić w kondensatorach i cewkach naprawdę dużych ilości energii? Czy widzisz, dlaczego do zasilania układów elektronicznych muszą być używane baterie i akumulatory, gdzie energia magazynowana jest w wiązaniach chemicznych, a nie w polu elektrycznym?

### Napięcie na cewce

A co z napięciem na cewce? To jest bardzo ważne pytanie!

O ile sprawa z napięciem i prądem w kondensatorze jest łatwo wyczuwalna intuicyjnie, o tyle wyjaśnienie zachowania się cewki wielu osobom nastrocza duże kłopoty. Pamiętam, jak w pierwszej, czy drugiej klasie szkoły średniej na lekcji podstaw elektrotechniki przekonywałem nauczyciela, że przecież napięcie w obwodzie elektrycznym zawierającym cewkę nie może być wyższe, niż napięcie zasilania, bo niby skąd miałoby się wziąć. Pan Wiśniewski, którego wszyscy lubiliśmy i uważamy do dziś za dobrego nauczyciela, pozwolił mi się wygadać, za wypowiedź postawił mi nawet czwórkę (uznał, że coś jednak umiem). Wtedy nie sprostował moich błędnych wyobrażeń - co więcej, nikt z licznej klasy nie miał innego zdania o napięciu w obwodzie z cewką. Dopiero po pewnym czasie zrozumiałem, co naprawdę dzieje się w cewce. Myślę, że i Ty możesz mieć z tym kłopoty, więc popatrz na **rysunek 3**. W obwód hydrauliczny z rysunku 1 wstawiamy dodatkowy zawór umieszczony między turbiną a zwężką 4. Co się

*Zarówno w kondensatorze, jak i w cewce można zgromadzić pewną ilość energii. Energię tę można potem odzyskać.*



Rys. 3.

stanie, gdy w stanie ustalonym, gdy turbina zdążyła się rozpędzić do określonej prędkości, nagle zamkniemy ten dodatkowy zawór (rozewrzemy wyłącznik S2)?

Przecież turbina wyposażona jest w ciężkie koło zamachowe i nie może się w jednej chwili zatrzymać. Jakie będzie ciśnienie na wyjściu turbiny po zamknięciu zaworu? Oczywiście powiesz, że w obracającym się kole zamachowym (cewce, przez którą płynie prąd) zgromadziła się pewna ilość energii i ta energia zamieni na chwilę naszą turbinę (cewkę) w pompę (źródło napięcia

- baterię). Masz świętą rację! Energia koła zamachowego spowoduje, że wirnik turbiny nadal będzie chciał się obracać.

Ale przecież zawór został całkowicie zamknięty (co odpowiada rozwarciu obwodu elektrycznego). Co stanie się z ciśnieniem na wyjściu pompy? Po przerwaniu przepływu wody, dzięki obecności koła zamachowego, turbina wytworzy na swym wyjściu ciśnienie. O jakiej wartości? Pomyśl: Ciężkie koło zamachowe może spowodować, że powstałe na wyjściu

ciśnienie, będzie wielokrotnie wyższe (!), niż którekolwiek z ciśnień, jakie wcześniej występowało w obwodzie. To jest bardzo ważny wniosek: Maksymalne ciśnienie (napięcie) samoczynnie powstające w turbinie (cewce) zupełnie nie zależy od ciśnienia (napięć), które wcześniej występowały w obwodzie. Od czego zależy? W idealnym przypadku, po całkowitym przerwaniu obwodu, powstające na chwilę ciśnienie (napięcie) miałoby wartość... nieskończenie wielką. W praktyce wartość tego na-

pięcia zależy od konstrukcji cewki, a ściślej biorąc od pewnych strat; ale i tak jest ono bardzo duże i może mieć wartość rzędu tysięcy woltów i może spowodować przebicie (uszkodzenie) izolacji między zwojami cewki.

A co się stanie, jeśli dodatkowy zawór nie zostałby całkowicie zamknięty, tylko częściowo przydławiony (co odpowiada zwiększeniu rezystancji R4)? Odwołujemy się do fundamentalnej zasady: cewka przeciwstawia się zmianom prądu... Po-

patrz na rysunki 1, 3 i pomyśl - jak to będzie w obwodzie elektrycznym z cewką?

Już wiesz: jeśli w obwodzie nastąpi gwałtowna zmiana rezystancji (lub też gwałtownie zmieni się napięcie zasilające), to na cewce samoczynnie, niejako automatycznie, zaindukuje się napięcie. O jakiej wartości? O jakiej biegunowości?

Uważaj! Będzie to napięcie o dokładnej takiej wartości i kierunku, żeby w chwili tuż po zmianie zachować natężenie prądu takie same, jak przed zmianą. Wygląda to może trochę tajemniczo - jakby cewka sama wiedziała, jakie to ma być napięcie. W rzeczywistości nie ma tu nic nadzwyczajnego, bo w sumie wynika to z jej podstawowej właściwości: przeciwstawiania się zmianom prądu. Zapamiętaj - na cewce na chwilę powstanie takie napięcie, aby utrzymać przepływ prądu (lub niedopuszczyć do narastania prądu, gdy wcześniej go nie było). Oczywiście nie będzie to trwało długo, bo w cewce można zmagazynować tylko ograniczoną ilość energii.

Może zapytasz jeszcze, skąd w cewce biorą się te napięcia? Przyjmij na wiarę, że jest to tak zwane zjawisko samoindukcji, związane z znaną Ci pewnie ze szkoły regułą przekory Lenza. Nie musisz wcale rozumieć głębokich zasad fizycznych związanych z tym zjawiskiem - na razie przyjmij do wiadomości, że tak po prostu jest.

Piotr Górecki

## Płyty CD-ROM z AVT



Kolekcja dźwięków CD-D1

Ponad 3000 plików MIDI podzielonych tematycznie na utwory muzyki rozrywkowej i klasycznej (wg kompozytorów), próbki dźwiękowe do testowania kart muzycznych, utwory nastrojowe, muzyka elektroniczna, kolędy polskie .... oraz 800 plików MOD, 100 WAV i 50 VOC wraz z programami do otwarcia i przeróbki dźwięków. Łącznie ponad 150 godzin muzyki!!



Kolekcja dźwięków 2 CD-D2

Ponad 800 plików MIDI podzielonych tematycznie: Muzyka Rozrywkowa i Elektroniczna, Nastrojowa, Próbkę Perkusyjne, Muzyka Taneczna-Dyskotekowa, Retro ... oraz Pliki MOD (1400) i WAV (50). Płyta zawiera również tradycyjne polskie utwory, m.in.: Walczki Łowicki, Polka Pupilka ... oraz polski program do odtwarzania plików WAV, MID, AVI oraz płyt CD-AUDIO.

DŹWIĘK CD-D3  
- PROGRAMY UŻYTKOWE

Programy konwertujące i przetwarzające różne formaty dźwiękowe, odtwarzające, nauka gry na instrumentach, edytory dźwięku, tworzenie pokazów multimedialnych z wykorzystaniem dźwięku, testowanie płyt AUDIO... w wersjach Shareware. Wszystkie programy posiadają opisy w języku polskim i uruchamiane są bezpośrednio z programu zarządzającego. Dodatkowo na płycie umieszczono 650 plików WAV, MOD i MIDI



Płyty są sprzedawane wysyłkowo za pobraniem pocztowym (koszty opakowania i spedycji przesyłki wynoszą 5,5 zł)

Zamówienia prosimy kierować na adres:

01-900 Warszawa 118,  
skrytka poczt. 72

lub telefonicznie: (0 -22) 35 66 88, 35 66 77,

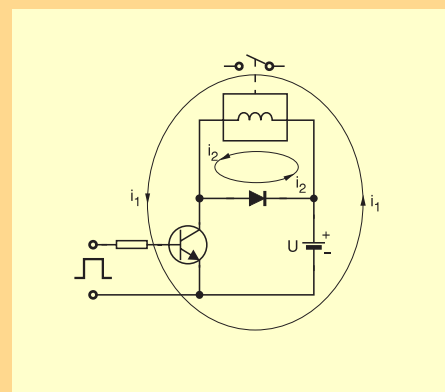
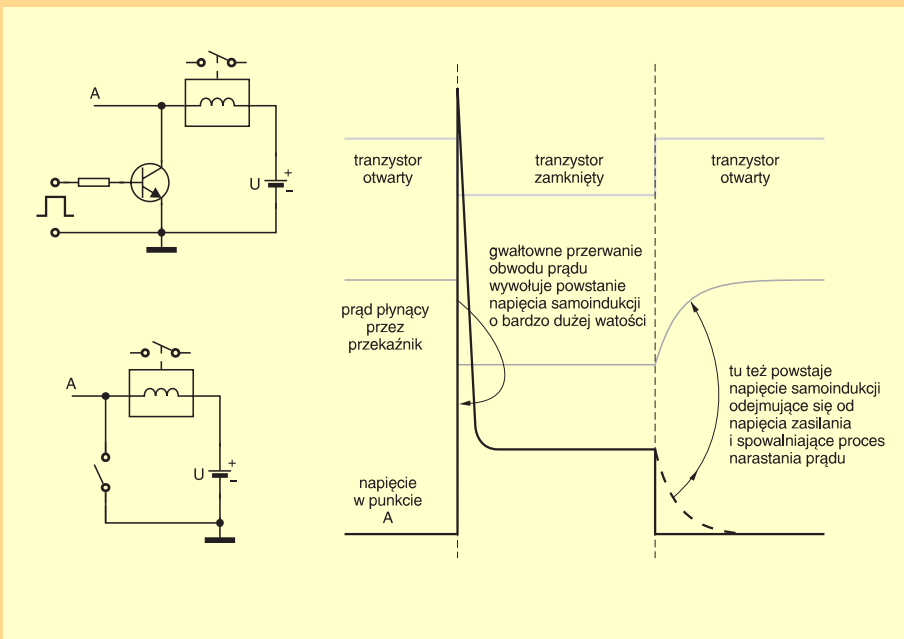
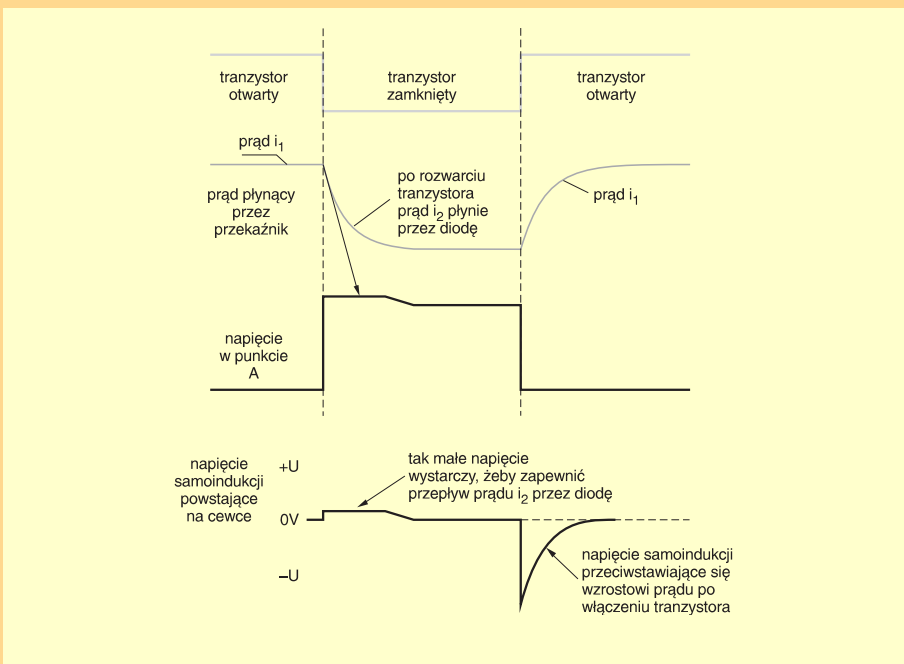
## Cewka w praktyce

Zobaczymy teraz, jak podane zasady przejawiają się w typowym układzie sterowania przełącznika, pokazanym na **rysunku 4a**. Ponieważ tranzystor pełni tu tylko rolę włącznika, można układ przedstawić, jak na **rysunku 4b**.

Najpierw założmy, że tranzystor przewodzi i przez cewkę przełącznika płynie prąd. W cewce tej zostaje więc zgromadzona pewna ilość energii. Co dzieje się po zatkanium tranzystora, czyli przerwaniu obwodu? Jak wiemy, cewka przeciwstawia się zmianom prądu. Cewka "chciałaby", żeby dalej płynął przez nią prąd, dlatego indukuje się na niej napięcie. Ponieważ prąd "nie może sobie znaleźć" nowej drogi przepływu, na cewce pojawia się napięcie o bardzo dużej wartości, które "usiłuje" znaleźć jakąkolwiek drogę przepływu prądu. Napięcie to może mieć wartość rzędu setek woltów i oczywiście może uszkodzić tranzystor.

A co dzieje się po włączeniu tranzystora? W obwodzie przełącznika pojawia się prąd. Tak, ale nie od razu - ze względu na indukcyjność uzwojenia prąd narasta stopniowo. W wielkim uproszczeniu można to sobie wyobrazić następująco: pojawiający się w pierwszej chwili po włączeniu mały prąd, powoduje powstanie na cewce napięcia o wartości niemal równej napięciu zasilającemu i takim kierunku, że niejako znosi ono napięcie zasilające. Ponieważ indukcyjność cewki przełącznika (a tym samym ilość możliwej do zmagazynowania energii) jest stosunkowo niewielka, napięcie samoindukcji stopniowo zmniejsza się, a prąd rośnie do ustalonej wartości, wyznaczonej przez rezystancję uzwojenia. Przebiegi napięć i prądów pokazuje **rysunek 4c**.

Inaczej jest, gdy równoległe z cewką włączona jest dioda - jak na **rysunku 5a**. Podczas działania przełącznika jest ona spolaryzowana w kierunku zaporowym i prąd przez nią nie płynie. Prąd  $i_1$  płynie w obwodzie: bateria - przełącznik - tranzystor (klucz) - bateria. Po wyłączeniu



tranzystora, prąd "chce" nadal płynąć przez cewkę przekaźnika, więc na cewce indukuje się napięcie. Tym razem będzie to napięcie rzędu 0,6...0,7V - tylko tyle wystarczy, aby prąd "znalazł" nową drogę przepływu - prąd  $i_2$  popłynie przez diodę. Przebiegi napięć i prądów pokazane są na **rysunku 5b**. Jeśli chcesz przekonać się, iż w cewce można zmagazynować tylko niewielką ilość energii, podłącz w szereg z taką diodą jakąkolwiek diodę LED (ale nie stosuj LEDa zamiast tej diody) i zobacz jak krótki jest błysk przy przerywaniu obwodu.

Czy teraz jesteś przekonany, że w obwodzie z tranzystorem zawsze należy włączać diodę równolegle do cewki przekaźnika? Czy potrafisz odpowiedzieć na pytanie, dlaczego maksymalny chwilowy prąd płynący przez tą diodę nie jest większy niż prąd pracy przekaźnika?

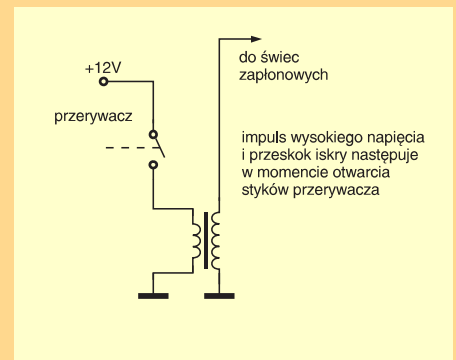
Czy rozumiesz działanie cewki wysokiego napięcia w samochodzie, gdy po przerwaniu przepływu prądu występuje przepięcie o wartości wielu tysięcy woltów, wywołujące przeskok iskry między elektrodami świcy? Uproszczony schemat instalacji zapłonowej samochodu pokazany jest na **rysunku 6**. Dla zwiększenia napięcia wyjściowego, zamiast pojedynczej cewki stosuje się tu transformator, czyli dwa uzwojenia o różnej liczbie zwojów.

## Stała czasowa

Czy pamiętasz ze szkoły przebiegi takie, jak na **rysunku 7**? Popatrz jeszcze raz na rysunek 1 i zauważ, że przebiegi z rysunku 7 obrazują zmiany ciśnienia i przepływu wody na zwężkach 2, 4, oraz na turbinie biernej i pionowej rurze po otwarciu zaworu głównego. Oczywiście przedstawiają one także zmiany prądu i napięcia w obwodach z kondensatorem C i cewką L z rysunku 2 po zwarceniu wyłącznika S1. Sam określ, która krzywa przedstawia przebieg zmian napięcia, a która zmian prądu kondensatora. A jak ma się sprawa z cewką?

Załóżmy teraz, iż mamy dwa kondensatory o różnych pojemnościach.

Kondensatory ładujemy do jakiegoś napięcia. Zgodnie z podanym wcześniej wzorem, w kondensatorach zgromadzi się pewna ilość energii. Jeśli teraz do obu kondensatorów dołączymy jedna-



kowe rezystory, to popłynie przez nie prąd. Napięcia na kondensatorach i prąd płynący przez rezystory będą zmieniać się w czasie tak, jak pokazuje to rysunek 7b. Jest oczywiste, że w obwodzie z kondensatorem o większej pojemności, gdzie gromadzi się więcej energii, przepływ prądu będzie trwał dłużej.

Podobny eksperyment można też

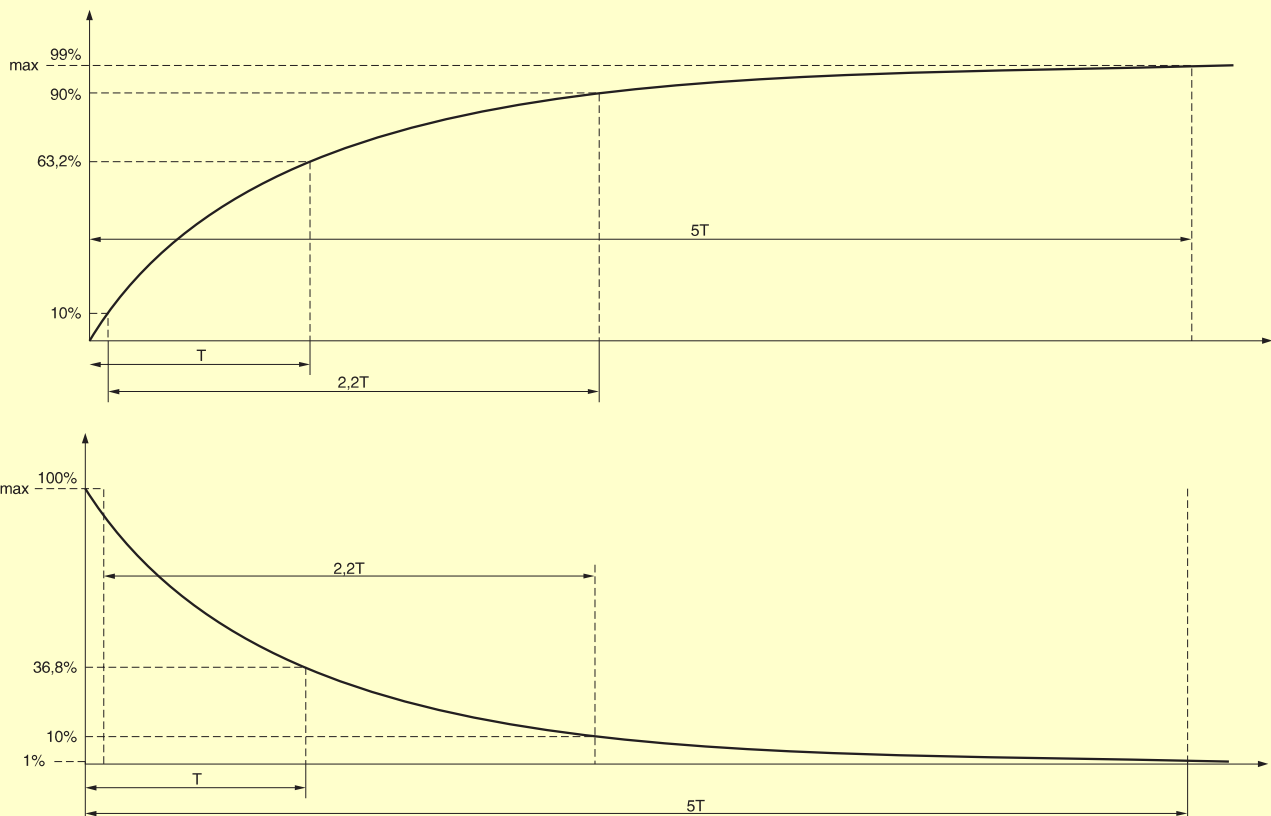
Obwód złożony z rezystora i kondensatora charakteryzuje się za pomocą tak zwanej stałej czasowej

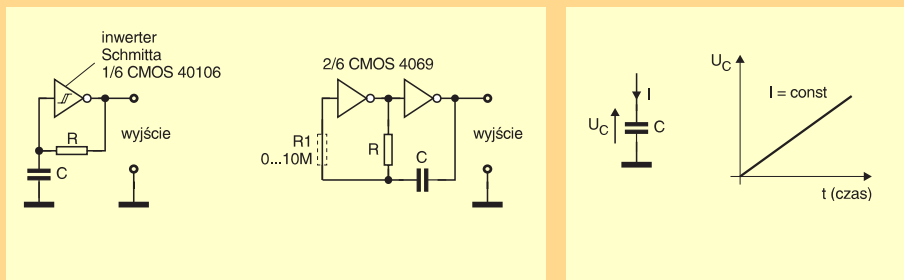
$$T = R C$$

Analogicznie obwód złożony z indukcyjności i rezystancji można również scharakteryzować stałą czasową

$$T = L/R$$

W praktyce, w obwodach czasowych stosuje się elementy RC, a nie RL.





przeprowadzić z dwoma różnymi cewkami: jeśli podłączymy napięcie do szeregowego obwodu RL, to prąd będzie narastał stopniowo, a na cewce pojawi się skok napięcia o czasie trwania zależnym od indukcyjności tej cewki i od współpracującej rezystancji.

W praktyce częściej interesuje nas nie tyle ilość zgromadzonej energii, co czas ładowania lub rozładowania przez daną rezystancję. Zamiast więc liczyć energię, mierzyć napięcia, korzystniej jest wprowadzić dodatkową wielkość, trafnie charakteryzującą każdy obwód składający się z rezystora i kondensatora (obwód RC) lub rezystora i cewki (obwód RL). Tą wielkością jest tak zwana stała czasowa, oznaczana T lub (greckie tau):

$$T = R C$$

$$T = L/R$$

Zauważ, że stała czasowa jest niezależna od napięcia. Wydaje się, iż potrafimy łatwo obliczyć, przez ile czasu w obwodzie RC lub RL będzie płynął prąd.

Ale o jaki czas tu chodzi? Jak widać z rysunku 7 nie możemy mówić o spadku napięcia czy prądu od wartości maksymalnej do zera (albo o wzroście od zera do wartości maksymalnej). Prąd i napięcie nie zmieniają się liniowo, tylko wykładniczo, a odpowiednią zależność dla kondensatora wyrażają wzory, których pewnie nie bardzo rozumiesz i którymi na razie nie musisz zaprzątać sobie głowy:

$$u = U e^{-t/RC}$$

lub

$$u = U e^{-t/T}$$

Podobny wzór można podać dla indukcyjności.

We wzorach tych występuje liczba e - podstawa logarytmów naturalnych. Właśnie z tą liczbą wiąże się dziwna wartość 0,368 i 0,632 (1-0,368) spotykana w większości podręczników. Właśnie po czasie T, napięcie czy prąd w obwodzie osiągnie podane 0,632 lub 0,367 wartości maksymalnej.

W praktyce, w obwodach czasowych nie stosuje się obwodów RL, więc i wzoru na stałą czasową

$$T = L/R$$

używa się rzadko - nie musisz go nawet pamiętać.

Natomiast bardzo często, na przykład

w technice cyfrowej, stosujemy obwody RC dla uzyskania opóźnień lub wytwarzania impulsów. Uzyskane czasy nie są wcale równe stałej RC, a to ze względu na różne poziomy przełączania użytych układów scalonych. Miej świadomość, że stała czasowa  $T = R C$  wynika z zależności matematycznych i nie można jej wprost stosować do wszelkich praktycznych układów zawierających elementy RC. Pokazuje ona w przybliżeniu, jakiego rzędu czasy można uzyskać stosując dane elementy R C. Sprawdź to praktycznie - dwa generatory z **rysunku 8** zawierające te same elementy RC będą wytwarzać znacznie różniące się częstotliwości. Spróbuj sam wyjaśnić przyczynę.

Powinieneś jednak wiedzieć, że na przykład po czasie 5T (5RC) napięcie lub prąd różni się od wartości końcowej (ustalonej) nie więcej niż o 1%. W przyszłości zapewne przyda ci się informacja, że w obwodzie RC, aby sygnał zmienił się od 10% do 90% jego wartości końcowej, potrzeba 2,2T (2,2RC) czasu. Zależności te zobaczysz na rysunku 7.

Na razie wystarczy żebyś wiedział, iż w praktyce obwody RC stosuje się do wytwarzania i opóźniania przebiegów impulsowych. W przyszłości dowiesz się, iż kondensatory (a teoretycznie także cewki) mogą być używane do przeprowadzania ważnych operacji matematycznych: całkowania i różniczkowania. Zapewne w podręcznikach spotkałeś stosowne wzory. Teraz nie zwracaj sobie tym głowy. Kiedyś wyjaśnię ci to przy omawianiu wzmacniaczy operacyjnych.

Na całkach i różniczkach znać się na razie nie musisz, ale zapamiętaj ważny wzór praktyczny, który z pewnością w przyszłości ci się przyda:

$$C U = I t$$

Wzór ten dotyczy sytuacji, gdy kon-

densator jest ładowany (lub rozładowywany) prądem I o stałym natężeniu - zobacz **rysunek 9**. Oczywiście napięcie na kondensatorze zmienia się wtedy liniowo. Przekształcając wzór możesz obliczyć o ile zmieni się napięcie na kondensatorze o pojemności C po czasie t, gdy prąd ładowania (rozładowania) ma wartość I:

$$U = (I t) / C$$

lub też ile czasu potrzeba, aby napięcie zmieniło się o wartość U:

$$t = (C U) / I$$

Pomyśl teraz, co będzie się działo z prądem, jeśli do danej cewki dołączymy napięcie? Jeśli cewka będzie zawierała wiele zwojów cienkiego drutu (czyli oprócz indukcyjności będzie mieć znaczną rezystancję), wtedy możemy potraktować ją jako połączenie indukcyjności L i rezystancji uzwojenia R (na przykład cewka przekątnika celowo ma znaczną rezystancję). Schemat zastępczy rzeczywistej cewki pokazany jest na **rysunku 10**. Oczywiście przebieg prądu będzie wyglądał tak, jak na rysunku 7a. Ale większość cewek ma stosunkowo małą rezystancję. Dla uproszczenia założymy, że rezystancja cewki jest równa zero. Jak wtedy zmieniać się będzie prąd?

Masz rację! Prąd będzie wzrastał liniowo (teoretycznie aż do nieskończoności). Pokazuje to **rysunek 11**. Podaję ci następny wzór:

$$L I = U t$$

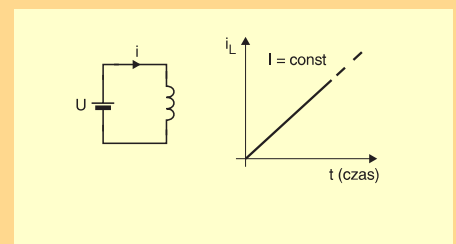
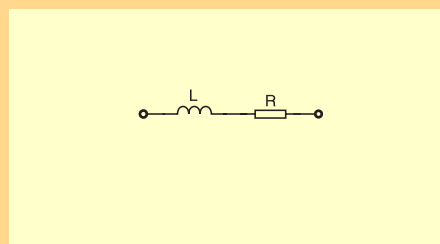
Nie musisz go pamiętać, jest rzadko wykorzystywany w praktyce. Podana zależność umożliwia jednak stosunkowo prosty pomiar indukcyjności cewki:

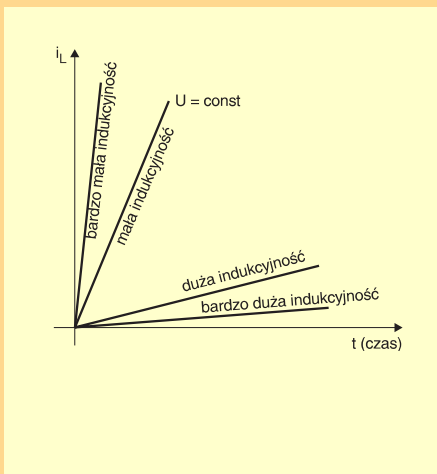
$$L = (U t) / I$$

Wystarczy dołączyć do cewki napięcie o znanej wartości i obserwować (np. za pomocą oscyloskopu) szybkość narastania prądu - porównaj **rysunek 12**. Sposób ten omówimy i wykorzystamy w jednym z następnych numerów EdW.

## Cewki kontra kondensatory

Na podstawie podanych wiadomości i wzorów mogłeś się przekonać, że cewki i kondensatory są "blisko spokrewnione" Na pewno spotkałeś się już z potocznym i mało precyzyjnym stwierdzeniem, że "z cewkami sprawa ma się tak samo, jak z kondensatorami, tylko odwrotnie". Coś w tym jest -





rzeczywiście zależności i wzory opisujące oba te elementy są bardzo podobne - spróbuj to teraz wyczuć intuicyjnie.

Nie masz chyba wątpliwości, że kondensator przeciwstawia się zmianom napięcia, i na próbę zmiany napięcia reaguje gwałtowną zmianą prądu. Jeśli spróbujesz gwałtownie zmienić napięcie na kondensatorze (na przykład dołączając źródło napięcia, czy też zwierając wyprowadzenia naładowanego kondensatora), wtedy przez kondensator popłynie bardzo duży prąd. Jest to chyba dla Ciebie oczywiste, że taki chwilowy prąd ładowania czy rozładowania może być wielokrotnie większy, niż jakiś mały prąd, którym w jakimś układzie, w normalnych warunkach pracy ładujemy lub rozładowujemy kondensator. Analogicznie jest z cewką - na próbę zmiany wartości, czy kierunku prądu, odpowiada ona zmianami napięcia.

Przemyśl to dokładnie. Porównaj też podane wzory i zauważ ich podobieństwo.

**Piotr Górecki**