Jak określić indukcyjność cewek

część 2

W EdW 5/03 zostały zaprezentowane sposoby wyznaczania indukcyjności najczęściej używanych cewek fabrycznych.

Kontynuujemy temat, przedstawiając różne sposoby określania indukcyjności cewek, a także proste, ale przydatne przystawki służące właśnie do pomiarów indukcyjności.

Na wartość indukcyjności cewki wpływają następujące czynniki:
- średnica cewki,
- długość cewki,
- liczba zwojów i rodzaj uzwojenia,
- pojemność własna cewki.

Indukcyjność cewki L jest tym większa, im większa jest jej średnica, im mniejsza długość nawinięcia cewki, im ciaśniej są ułożone zwoje oraz im jest tych zwojów więcej.

Indukcyjność cewki zależy od liczby zwojów wprost proporcjonalnie do ich kwadratu. Jeżeli zatem jedna cewka będzie miała np. 12 zwojów, druga cewka tylko 4 zwoje, nawiniętych identycznie, to indukcyjność cewki pierwszej będzie miała wartość nie trzykrotnie, ale dziewięciokrotnie większą od indukcyjności cewki drugiej.

Indukcyjność cewek jednowarstwowych (**rys. 1**) można obliczyć z następującego wzoru:

$$L = \frac{KDn^2}{1000}$$

K - współczynnik zależny od stosunki średnicy do długości uzwojenia (D/l) można wyznaczyć za pomocą nomogramu (**rys. 2**)
D - średnica uzwojenia [cm]
l - długość uzwojenia [cm]
n - liczba zwojów cewki
L - indukcyjność cewki [μH]

Z nieco mniejszą dokładnością indukcyjność cewki jednowarstwowej można oszacować z nomogramu zamieszczonego na **rysunku 3**.

Indukcyjność jednego zwoju kołowego o średnicy D wykonanego z drutu o średnicy d (**rys. 4**) można wyliczyć ze wzoru:

$$L = 0{,}0145D \log 1{,}08\frac{D}{d}$$

Dla przykładu, indukcyjność jednego zwoju o średnicy D=25cm wykonanego z drutu o średnicy d=4mm wynosi 0,66μH.

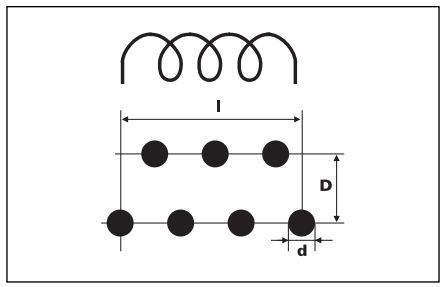
Z kolei indukcyjność drutu prostego można wyliczyć ze wzoru:

$$L = 0{,}0046l \log \frac{1{,}47l}{d}$$

Przykładowo, indukcyjność drutu prostego o długości 5cm i średnicy 1mm wynosi 0,0043μH. Warto wiedzieć, że taki odcinek drutu z dołączonym kondensatorem o wartości 15pF tworzy równoległy obwód rezonansowy o wartości 200MHz.

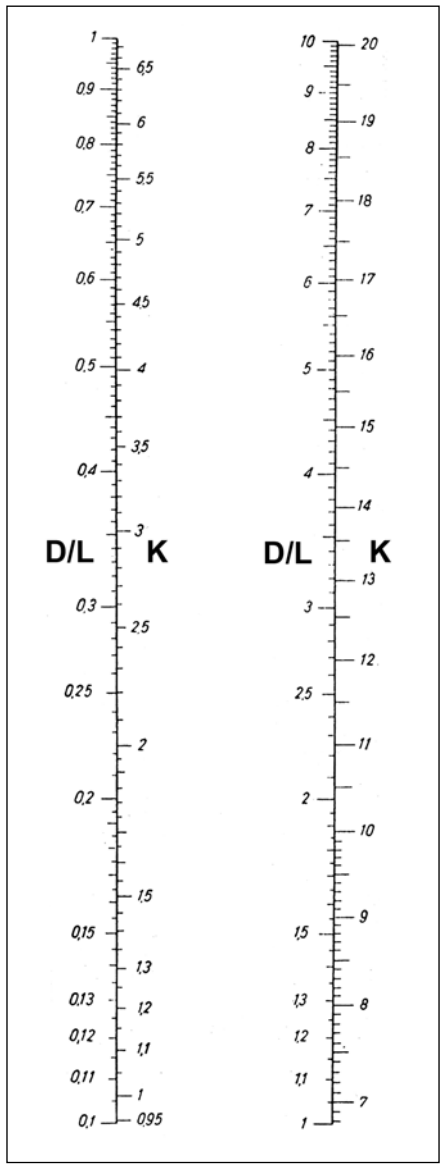
Na stronach internetowych często można spotkać kalkulatory ułatwiające wyznaczanie indukcyjności, ale one także opierają się o takie i podobne wzory.

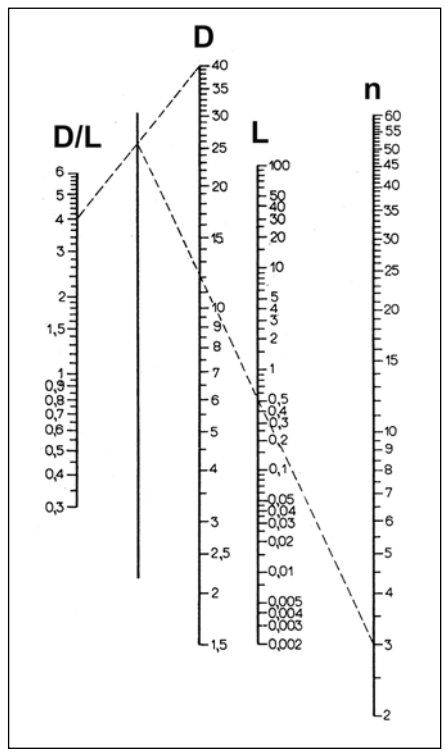
Obliczanie indukcyjności cewek wielowarstwowych jest dość skomplikowane i dlatego lepiej w takim przypadku korzystać z mierników. W każdym razie o ile indukcyjność cewek powietrznych o niewielkiej liczbie zwojów można obliczyć lub wyznaczyć



Rys. 1

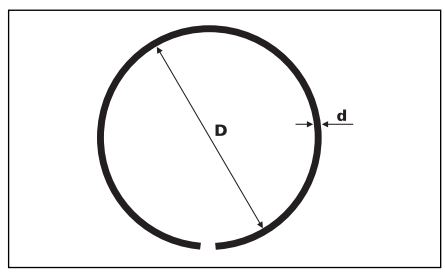
Rys. 2





Rys. 3

Rys. 4



z nomogramów, to indukcyjność cewek nawijanych na rdzeniach ferrytowych można w zasadzie jedynie zmierzyć. Tylko nieliczne multimetry cyfrowe są wyposażane w podzakres do pomiaru indukcyjności.

Są także mierniki przystosowane tylko do pomiaru L lub LC, jak np. DVM6243 firmy Velleman, dostępny w sieci handlowej AVT. Umożliwiają one pomiar indukcyjności w czterech podzakresach: 2mH, 20mH, 200mH, 2H (pojemności: 2nF, 20nF, 200nF, 2µF, 20µF, 200µF). Są to multimetry stosunkowo drogie, a przy tym mało przydatne do pomiaru cewek o indukcyjnościach rzędu kilku mikrohenrów (nie mówiąc o nanohenrach). Przystosowane są one w zasadzie do dokładnych pomiarów cewek o indukcyjności kilkuset mikrohenrów. Z tego też względu w warunkach laboratoryjnych korzysta się z drogich (ale i dokładnych) mostków RLC, które zapewniają pomiar cewek od części nH aż po H.

Do pomiarów indukcyjności cewek w warunkach amatorskich proponujemy wykonanie prostej przystawki dołączanej albo do posiadanego miliwoltomierza, albo do miernika częstotliwości.

Metoda bezpośrednia z generatorem

Jak wiemy, częstotliwość każdego generatora LC, niezależnie od jego konstrukcji, zależy od indukcyjności i wypadkowej pojemności widzianej przez końcówki cewki. Mierząc częstotliwość wyjściową generatora, można wyliczyć indukcyjność cewki (oczywiście znając pojemność wejściową układu generatora).

Przykładowy schemat ideowy takiego generatora jest pokazany na **rysunku 5**. Na tranzystorze T1 jest skonstruowany zasadniczy generator, zaś na tranzystorze T2 separator w postaci wtórnika emiterowego.

Częstotliwość wyjściowa układu zależy od pojemności wewnętrznej przystawki (Cw).

Pojemność wewnętrzną układu można wyznaczyć z poniższej procedury:
- do zacisków przystawki należy podłączyć cewkę o nieznanej indukcyjności i zmierzyć częstotliwość wyjściową f1 [MHz]
- równolegle do uzwojeń cewki podłączyć kondensator o znanej pojemności, np. C = 100pF i zmierzyć częstotliwość wyjściową f2 [MHz]
- potrzebną pojemność wejściową przystawki [pF] wyliczyć ze wzoru:

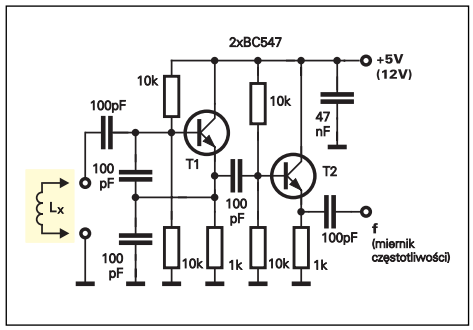
$$Cw = \frac{C}{\left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 - 1}$$

Indukcyjność dołączonej cewki można wyliczyć ze wzoru:

$$Lx = \frac{25330}{f_1^2 * Cw}$$

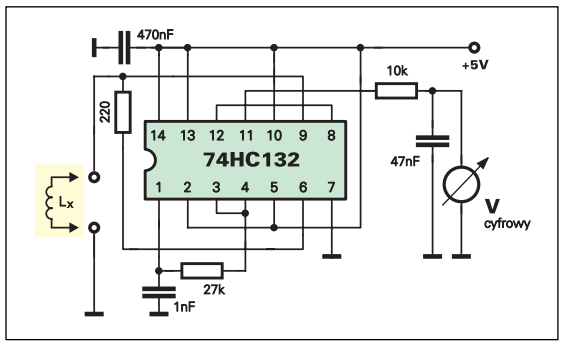
Do przybliżonego wyznaczania indukcyjności na podstawie zmierzonej częstotliwości można wykonać specjalny nomogram, aby wyeliminować konieczność każdorazowego korzystania z kalkulatora.

Przy dzielniku pojemnościowym 100pF przystawka umożliwia określenie indukcyjności cewek w zakresie 1...500µH, a także częstotliwości rezonatorów kwarcowych w zakresie 3...20MHz. Chcąc mierzyć częstotliwości rezonatorów w zakresie 1...3MHz oraz cewki o indukcyjności powyżej 500µH należy wartości kondensatorów dzielnika powiększyć do 1nF. Przy pomniejszeniu wartości tych kondensatorów uzyskamy możliwość pomiaru cewek o indukcyjnościach mniejszych od 1µH i rezonatorów o częstotliwościach powyżej 20MHz. Wiąże się to z koniecznością wyznaczenia nowych wartości Cw.



Rys. 5

Rys. 6



Układ z **rysunku 6** jest skonstruowany w oparciu o cztery bramki Schmitta, wchodzące w skład układu scalonego 74HC132. Bramka 1 z elementami RC tworzy generator fali prostokątnej. Wartość rezystora została tak dobrana, aby częstotliwość generatora wynosiła około 50kHz. Bramka 2 stanowi separator - układ formowania sygnału generatora. Zasadnicze właściwości bramki Schmitta zostały wykorzystane w bramce 3. Na jedno z jej wejść jest podany przebieg piłokształtny uformowany z przebiegu prostokątnego po przejściu przez układ różniczkujący, zestawiony z elementów R2Lx. Przełączenie bramki 74HC132 następuje z chwilą przekroczenia poziomu wejściowego 1,8V (zmiana sygnału z „0" na „1") i przy 3V (przy zmianie sygnału z „1" na „0"). Bramka 4 odwraca fazy sygnałów wyjściowych bramki 3. Czas trwania jedynki logicznej na wyjściu bramki 4 jest wprost proporcjonalny do stałej czasowej ł = Lx/R. Impulsy wyjściowe po przejściu przez układ całkujący RC są kierowane do zacisków woltomierza. Wartość średnia tego napięcia zależy od rezystancji wejściowej podłączonego woltomierza - im większa jest ta rezystancja, tym pomiar dokładniejszy.

Wartości elementów w przedstawionym układzie przystawki zostały tak dobrane, aby można było mierzyć indukcyjności cewek z przedziału 5...500µH (czyli w najczęściej wykorzystywanym przedziale wartości). W tym zakresie mierzonej indukcyjności układ pracuje liniowo.

Korzystanie z przystawki jest bardzo proste. Indukcyjności 5µH odpowiada napięcie wyjściowe 5mV i odpowiednio, 500µH - 500mV. W przypadku bezpośredniego zwarcia zacisków Lx napięcie wyjściowe jest zbliżone do zera (przy rozwarciu wynosi około 2,7V).

Podczas testowania przystawki zostały wykorzystane multimetry cyfrowe, które mają bardzo dużą rezystancję wejściową. Po dołączeniu multimetru analogowego wskazania będą obarczone bardzo dużym błędem.

Powiększenie zakresu pomiarowego przystawki można uzyskać przez zmniejszenie częstotliwości generatora oraz zmniejszenie stałej czasowej układu, czyli przez zmianę wartości rezystorów (wiąże się to z koniecznością zastosowania dodatkowego przełącznika).

Czytelnikom, którzy chcieliby określać cewki o bardzo małej indukcyjności, można polecić przystawkę działającą za pomocą metody rezonansowej. Przedstawiono na **rysunku 7** schemat miernika umożliwia określenia indukcyjności cewki z zakresu 0,05...1µH. Ten prosty układ składa się z wysokostabilnego generatora wysokiej częstotliwości, równoległego obwodu pomiarowego oraz wskaźnika rezonansu.

Jako generator w.cz. jest zastosowany generator scalony o częstotliwości 50MHz. Właśnie taka częstotliwość umożliwia pomiar cewek o indukcyjności nawet poniżej 0,2µH.

Dodatkowy obwód rezonansowy z cewką 0,6µH i trymerem 25pF służy do poprawienia kształtu sygnału wyjściowego 50MHz.

Obwód pomiarowy jest złożony ze zmiennego kondensatora wzorcowego o maksymalnej wartości 250pF i indukcyjności mierzonej Lx.

Wskaźnik pomiarowy tworzy detektor w.cz. w postaci podwajacza napięcia z diodami germanowymi D1 D2 z dołączonym mikroamperomierzem, a nawet dowolnym posiadanym multimetrem.

Po zmontowaniu układu należy ustawić trymer na maksymalny sygnał w.cz., a następnie wyskalować oś kondensatora zmiennego

w wartościach indukcyjności. Skalowanie oraz pomiar polega na dostrojeniu generatora do obwodu pomiarowego na maksymalne wychylenie wskaźnika pomiarowego, czyli do stanu rezonansu elementów Lx i C (250pF).

Najłatwiej będzie nanieść podziałkę mając kilka wzorcowych indukcyjności 0,05...1μH. Jeżeli ktoś ma miernik pojemności, może najpierw nanieść wstępną skalę w wartościach pojemności kondensatora zmiennego, a potem za pomocą przekształconego wzoru wyliczyć ostateczne wartości indukcyjności i nanieść napisy.

Przyjmując częstotliwość rezonansową 50MHz i znając pojemność kondensatora w pF można wyznaczyć indukcyjność w μH z uproszczonego wzoru:

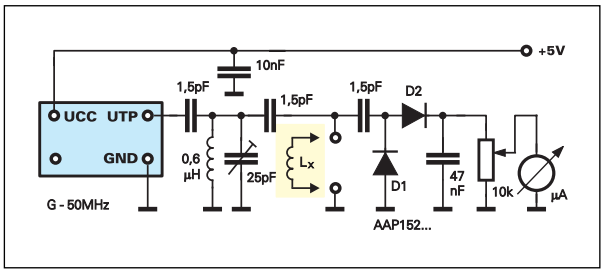
$$Lx = 10/C$$

Czyli jeżeli maksymalne wychylenie wskaźnika przypadnie dla pojemności kondensatora 10pF, będziemy mieli do czynienia z indukcyjnością 1μH i odpowiednio, dla 50pF-0,2μH, 100pF-0,1μH...

Po wyskalowaniu należy jeszcze upewnić się, czy miernik działa prawidłowo, dołączając kilka cewek o małych wartościach indukcyjności stosowanych w zakresach VHF. Eksperymentalne cewki można wykonać samemu poprzez nawinięcie emaliowanym drutem miedzianym o średnicy 1mm (DNE 1) na ołówku (średnica około 7mm):
50nH-2 zwoje, 100nH-3 zwoje, 200nH-7 zwojów, 300nH-10 zwojów...

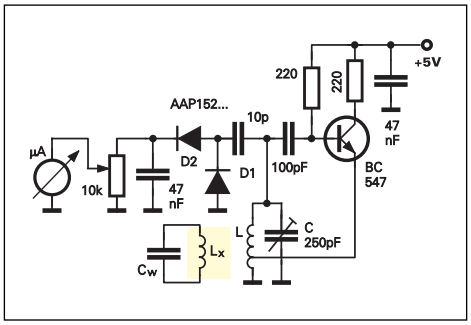
Na zakończenie warto przypomnieć jeden z najbardziej uniwersalnych przyrządów, czyli TDO.

TDO to skrót od angielskiej nazwy Trans-Dip-Oscillator (odpowiednik GDO, czyli Grid-Dip-Oscylator) i bywa często nazywany po prostu „dipmetrem". Zakres pomiarowy TDO zależy od liczby wykonanych cewek wzorcowych, zaś dokładność pomiarów - od precyzji w naniesieniu skali, a także od wprawy użytkownika.



Rys. 7

Rys. 8



Na rysunku 7 zamieszczono schemat jednego z najprostszych układów wykonanych z zastosowaniem łatwych do zdobycia podzespołów.

Choć na łamach pisma były już opisywane podobne urządzenia, to warto przypomnieć, że zasadniczym elementem urządzenia jest generator wykonany w układzie Hartleya na tranzystorze BC547. Układ taki charakteryzuje się pewną pracą w szerokim zakresie częstotliwości. W skład obwodu rezonansowego wchodzi wymienna nieekranowana cewka L umieszczona na zewnątrz obudowy oraz kondensator o zmiennej pojemności zaopatrzony w podziałkę częstotliwości. Można tu wykorzystać kondensator obrotowy w obudowie plastikowej o pojemności około 200pF (jedna sekcja agregatu AM). Po generatorze następuje prostownik w.cz. w postaci podwajacza napięcia, a następnie wskaźnik prądu stałego w postaci mikroamperomierza.

Jeżeli obwód rezonansowy z cewką L (oczywiście przy zasilaniu układu) zostanie sprzęgnięty z innym obwodem o identycznej częstotliwości rezonansowej, to wskaźnik miernika pokaże spadek wychylenia wskazówki dołączonego miernika - tak zwany „dip". Dzieje się to na skutek tego, że przy zgodności obydwu częstotliwości badany obwód pobiera część energii z obwodu generatora, powodując zmniejszenie amplitudy sygnału generatora.

Przy eksperymentalnym dobieraniu liczby zwojów można posłużyć się odbiornikiem radiowym z odpowiednim zakresem częstotliwości.

Trzeba pamiętać, że maksymalna wartość częstotliwości występuje przy minimalnej pojemności kondensatora zmiennego (wykręconym rotorze), zaś minimalna - przy maksymalnej pojemności kondensatora zmiennego (wkręconym rotorze).

W celu określenia indukcyjności cewki należy końcówki Lx połączyć z kondensatorem o znanej pojemności C, a następnie określić częstotliwość rezonansową tak powstałego obwodu LC.

Indukcyjność wyliczamy ze wzoru (5).

Mam nadzieję, że w powyższym artykule udało mi się choć częściowo odpowiedzieć na pytanie, jak określić indukcyjność cewek lub ile nawinąć zwojów, aby uzyskać potrzebną wartość indukcyjności.

Andrzej Janeczek