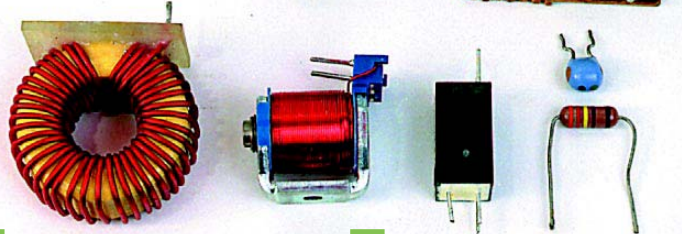


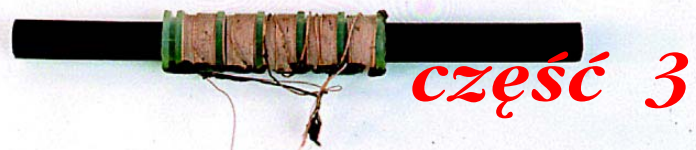
W dwóch poprzednich listach próbowałem na przykładzie urządzeń hydraulicznych wytłumaczyć Ci działanie elementów elektronicznych, w szczególności cewek indukcyjnych.

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 wartość napięcia zasilania układu, w którym dana cewka pracuje.

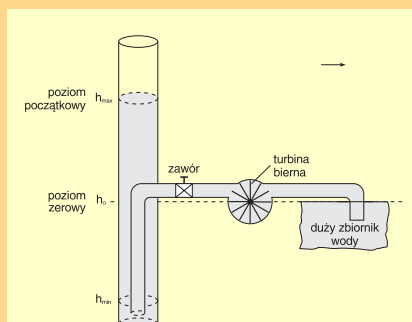
Wiesz, że w obwodach prądu zmiennego cewki i kondensatory stawiają przepływającemu prądowi pewien opór, zwany reaktancją. Opór ten zależy od częstotliwości - w cewkach, ze wzrostem częstotliwości opór ten rośnie, w kondensatorach - maleje.

Dzisiaj zajmiemy się dalszymi zagadnieniami z tej dziedziny.

Rezonans

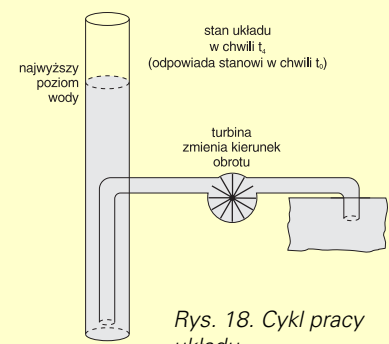
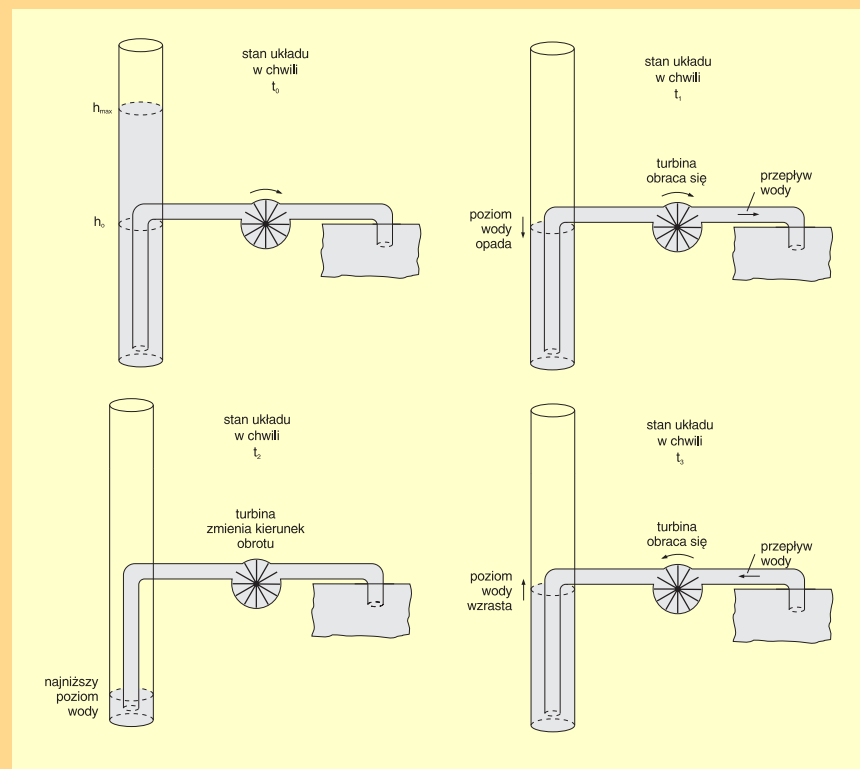
Ze słowem rezonans na pewno się już spotkałeś. Zapoznajmy się z rezonansem w obwodach elektrycznych. Jak zwykle, najpierw spróbujemy znaleźć łatwiejszą do zrozumienia, hydrauliczną analogię.

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

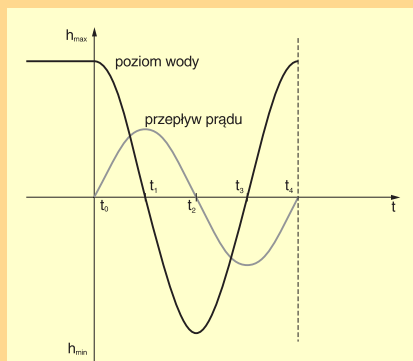


Rys. 17.

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.

chwila t_1), poziom wody w rurze obniży się do poziomu zerowego, oznaczonego h_0 . Na pierwszy rzut oka mogłoby wyglądać, 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 zdążyła 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. 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.

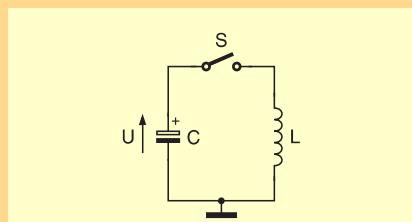
Czy zauważyłeś, że na początku, przed chwilą t_0 , mieliśmy stan ustalony - na kondensatorze występowało stałe napięcie dodatnie. Po zamknięciu wyłącznika S, stało się coś dziwnego - w obwodzie pojawiły się przebiegi przemienne. Co ciekawe, są to przebiegi o kształcie sinusoidalnym.

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 odpowiedź!

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.

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

gdzie f_{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 μH , 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 reakcji kondensatora ($X_C=1/2\pi fC$). Zapamiętaj to raz na zawsze: rezonans występuje zawsze wtedy, gdy reakcja cewki jest liczbowo równa reakcji kondensatora.

Teraz już z grubszą 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} (napiecie na kondensatorze - U_{max}). Co możemy powiedzieć o maksymalnej wielkości przepływu wody (natężenia 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 ciągle 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:

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

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

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

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.

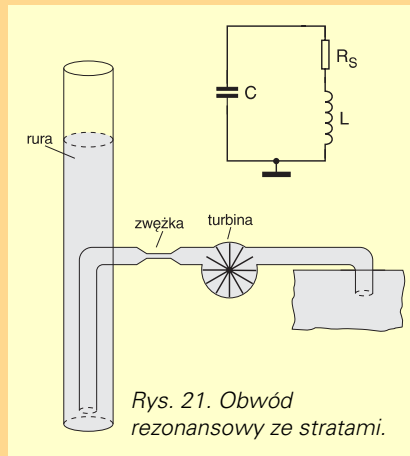
Zauważ - przy danym napięciu U_{\max} uzyskujemy mały prąd.

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 ρ .

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 reaktancję 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 reaktancje.

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_0 sytuacja jest identyczna, jak w chwili t_0 . To by znaczyło, że drgania będą utrzymywać się w nieskończoność. Czy tak może być? Jak myślisz? Odpowiedz!

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.

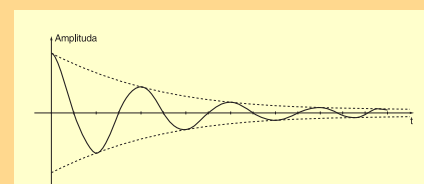
Choć trzeba rozumieć podaną właśnie przyczynę zaniku drgań w obwodzie rezonansowym, w praktyce ważniejsze są inne objawy tego zjawiska. O tym jednak później.

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

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

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.