

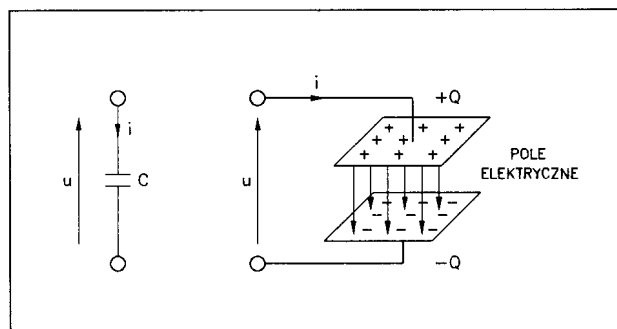
Elektronika inaczej cz. 6 – pojemność i indukcyjność

Wprowadzenie

Dotychczas zajmowaliśmy się wyłącznie obwodami rezystancyjnymi. Ich podstawową właściwością jest to, że reagują jedynie na aktualną wartość sygnału. Obwody takie nazywamy bezinercyjnymi. Istnieje grupa elementów, których reakcja zależy nie tylko od aktualnej wielkości ale także od wcześniejszych wartości sygnału. Elementy takie nazywane są inercyjnymi, a należą do nich indukcyjność i pojemność.

Pojemność

Idealną pojemnością charakteryzuje się element, na którym napięcie jest proporcjonalne do ładunku. Element taki nazywany jest *kondensatorem*. Model pojemności prezentowaliśmy już wcześniej przy opisywaniu napięcia. Stanowi ją układ dwóch przewodzących płaszczyzn rozdzielonych materiałem dielektrycznym (nieprzewodzącym prądu elektrycznego). Oznaczenie schematowe i budowę kondensatora pokazano na rys. 1.



Rys. 1 Oznaczenie i budowa kondensatora

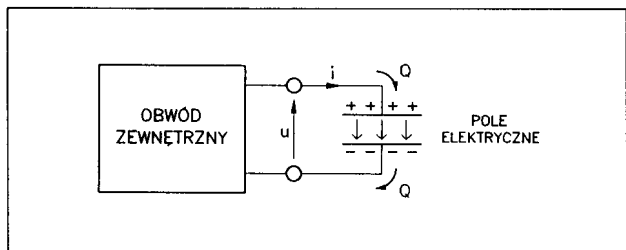
Proporcja między ładunkiem i napięciem jest określona następująco:

$$Q = C \cdot U$$

gdzie: Q – ładunek,
 C – współczynnik proporcjonalności
– pojemność,
 U – napięcie.

Współczynnik proporcjonalności między napięciem i ładunkiem nazywany jest właśnie pojemnością kondensatora. Zależy ona jedynie od powierzchni i odległości płaszczyzn przewodzących oraz właściwości dielektryka. Jednostką pojemności jest *farad*, oznaczany literą [F].

Ponieważ okładziny kondensatora oddzielone są warstwą dielektryka nie przewodzi on prądu stałego. Idealny kondensator dla prądu stałego stanowi przerwę. Jaki więc może być pożytek z takiego elementu? Otóż okazuje się, że kondensator przewodzi prąd zmienny. Pokazano to na rys. 2.



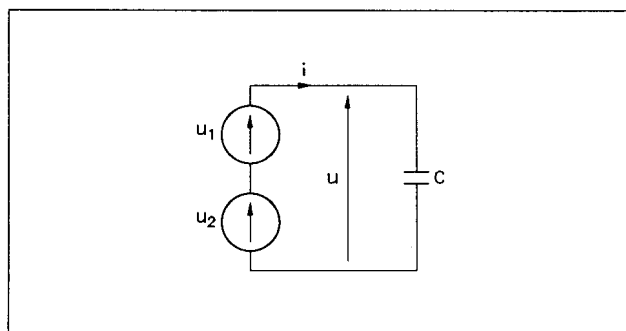
Rys. 2 Przepływ prądu przez kondensator

Dopływający do górnej okładziny kondensatora prąd doprowadza do niej ładunek. W tym samym czasie z dolnej okładziny odpływa taki sam ładunek. W efekcie na górnej okładzinie zgromadzony zostanie ładunek dodatni, a na dolnej ujemny (odpłynął z niej ładunek dodatni). Sumaryczny ładunek kondensatora dalej jest równy zeru, ale nastąpił przepływ ładunku w obwodzie zewnętrznym od okładziny ujemnej do dodatniej. Przemieszczenie się ładunku w czasie to przepływ prądu. Przepływ prądu będzie występował jeśli wystąpi zmiana napięcia, ponieważ zgodnie z podaną wcześniej zależnością, zmiana napięcia na kondensatorze musi spowodować zmianę ładunku. Wartość chwilową prądu płynącego przez kondensator określa podana niżej zależność:

$$i = C(du/dt)$$

gdzie: i – wartość chwilowa prądu,
 C – pojemność kondensatora,
 du/dt – szybkość zmiany napięcia.

Pojemność jest elementem liniowym co można wykazać włączając ją w obwód zasilany z dwóch połączonych szeregowo źródeł napięciowych.



Rys. 3 Ilustracja liniowości pojemności

Napięcie doprowadzone do kondensatora będzie sumą napięć składowych:

$$u = u_1 + u_2$$

$$i = C \cdot du/dt = C \cdot du_1/dt + C \cdot du_2/dt$$

Widzimy więc, że spełniona jest zasada superpozycji potwierdzająca liniowość pojemności.

Ważną właściwością pojemności jest gromadzenie energii elektrycznej. Moc doprowadzona do pojemności podczas przepływu ładunku będzie wynosiła:

$$P = u \cdot i = u \cdot C \cdot (du/dt)$$

Moc określona jest jako szybkość zmian energii (dE/dt). Korzystając z rachunku różniczkowego uzyskuje się następujące wyrażenie na energię zgromadzoną w pojemności:

$$E = C \cdot u^2/2$$

gdzie: E – energia,
 u – napięcie kondensatora.

Energia ta jest gromadzona w polu elektrycznym między okładzinami kondensatora. W przypadku idealnego kondensatora energia może zostać oddana do obwodu zewnętrznego bez strat.

Budowa rzeczywistych kondensatorów jest taka sama jak idealnej pojemności. Jako materiał izolacyjny wykorzystywane są materiały ceramiczne, tworzywa sztuczne, papier lub powietrze. Pojemności kondensatorów są zwykle dużo mniejsze od farada i dlatego używa się jednostek pochodnych.

$$1\text{mF} = 10^{-3}\text{F}$$

$$1\mu\text{F} = 10^{-6}\text{F}$$

$$1\text{nF} = 10^{-9}\text{F}$$

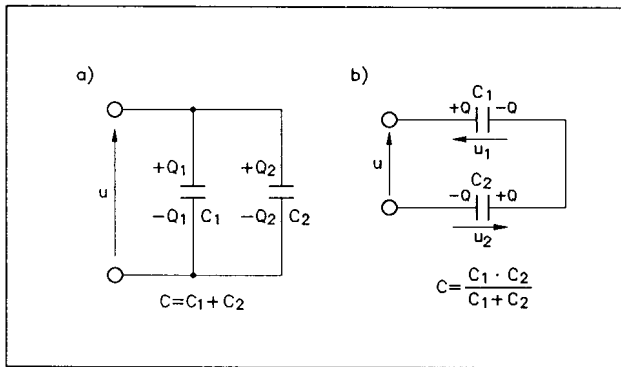
$$1\text{pF} = 10^{-12}\text{F}$$

Materiały izolacyjne używane do budowy kondensatorów rzeczywistych nie posiadają idealnych właściwości i zazwyczaj przepływa przez nie bardzo mały prąd zwany prądem upływności. Prąd ten powoduje samoczynne rozładowanie się kondensatora, a więc i straty nagromadzonej w nim energii. Straty w dielektrykach powstają także podczas przepływu prądów wielkiej częstotliwości. Rzeczywisty kondensator można przedstawić jako równoległe połączenie idealnej pojemności i rezystora reprezentującego upływność czy straty w dielektryku.

Co się dzieje podczas łączenia kondensatorów? Przy równoległym połączeniu kondensatorów (rys. 4a) napięcie na nich jest takie samo, a pełny ładunek wynosi:

$$Q = Q_1 + Q_2 = C_1 \cdot u + C_2 \cdot u = (C_1 + C_2)u$$

Oba połączone równolegle kondensatory można zastąpić jednym o wypadkowej pojemności będącej sumą pojemności składowych.



Rys. 4 Łączenie kondensatorów

Przy szeregowym połączeniu kondensatorów pokazanym na rys. 4b) ładunek $+Q$ dopływa do jednej okładziny kondensatora C_1 odpływa od jego drugiej okładziny. Ładunek ten dopływa do okładziny kondensatora C_2 i odpływa od drugiej. Ładunki obu kondensatorów są więc jednakowe. Napięcie przyłożone do kondensatorów będzie sumą napięć na każdym z nich.

$$u = u_1 + u_2 = Q/C_1 + Q/C_2 = \\ = Q(1/C_1 + 1/C_2) = Q/C$$

Odwrotność pojemności wypadkowej szeregowo połączonych kondensatorów będzie równa sumie odwrotności pojemności składowych. Wyrażenie na pojemność wypadkową dwóch szeregowo połączonych kondensatorów będzie podobne do wyrażenia na rezystancję wypadkową dwóch połączonych równolegle rezystorów.

Idealna indukcyjność

Idealna indukcyjność jest elementem obwodu, na którym napięcie jest proporcjonalne do szybkości zmian prądu jaki przez nią przepływa.

$$u = L(di/dt)$$

gdzie: u – napięcie,

L – współczynnik proporcjonalności

– indukcyjność,

di/dt – szybkość zmian prądu.

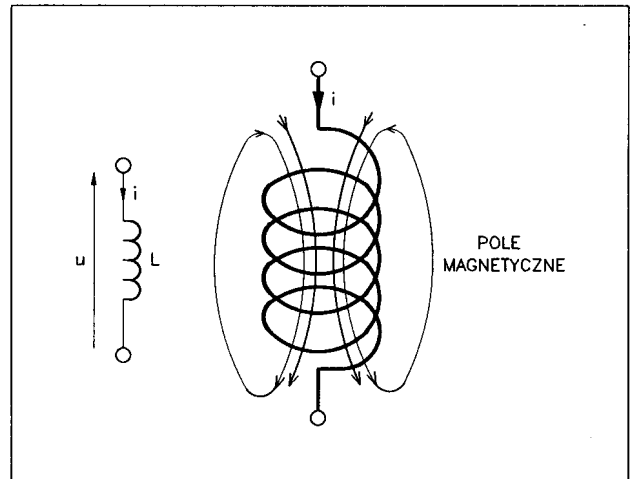
Współczynnik proporcjonalności L nazywany jest *indukcyjnością*. Jednostką indukcyjności jest *henr* – w skrócie [H].

Indukcyjność uzyskuje się przez nawinięcie przewodnika. Zwoje przewodnika przez, który płynie prąd wytwarzają nakładające się pole magnetyczne. Element posiadający indukcyjność jest nazywany *cewką indukcyjną*. Oznaczenie schematowe i budowę indukcyjności pokazano na rys. 5.

Dla prądu stałego $(di/dt) = 0$ i wówczas napięcie u także będzie równe 0. Oznacza to, że dla prądu stałego idealna indukcyjność stanowi zwarcie.

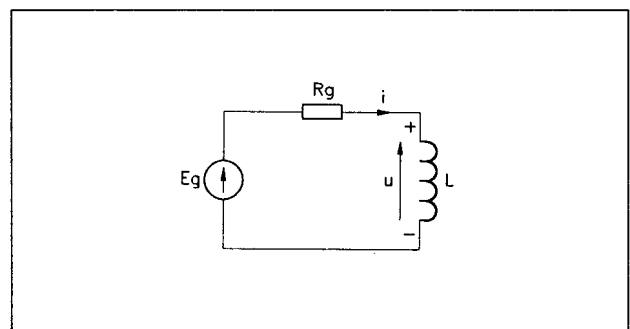
Pole magnetyczne powstaje wokół każdego przewodnika przez, który płynie prąd. Przy specyficznym układzie przewodników jaki mamy w cewce indukcyjnej, pola poszczególnych zwojów sumują się dając w jej

środku największą wartość. Zjawiska dotyczące prądu i pola magnetycznego określa prawo indukcji Faradaya. Prawo to mówi, że jeśli obwód elektryczny znajduje się w polu magnetycznym, to zmiana pola magnetycznego wywoła w obwodzie siłę elektromotoryczną (napięcie). Kierunek napięcia przeciwdziała zmianie wywołującego go pola magnetycznego. W rozpatrywanym przypadku mamy do czynienia z tzw. samoindukcją, ponieważ zmianę pola wywołuje zmiana prądu płynącego w obwodzie. Indukowane napięcie będzie w konsekwencji przeciwdziało zmianie prądu.



Rys. 5 Indukcyjność

Na rys. 6 indukcyjność połączona jest ze źródłem napięciowym. Wzrost napięcia źródła będzie powodował wzrost prądu w obwodzie. Zmiana prądu spowoduje powstanie napięcia na indukcyjności, którego kierunek przeciwdziała zmianie prądu.



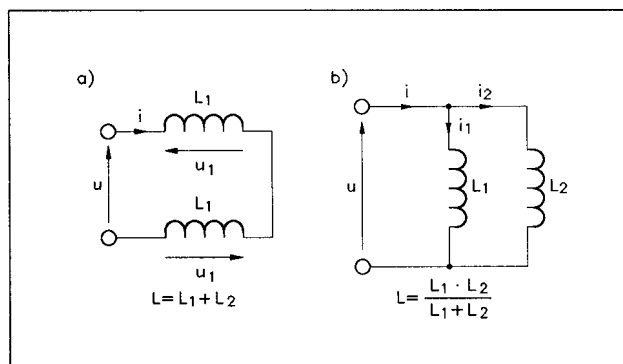
Rys. 6 Kierunek napięcia na indukcyjności

Indukcyjność jest także elementem liniowym i obowiązuje dla niej zasada superpozycji. Udowodnić można to przez zasilenie indukcyjności z dwóch równolegle połączonych źródeł prądowych. W polu magnetycznym indukcyjności gromadzi się energia, której wielkość określa podobny wzór jak dla pojemności.

$$E = L \cdot i^2 / 2$$

Indukcyjność idealna może oddać tą energię bez strat do obwodu zewnętrznego.

Efekty przy łączeniu indukcyjności są zbliżone do łączenia rezystorów. Indukcyjność wypadkowa dwóch szeregowo połączonych indukcyjności jest ich sumą. Przy równoległym połączeniu indukcyjności – odwrotność indukcyjności wypadkowej jest sumą odwrotności indukcyjności składowych. Połączenia te i odpowiednie zależności pokazano na rys. 7.



Rys. 7 Łączenie indukcyjności

Indukcyjności rzeczywiste to popularne cewki indukcyjne. Uzwojenia ich często nawijane są na rdzeniach z materiałów magnetycznych, co daje efekt wzmocnienia pola magnetycznego i przy mniejszej ilości zwojów uzyskuje się większą indukcyjność. Przewodnik jakim jest nawijana cewka posiada rezystancję i dlatego rzeczywista cewka indukcyjna nie stanowi zwarcia dla prądu stałego, lecz rezystancję. Rezystancję tą zwiększają dodatkowo straty w rdzeniu występujące przy prądzie zmiennym. Schemat zastępczy rzeczywistej cewki indukcyjnej można przedstawić w formie rezystancji połączonej szeregowo z idealną indukcyjnością.

Indukcyjności rzędu kilkudziesięciu H to już bardzo duże wartości. W praktyce spotyka się często wartości mniejsze i używane są następujące jednostki pochodne:

$$1\text{mH} = 10^{-3}\text{H}$$

$$1\mu\text{H} = 10^{-6}\text{H}$$

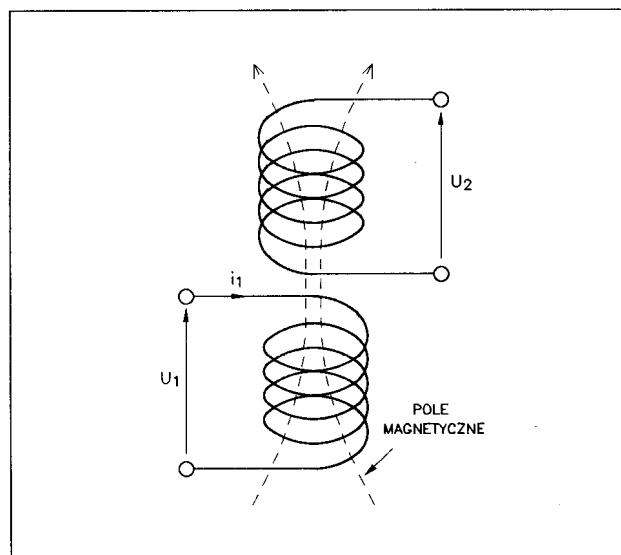
$$1\text{nH} = 10^{-9}\text{H}$$

Transformator

Prawo indukcji Faradaya w zasadniczej postaci opisuje tzw. indukcję wzajemną. Jest to indukowanie napięcia w obwodzie wskutek zmian pola magnetycznego obejmującego ten obwód, a wytworzonego przez inny obwód elektryczny. Ilustruje to zjawisko rys. 8.

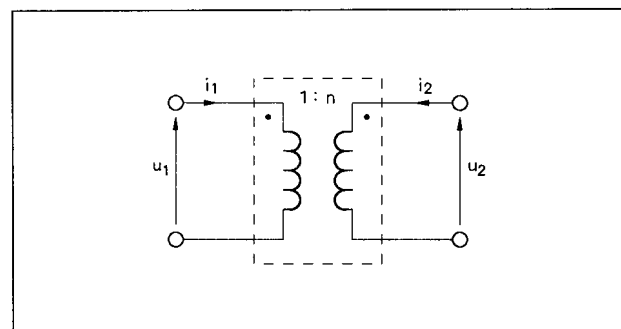
Zmiana prądu i_1 płynącego w jednym z obwodów wywołuje siłę elektromotoryczną (napięcie) na zaciskach drugiego obwodu. Odwrotnie, gdyby płynął prąd w drugim obwodzie, indukował by napięcie w obwodzie pierwszym. Zjawisko to wykorzystuje się w transformatorze.

Transformator składa się co najmniej z dwóch uzwojeń nawiniętych na wspólnym rdzeniu. Pomimo odizolowania elektrycznego obu uzwojeń, przepływ prądu zmiennego w jednym z nich wywołuje indukowanie się siły elektromotorycznej w pozostałych.



Rys. 8 Indukcja wzajemna

Idealny transformator o dwóch uzwojeniach można przedstawić w formie czwórnika pokazanego na rys. 9.



Rys. 9 Transformator idealny

Zakłada się, że indukcyjności własne poszczególnych uzwojeń są bardzo duże, a rezystancje równe 0. Kropki oznaczają jednakową polaryzację uzwojeń (w praktyce początek lub koniec uzwojeń nawiniętych w tym samym kierunku). Współczynnik n nazywany jest przekładnią transformatora i określa zależność między napięciami na obu uzwojeniach transformatora.

$$u_2 = n \cdot u_1$$

Jeśli napięcie u_1 przyłożone jest "+" do wyprowadzenia z kropką, to napięcie u_2 będzie także miało "+" przy wyprowadzeniu z kropką. Przy przeciwnym połączeniu napięć do uzwojeń można uzyskać odwrócenie napięcia wyjściowego.

Transformator idealny jest elementem bezstratnym, a więc moc doprowadzona do obwodu wejściowego będzie równa mocy w obwodzie wyjściowym.

$$u_1 \cdot i_1 = u_2 \cdot i_2$$

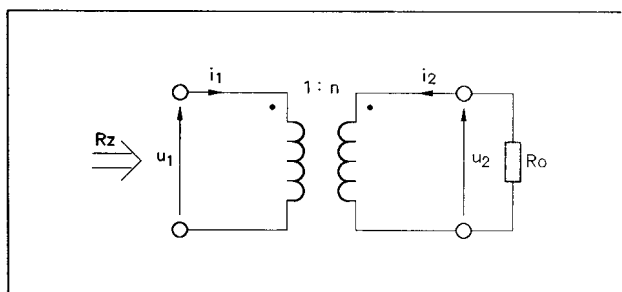
lub

$$i_1/i_2 = u_2/u_1 = n$$

Jeśli $n > 1$ to po przyłożeniu napięcia u_1 , napięcie u_2 będzie większe n razy, a prąd i_2 n razy mniejszy od

prądu i_1 . Taki transformator jest nazywany podwyższającym. Można taki transformator zasilać od strony u_2 i wtedy będzie on transformatorem obniżającym. Zwykle uzwojenie zasilane (podłączone do generatora) nazywane jest uzwojeniem pierwotnym, a uzwojenie, do którego jest podłączone obciążenie nazywane jest wtórnym.

Spróbujemy teraz znaleźć schemat zastępczy transformatora widziany od strony generatora przy dołączonym do drugiego uzwojenia obciążeniu rezystancyjnym. Ilustracją takiej sytuacji jest rys. 10.



Rys. 10 Rezystancja zastępcza transformatora

Prąd i_1 transformuje się na stronę wtórną zgodnie z poznaną wcześniej zależnością:

$$i_2 = -i_1/n$$

Korzystając z prawa Ohma:

$$u_2 = -i_2 \cdot R_o = i_1 \cdot R_o/n$$

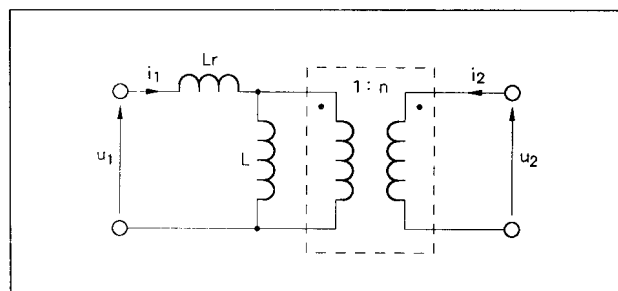
$$u_1 = u_2/n = i_1 \cdot R_o/n^2$$

Ponownie korzystając z prawa Ohma znajdujemy poszukiwaną rezystancję zastępczą:

$$R_z = u_1/i_1 = R_o/n^2$$

Tak więc w transformatorze podwyższającym rezystancja zastępcza widziana na zaciskach generatora będzie n^2 razy mniejsza od rezystancji obciążenia. W transformatorze obniżającym będzie n^2 razy większa od rezystancji obciążenia.

Transformator rzeczywisty różni się znacznie od przeanalizowanego modelu idealnego. Transformator idealny stworzono na założeniu, że całe pole magnetyczne uzwojenia pierwotnego obejmuje uzwojenie wtórne i odwrotnie. Praktycznie jest to trudne do zrealizowania – zawsze część pola magnetycznego wytworzonego przez uzwojenie obejmuje tylko to uzwojenie. Należy więc w modelu rzeczywistego transformatora uwzględnić tzw. *indukcyjności rozproszenia* uzwojeń pierwotnego i wtórnego. Często indukcyjność rozproszenia uzwojenia wtórnego przenosi się do obwodu uzwojenia pierwotnego i rozpatruje jedynie w obwodzie pierwotnym (L_r). Model rzeczywistego transformatora pokazano na rys. 11.



Rys. 11 Transformator rzeczywisty

Kolejnym nowym elementem na tym schemacie jest równolegle do uzwojenia pierwotnego podłączona indukcyjność L reprezentująca rzeczywistą indukcyjność obwodu pierwotnego wytwarzającą pole magnetyczne związane z uzwojeniem wtórnym. Nazywana jest ona często *indukcyjnością magnesującą*.

Nie uwzględniono na tym schemacie rezystancji uzwojeń. Należy je uwzględnić jeśli będą porównywalne z rezystancjami obwodów zewnętrznych. Między uzwojeniami transformatora występuje także pojemność, której wpływ zaznaczy się przy wysokich częstotliwościach. Podobnie zresztą przy wysokich częstotliwościach zaznaczy się wpływ indukcyjności rozproszonej.

Ciąg dalszy w następnym numerze.