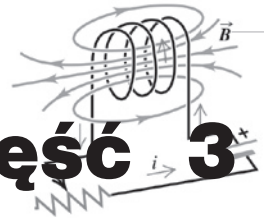


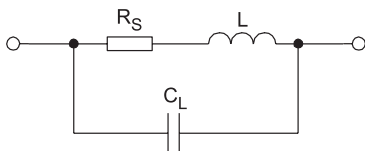
Indukcyjności

To nie takie straszne, część 3



W tym odcinku opowiadania o elementach indukcyjnych, przedstawimy podstawy teoretyczne pozwalające na obliczenie prostych elementów indukcyjnych. Zaczynamy od przedstawienia najważniejszych parametrów tych elementów, z których istnienia powinien zdawać sobie sprawę każdy konstruktor.

Elementy indukcyjne, takie jak cewki i dławiki stosuje się w obwodach, których własności zależą od częstotliwości. Zwykle wykonane są one w postaci pewnej ilości zwojów drutu miedzianego, nawiniętego na rdzeniu magnetycznym, lub bez rdzenia. Stosujemy je zazwyczaj do filtrowania prądu stałego i magazynowania energii. W obwodach wyjściowych zasilaczy impulsowych dławiki stosuje się do filtracji zakłóceń o wysokich częstotliwościach, a w przetwornicach DC/DC – do magazynowania energii. W takich przypadkach ważne jest, aby cewka dobrze pracowała przy dużej skła-



Rys. 22. Uproszczony schemat zastępczy cewki, gdzie: L =indukcyjność, R_s =rezystancja szeregową (rezystancja drutu + pozostałe straty w drucie i rdzeniu), C_L =pojemność własna cewki np. pojemność między zwojami lub warstwami uzwojeń, zwana również pojemnością upływnościową, pasożytniczą albo rozproszoną

dowej stałej bez nasycenia rdzenia, dlatego w tym przypadku najczęściej stosujemy rdzeń z otwartym obwodem magnetycznym, np. rdzeń ferrytowy walcowy lub szpulkowy. Ma on prawie same zalety, jest mały, tani nie nasycy się, ale za to ze względu na kształt swojej budowy, jest świetną anteną wypromieniowującą tłumione zakłócenia na zewnątrz. Wypromieniowana fala elektromagnetyczna, może skutecznie uniemożliwić poprawną pracę, znajdujących się w pobliżu wrażliwych układów, takich jak układy mikroprocesorowe. Dlatego też, bardzo często w takich przypadkach stosujemy rdzenie toroidalne. Ze względu na swój kształt, (obwód magnetyczny zamknięty) energia nie jest wypromieniowana na zewnątrz, natomiast, aby uniknąć nasycania się takich rdzeni, zastosowany jest materiał proszkowy, czyli posiadający tak zwaną rozproszoną szczelinę powietrzną.

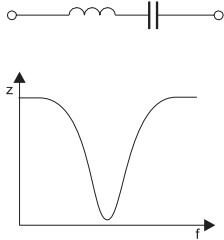
Reaktancją indukcyjną (X_L) cewki nazywamy jej oporność dla prądu zmiennego, w zależności od częstotliwości. Oporność dla prądu stałego, jest w istocie rezystancją zastosowanego drutu. Wartość

reaktancji indukcyjnej (X_L) (X_L) oblicza się ze wzoru $X_L = \omega * L$, gdzie $\omega = (2 * \pi * f)$, a f =częstotliwość. $X_L = L [\mu H] * f [MHz] * \pi * 2$

Indukcyjność jest to cecha cewki, która przeciwdziała wszelkim zmianom płynącego przez nią prądu. Mechanizm ten wynika z działania siły elektromotorycznej (SEM) indukcji w cewce. Cewka o indukcyjności 1 H daje siłę elektromotoryczną 1 V, jeżeli prąd przepływający zmienia się z prędkością 1 A/s (1 H=1 Vs/A).

Aby wyliczyć indukcyjność, korzystamy z następującego wzoru: $L = \mu_o * N^2 / ((1/\mu_r) * (\Sigma l_o/A_o))$, co również można napisać jako: $L = N^2 * \mu_o * \mu_r / (\Sigma l_o/A_o)$.

Aby uprościć obliczenia, wyciąga się często przed nawias przenikalność, współczynnik rdzenia i podaje współczynnik A_L . $A_L = \mu_o * \mu_r / (\Sigma l_o/A_o)$. Jeśli połączy się te dwa wzory, otrzymamy: $L = N^2 * A_L$, gdzie L =indukcyjność, N =liczba zwojów, A_L =współczynnik rdzenia (najczęściej w nH/N²). I ten właśnie wzór pozwoli nam na przybliżone obliczenie indukcyjności dla większości elementów, jakie przyjdzie nam projektować. Przekształcając wzór możemy oczywiście wyliczyć liczbę zwojów lub współczynnik A_L , a dzięki temu możemy śmiało stosować „nieznane” rdzenie we własnych aplikacjach. Pod warunkiem jednak, że czytaliśmy poprzednią



Rys. 23. Szeregowe połączenie LC

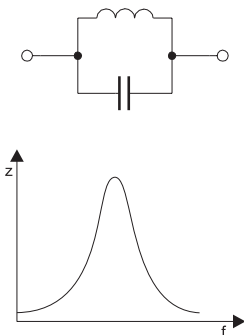
część artykułu i wiemy jak określić przybliżoną częstotliwość pracy i określić prawdopodobny materiał rdzenia. Wystarczy w amatorskich warunkach nawinąć na dowolny rdzeń 10 zwojów drutu w izolacji, zmierzyć indukcyjność i podstawić do powyższego wzoru, aby wyliczyć stałą A_l dla naszego rdzenia. Jeżeli jest to rdzeń Ni-Zn lub rdzeń proszkowy, jeżeli A_l jest rzędu kilku tysięcy, to jest to rdzeń Mn-Zn. Teraz, aby otrzymać element o wymaganej indukcyjności, wystarczy podstawić do tego samego wzoru, wyliczoną wcześniej stałą A_l i już wiemy, ile zwojów drutu musimy nawinąć na rdzeń.

Impedancja (Z) cewki przy danej częstotliwości jest wartością zespoloną rezystancji i reaktancji. $Z = \sqrt{X_L^2 + R^2}$. Ażeby było łatwiej zrozumieć cewkę jako element obwodu elektrycznego, możemy zastosować uproszczony schemat zastępczy, pokazany na rys. 22.

Dobroć - Q (Quality), jest stosunkiem reaktancji cewki do rezystancji szeregowej. Niższa rezystancja daje wyższą dobroć, co w przypadku filtrów daje większe nachylenie zbocza. Dobroć jest miarą strat w cewce i nie jest wyrażona jednostką, a możemy ją wyliczyć wg następującego wzoru:

$$Q = X_L / R_s$$

Rezystancja szeregową (R_s): jest to rezystancja, jaką posiada cewka przy przepływie prądu stałego.



Rys. 24. Równoległe połączenie LC

Rezonans - Cewka wspólnie z kondensatorem tworzy obwód rezonansowy, który charakteryzuje się częstotliwością rezonansową tj. taką, przy której reaktancje cewki i kondensatora są równe. Przy tej częstotliwości całkowita impedancja układu cewka-kondensator jest najniższa przy połączeniu szeregowym, zaś najwyższa przy połączeniu równoległym.

Wzór na **częstotliwość rezonansową** jest następujący: $f = 1 / (2\pi \cdot \sqrt{LC})$. Częstotliwość jest w Hz, o ile L jest podawane w H, zaś C w F. Jeśli L i C podaje się odpowiednio w μH i μF , to częstotliwość otrzymamy w MHz.

Pojemność własna cewki (C_L) wraz z indukcyjnością tworzy obwód rezonansowy. Powodem tego są pojemności międzyzwojowe i międzywarstwowe w uzwojeniu cewki. Częstotliwość takiego obwodu nazywana jest **częstotliwością rezonansu własnego (SRF)**. Pojemność własna może stwarzać problemy przy wyższych częstotliwościach, o ile nie uwzględni się jej przy obliczeniach. Częstotliwość przy pomiarze dobroci powinna wynosić nie więcej niż 1/10-tej częstotliwości. Jeżeli chcemy wykonać element o bardzo wysokiej częstotliwości granicznej, czyli tłumiący w miarę liniowo w szerokim zakresie częstotliwości, to pamiętajmy, aby uzwojenie było ułożone w jednej warstwie, wtedy pojemności międzyzwojowe będą najniższe, a częstotliwość graniczna wysoka.

Efekt naskórkowości - Straty rezystywne ($\tan \delta R$) mogą być liczone jako rezystancja dla prądu stałego, o ile częstotliwość nie przekracza 50 kHz. Jeśli częstotliwość jest wyższa, powinno brać się pod uwagę tzw. „efekt naskórkowości”. Kiedy przez przewód płynie prąd, powstaje pole magnetyczne nie tylko wokół, ale również wewnątrz przewodu. To ostatnie, które jest prostopadłe do kierunku przepływu prądu, indukuje z kolei prądy wirowe w przewodzie. Przenikalność magnetyczna miedzi jest niska ($\mu_r \sim 1$), ale rezystancja właściwa jest również niska, co powoduje, że prądy wirowe przy częstotliwościach powyżej 50 kHz mogą być znaczne. Prądy wirowe przemieszczające się wzdłuż przewodu, płyną zgodnie z kierunkiem przepływu

prądu przy powierzchni przewodu. Powoduje to zagęszczenie prądu tuż przy powierzchni, co zmniejsza jego przekrój skuteczny, a to kolei powoduje wzrost rezystancji. Przez pojęcie głębokości naskórkowości rozumie się tę głębokość, gdzie gęstość prądu spada do 37% ($1/e$). Głębokość ta jest taka sama, jak grubość ścianki równie długiej rury o rezystancji dla prądu stałego odpowiadającej rezystancji tego przewodu dla prądu przemiennego.

Tę głębokość można wyliczyć ze wzoru: $\delta = 1 / (f \mu \pi \rho)$ gdzie δ - głębokość naskórkowości w metrach, f - częstotliwość w Hz, μ - przenikalność $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$, i ρ - przewodność właściwa w S/m. Dla miedzi jest $\mu_r = 1$ i $\rho = 5,8 \times 10^7$ S/m. Oporność można więc wyliczyć ze wzoru: $R_{AC} = R_{DC} \cdot A / (2\pi \cdot r \cdot \delta)$ w sposób uproszczony:

$$R_{DC} \cdot r / (2 \cdot \pi)$$

Gdzie R_{AC} - rezystancja AC, R_{DC} - rezystancja DC, A - powierzchnia przekroju drutu, r - promień drutu i δ - głębokość naskórkowości.

W domowych warunkach wystarczy uproszczony wzór, który pozwoli wyliczyć przybliżoną głębokość wnikania dla miedzi $\delta = 66 / \sqrt{f}$ oraz $\delta = 64,2 / \sqrt{f}$ dla srebra, gdzie - głębokość wnikania w mm, f - częstotliwość w Hz.

Przykładowo, dla 100 kHz - $\delta = 66 / \sqrt{100000}$ [Hz] = 0,21 [mm] - drut użyty do wykonania cewki powinien mieć średnicę nie większą niż 0,42 mm. W większości przypadków przekroczenie tej granicy będzie skutkowało zwiększeniem gabarytów elementu, większymi stratami przy pozornie większej dobroci Q, a w konsekwencji zwiększoną emisją ciepła.

Sposobem na zmniejszenie wpływu naskórkowości jest używanie licy zamiast przewodu litego lub nawinięcie uzwojenia wieloma przewodami o mniejszym przekroju w sposób bi-, tri- lub quadrofilarny. Lica składa się z wielu (średnio 3...400) izolowanych przewodów, które są ze sobą skręcone i które przez całą długość zmieniają swoje położenie w wiązce. Oporność licy w.c.z. dla prądu przemiennego jest równa jej rezystancji stałoprądowej. Należy pamiętać też, że rezystancja przewodu miedzianego jest ok. 30% wyższa przy temp. 100°C, niż przy 25°C.

Jacek Abramowicz
www.feryster.pl