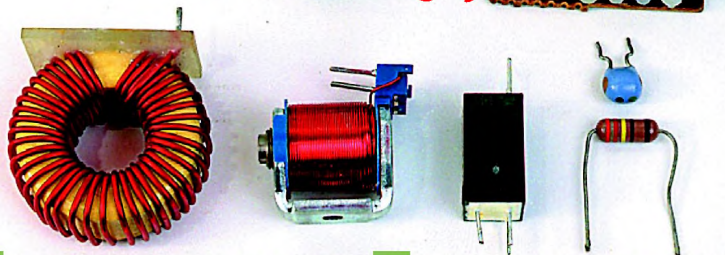
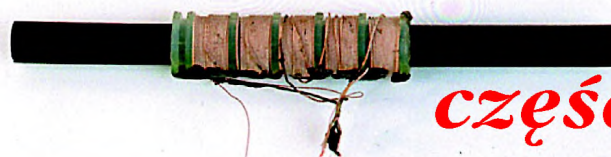


W kilku moich pierwszych listach starałem się przybliżyć Ci ze strony praktycznej tak popularne elementy jak rezystory i kondensatory. Po przedłużonej przerwie wakacyjnej, podczas której przedstawiłem Ci garść rad na temat wykorzystania podzespołów zastępczych, powracam do elementów podstawowych. Na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

# Elementy indukcyjne



## FUNDAMENTY ELEKTRONIKI



### część 1

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 egzaminy, 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 staję 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:

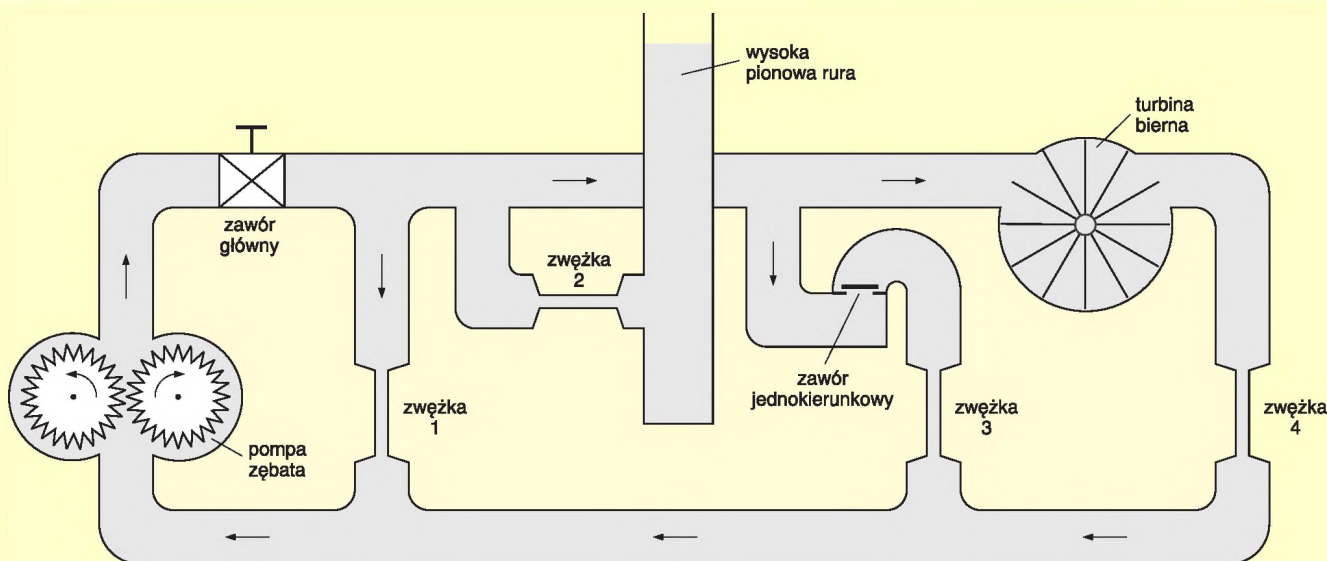
Najpierw na przykładzie modelu hydraulicznego pokażę Ci zarys zagadnienia. Będzie to tłumaczenie wręcz łopatologiczne - nie irytuj się, że sięgam do takich przykładów - list ten będą czytać także zupełnie początkujący. W tej części podane będą najważniejsze zasady i zjawiska dotyczące indukcyjności oraz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

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

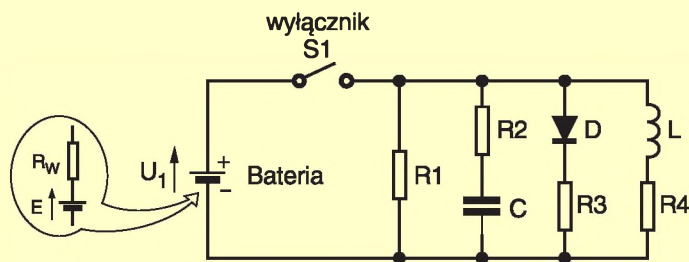
W miarę możliwości postaram się przybliżyć podstawy fizyczne, żebyś zrozumiał, co dzieje się w rdzeniu cewki czy transformatora, i jak to wpływa na parametry danego elementu indukcyjnego.

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 (ferytowy 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 zamknijemy 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 napelnąć 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 ideal-

na, pracująca bez strat wywołanych tarciami, wtedy w stanie ustalonym, między jej wejściem, a wyjściem nie wystąpiłby spadek ciśnienia. W prakty-

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

ce, 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 znacznie 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 napelnionej 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. Szczercze mówią, 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), zwykle 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 mikrofaradów, 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 dostrzeżesz 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.

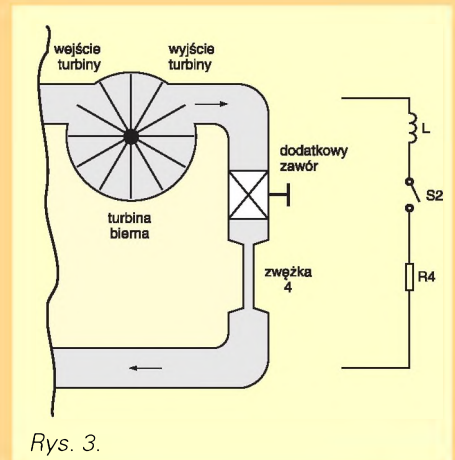
A teraz masz zadanie do samodzielnego przemyślenia - jak myślisz, co jest ograniczeniem, nie pozwalającym gromadzić w kondensatorach i cewkach naprawdę dużych ilości energii? Czy widzisz, dlaczego do zasilania układów elektronicznych muszą być używane baterie i akumulatory, gdzie energia magazynowana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

pompy 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  $R_4$ )? 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

*Pojemność kondensatora przeciwdziała gwałtownym zmianom napięcia na nim. Przez kondensator może przy tym płynąć (przez krótki czas) prąd o dużym natężeniu. Indukcyjność cewki przeciwdziała gwałtownym zmianom prądu płynącego przez tę cewkę. Na cewce powstają przy tym skoki napięcia, których wartość może wielokrotnie przewyższać wartości napięć zasilających dany obwód czy układ.*

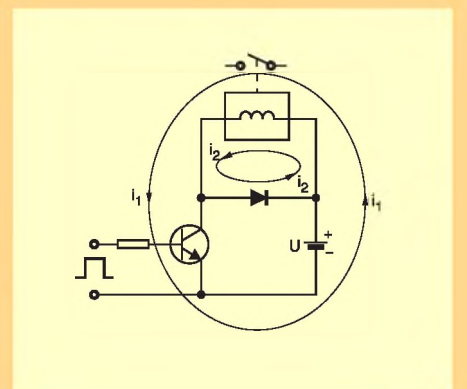
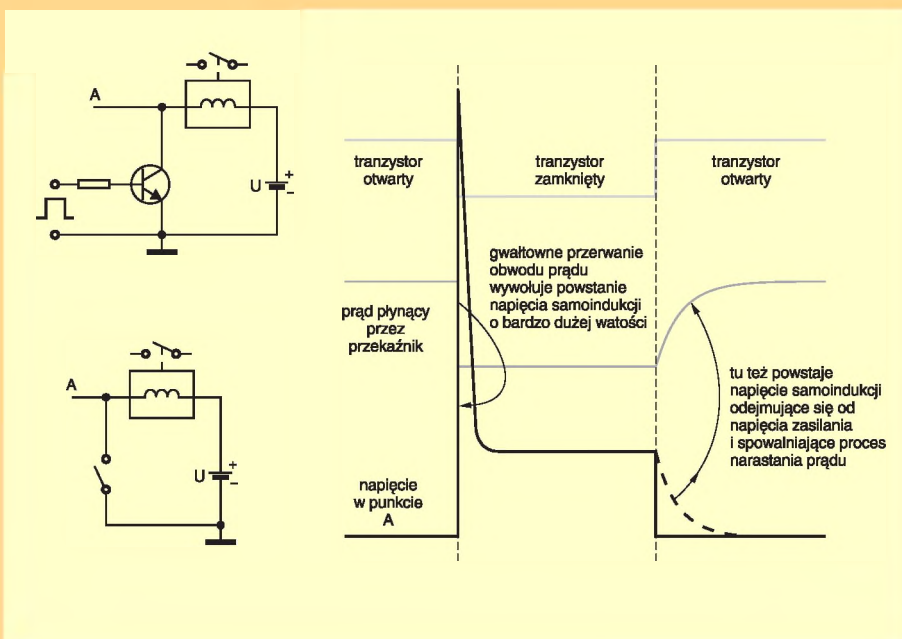
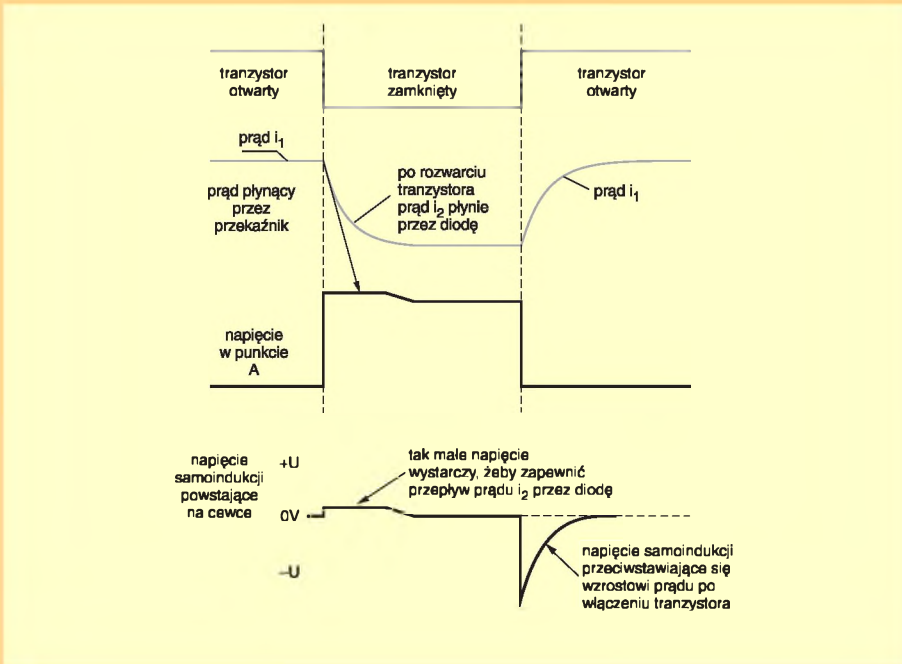
## Cewka w praktyce

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

Najpierw założymy, że tranzystor przewodzi i przez cewkę przekaźnika płynie prąd. W cewce tej zostaje więc zgromadzona pewna ilość energii. Co dzieje się po zatkaniu 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 przekaźnika 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 przekaźnika (a tym samym ilość możliwej do zgromadzenia 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 równolegle z cewką włączona jest dioda - jak na **rysunku 5a**. Podczas działania przekaźnika jest ona spolaryzowana w kierunku zaporowym i prąd przez nią nie płynie. Prąd  $i_1$  płynie w obwodzie: bateria - przekaźnik - 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?

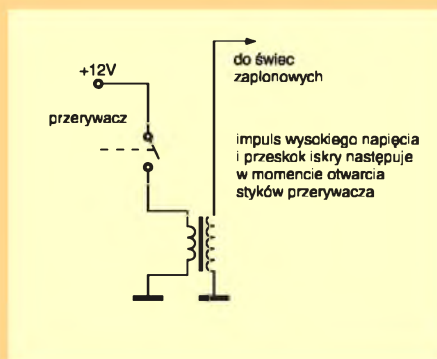
Czy rozumiesz działanie cewki wysokiego napięcia w samochodzie, gdy po przerwaniu przepływu prądu występuje przepięcie o wartości wielu tysięcy woltów, wywołujące przeskok iskry między elektrodami świecy? Uproszczony schemat instalacji zapłonowej samochodu pokazany jest na **rysunku 6**. Dla zwiększenia 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 zwarciu 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

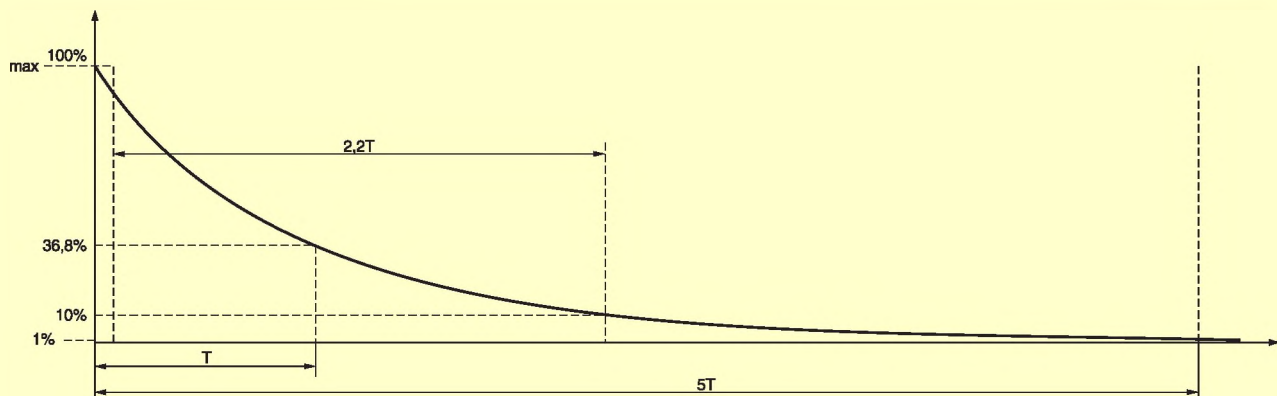
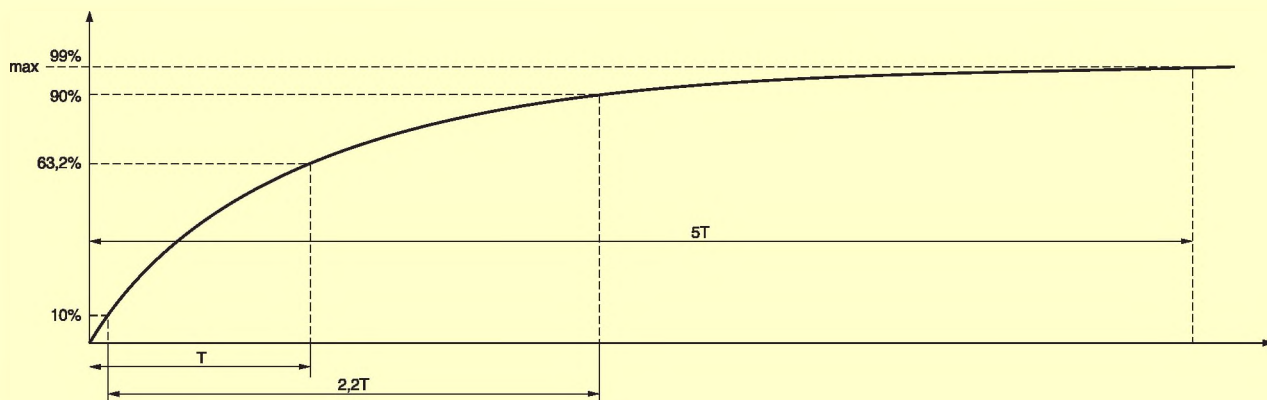
Obwód złożony z rezystora i kondensatora charakteryzuje się za pomocą tak zwanej stałej czasowej

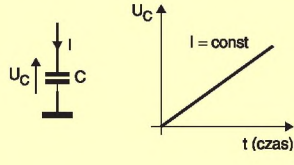
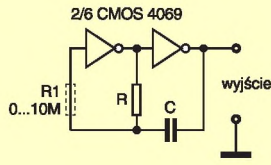
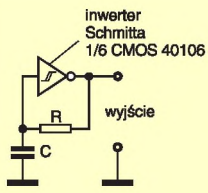
$$T = R C$$

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 zaprzętać 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. Mniej 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.

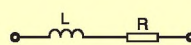
Powinieneś jednak wiedzieć, że na przykład po czasie 5T (5RC) napięcie lub prąd różni się od wartości końcowej (ustalonej) nie więcej niż o 1%. W przyszłości zapewne przyda ci się informacja, że w obwodzie RC, aby sygnał zmienił się od 10% do 90% jego wartości końcowej, potrzeba 2,2T (2,2RC) czasu. Zależności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

$$L I = U t$$

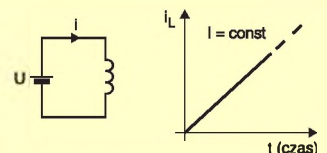
Nie musisz go pamiętać, jest rzadko wykorzystywany w praktyce. Podana zależność umożliwia jednak stosunkowo prosty pomiar indukcyjności cewki:

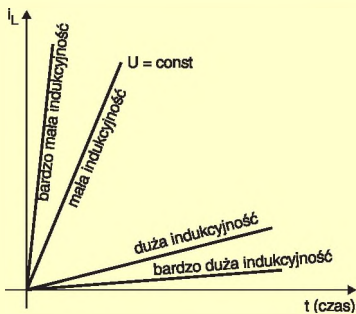
$$L = (U t) / I$$

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

W tym odcinku są zamieszczone dalsze informacje o elementach indukcyjnych. Dodatkowo podano pokrewne wiadomości dotyczące kondensatorów.

# Elementy indukcyjne

## FUNDAMENTY ELEKTRONIKI

### część 2



### Cewka w praktyce

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

Najpierw założymy, że tranzystor przewodzi i przez cewkę przekaźnika płynie prąd. W cewce tej zostaje więc zgromadzona pewna ilość energii. Co dzieje się po zatkaniu 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. Ponie-

waż 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.

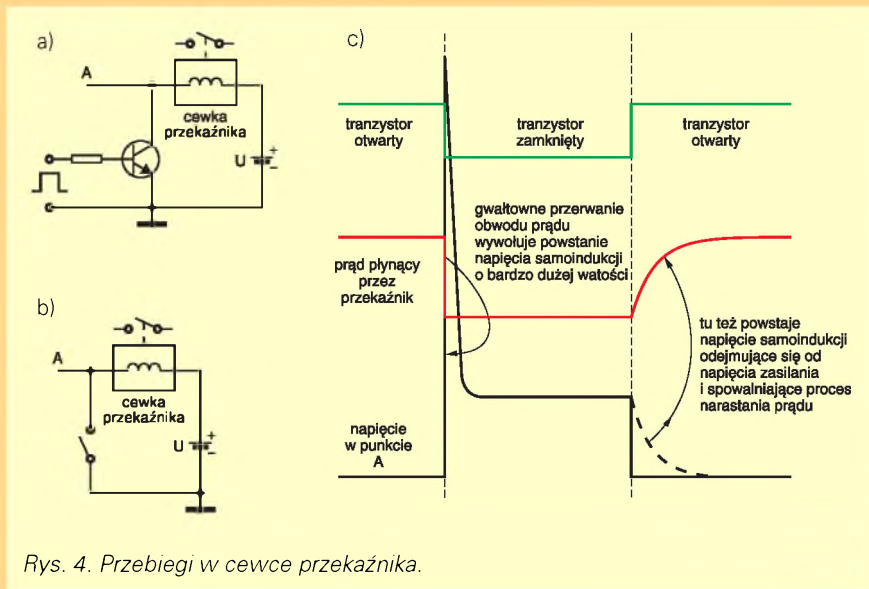
A co dzieje się po włączeniu tranzystora? W obwodzie przekaźnika pojawia się prąd. Tak, ale nie od razu - ze względu na indukcyjność uzwojenia prąd narasta stopniowo. W wielkim uproszczeniu można to sobie wyobrazić następująco: pojawiający się w pierwszej chwili po włączeniu mały prąd, powoduje powstanie na cewce napięcia o wartości niemal równej napięciu zasilającemu i takim kierunku, że niejako znosi ono napięcie zasilające.

Ponieważ indukcyjność cewki przekaźnika (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**.

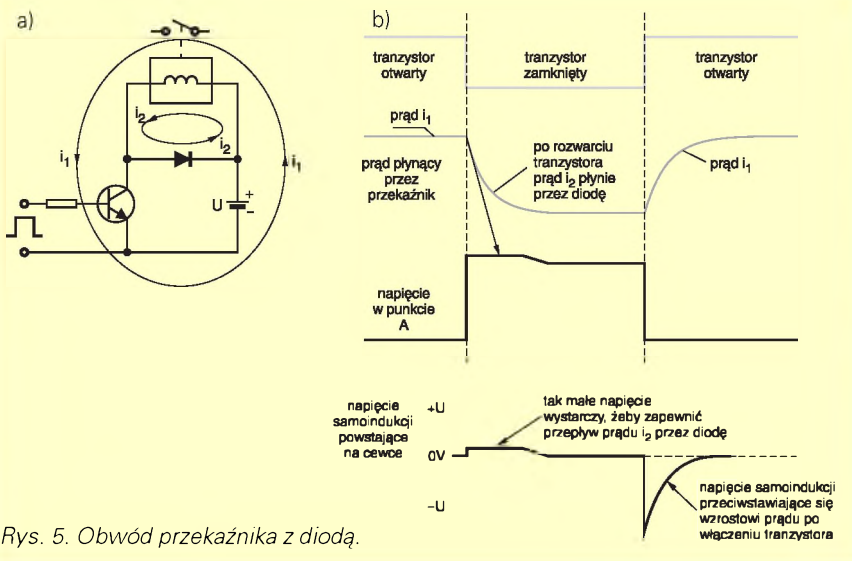
Inaczej jest, gdy równolegle z cewką włączona jest dioda - jak na **rysunku 5a**. Podczas działania przekaźnika jest ona spolaryzowana w kierunku zaporowym i prąd przez nią nie płynie. Prąd  $i_1$  płynie w obwodzie: bateria - przekaźnik - tranzystor (klucz) - bateria. Po wyłączeniu tranzystora, prąd "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**. A teraz przekonaj 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 tę diodę nie jest większy niż prąd pracy przekaźnika?

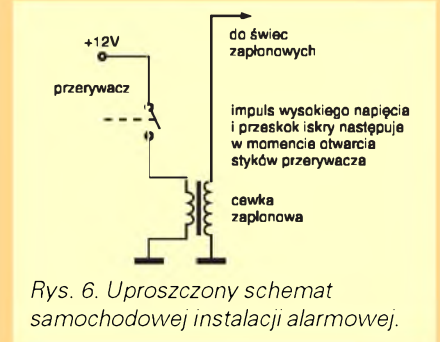
Czy rozumiesz działanie cewki wysokiego napięcia w samochodzie, gdy po przerwaniu przepływu prądu występuje przepięcie o wartości wielu tysięcy woltów?



Rys. 4. Przebiegi w cewce przekaźnika.



Rys. 5. Obwód przekaźnika z diodą.



Rys. 6. Uproszczony schemat samochodowej instalacji alarmowej.

tów, wywołujące przeskok iskry między elektrodami świecy? 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

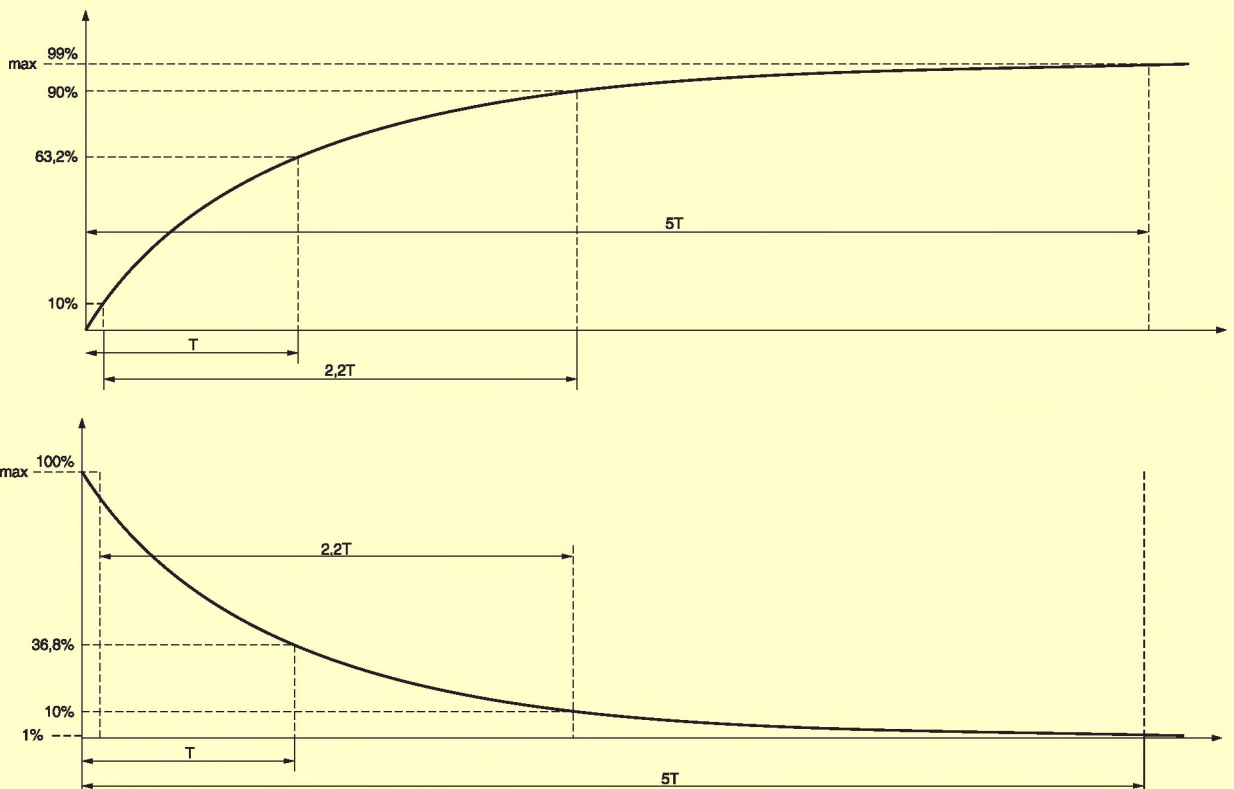
Czy pamiętasz ze szkoły przebiegi takie, jak na **rysunku 7**? Popatrz jeszcze raz na rysunek 1 i zauważ, że przebiegi z ry-

sunku 7 obrazują zmiany ciśnienia i przepływu wody na zwężkach 2, 4, oraz na turbinie biernej i pionowej rurze po otwarcu zaworu głównego. Oczywiście przedstawiają one także zmiany prądu i napięcia w obwodach z kondensatorem C i cewką L z rysunku 2 po zwarcu wyłącznika S1. Sam określ, która krzywa przedstawia przebieg zmian napięcia, a która zmian prądu kondensatora. A jak ma się sprawa z cewką?

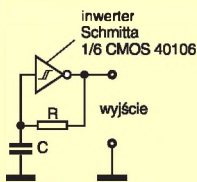
Załóżmy teraz, iż mamy dwa kondensatory o różnych pojemnościach.

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

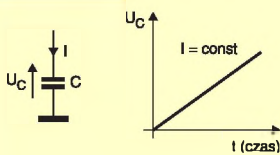
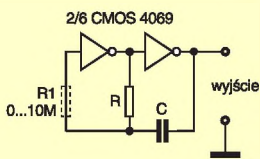
Podobny eksperyment można też przeprowadzić z dwoma różnymi cewkami: jeśli podłączymy napięcie do szeregowego obwodu RL, to prąd będzie narastał stopniowo, a na cewce pojawi się skok napięcia o czasie trwania zależnym od indukcyjności tej cewki i od współpracującej rezystancji.



Rys. 7. Zmiany napięcia i prądu w obwodach RC i RL.



Rys. 8. Generatory RC z bramkami CMOS.



Rys. 9. Ładowanie kondensatora prądem o stałym natężeniu.

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

$$T = RC$$

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.

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  $\tau$ :

$$T = RC$$

$$T = L/R$$

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 być może 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

$$T = L/R$$

korzysta 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  $T = RC$  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 zawracaj 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:

$$C \Delta U = I \Delta t$$

Wzór ten dotyczy sytuacji, gdy kondensator jest ładowany (lub rozładowywany) prądem I o stałym natężeniu - zo-

bacz **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:

$$U = \frac{I \cdot t}{C}$$

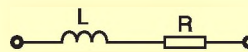
lub też ile czasu potrzeba, aby napięcie zmieniło się o wartość U:

$$t = \frac{C \cdot U}{I}$$

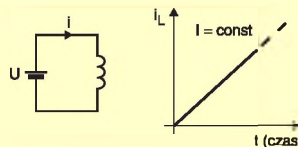
Pomyśl teraz, co będzie się działo z prądem, jeśli do danej cewki dołączymy napięcie? Jeśli cewka będzie zawierała wiele zwojów cienkiego drutu (czyli oprócz indukcyjności będzie mieć znaczną rezystancję), wtedy możemy potraktować ją jako połączenie indukcyjności L i rezystancji uzwojenia R (na przykład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

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

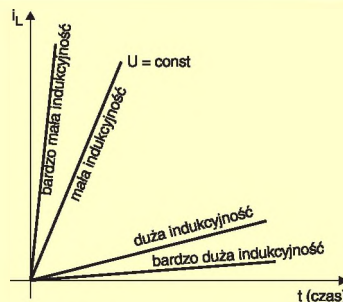
$$L \Delta I = U \Delta t$$



Rys. 10. Schemat zastępczy rzeczywistej cewki indukcyjnej.



Rys. 11. Prąd w idealnej cewce po dołączeniu do źródeł napięcia.



Rys. 12. Przebieg prądu w cewce po dołączenia napięcia.

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

$$L = \frac{t \cdot U}{I}$$

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

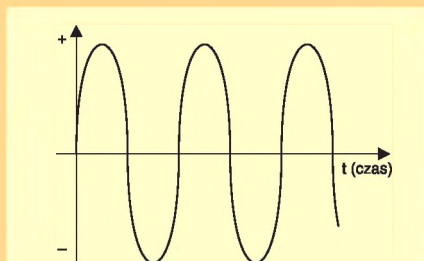
Na podstawie podanych wiadomości i wzorów mogłeś się przekonać, że cewki i kondensatory są "blisko spokrewnione". Na pewno spotkałeś się już z potocznym i mało precyzyjnym stwierdzeniem, że "z cewkami sprawa ma się tak samo, jak z kondensatorami, tylko odwrotnie". Coś w tym jest - rzeczywiście zależności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

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

## Obwód napięcia zmiennego

Do tej pory zajmowaliśmy się obwodem napięcia stałego. Ale model hydrau-



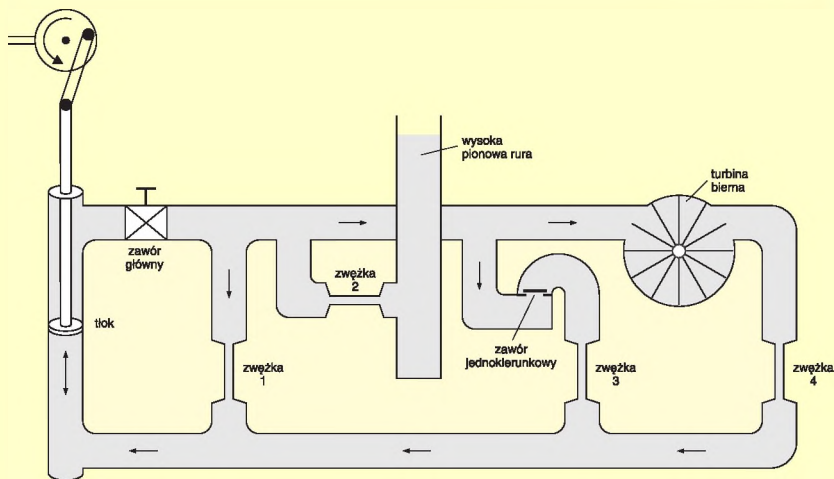
Rys. 14. Przebieg zmian ciśnienia na wyjściu cylindra

liczny równie dobrze ilustruje również zachowanie cewki i kondensatora przy prądzie zmiennym. Musimy tylko znaleźć element reprezentujący źródło napięcia zmiennego. Popatrz na **rysunek 13**. Pompę zębatą zastąpiliśmy cylindrem z tłokiem. Tłok, napędzany silnikiem z odpowiednią przekładnią, porusza się w cylindrze ruchem posuwisto-zwrotnym. Wzrost ciśnienia na jednym wylocie cylindra związany jest ze spadkiem ciśnienia na drugim wylocie. W obwodzie, jak na rysunku 13, woda nie płynie więc w jednym kierunku - cząsteczki wody drgają, przesuwając się w obydwie strony od położenia spoczynkowego. Zmiany ciśnienia w czasie określone są funkcją sinusoidalną, jak na **rysunku 14**. Ich drgania dobrze przedstawiają zachowanie nośników prądu, czyli elektronów, w przewodach obwodu prądu zmiennego. Jakie to proste, prawda?

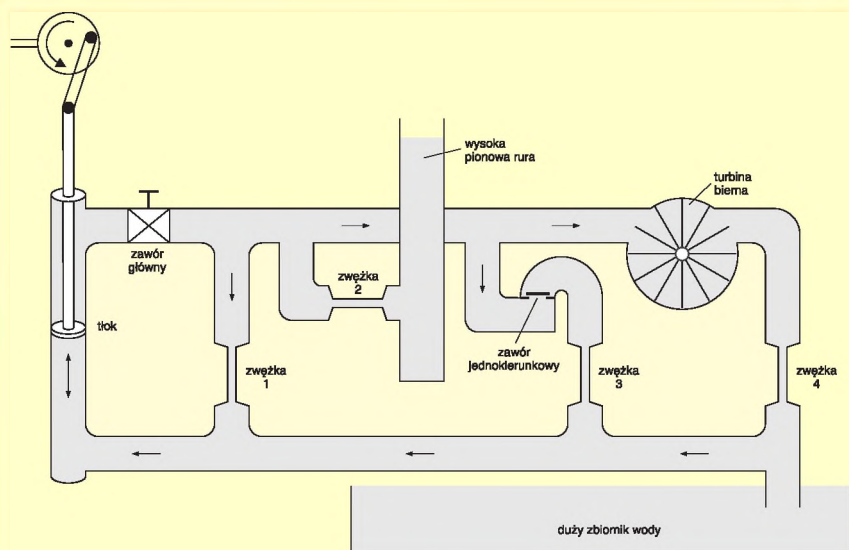
No tak, ale spostrzegawczy Czytelnik zauważy, że coś z naszą analogią jest nie w porządku. Skąd mianowicie ma się brać woda do napełnienia rury z rysunku 1 i 13? Jeśli to zauważyłeś, gratuluję spostrzegawczości!

Rzeczywiście analogia nie jest zupełna, ale nie w tym problem; dzięki temu spostrzeżeniu wyjaśnimy jeszcze pojęcie napięcia ujemnego, masy i uziemienia.

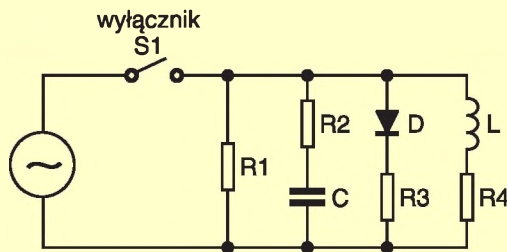
Poparż na **rysunek 15**. Tym razem wyobraźmy sobie, że nasz system hydrauliczny umieszczony jest na poziomie morza i otwarty koniec dolnej rury jest zanurzony w wodzie. Niezależnie od tego, ile litrów wody dolejemy do morza, albo ile z niego pobierzemy, poziom wody w morzu praktycznie się nie zmieni. Poziom wody w morzu i odpowiadające mu ciśnienie przyjmujemy więc jako ciśnienie początkowe, ciśnienie odniesienia. Dokładnie tak samo wygląda sprawa



Rys. 13. Hydrauliczna analogia elektrycznego obwodu prądu zmiennego.



Rys. 15. Dokładniejsza wersja modelu hydraulicznego.



Rys. 16. Elektryczny odpowiednik układu z rysunku 15.

z napięciem - nasza planeta, Ziemia, z grubsza biorąc, przewodzi prąd elektryczny. I tak samo, jak poziom morza i panujące tam ciśnienie przyjęliśmy jako wartość odniesienia, tak samo potencjał Ziemi przyjmujemy jako punkt odniesienia dla napięć elektrycznych. Mówimy więc o napięciach mierzonych w stosunku do ziemi (tym razem pisanej już małą literą). Teraz nie ma już problemu: rysunek 15 nie budzi zastrzeżeń.

Jeśli tłok porusza się do góry (na rysunku), na górnym wylocie cylindra ciśnienie jest większe, niż ciśnienie odniesienia w morzu. A gdy tłok porusza się do dołu i znajduje się w dolnej części cylindra, ciśnienie na górnym wylocie jest mniejsze (!) niż ciśnienie odniesienia. Chyba nie widzisz tu problemu - jest to po prostu podciśnienie - cząsteczki wody są wtedy wyciągane z morza (to podciśnienie odpowiada oczywiście ujemnemu napięciu elektrycznemu).

Jak więc zachowują się odpowiedniki cewki i kondensatora przy prądzie przemiennym? Popatrz na rysunek 15 i jego elektryczny odpowiednik na **rysunku 16**. Załóżmy, że tłok wykonuje określoną i stałą liczbę cykli roboczych w ciągu minuty. Gdy ciśnienie na (górnym) wylocie cylindra jest dodatnie, woda jest wpychana przez zwężkę 2 do pionowej rury i jej poziom wzrasta. Gdy tłok przesuwają się na dół i ciśnienie na wylocie jest mniejsze, niż ciśnienie w rurze, woda jest z rury wyciągana. Poziom wody w rurze (napięcie na kondensatorze) waha się w rytm ruchów tłoka (zmian napięcia generatora). Gdy zwiększymy średnicę rury (pojemność kondensatora), wtedy przy tej samej zwężce (rezystorze R1) zmiany poziomu wody w rurze (napięcia kondensatora), będą oczywiście mniejsze. Tak samo zmiany poziomu wody (napięcia na kondensatorze) będą mniejsze, gdy zwiększymy częstotliwość ruchów tłoka (częstotliwość zmian napięcia generatora).

Odwrotnie będzie z turbiną (cewką). Przy małym kole zamachowym (indukcyjności), przez turbinę (cewkę) będzie przepływał znaczny prąd. Po prostu turbina o małej bezwładności będzie się obra-

cać raz w jedną, raz w drugą stronę w rytm zmian ciśnienia zasilającego. Gdy jednak bezwładność będzie bardzo duża, to prąd przez nią przepływający będzie znikomo mały - w czasie jednego cyklu ciężka turbina nie zdąży nawet drgnąć.

Tak samo przy zwiększeniu częstotliwości pracy tłoka, ilość wody przepływająca przez daną turbinę na pewno się zmniejszy.

Dokładnie ilustruje to zachowanie cewki przy prądzie zmiennym. Czym większa indukcyjność, tym mniejszy prąd, tak samo czym większa częstotliwość tym mniejszy prąd.

Zauważ w tym miejscu, że przy prądzie stałym mówiliśmy, iż kondensator i cewka przeciwstawiają się zmianom (napięcia i prądu), a teraz możemy mówić o oporności cewki i kondensatora w obwodach prądu przemiennego. Opór taki nazywamy reaktancją (pojemnościową i indukcyjną) i dla odróżnienia od rezystancji R (która występuje i przy prądzie stałym, i przy zmiennym) jest oznaczany odpowiednio  $X_C$  oraz  $X_L$ .

A oto stosowne wzory, które musisz zapamiętać, bo będziesz ich wielokrotnie używał:

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L$$

gdzie  $f$  - częstotliwość przebiegu zmiennego.

W praktyce, zamiast podawać częstotliwość w hercach, a pojemność i indukcyjność w faradach i henrach, podaje się częstotliwość w megahercach, pojemność w mikrofaradach, indukcyjność w mikrohenrach - wynik (reaktancja) wychodzi w omach. Często też podaje się pojemność w mikrofaradach a częstotliwość w kilohercach - wtedy reaktancja wyrażona jest w kiloomach.

Jak widać ze wzorów, opór cewki czy kondensatora nie jest stały. W przypadku cewki jest wprost proporcjonalny do in-

dukcyjności tej cewki i częstotliwości prądu - rośnie ze wzrostem częstotliwości. Cewka dławi więc przepływ prądu zmiennego - dlatego cewki, które w układach mają zmniejszać przepływ prądów zmiennych, nazywamy dławikami.

W praktyce podane wzory wygodniej jest przedstawić w postaci:

$$X_C = \frac{0,159}{f \cdot C}$$

$$X_L = 6,28 \cdot f \cdot L$$

Bardzo często potrzebne są też wzory na obliczenie pojemności czy indukcyjności o danej reaktancji:

$$C = \frac{0,159}{f \cdot X_C}$$

$$L = \frac{X_L}{6,28 \cdot f}$$

Do tej pory na przykładzie modelu hydraulicznego przedstawiłem Ci najważniejsze informacje o cewkach i kondensatorach. Jeśli jesteś dociekliwy, spróbuj jeszcze na podstawie tego modelu dociec, dlaczego mówi się, że w obwodzie zawierającym cewkę prąd opóźnia się względem przyłożonego napięcia (zartobliwa odpowiedź brzmi: ponieważ zaplątuję się w zwojach). Tak samo zastanów się co właściwie znaczy, że w obwodzie z kondensatorem prąd wy-

przedza napięcie. Podpowiem Ci tylko, że chodzi o zachowanie tych elementów przy zmianach napięcia. Spróbuj narysować przebiegi prądu w cewce

i kondensatorze przy dołączeniu do nich napięcia sinusoidalnego.

Podsumowujemy:

1. W cewce i kondensatorze można zgromadzić pewną ilość energii i potem tę energię odzyskać.
2. Pojemność kondensatora przeciwstawia się zmianom napięcia.
3. Indukcyjność cewki przeciwstawia się zmianom prądu. Nieodłącznym skutkiem tego zjawiska jest samoczynne wytwarzanie prądów (w kondensatorach) oraz napięć (w cewkach), których wartości może być bardzo duża.
4. W obwodach prądu przemiennego cewki i kondensatory stawiają przepływowi prądu pewien opór, który nazywamy reaktancją. Opór ten zależy od częstotliwości.

Piotr Górecki

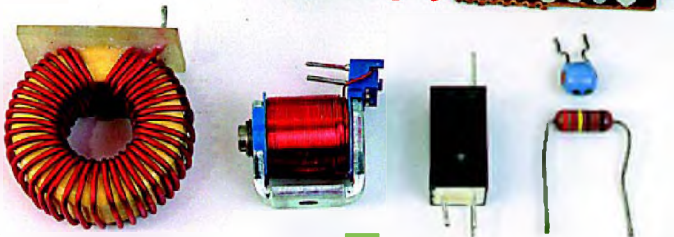
*Cewka i kondensator stanowią oprór dla przepływu prądu zmiennego. Opór ten, w odróżnieniu od rezystancji, jest nazywany reaktancją.*

W dwóch poprzednich listach próbowałem na przykładzie urządzeń hydraulicznych wytłumaczyć Ci działanie elementów elektronicznych, w szczególności cewek indukcyjnych.

Dzisiaj zajmiemy się dalszymi zagadnieniami z tej dziedziny.

Ponieważ temat nie należy do najłatwiejszych, być może będziesz musiał przeczytać materiał kilkakrotnie, aby w pełni zrozumieć i przyswoić sobie podane zasady.

# Elementy indukcyjne



## FUNDAMENTY ELEKTRONIKI



Wiesz już, że cewka przeciwstawia się zmianom prądu (a kondensator - zmianom napięcia). Rozumiesz, że przy zmianach prądu, w cewce wytwarza się napięcie, zwane napięciem samoindukcji. Napięcie to może mieć wartość wielokrotnie przekraczającą wartości napięć zasilania układu, w którym dana cewka pracuje.

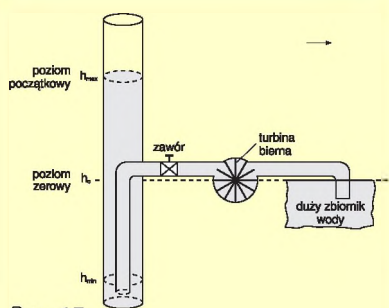
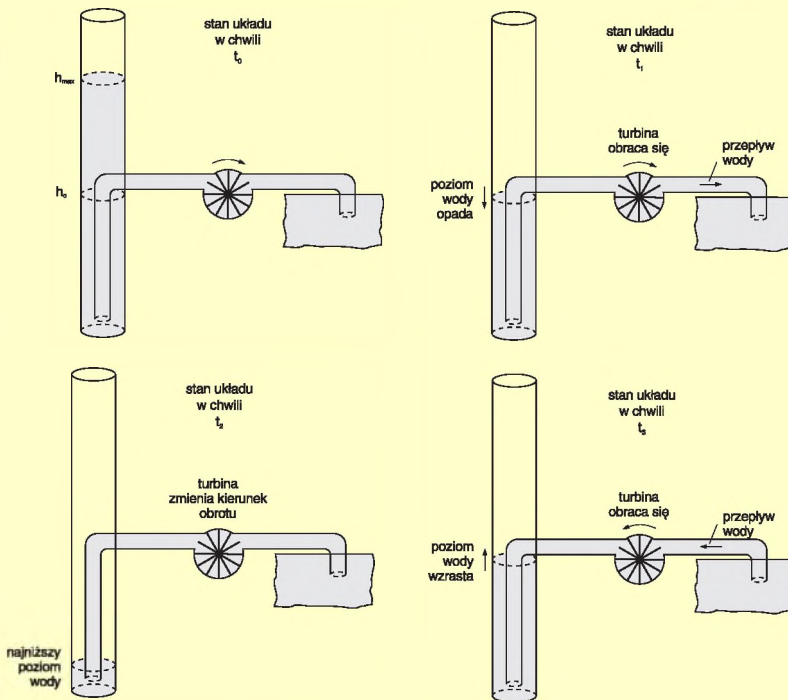
Wiesz, że w obwodach prądu zmiennego cewki i kondensatory stawiają przepływającemu prądowi pewien opór, zwany reaktancją. Opór ten zależy od częstotliwości - w cewkach, ze wzrostem częstotliwości opór ten rośnie, w kondensatorach - maleje.

Dzisiaj zajmiemy się dalszymi zagadnieniami z tej dziedziny.

### Rezonans

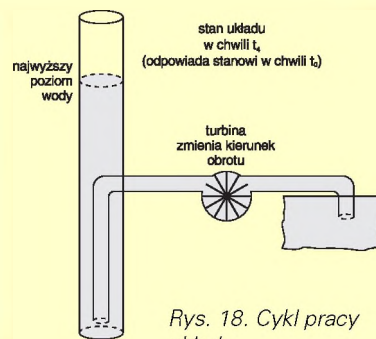
Ze słowem rezonans na pewno się już spotkałeś. Zapoznajmy się z rezonansem w obwodach elektrycznych. Jak zwykle, najpierw spróbujemy znaleźć łatwiejszą do zrozumienia, hydrauliczną analogię.

Spójrz na rysunek 17. Zobaczysz wysoką, pionową rurę, otwartą od góry

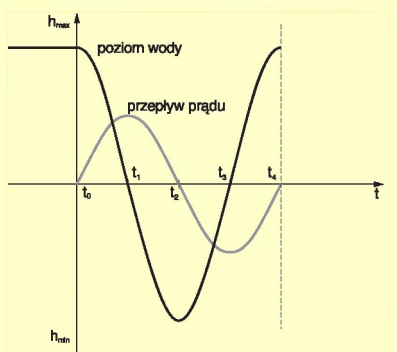


Rys. 17.

i turbinę bierną z kołem zamachowym. Jak pamiętasz, rura jest odpowiednikiem kondensatora, turbina - odpowiednikiem cewki. Załóżmy, że w stanie początkowym, czyli do chwili nazwanej  $t_0$ , zawór jest zamknięty i poziom wody w rurze jest wyższy od poziomu zerowego - jest to poziom oznaczony  $h_{max}$ . Gdy w chwili  $t_0$  zawór zostanie otwarty, poziom wody w rurze zacznie się obniżać. Turbina bierna zacznie się obracać i będzie nabierać prędkości. W pewnej chwili (nazwijmy ją



Rys. 18. Cykl pracy układu.



Rys. 19. Zmiany poziomu wody i przepływu.

chwilą  $t_1$ ), poziom wody w rurze obniży się do poziomu zerowego, oznaczonego  $h_0$ . Na pierwszy rzut oka mogłoby wydawać się, że w chwili  $t_1$ , czyli w momencie wyrównania poziomu wody w rurze z poziomem wody w dużym zbiorniku, przepływ wody ustanie. Owszem, w końcu ustanie, ale jeszcze nie teraz! Przecież przepływ wody przez turbinę w czasie od chwili  $t_0$  do  $t_1$  spowodował, że nabrała ona prędkości. W jej kole zamachowym zgromadziła się jakaś ilość energii. Dzięki tej energii, po chwili  $t_1$  turbina będzie spełniać rolę pompy i spowoduje dalsze obniżanie poziomu wody w rurze, poniżej poziomu  $h_0$ . Poziom wody w rurze będzie się więc nadal obniżał, a turbina tracić będzie stopniowo swą energię na wypompowanie wody i jej obroty będą coraz wolniejsze. W pewnej chwili  $t_2$ , poziom wody w rurze będzie najniższy ( $h_{min}$ ) i turbina się zatrzyma. Oczywiście zaraz potem turbina zacznie obracać się w przeciwnym kierunku, a poziom wody w rurze zacznie wzrastać. W chwili  $t_3$  poziom wody w rurze zrówna się z poziomem wody w dużym zbiorniku, ale przepływ wody nie ustanie, bo w czasie od  $t_2$  do  $t_3$  turbina zdąży nabrać prędkości i po chwili  $t_3$  znów będzie pełnić rolę pompy. Poziom wody w rurze będzie więc nadal wzrastał i w chwili  $t_4$  osiągnie poziom najwyższy. Oczywiście w chwili  $t_4$  turbina na moment się zatrzyma, a zaraz potem zacznie się obracać w przeciwnym kierunku. Zauważ, że w chwili  $t_4$  stan układu jest taki jak w chwili  $t_0$ . A więc opisany cykl powtórzy się, i to nie raz.

Poszczególne fazy takiego cyklu pokazane są na **rysunku 18**. Natomiast na **rysunku 19** możesz zobaczyć, jak zmienia się poziom wody w rurze oraz przepływ wody (co odpowiada prędkości turbiny).

Patrząc na zjawisko ze strony energetycznej, można powiedzieć, że energia zgromadzona pierwotnie w rurze (jako energia potencjalna słupa wody), zostaje przekazana do turbiny (gdzie gromadzi się w postaci energii kinetycznej koła za-

machowego). Potem znów jest gromadzona jako energia potencjalna słupa wody, itd, itd. W układzie zachodzi więc proces ciągłego przekazywania (wymiany) energii między rurą, a turbiną.

A teraz popatrz na **rysunek 20**. Nie masz chyba wątpliwości, że przedstawia on elektryczną analogię układu z rysunku 17. To właśnie jest obwód rezonansowy. Jego działanie dokładnie odpowiada przedstawionemu wcześniej opisowi, przy czym napięcie na kondensatorze odpowiada poziomowi wody w rurze, a prąd - przepływowi wody. Jak się słusznie domyślasz, rysunek 19 pokazuje także przebieg prądu w obwodzie i napięcia na kondensatorze.

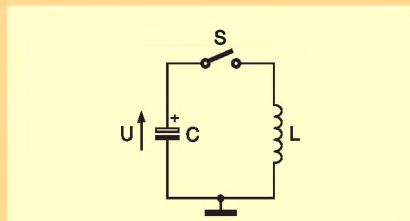
Czy zauważyłeś, że na początku, przed chwilą  $t_0$ , mieliśmy stan ustalony - na kondensatorze występowało stałe napięcie dodatnie. Po zamknięciu wyłącznika S, stało się coś dziwnego - w obwodzie pojawiły się przebiegi przemienne. Co ciekawe, są to przebiegi o kształcie sinusoidy.

A więc zrobiliśmy coś na kształt generatora przebiegów sinusoidalnych. To nie jest przypadek. Połączenie cewki (L) i kondensatora (C) daje obwód rezonansowy, który zawsze ma związek z przebiegami sinusoidalnymi. Możemy obrazowo powiedzieć, że każdy obwód rezonansowy "lubi" pewną częstotliwość. Dla konkretnej cewki i konkretnego kondensatora będzie to jakaś częstotliwość charakterystyczna, zwana częstotliwością rezonansową obwodu.

A od czego zależy częstotliwość tak wytwarzanych drgań? Popatrz na rysunki 17, 18, pomyśl chwilę i odpowiedz!

Czy jesteś przekonany, że częstotliwość będzie zależeć od pojemności rury i od bezwładności koła zamachowego turbiny?

Oczywiście, jeśli pojemność rury będzie mała i bezwładność turbiny też będzie mała, to zmiany będą szybkie, czyli częstotliwość drgań duża. I odwrotnie, gdy pojemność i bezwładność będą duże, wtedy zmiany będą powolne, czyli częstotliwość będzie mała.



Rys. 20. Obwód rezonansowy.

Tak samo jest z obwodem elektrycznym LC. Czym większa pojemność i indukcyjność, tym mniejsza częstotliwość.

Zapamiętaj bardzo ważny wzór. Jest to wzór na częstotliwość rezonansową obwodu LC.

$$f_{\text{rez}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

gdzie  $f_{\text{rez}}$  - częstotliwość rezonansowa, L - indukcyjność, a C - pojemność.

W praktyce dla częstotliwości radiowych zazwyczaj podaje się indukcyjność w mikrohenrach, a pojemność w pikofaradach. Wtedy częstotliwość wyrażoną w megahercach oblicza się ze wzoru:

$$f = \frac{159}{\sqrt{LC}}$$

f w MHz, L w  $\mu\text{H}$ , C w pF

Dla małych częstotliwości indukcyjność podaje się w milihenrach, pojemność w nanofaradach, a częstotliwość

w kilohercach oblicza się z podobnego wzoru:

$$f = \frac{159}{\sqrt{LC}}$$

f w kHz, L w mH, C w nF

Co ciekawe, dla częstotliwości rezonansowej, reak-

tancja cewki ( $X_L = 2\pi fL$ ) jest równa liczbowo reaktancji kondensatora ( $X_C = 1/2\pi fC$ ). Zapamiętaj to raz na zawsze: rezonans występuje zawsze wtedy, gdy reaktancja cewki jest liczbowo równa reaktancji kondensatora.

Teraz już z grubsza wiesz, co to jest i jak działa obwód rezonansowy.

## Rezystancja charakterystyczna

Popatrz jeszcze raz na rysunki 17, 19 i 20. Załóżmy, że w stanie ustalonym, czyli przed chwilą  $t_0$ , poziom wody w rurze wynosi  $h_{max}$  (napędzenie na kondensatorze -  $U_{max}$ ). Co możemy powiedzieć o maksymalnej wielkości przepływu wody (natężeniu prądu) po chwili  $t_0$ ? Co się stanie, jeśli zmniejszymy bezwładność turbiny (zmniejszymy indukcyjność)?

Zastanów się... Co wymyśliłeś?

Na pewno zmieni się szybkość zmian, czyli wzrośnie częstotliwość drgań - zgadza się to z podanym wcześniej wzorem na częstotliwość rezonansową. Ale nas interesuje wartość prądu. Odpowiedź możemy uzyskać na kilka sposobów:

Wiemy, że cewka przeciwstawia się zmianom prądu. Cewka o mniejszej indukcyjności przeciwstawia się słabiej, czyli prąd jest większy.

Podchodząc ze strony energetycznej, wyciągamy taki sam wniosek - pamięta-

my, że między kondensatorem i cewką występuje ciągłe przekazywanie energii. Jeśli ta sama ilość energii kondensatora ma w krótszym czasie zostać przekazana do cewki (cewki o mniejszej indukcyjności), to prąd musi być większy. To samo wychodzi nam ze znanych wzorów:

$$E_C = \frac{CU^2}{2} = E_L = \frac{LI^2}{2}$$

Jak z tego widać, możemy tu mówić o swego rodzaju oporności: to samo napięcie wywołuje przepływ prądu o różnej wartości.

Ponieważ jest to bardzo ważna, a często zupełnie nie rozumiana sprawa, przyjrzyjmy się jej jeszcze dokładniej.

Wyobraź sobie, że masz trzy obwody rezonansowe o podanych niżej wartościach elementów:

$$L=1\text{H} \text{ i } C=1\text{nF}$$

$$L=1\text{mH} \text{ i } C=1\mu\text{F}$$

$$L=1\mu\text{H} \text{ i } C=1\text{mF}$$

Zauważ, że wszystkie mają tę samą częstotliwość rezonansową.

Ale chyba czymś się różnią?

Wytłumacz mi, proszę, czym różnią się te trzy obwody rezonansowe o podanych wartościach elementów. Wróć do rysunku 17 i zastanów się, co to naprawdę oznacza. Zanim przeczytasz poniższy akapit spróbuj wyciągnąć wnioski samodzielnie.

A teraz analizujemy wspólnie.

Przypadek pierwszy: duża indukcyjność (1H), mała pojemność (1nF). Odpowiada to cienkiej rurze i ciężkiej turbinie. Przy danym napięciu  $U_{\max}$  w małym kondensatorze zgromadzi się niewielka ilość energii. Przy dużej indukcyjności prąd będzie bardzo mały.

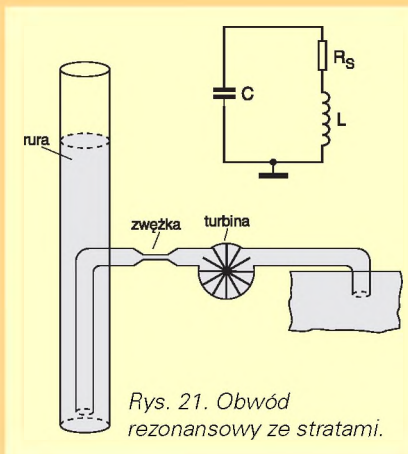
Zauważ - przy danym napięciu  $U_{\max}$  uzyskujemy mały prąd.

W trzecim przypadku, przy danym napięciu  $U_{\max}$ , w kondensatorze o dużej pojemności zgromadzi się znaczna ilość energii. Przy małej wartości indukcyjności, prąd będzie duży. Odpowiada to grubej rurze i lekkiej turbinie.

Co możemy powiedzieć o zależności prądu od napięcia? Widać tu jasno, że z obwodem rezonansowym związana jest jakaś wartość oporności charakterystycznej. Tę oporność charakterystyczną oznacza się zazwyczaj grecką literką  $\rho$ .

Co to za oporność? Musisz to zrozumieć dokładnie, żeby Ci się wszystko nie pomieszało - wiedz, że niebawem będziemy mówić o innych rodzajach oporności, z wiązanych z obwodem rezonansowym.

Może powiesz, że to było dla Ciebie jasne od początku - przecież cały czas chodzi tu o reakcję elementów przy częstotliwości rezonansowej. Masz ra-



Rys. 21. Obwód rezonansowy ze stratami.

cję i ma to ważne znaczenie praktyczne.

Możesz znaleźć tę oporność charakterystyczną licząc częstotliwość rezonansową, a potem reakcję.

Oczywiście:

$$\rho = 2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}$$

Łatwiej jednak skorzystać z prostego wzoru:

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Ten wzór już pewnie gdzieś widziałeś. Jaki jest jednak jego sens praktyczny.

Po pierwsze - oporność charakterystyczna obwodu rezonansowego jest równa reaktancji cewki i równa reaktancji kondensatora przy częstotliwości rezonansowej.

Po drugie ma to związek z tak zwanym dopasowaniem i przekazywaniem energii. To jest zagadnienie ogromnie ważne w technice w.cz. - zajmiemy się nim trochę później.

## Tłumienie drgań

Z rysunku 19 mogłoby wynikać, że w chwili  $t_4$  sytuacja jest identyczna, jak w chwili  $t_0$ . To by znaczyło, że drgania będą utrzymywać się w nieskończoność. Czy tak może być? Jak myślisz? Odpowiedź!

Jeśli odpowiedziałeś, że drgania mogłyby utrzymywać się w nieskończoność, pod warunkiem, że nie występowałyby żadne straty, masz rację!

W praktyce, w układzie hydraulicznym będą jednak występować straty wywołane tarciami: zarówno w turbinie, jak i w rurach połączeniowych. Czym mniejsze będą te straty, tym dłużej utrzymają się drgania.

W rzeczywistym układzie elektrycznym też zawsze występują jakieś straty. Większość tych strat spowodowanych jest rezystancją cewki. Prawdziwa cewka składa się z pewnej ilości zwojów drutu. Drut ten ma jakąś niezerową rezys-

tancję. Ponadto przy dokładnym rachunku należałoby uwzględnić rezystancję przewodów łączeniowych i różnego typu straty w kondensatorze. W praktyce zdecydowanie największe są straty na rezystancji cewki, i pozostałe straty można spokojnie pominąć.

Narysujmy więc praktyczny schemat zastępczy obwodu rezonansowego. Schemat taki możesz zobaczyć na **rysunku 21**.

W rzeczywistości przebiegi prądu i napięcia nie będą więc wyglądać, jak na rysunku 19. W każdym cyklu część energii jest bezpowrotnie tracona (zamieniana w procesie tarcia w bezużyteczne ciepło). Tak samo jest w obwodzie elektrycznym. Dlatego kolejne drgania będą mieć coraz mniejszą amplitudę. W rzeczywistości przebiegi napięcia i prądu w obwodzie rezonansowym będą drganiami gasnącymi - pokazuje to **rysunek 22**. Czym większe będą straty, tym szybciej zanikną drgania. Można powiedzieć, że rezystancja występująca w obwodzie rezonansowym tłumia drgania.

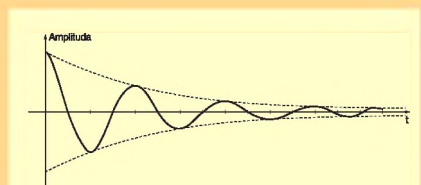
Choć trzeba rozumieć podaną właśnie przyczynę zaniku drgań w obwodzie rezonansowym, w praktyce ważniejsze są inne objawy tego zjawiska. O tym jednak później.

W tym miejscu dla ścisłości należałoby wyjaśnić kwestię, czy rezystancja strat wpływa na częstotliwość rezonansową. Jeszcze raz przeanalizuj rysunek 21b. Jeśli dojdiesz do wniosku, że rezystancja ma tu jakiś wpływ - masz rację. Ale przy niewielkich stratach wpływ na częstotliwość jest wręcz pomijalnie mały, dlatego prawie nigdy nie uwzględnia się do przy obliczaniu częstotliwości rezonansowej. Warto jednak wiedzieć, że znany wzór

$$\text{frez} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

w zasadzie dotyczy obwodu idealnego. Nie ma to znaczenia - w praktyce i tak obliczenia dokładne nie są potrzebne, bo rzeczywiste cewki i kondensatory wykonywane są z pewną niezerową tolerancją i dla uzyskania potrzebnej częstotliwości trzeba stosować strojenie obwodu przez zmianę indukcyjności lub pojemności.

Piotr Górecki



Rys. 22. Drgania gasnące.

W tym odcinku kontynuujemy rozważania dotyczące obwodu rezonansowego. Ważnym pojęciem, które pojawia się w tym artykule, jest pojęcie dobroci obwodu.

# Elementy indukcyjne

## FUNDAMENTY ELEKTRONIKI

### część 4

### Dobroć obwodu rezonansowego

Mówiliśmy już, że w każdym rzeczywistym obwodzie rezonansowym występują straty. Straty te możemy przedstawić w postaci rezystancji włączonej szeregowo z indukcyjnością (niewielkie straty kondensatora pomijamy). Gdybyśmy chcieli, moglibyśmy też włączyć w obwód rezonansowy dodatkową rezystancję szeregową. Oczywiście włączenie takiej rezystancji dodatkowo zwiększy straty, czyli bardziej stłumi obwód.

Potrzebna byłaby nam jakaś miara tych strat.

Spójrzmy na problem od strony energetycznej. W czasie rezonansu następuje cykliczna wymiana (przepływ) energii między cewką a kondensatorem. W każdym cyklu drgań (okresie), tracona jest jakaś część energii zgromadzonej w obwodzie. Zauważ, że stosunek całkowitej energii gromadzonej w elementach obwodu do energii strat (w ciągu jednego okresu) nie zależy od napięcia pracy. Czym większe napięcie, tym większy prąd i większe straty w rezystancji.

Wprowadźmy więc pojęcie dobroci, jako miary tych strat. Dobroć oznacza się dużą literą  $Q$ .

Nie będę Ci oczywiście wyprowadzał wzoru - podam tylko końcowy wynik:

$$Q = \frac{P}{P_s}$$

gdzie  $P_s$  to zastępcza szeregową rezystancja strat, którą zaznaczyliśmy na rysunku 21, zaś  $r$  to rezystancja charakterystyczna.

Jak wynika z wcześniejszych wzorów:

$$Q = \frac{\sqrt{L/C}}{R} = \frac{2\pi fL}{R_s} = \frac{1}{2\pi fC \cdot R_s}$$

Ty pewnie w literaturze spotkałeś inne określenie dobroci. My dojdziemy do tego później. Choć w praktyce rzeczywiście mówią o dobroci nieco w innym kontekście (chodzi o szerokość pasma filtru), Ty zawsze pamiętaj, że dobroć w swych korzeniach jest miarą strat w obwodzie.

Tu należałoby już przejść do obwodu rezonansowego jako filtru. Zanim to zrobimy, musisz jeszcze utrwalić sobie pewne istotne wiadomości i wyobrażenia związane z rezonansem.

### Obwód rezonansowy jako filtr

Chyba nie masz wątpliwości, że bardzo rzadko wykorzystujemy obwód rezonansowy do wytwarzania drgań gasnących według rysunku 20. Narysowałem Ci go tylko dla ułatwienia analizy. Do czego więc przydaje się obwód rezonansowy?

Przed chwilą mówiłem Ci, że obwód rezonansowy lubi swoją częstotliwość rezonansową.

Najogólniej biorąc, idealny (czyli bezstratny) obwód rezonansowy "lubi" swoją częstotliwość rezonansową niezmiernie - "lubi" ją tak bardzo, że potrafi ją wytworzyć niejako z niczego, a właściwie z napięcia stałego; co więcej - utrzyma drgania w nieskończoność. Jeśli w obwodzie występuje rezystancja strat, jego "miłość" do częstotliwości rezonansowej jest mniejsza - tym mniejsza, im większe straty.

Już na pierwszy rzut oka widać, że obwód rezonansowy wyróżnia swoją "ulubioną" częstotliwość, więc może być wykorzystany do filtrowania, czyli oddzielania przebiegów o różnych częstotliwościach.

Przyjrzyjmy się temu dokładnie.

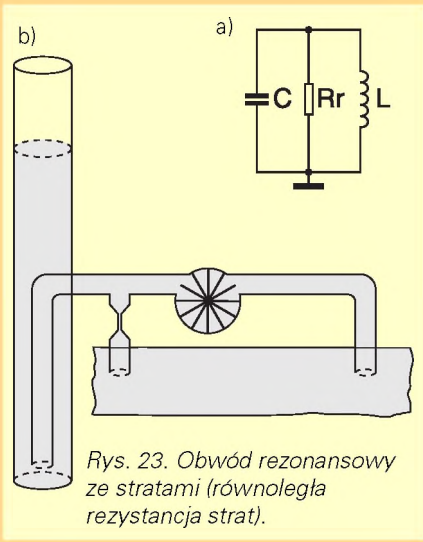
### Rezonans równoległy i rezonans szeregowy

Niejednokrotnie spotkałeś już określenia: obwód rezonansowy równoległy i szeregowy. Prawdopodobnie też słyszałeś o czymś takim jak rezonans prądów i rezonans napięć. Czyżby więc istniały dwa rodzaje rezonansu?

Nie. Określenia te wzięły się z praktyki - ze sposobu wykorzystania obwodu rezonansowego. O nazwie decyduje sposób dołączenia współpracujących z obwodem elementów, zwłaszcza rezystancji.

Ponieważ nie omawialiśmy jeszcze pojęcia źródła prądowego, i nie chcę Cię męczyć wprowadzeniem pojęcia przewodności (odwrotności rezystancji), muszę Ci sprawę uzmysłowić trochę okrężną drogą.

Na rysunku 20 mieliśmy do czynienia z obwodem idealnym, bezstratnym. Nie wiele myśląc, rezystancję reprezentującą straty włączyliśmy w obwód szeregowo. W zasadzie jest to jak najbardziej słuszne. W układzie hydraulicznym z rysunku 17 straty wynikają głównie z tarcia wody o rury i tarcia w turbinie. Rzeczywiście, aż prosi się, aby straty te w układzie hydraulicznym przedstawić w postaci zwężki, umieszczonej szeregowo, a w obwodzie elektrycznym w postaci szeregowego rezystora.



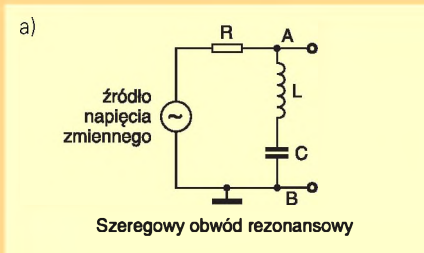
Rys. 23. Obwód rezonansowy ze stratami (równoległa rezystancja strat).

Ale pomyśl chwilę - czy tych strat nie można przedstawić inaczej?

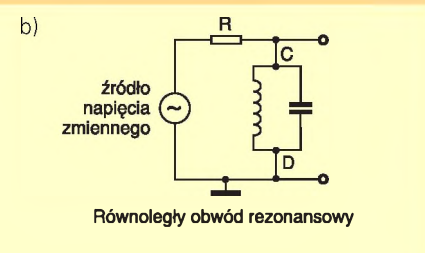
Dlaczego nie przedstawić ich jako rezystancji równoległej?

W układzie w elektrycznym wyglądałoby to jak na rysunku 23a, a hydraulicznym - 23b (porównaj to z rysunkiem 21).

Zastanów się - w rzeczywistości straty powstają we wszystkich elementach rzeczywistego układu - w dielektryku kondensatora, w doprowadzeniach kondensatora, w przewodach łączących, w drucie cewki, w rdzeniu cewki itd. My przy opisie sytuacji musimy przedstawić je w jakiś prosty sposób (w postaci jednej, zastępczej rezystancji), żeby zbyt nie komplikować obliczeń i analizy. Powinniśmy mieć przy tym świadomość, że nasz opis na pewno jest lepszym lub gorszym przybliżeniem. Jeśli tak, to nie ma większej różnicy, czy straty w obwodzie



Szeregowy obwód rezonansowy



Równoległy obwód rezonansowy

Rys. 24. Podstawowe układy filtrów.

rezonansowym przedstawimy w postaci szeregowej, czy równoległej. Przedstawimy tak, żeby nam było wygodniej i łatwiej liczyć oraz analizować zachowanie układu.

Popatrz jeszcze na rysunki 23 i 21. Odpowiedz na pytanie kontrolne: czy dla konkretnego obwodu, zastępcza szeregową rezystancja strat ma taką samą wartość, jak zastępcza równoległa rezystancja strat?

Oczywiście, że nie - w dobrym obwodzie rezonansowym straty są w sumie niewielkie. Czyli rezystancja szeregową z rysunku 21a będzie miała wartość niewielką, a równoległą z rysunku 23a - bardzo dużą.

Może jeszcze zapytasz, jak to jest z dobrocią przy przedstawieniu strat w postaci rezystancji równoległej?

Przed chwilą doszliśmy do wniosku, że równoległa rezystancja ma dużą wartość. Zapewne nie zaskoczy Cię więc

wzór na dobroć w obwodzie równoległym:

$$Q = \frac{R_r}{\rho} = \frac{R_r}{\sqrt{L/C}} = \frac{R_r}{2\pi f L} = 2\pi f C \cdot R_r$$

Zauważ, czym różni się on od wcześniejszej podanej dla rezystancji szeregowej:

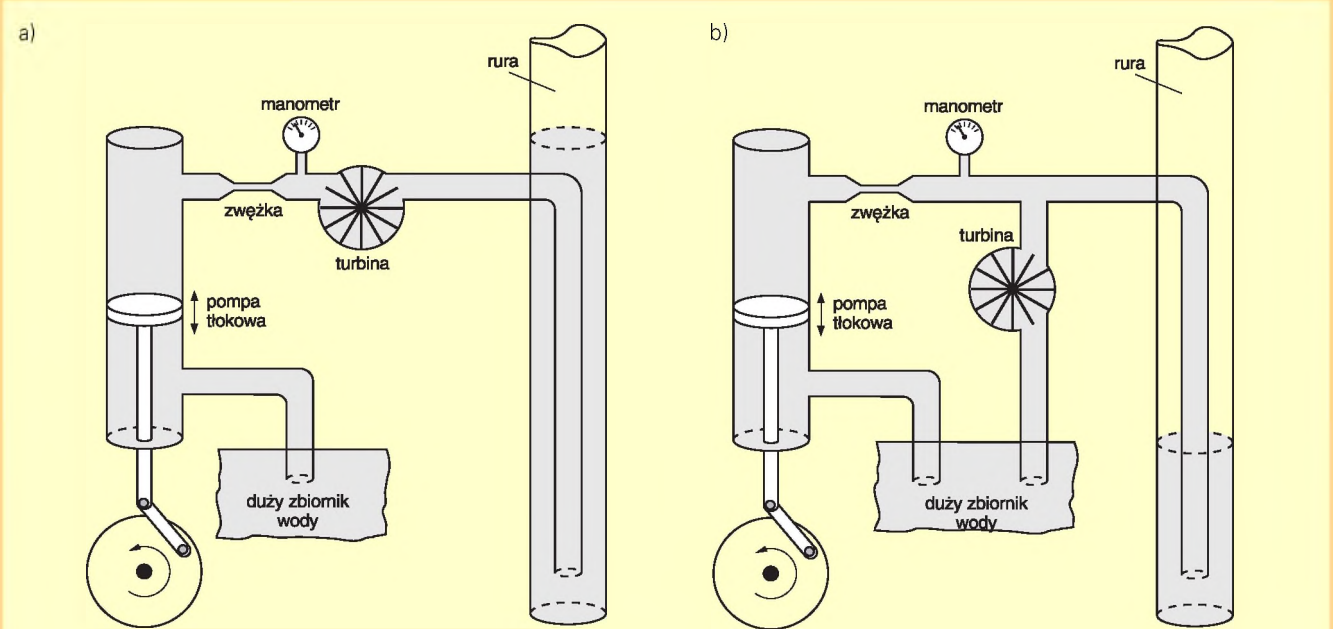
$$Q = \frac{\sqrt{L/C}}{R} = \frac{2\pi f L}{R_s} = \frac{1}{2\pi f C \cdot R_s}$$

*Sumę strat w obwodzie rezonansowym możemy przedstawić jako zastępczą rezystancję strat. Dla wygody i ułatwienia obliczeń, rezystancja taka może być włączona do obwodu szeregowo albo równoległo.*

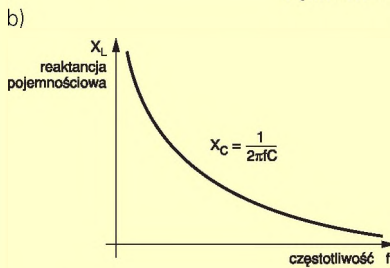
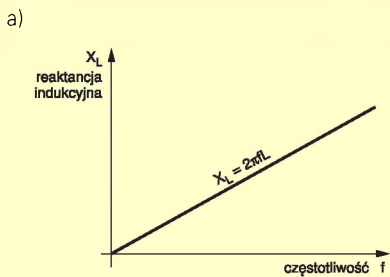
Oczywiście dla danego obwodu z obu wzorów musi wyjść ta sama wartość dobroci. Inaczej być nie może. Przecież dobroć nie bierze się ze wzorów - wprost przeciwnie, to my dobieramy jakieś modele i jakieś wzory, które mają

możliwie wiernie opisywać rzeczywiste zjawiska, z jakimi mamy do czynienia w obwodzie rezonansowym.

Jeśli mamy już dwa schematy zastępcze obwodu rezonansowego, robimy kolejny ważny krok.



Rys. 25. Obwody hydrauliczne.



Rys. 26.

## Oporność obwodu rezonansowego

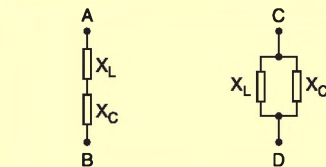
Na rysunku 24 możesz zobaczyć dwa podstawowe filtry, wykorzystujące obwód rezonansowy. Są one często spotykane w praktyce, zwłaszcza w technice w.c.z. Właśnie tu masz szeregowy i równoległy obwód rezonansowy. Na początek interesować nas będzie oporność, jaką dla różnych częstotliwości stanowi obwód rezonansowy.

Żeby to lepiej zrozumieć, spróbujmy z grubsza przeanalizować działanie układów hydraulicznych pokazanych na rysunku 25.

Najpierw zastanówmy się wspólnie nad działaniem układu z rysunku 25a, który ma przybliżyć działanie układu elektrycznego z rysunku 24a. Dla bardzo małych częstotliwości (bardzo wolnych ruchów tłoka pompy), turbina będzie się powoli obracać w jedną i w drugą stronę, a poziom wody w rurze będzie się pomalą podnosił i opadał w takt ruchów tłoka.

Skoncentruj się. Czy zauważyłeś, że przy tak małej częstotliwości obecność turbiny praktycznie nie ma znaczenia i układ zachowuje się, jakby składał się tylko z pompy, zwężki i rury. Z kolei dla bardzo dużych częstotliwości, przede wszystkim daję o sobie znać bezwładność turbiny. Turbina praktycznie się nie porusza. Dla dużych częstotliwości obecność rury praktycznie nie ma znaczenia, bo turbina skutecznie odizolowała rurę od pompy i zwężki - układ zachowuje się tak, jakby składał się tylko z pompy, zwężki i turbiny.

Prześledźmy jeszcze działanie układu z rysunku 25b. Dla bardzo małych częstotliwości turbina obraca się bez przeszkód w jedną i drugą stronę. Jakiekol-



Rys. 27. Schematy zastępcze obwodów z rys. 24 i 25.

wiek (powolne) zmiany ciśnienia powodują przepływ wody przez turbinę. Tym samym obecność rury nie gra praktycznie żadnej roli - układ zachowuje się, jakby składał się tylko z pompy, zwężki i turbiny. Z kolei przy bardzo dużych częstotliwościach ciężka turbina praktycznie nie przepuszcza wody w żadnym kierunku - układ zachowuje się tak, jakby składał się tylko z pompy, zwężki i rury.

Analogicznie wygląda to w obwodzie elektrycznym. Spróbuj zrozumieć (nie musisz natomiast uczyć się na pamięć):

1. obwód rezonansowy szeregowy
  - dla małych częstotliwości zachowuje się jak kondensator (ma charakter pojemnościowy)
  - dla dużych częstotliwości zachowuje się jak cewka (ma charakter indukcyjny)
2. obwód rezonansowy równoległy zachowuje się odwrotnie:
  - dla małych częstotliwości zachowuje się jak cewka (ma charakter indukcyjny)
  - dla dużych częstotliwości zachowuje się jak kondensator (ma charakter pojemnościowy).

Zanim dowiesz się, jak to wygląda dla częstotliwości rezonansowej, utrwal sobie podane wyżej informacje, korzystając z rysunku 26. Właśnie na rysunku 26a i b możesz zobaczyć, jak zmienia się reaktancja cewki i kondensatora przy zmianach częstotliwości.

Teraz popatrz na rysunek 24a. Mamy tu szeregowe połączenie cewki i kondensatora. Natomiast na rysunku 24b mamy równoległe połączenie tych elementów. Wiemy, że reaktancja jest swego rodzaju opornością. Rysujemy więc schemat zastępczy szeregowego i równoległego obwodu rezonansowego - patrz **rysunek 27**. Z połączeniem oporów chyba nie powinniśmy mieć kłopotów. Zastanów się:

Przy połączeniu szeregowym, wypadkowa oporność powinna być sumą obu oporności składowych. Zgadza się to z podanymi przed chwilą wnioskami: szeregowy obwód rezonansowy dla małych częstotliwości ma charakter pojemnościowy, bo reaktancja kondensatora ma wartość dużo większą niż reaktancja cewki. Tak samo przy dużych częstotliwościach dominuje reaktancja indukcyjna. Wszystko pasuje.

Przy połączeniu równoległym wypadkowa oporność powinna być mniejsza od każdej z oporności składowych. Tak przy najmniej jest przyłączeniu rezystorów. Na pierwszy rzut oka w równoległym obwodzie rezonansowym też tak jest: przy małych częstotliwościach obwód ten ma małą reaktancję - decyduje o tym mała reaktancja cewki, natomiast reaktancja kondensatora jest duża, więc nie ma istotnego wpływu na wypadkową reaktancję.

Dla dużych częstotliwości obwód równoległy też ma małą reaktancję - tym razem decydujące znaczenie ma mała reaktancja kondensatora, a dużą reaktancję cewki można zaniedbać.

Wszystko wydaje się jasne. Może więc spróbujemy narysować przebieg reaktancji obwodu równoległego i szeregowego w zależności od częstotliwości.

Biorąc pod uwagę zasady obowiązujące przy łączeniu rezystorów narysowalibyśmy krzywe wypadkowe, jak na **rysunku 28**.

Jednak w rzeczywistości oporność wypadkowa obwodów rezonansowych wcale nie zmienia się tak, jak na rysunku 28, dlatego rysunek jest przekreślony. Dla obwodów rezonansowych, w których straty związane z występowaniem szkodliwych rezystancji są bardzo małe, oporność wypadkowa będzie taka, jak na rysunku 29.

Czy jesteś zdziwiony?

Okazuje się, że dla częstotliwości rezonansowej idealny obwód szeregowy ma oporność równą zero. Natomiast obwód równoległy stanowi wtedy nieskończenie wielką rezystancję.

Nietrudno się domyślić, że straty jakby pogarszają sytuację.

Skoncentruj się. Czy już potrafiłbyś odpowiedzieć na pytanie, jakie będą wypadkowe oporności odvodu w stanie rezonansu?

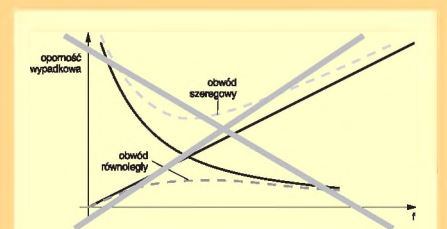
Popatrz na wzory na dobroć obwodu szeregowego i równoległego:

$$Q = \frac{R_r}{p}$$

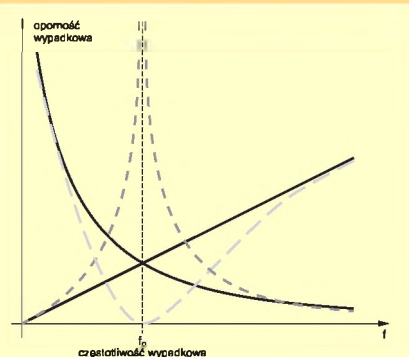
$$Q = \frac{P}{R_s}$$

Przekształć je:

$$R_r = p \cdot Q$$



Rys. 28. Próba określenia oporności wypadkowej.



Rys. 29. Oporność obwodów rezonansowych.

$$R_s = \frac{P}{Q}$$

Uważaj! Masz tu odpowiedź, jakie oporności będzie miał szeregowy, a jakie równoległy obwód rezonansowy.

Zapamiętaj więc raz na zawsze:

Idealny obwód szeregowy miałby w rezonansie oporność równą zeru.

Idealny obwód równoległy miałby w rezonansie oporność nieskończenie wielką.

Przy praktycznych obliczeniach rzeczywistych obwodów rezonansowych nie znamy wartości  $R_s$  i  $R_r$ , znamy za to indukcyjność  $L$ , pojemność  $C$  i umiemy w stosunkowo prosty sposób

zmierzyć dobroć  $Q$ . Punktem wyjścia do obliczenia  $R_s$  i  $R_r$  jest rezystancja charakterystyczna:

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Dla częstotliwości rezonansowej szeregowe połączenie cewki i kondensatora (obwód szeregowy) ma minimalną oporność  $R_s$ ,  $Q$ -krotnie mniejszą od rezystancji charakterystycznej  $\rho$ .

Natomiast obwód równoległy ma przy częstotliwości rezonansowej oporność  $R_r$   $Q$ -krotnie większą od rezystancji charakterystycznej  $\rho$ .

Inaczej mówiąc, znaleźliśmy praktyczny sens wprowadzonych poprzednio zastępczych rezystancji  $R_s$  i  $R_r$ . Właśnie takie oporności, a ściślej biorąc - rezystancje, ma obwód równoległy i szeregowy w rezonansie.

Masz teraz komplet informacji, bo wcześniej przeanalizowaliśmy, jaką opor-

ność reprezentuje obwód rezonansowy dla częstotliwości większych i mniejszych od rezonansowej.

*Dla częstotliwości rezonansowej szeregowe połączenie cewki i kondensatora (obwód szeregowy) ma minimalną oporność, rezystancję  $Q$ -krotnie mniejszą od rezystancji charakterystycznej. Natomiast obwód równoległy ma przy częstotliwości rezonansowej oporność, rezystancję  $Q$ -krotnie większą od rezystancji charakterystycznej  $\rho$ .*

Zapewne wiesz już, jak będą działać filtry, pokazane na rysunku 24.

Biorąc pod uwagę przebieg oporności obwodu rezonansowego w funkcji częstotliwości z rysunku 29, dojdiesz do wniosku, że filtr z obwodem równoległym z rysunku 24b przepuszcza częstotliwości zbliżone do swojej częstotliwości rezonansowej. Filtr

z obwodem szeregowym przepuszcza wszystkie inne, a stanowi pułapkę dla częstotliwości bliskich częstotliwości rezonansowej.

W następnych odcinkach przyjrzymy się bliżej sprawie łączenia oporności i pomalutką doprowadzę Cię do liczb zespolonych.

Piotr Górecki

Ostatnio zaczęłem Ci tłumaczyć sprawę rezonansu. Poznałeś pojęcie oporności charakterystycznej - jest to występująca podczas rezonansu oporność cewki i równa jej liczbowo oporność kondensatora. Doszliśmy do wniosku, że w idealnym obwodzie rezonansowym powstałe drgania mogłyby się utrzymywać w nieskończoność. Omówiliśmy pojęcie dobroci jako miary strat w obwodzie nieidealnym. Zaczęliśmy analizować działanie szeregowego i równoległego obwodu rezonansowego - okazało się, że obwód rezonansowy działa jako filtr. Ostatnio wzięliśmy na warsztat sprawę oporności wypadkowej szeregowego i równoległego obwodu rezonansowego.

Wiesz już, że dla częstotliwości rezonansowej szeregowo połączenie cewki i kondensatora (obwód szeregowy) ma minimalną oporność - stanowi rezystancję Q-krotnie mniejszą od rezystancji charakterystycznej (gdzie  $\rho = \sqrt{L/C}$ ). W obwodzie idealnym, bezstratnym, oporność ta wynosiłaby zero.

Natomiast obwód równoległy ma przy częstotliwości rezonansowej oporność, a ściślej - rezystancję, o wartości Q-krotnie większej od rezystancji charakterystycznej tego obwodu.

Te wnioski są może dla Ciebie zaskoczeniem, ale naprawdę nie ma w tym nic z magii - w sumie jest to nawet bardzo proste. Okazuje się tylko, że dla pełnego zrozumienia problemu trzeba bliżej zapoznać się z pojęciem oporności. Zróbmy to dzisiaj.

Ten odcinek jest nieco trudniejszy niż materiał, który przedstawiłem wcześniej, dlatego nie przejmuj się, jeśli wusstykiego nie zrozumiesz od razu. Być może podane wiadomości będziesz stopniowo układał sobie w głowie, wracając kilkakrotnie do tego artykułu. Jeśli jednak chcesz zajmować się elektroniką na poważnie, to wiedz, że podane tu wnioski są dla Ciebie bardzo istotne i przydadzą Ci się wielokrotnie w przyszłości.

Zadaj więc sobie trochę trudu i spróbuj nadążyć za podanym tokiem rozumowania.

## Dodawanie reaktancji

Do tej pory ogólnie mówiliśmy o różnych rodzajach oporności. Znasz już pojęcie rezystancji - występuje ona przy prądzie stałym i zmiennym. Wyraża się ją w omach.

Wiesz także, że dla prądu zmiennego cewka i kondensator przedstawiają sobą pewien opór (reaktancję indukcyjną i pojemnościową). Reaktancję tę także wyrażamy w omach. Ale chyba czegoś jeszcze o tych omach (a właściwie o tych opornościach) nie wiemy...

Połącz w szereg dwa rezystory 100-omowe. Oporność wypadkowa będzie oczywiście sumą obu oporności składowych - wyniesie ona 200 $\Omega$ . Ale gdy w szeregowym obwodzie rezonansowym dodają się dwie idealne reaktancje (pojemnościowa i indukcyjna), obie mające po 100 $\Omega$ , to oporność wypadkowa wyniesie 0 $\Omega$  (porównaj rysunek 29 w EdW 3/97 str. 70).

Czyżby więc istniały trzy rodzaje omów? Omy rezystancyjne, omy indukcyjne i omy pojemnościowe? Jak to jest, że jeśli dodajemy "omy rezystancyjne", to wypadkowa oporność się zwiększa, a gdy dodajemy "omy indukcyjne" i "omy pojemnościowe", wtedy wypadkowa oporność się zmniejsza?

Zauważ, że w obwodzie rezonansowym szeregowym przy częstotliwości rezonansowej liczbowo równe reaktancje cewki i kondensatora zamiast się wprost dodać - zniósły się do zera... A może właśnie się dodały? No, no...

Tak jest! One się dodały i zniósły! Ale czy potrafisz to sobie jakoś wytłumaczyć? Spróbuj ruszyć głową.

Wygląda na to, że reaktancja indukcyjna i pojemnościowa... mają przeciwne znaki. Ale co to mogłoby znaczyć, że kondensator ma jakąś ujemną reaktancję? Nie mów tylko, że to jest bez sensu! Ma go głębokie i praktyczne znaczenie - wierz mi: to Twoja intuicja na razie nie

podsuwa Ci żadnego jasnego wytłumaczenia.

Wróć do rysunku 29. Przy połączeniu szeregowym, równe co do wartości liczbowej reaktancje kondensatora i cewki zniósły się do zera. A przy połączeniu równoległym?

Dodały się, to niewłaściwe słowo. One też jakby się zniósły, tylko w efekcie wypadkowa oporność gwałtownie wzrosła (w obwodzie idealnym wzrosłaby do nieskończoności). Trudno to w pierwszej chwili pojąć, ale naprawdę nie ma tu nic z magii. Po prostu czegoś jeszcze o opornościach nie wiemy. Czujemy na razie przez skórę, że oprócz liczbowej wartości reaktancji podawanej w omach, należy tu jeszcze uwzględnić jakiś dodatkowy czynnik, coś w rodzaju znaku plus czy minus. Tą sprawę wyjaśnię Ci za chwilę. Podany tam materiał wprowadzi Cię (mam nadzieję bezboleśnie) w świat profesjonalnej elektroniki, gdzie wykorzystuje się obliczenia na liczbach zespolonych. Nie bój się, to wcale nie jest trudne.

Na razie wracamy do naszego obwodu rezonansowego.

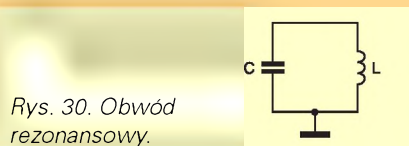
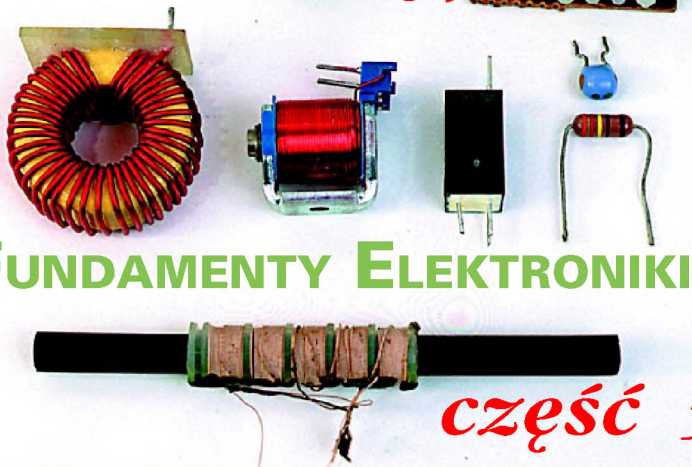
## Zależności fazowe - impedancja

Wróćmy jeszcze raz do podstawowego obwodu rezonansowego, który pokazałem Ci na **rysunku 30**. Czy zgodzisz się ze stwierdzeniem, że prąd płynący przez

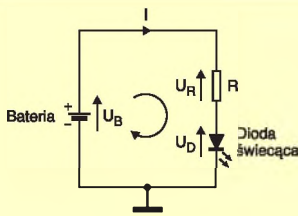
# Elementy indukcyjne

## FUNDAMENTY ELEKTRONIKI

### część 5



Rys. 30. Obwód rezonansowy.



Rys. 31. Strzałkowanie napięć i prądów w obwodzie.

cewkę i kondensator, to ten sam prąd? Czy można powiedzieć, że napięcia na cewce i kondensatorze mają taką samą wartość? Nie protestujesz?

Zastanówmy się nad tym dokładniej.

Przy analizie obwodów elektrycznych, musimy zachować jakiś porządek i pewne reguły, w przeciwnym wypadku zginiemy marnie na próbie analizy bardziej skomplikowanego układu. Aby nie pogubić się w obliczeniach, zaznaczamy kierunki przepływu prądu i kierunek napięcia. Takie zaznaczanie nazywa się strzałkowaniem.

W obwodach prądu stałego sprawa jest bardzo prosta. W przypadku napięć strzałka wskazuje punkt o wyższym potencjale (bardziej dodatni). Umówiliśmy się, że strzałka wskazuje kierunek prądu od bieguna dodatniego do ujemnego (a właściwie od punktu o wyższym potencjale do punktu o niższym potencjale). Ten umowny kierunek przepływu prądu jest przeciwny, niż ruch nośników prądu - elektronów, ale to akurat nie ma żadnego znaczenia.

Jeśli pamiętasz ze szkoły prawo Kirchhoffa dla napięć, to niniejsze rozważania tym bardziej będą dla Ciebie jasne. Twierdzenie to mówi, że w każdym obwodzie zamkniętym, suma napięć na elementach tworzących obwód jest w każdej chwili równa zero.

Jeśli nie jest to dla Ciebie do końca jasne, popatrz na **rysunek 31**. W tym prostym obwodzie zamkniętym (tak zwanym oczku) oznaczyłem, czyli zastrzałkowałem, występujące tam napięcia. Wybrałem też kierunek obiegu tego oczka (może to być kierunek zgodny z ruchem wskazówek zegara albo przeciwny - nie ma to znaczenia). Napięcia zastrzałkowane zgodnie z kierunkiem obiegu oczka biorę ze znakiem plus, zastrzałkowane przeciwnie - ze znakiem minus.

Zgodnie z napięciowym prawem Kirchhoffa otrzymuję:

$$U_B + (-U_R) + (-U_D) = 0$$

czyli:

$$U_B - U_R - U_D = 0$$

Taki zapis może się wydać dziwny i niepotrzebny. Ale przecież po przeniesieniu  $U_R$  i  $U_D$  na drugą stronę znaku równości, otrzymujemy równanie, którego sens jest oczywisty:

$$U_B = U_R + U_D$$

W tak prostym układzie można obyć się bez strzałkowania. Ale przy skomplikowanych sieciach strzałkowanie ułatwia życie, a czasami wręcz umożliwia obliczenia.

Czy jednak strzałkowanie ma sens w przypadku przebiegów zmiennych?

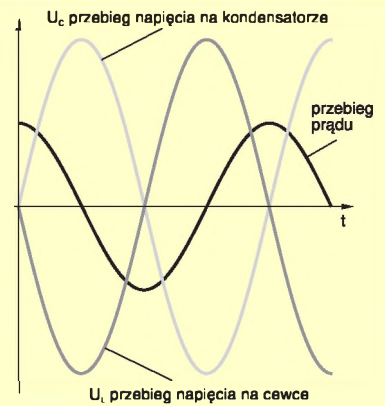
To bardzo ważne pytanie! Strzałkowanie ma nam pomagać i musi mieć jakiś sens fizyczny. Przy przebiegach przemienialnych, a zwłaszcza sinusoidalnych, nie bardzo możemy mówić o punktach o wyższym, czy niższym potencjale, bo napięcie ciągle się tam zmienia. Możemy jednak mówić o wartościach chwilowych. W takim wypadku strzałkowanie jak najbardziej ma sens. Przy zaznaczaniu wartości chwilowych napięcia i prądu oznaczmy małymi literami  $u$ ,  $i$ , w odróżnieniu od dużych liter w obwodach prądu stałego.

Niestety, operowanie wartościami chwilowymi, a zwłaszcza jakiegokolwiek obliczenia tych wartości, są w praktyce bardzo kłopotliwe.

Tu pozwolę sobie na małą dygresję. Na pewno wiesz, że przy przebiegach zmiennych mówi się o wartości maksymalnej, czyli szczytowej, oznaczanej  $U_m$ ,  $U_{max}$ ,  $U_p$  (peak - szczyt),  $U_A$ . Jest to tak zwana amplituda przebiegu zmiennego. W praktyce często podaje się wartość międzyszczytową, czyli podwójną wartość amplitudy (oznaczaną  $U_{pp}$ ).

Jednak najczęściej używa się pojęcia wartości skutecznej przebiegu zmiennego. Według prostej, ale prawdziwej definicji, wartość skuteczna napięcia zmiennego jest równa wartości napięcia stałego, które na danej rezystancji spowoduje wydzielenie takiej samej ilości ciepła, jak to napięcie zmienne. Podobnie można zdefiniować wartość skuteczną natężenia prądu zmiennego. Dla przebiegu sinusoidalnego wartość skuteczna jest równa  $1/\sqrt{2}$  wartości szczytowej, czyli w przybliżeniu 0,707. Zapamiętaj wartość liczby  $\sqrt{2}$  (około 1,41) oraz  $1/\sqrt{2}$  czyli około 0,707. Jeśli znasz wartość skuteczną napięcia (prądu) sinusoidalnego, napięcie szczytowe obliczysz, mnożąc ją przez 1,41. Znając wartość szczytową (amplitudę), mnożąc ją przez 0,707 obliczysz wartość skuteczną. Zapamiętaj to raz na zawsze - jest to bardzo przydatne w praktyce. Na rysunku n+6 możesz zobaczyć, jak wygląda to w przypadku przebiegu sinusoidalnego.

A teraz wracamy do głównego wątku. Jeśli obierzemy kierunek obiegu oczka i zaznaczymy napięcia chwilowe na cewce i kondensatorze obwodu rezonansowego, to zgodnie z napięciowym prawem Kirchhoffa, suma napięć (chwilowych) w oczku musi być równa zero. Napięcia na cewce i kondensatorze w każdej chwili będą mieć tę samą wartość, ale przeciwne... kierunki.



Rys. 32. Przebiegi napięcia i prądu w obwodzie rezonansowym.

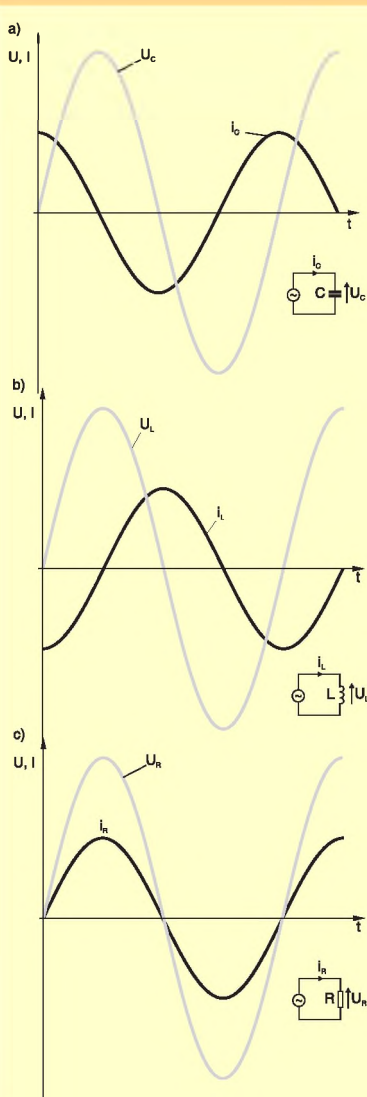
Może ostro zaprotestujesz: na dwóch połączonych równolegle elementach zawsze występuje to samo napięcie. I tak, i nie. W sumie jest to kwestia umowy - ale jak wspomniałem, przyjęcie pewnych spójnych zasad oznaczania napięć i prądów znakomicie ułatwia analizę wszelkich, nawet bardzo skomplikowanych układów.

Strzałkowanie napięć i rozwiązywanie układów równań z wieloma niewiadomymi bardzo rzadko stosujemy w naszej elektronicznej praktyce. Wspomniałem tu o napięciowym prawie Kirchhoffa, żeby uzasadnić  $C_1$ , dlaczego możemy powiedzieć, że w obwodzie rezonansowym napięcia mają przeciwne kierunki, czyli w każdej chwili suma napięć na cewce i kondensatorze jest równa zero. Ale co to znaczy różne kierunki?

Spójrz na **rysunek 32** - porównaj napięcia chwilowe na kondensatorze i cewce. Widzisz, że napięcia na cewce i kondensatorze mają taką samą wartość, ale niejako przeciwne kierunki. Jak to nazwać i zapisać? Az prosiłoby się powiedzieć, że napięcie na cewce jest przeciwne, niż na kondensatorze i zapisać je ze znakiem minus. Ale przecież mamy tu do czynienia z napięciami zmiennymi, a nie stałymi, więc chyba nie możemy tu użyć znaku minus? Jak myślisz?

Rzeczywiście, użycie znaku minus mogłoby spowodować zamieszanie i wprowadzić w błąd. Ale jakoś trzeba określić, że napięcia na cewce i kondensatorze są w jakiś sposób przeciwne.

Ale nie koniec na tym. Spójrz na **rysunek 33**. Rysunek 32 rozbiłem na dwie części. Na rysunku 33a znajdziesz przebiegi dotyczące kondensatora, a na rysunku 33b - cewki. Rysunki te dotyczą nie tylko obwodu rezonansowego, ale każdego obwodu napięcia zmiennego, zawierającego źródło napięcia sinusoidalnego i "czystą" pojemność lub indukcyjność. Dlatego na rys. 33 narysowałem dodatkowo takie obwody. Natomiast na rys. 33c pokazuję Ci jeszcze ob-



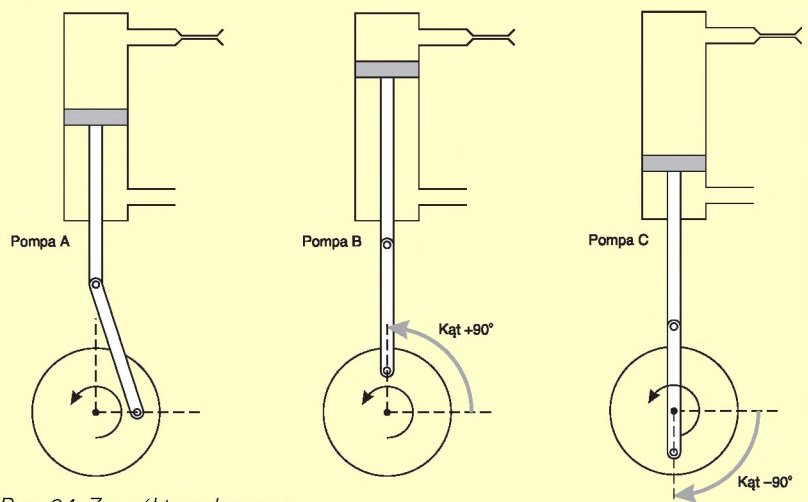
Rys. 33. Przebiegi napięcia i prądu w obwodzie R L C.

wód zawierający źródło napięcia zmiennego i rezystor i przebieg napięcia i prądu w tym obwodzie w pewnym odcinku czasu.

Przebiegi z rys. 33 pokazują fundamentalne zależności między prądem, a napięciem w obwodach prądu zmiennego.

Przed chwilą zastanawialiśmy się, jak zapisać fakt, że napięcia zmienne na cewce i kondensatorze są niejako przeciwne - teraz mamy dalszy problem: jak zapisać, że przebiegi napięcia na wspomnianych rysunkach są przesunięte względem prądu. We wszystkich trzech przypadkach do elementów przyłożyliśmy takie same napięcie zmienne. Zmierzona amperomierzem wartość prądu jest we wszystkich przypadkach taka sama. Znaczący to, że oporność pokazanych elementów, wyrażona w omach, jest jednakowa.

Zauważ, że w obwodzie z rezystorem (rys. 33c) nie ma przesunięcia. W obwodzie z kondensatorem wygląda na to, że



Rys. 34. Zespół trzech pomp.

zmiany prądu wyprzedzają zmiany napięcia (co wcale nie znaczy, że kondensator jest elementem "przewidującym", który wcześniej przewiduje zmiany napięcia) - inaczej mówiąc, przebieg napięcia na kondensatorze opóźnia się względem prądu. Przy cewce, zmiany prądu opóźniają się względem zmian napięcia.

Jak to opisać i nazwać? Oprócz oporności wyrażonej w omach trzeba wprowadzić miarę tego przesunięcia. Może się zdziwisz, jeśli powiem, że bardzo wygodną miarą tego przesunięcia wcale nie jest czas (na co mogłyby wskazywać dotychczasowe rysunki), tylko kąt.

Dlaczego kąt? Nieprzypadkowo rysowałem Ci wcześniej pompę tłokową wraz z kołem napędzającym. Popatrz na trzy pompy pokazane na **rysunku 34**. Nie jest to rysunek jednej pompy w trzech różnych chwilach czasowych. Jest to zespół trzech pomp, które są napędzane wspólnym silnikiem; czyli prędkość i częstotliwość drgań będą takie same. Jeden cykl pracy pompy to jeden obrót koła napędzającego, czyli obrót o kąt  $360^\circ$ .

Niech Cię to nie dziwi - przebieg sinusoidalny i funkcja sinus mają ścisły związek z kołem. Zgadza się to z praktyką: przecież sinusoidalny przebieg napięcia sieci energetycznej też jest wytwarzany przez wirujące generatory.

Czym różnić się będą przebiegi ciśnienia wytwarzanego przez te trzy pompy?

Oczywiście przebiegi te będą wzajemnie przesunięte. Spójrz na **rysunek 35**. Bardzo przypomina nam to przebiegi z rysunków 32, 33. Na rysunkach 34 a, b i c zaznaczyłem kąt. Wiesz chyba ze szkoły, że kierunek przeciwny do ruchu wskazówek zegara przyjęto nazywać kierunkiem ujemnym. Stąd kąt  $+90^\circ$  i  $-90^\circ$ . Zauważ, że możemy zmieniać prędkość wirowania, czyli częstotliwość przebiegów, ale zależności między tymi trzema przebiegami, pokazane na rysunku 35,

zawsze pozostaną stałe. Tu widzisz, dlaczego czas nie jest dogodną miarą przesunięcia - czas zmienia się wraz z częstotliwością, a kąt w tym wypadku nie.

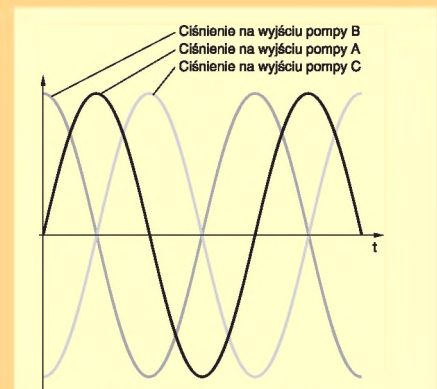
Mamy więc brakującą wielkość, charakteryzującą przebiegi zmiennie: jest to pewien kąt - w elektronice kąt ten nazywamy fazą.

Teraz chyba nie zaprotestujesz, jeśli powiem, że przebieg pompy B wyprzedza przebieg pompy A o  $90$  stopni, a przebieg pompy C opóźnia się w stosunku do przebiegu pompy A o  $90$  stopni. Przebieg z pompy B wyprzedza przy tym przebieg pompy C o  $180$  stopni.

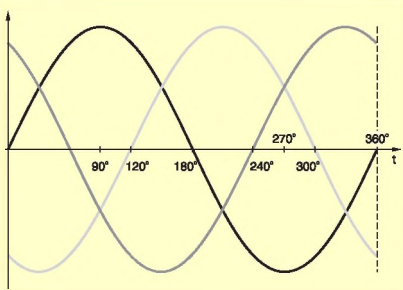
Wprowadziliśmy właśnie pojęcie fazy. Przebieg sinusoidalny możemy w pełni scharakteryzować podając jego amplitudę (lub wartość skuteczną) oraz fazę w stosunku do innych przebiegów.

Na przykład w sieci energetycznej mamy prąd trójfazowy - przebiegi napięcia w kolejnych fazach są przesunięte o kąt  $120^\circ$  ( $360^\circ : 3$ ) (**rysunek 36**).

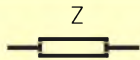
Wróć teraz do rysunków 32, 33. Teraz już powinieneś rozumieć, dlaczego mówimy, że w kondensatorze prąd wyprzedza napięcie o  $90$  stopni, a w cewce prąd opóźnia się względem napięcia o  $90$  stopni.



Rys. 35. Przebieg ciśnienia na wyjściach pomp.



Rys. 36. Przebiegi napięcia w energetycznej sieci trójfazowej.



Rys. 37. Symbol impedancji.

A teraz bardzo uważaj! Przechodzimy do bardzo ważnego zagadnienia! Skąd się bierze to opóźnianie i wyprzedzanie?

Pomyśl samodzielnie. W obwodzie prądu zmiennego z rezystorem nie ma przesunięcia...

Do tej pory mówiliśmy o rezystancji, reaktancji indukcyjnej i pojemnościowej jako o opornościach wyrażanych w omach. Umiemy obliczyć ich wartość liczbową. Wartość liczbowa rezystancji, jednej i drugiej reaktancji może być taka sama, ale coś przecież je różni...

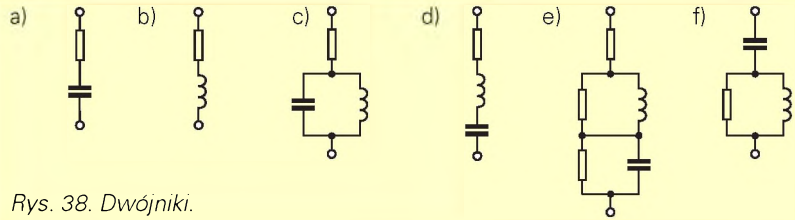
Nie masz chyba wątpliwości, że przesunięcia prądu i napięcia są skutkiem, a przyczyną tkwi we właściwościach oporności, ściślej - reaktancji. Rezystancja nie przesuwają fazy prądu względem napięcia. Każda z reaktancji przesuwają fazę o  $90^\circ$  - jedna o  $+90$  stopni, druga o  $-90$  stopni.

Czy po naszych dotychczasowych rozważaniach nie masz wrażenia, że "om, omowi nie równy" i że poszczególne oporności trzeba potraktować jako różne odmiany jakiejś ogólnej oporności?

Czy w przypadku oporności również nie powinniśmy wykorzystać pojęcia fazy, czyli kąta przesunięcia? Wszystko wskazuje, że tak.

Jeszcze raz przeanalizuj sprawę i upewnij się, że przesunięcia prądu względem napięcia, pokazane na kilku wcześniejszych rysunkach wynikają ni mniej ni więcej, tylko właśnie z jakiejś dziwnych właściwości oporności (ściślej mówiąc reaktancji pojemnościowej i indukcyjnej).

To nam w dużym stopniu wyjaśnia, dlaczego przy szeregowym i równoległym połączeniu reaktancji otrzymaliśmy takie dziwne wyniki - po prostu rysując rysunek 28 i sumując reaktancje nie uwzględniliśmy zależności fazowych, czyli kątowych. To nam też pomaga zrozumieć, dlaczego mieliśmy wrażenie, że reaktancja pojemnościowa i indukcyjna



Rys. 38. Dwójniki.

są niejako odwrotne - coś w tym jest, różnica fazy wynosi  $180$  stopni.

Czy już do Ciebie dotarło, że rezystancja i obie reaktancje są szczególnymi przypadkami jakiejś ogólnej oporności? Jeśli dotarło, to zrozumiałeś pojęcie impedancji.

Impedancja jest opornością ogólną, fachowo mówiąc - zespoloną. Impedancja może zmieniać się z częstotliwością. Impedancja oznaczamy literą  $Z$ , a na schematach zastępczych rysowana jest w postaci takiej jak inne oporności - patrz **rysunek 37**.

Można powiedzieć, że rezystancja, reaktancja pojemnościowa i indukcyjna są szczególnymi przypadkami impedancji. Na przykład impedancja idealnego kondensatora jest w rzeczywistości "czystą" reaktancją.

Tak samo szczególnym przypadkiem jest impedancja dla prądu stałego - częstotliwość jest wtedy równa zero, a więc reaktancja pojemnościowa ma wartość nieskończenie wielką, a indukcyjna - równą zero. Dlatego w obwodzie prądu stałego interesują nas tylko rezystancje.

W ogólnym przypadku impedancja nie musi być "czystą" reaktancją lub "czystą" rezystancją. Może niejako składać się z rezystancji, oraz z reaktancji. Na **rysunku 38** znajdziesz kilka tak zwanych dwójników - dwuzaciskowych sieci składających się z różnych elementów. Popatrz uważnie na ten rysunek. Znajdziesz tam między innymi schemat zastępczy rzeczywistej cewki (38b) oraz nasze obwoły re-

zonansowe. Nie masz chyba wątpliwości, że każdy z pokazanych dwójników ma jakąś impedancję. Niewątpliwie we wszystkich przypadkach impedancja ta zależy od częstotliwości.

Chyba Cię trochę zasmucilem. Zrozumiałeś, że przy obliczeniach impedancji, czyli oporności złożonej z rezystancji i reaktancji, oprócz wartości liczbowej wyrażanej w omach musisz uwzględnić kąt. Na razie jeszcze nie potrafisz przeprowadzić takich obliczeń. Nie martw się - zajmiemy się tym już niedługo. Ale jak by nie było, jeśli nadążasz za mną i rozumiałeś wszystko, co przedstawiłem Ci do tej chwili, uczyniłeś bardzo duży i ważny krok w kierunku profesjonalnej elektroniki. Poczułeś problem impedancji. Jesteś o krok od wykorzystania liczb zespolonych.

Piotr Górecki