

Indukcyjność

Jest podstawowym parametrem cewki indukcyjnej. Określana jest jako stosunek strumienia magnetycznego wytworzonego przez cewkę i skojarzonego z nią, do płynącego przez nią prądu.

$$L = \Phi / i$$

gdzie: L – indukcyjność [H],
 Φ – strumień magnetyczny [Vs],
 i – prąd [A].

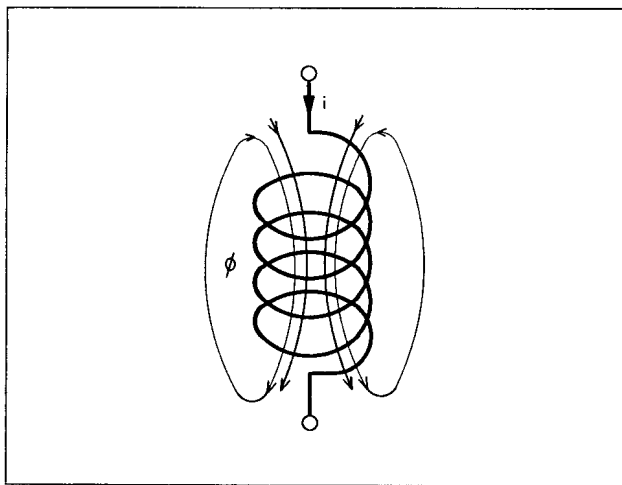
Strumień skojarzony oznacza strumień wytworzony przez cewkę i obejmujący ją. Część strumienia wytworzonego przez cewkę nie obejmuje jej – jest to tzw. strumień rozproszony. Cewka indukcyjna wykonana jest w formie nawiniętych na tzw. karkasie uzwojeń z materiału przewodzącego (najczęściej drutu miedzianego). Znaczący wpływ na wielkość strumienia skojarzonego mają budowa i kształt cewki indukcyjnej, które tym samym wpływają na jej indukcyjność. Jednostką indukcyjności jest *Henr* [H]. Praktycznie często używane są jednostki pochodne:

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

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

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

Ilustrację indukcyjności prezentuje rys. 1.



Rys. 1 Indukcyjność

Cewka indukcyjna wewnątrz i zewnątrz może posiadać tzw. rdzeń z materiału magnetycznego, najczęściej ferromagnetycznego, posiadającego właściwość zwiększania strumienia magnetycznego jak i jego skupiania. Zastosowanie rdzenia zwiększa indukcyjność cewki bez zwiększania ilości zwojów. Istotnym parametrem rdzenia magnetycznego jest tzw. *przenikalność magnetyczna* (μ), która jest współczynnikiem wpływającym bezpośrednio na wzrost indukcyjności.

Prąd stały płynący przez idealną cewkę indukcyjną nie powoduje na niej spadku napięcia. Dla prądu stałego cewka stanowi zwarcie. Praktycznie prąd ten będzie ograniczany rezystancją przewodnika z jakiego wykonana jest cewka indukcyjna.

Zmiana prądu płynącego przez cewkę powoduje zmianę strumienia magnetycznego i w efekcie powstawanie na jej zaciskach siły elektromotorycznej.

$$E = -d\Phi/dt = -L(di/dt)$$

Wielkość siły elektromotorycznej będzie proporcjonalna do indukcyjności L i szybkości zmian prądu (di/dt). Przeptywający przez cewkę prąd, zmieniający się sinusoidalnie wytworzy na niej zmieniające się sinusoidalnie napięcie, które w idealnym przypadku będzie wyprzedzało prąd o 90° . Dla prądu zmiennego można zapisać odpowiednik prawa Ohma dla indukcyjności:

$$U = IX_L$$

$$X_L = 2\pi fL$$

gdzie: X_L – reaktancja indukcyjna [Ω],

f – częstotliwość [Hz],

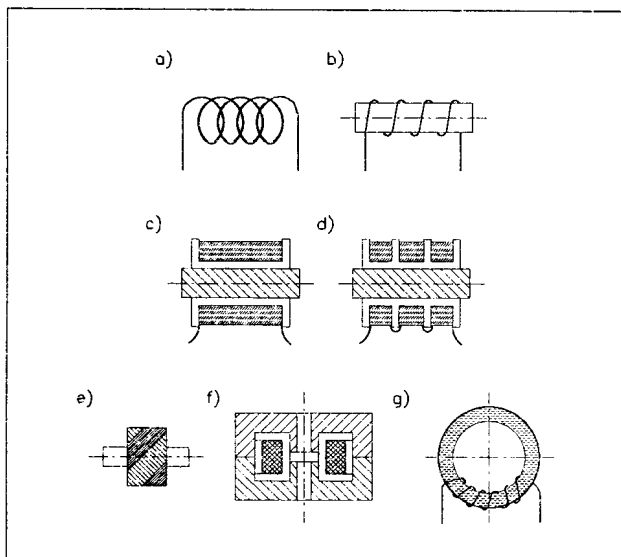
L – indukcyjność [H].

Wyrażenie to dla uproszczenia nie zawiera podanych wcześniej zależności fazowych, o których jednak nie należy zapominać.

Stosowanie cewek indukcyjnych w dobie układów scalonych o wielkiej skali integracji jest coraz bardziej ograniczane. Jednak znajduje się jeszcze wiele zastosowań gdzie prościej i z lepszym skutkiem stosuje się tradycyjne, duże i zawodne elementy jakimi są indukcyjności. Do przykładów zastosowań należą: obwody rezonansowe w.c., filtry, dławiki i transformatory. O transformatrach napiszemy osobno w kolejnym artykule z tego cyklu.

Budowa cewek indukcyjnych stałych

Najprostszą budowę posiadają cewki jednowarstwowe powietrzne, które mogą być nawinięte na karkasie z materiału izolacyjnego (tworzywo sztuczne, papier) lub mogą być wykonane w formie samonośnej przez nawinięcie z odpowiednio grubego drutu. Widok takiej cewki pokazany jest na rys. 2a.



Rys. 2 Budowa indukcyjności stałych

Nowoczesne cewki tego rodzaju są nawijane bez karkasu a ich uzwojenia są sklejane tworząc konstrukcję samonośną.

Po założeniu cewki powietrznej jednowarstwowej na rdzeń magnetyczny np. anteny ferrytowej uzyskujemy cewkę jednowarstwową z rdzeniem, o odpowiednio większej indukcyjności. Cewkę taką pokazano na rys. 2b. Dalsze zwiększenie indukcyjności można uzyskać przez nawinięcie uzwojenia w sposób wielowarstwowy co pokazano na rys. 2c. Na rysunku tym widzimy schematyczny wizerunek cewki wielowarstwowej z rdzeniem.

Wadą tego rodzaju cewek przy ich dużej indukcyjności, jest duża pojemność własna widziana niekorzystnie w wielu zastosowaniach. Sposobami na zmniejszenie pojemności własnej cewek są specjalne metody ich nawijania. Pierwszym sposobem zamiast jednej cewki wielowarstwowej jest nawinięcie kilku cewek mniejszych połączonych szeregowo. Indukcyjności cewek połączonych szeregowo dodają się, natomiast ich pojemności własne dodają się zgodnie z wzorami na szeregowe połączenie pojemności dając efekt zmniejszenia pojemności wypadkowej. Jest to tzw. cewka sekcyjna pokazana na rys. 2d.

Drugim sposobem zmniejszenia indukcyjności cewki wielowarstwowej jest tzw. nawijanie krzyżowe polegające na umieszczaniu kolejnych zwojów pod kątem prostym względem siebie. Pojemność między kolejnymi zwojami będzie teraz znacznie mniejsza, w stosunku do dotychczasowego równoległego ułożenia zwojów. Cewkę nawiniętą krzyżowo widzimy na rys. 2d.

Duża ilość nowoczesnych cewek jest wykonywana jako wielowarstwowe i umieszczane wewnątrz specjalnego rdzenia ferrytowego składającego się z dwóch jednakowych części – tzw. rdzenia kubkowego. Rdzeń ten znajduje się wewnątrz i na zewnątrz cewki. Dzięki temu prawie 100% pola magnetycznego zamyka się w rdzeniu, dając zwiększenie indukcyjności i znaczne zmniejszenie rozproszonych pól magnetycznych. Cewka z rdzeniem kubkowym jest pokazana na rys. 2f.

Korzystne właściwości posiadają cewki nawijane na zamkniętym rdzeniu w kształcie koła tzw. rdzeniu toroidalnym – patrz rys. 2g. Kłopotliwe jest wprowadzenie nawijania cewki toroidalnej, ale warto pomęczyć się dla efektów, jakimi są duża indukcyjność i małe pole magnetyczne rozproszone.

Parametry cewek stałych

Zasadniczym jest *indukcyjność znamionowa* L mierzona w Henrach [H]. Najczęściej nie jest ona podawana jako wartość z szeregu, jak dla rezystorów czy kondensatorów. Chociaż są wykonywane zwłaszcza dla w.w. m.c. i w.c., jako stałe indukcyjności o wartościach znamionowych w/g szeregów E6, E12 lub nawet E24. Dostępne są wartości indukcyjności w przedziale $0,1 \mu\text{H} - 100 \text{ mH}$. Indukcyjności o takich wartościach są wykonywane także w postaci odpowiedniej do montażu powierzchniowego.

Zazwyczaj indukcyjności wykonywane są o wartościach określonych indywidualnie przez zamawiającego. Także zróżnicowane są formy zewnętrzne indukcyjności i dodatkowe wymagania. W sytuacji kiedy producent seryjnych indukcyjności nie jest w stanie sprostać wygórowanym rządaniom trzeba podejmować się ich produkcji we własnym zakresie.

Straty energii w cewce reprezentuje tzw. *dobroć cewki* Q . Źródłami strat w cewce mogą być: rezystancja przewodu z jakiego jest wykonane uzwojenie cewki, straty w rdzeniu magnetycznym i straty dielektryczne w karkasie. Straty te zmieniają się i zazwyczaj rosną ze wzrostem częstotliwości. Jeśli sumaryczne straty w cewce przedstawi się w postaci rezystancji r_s połączonej szeregowo z indukcyjnością cewki L , to dobroć cewki określa niżej podany wzór:

$$Q = 2\pi fL/r_s$$

Straty energii występujące w cewce indukcyjnej powodują, że kąt fazowy między napięciem i prądem na indukcyjności będzie odbiegał od 90° . Tangens różnicy kątów idealnego i rzeczywistego nazywany jest *tangensem kąta strat* – $\text{tg } \delta$. Jest on odwrotnością dobroci cewki.

$$\text{tg } \delta = 1/Q$$

Dobroć jest istotnym parametrem zwłaszcza dla cewek stosowanych w obwodach rezonansowych. Od dobroci cewki zależy wypadkowa dobroć obwodu i związane z nią jego właściwości selektywne. Dużą dobroć

można uzyskać przez nawijanie cewki odpowiednim drutem (lica w.c.z., drut srebrzony) oraz stosowanie rdzeni magnetycznych o małych stratach.

Zmiany indukcyjności w funkcji temperatury przedstawia się za pomocą *temperaturowego współczynnika indukcyjności* TWL.

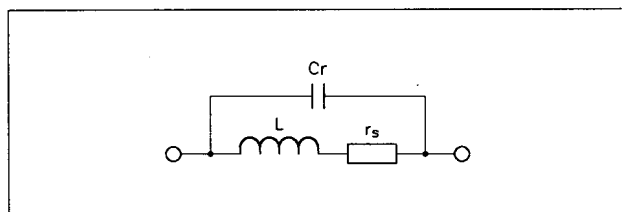
$$TWL = \Delta L / (L \Delta T)$$

gdzie: ΔL – przyrost indukcyjności,
 L – indukcyjność początkowa,
 ΔT – przyrost temperatury.

Temperaturowy współczynnik indukcyjności podaje się w [ppm/°] ($\text{ppm} = 10^{-6}$). Wartości TWL są zwykle dodatnie. Dla cewek powietrznych wynoszą od kilku do 300 ppm/°. Dla cewek z rdzeniem magnetycznym od – 100 do 200 ppm/°. Dla uzyskania stabilnej cewki powietrznej należy zapewnić małe zmiany jej wymiarów geometrycznych w funkcji temperatury. W przypadku cewki z rdzeniem magnetycznym decydujący wpływ ma zależność przenikalności rdzenia od temperatury.

Parametrem cewki niezbyt mile widzianym jest *pojemność rozproszona* C_r . Składają się na nią pojemności między zwojami i pojemność wyprowadzeń. Sposoby jej zmniejszania przedstawiono przy okazji opisu budowy cewek.

Po uwzględnieniu pojemności rozproszonej i rezystancji strat można narysować schemat zastępczy cewki indukcyjnej – rys. 3.



Rys. 3 Schemat zastępczy cewki indukcyjnej

Budowa cewek indukcyjnych zmiennych

W wielu zastosowaniach niezbędne jest przestrajanie obwodów rezonansowych, lub co najmniej dostrojenie obwodu w ograniczonym zakresie dla skompenso-

wania rozrzutu parametrów. Do tego celu można zastosować opisane wcześniej kondensatory zmienne, ale często stosuje się indukcyjności zmienne.

Najprostszym sposobem niewielkiej zmiany indukcyjności samonośnej cewki powietrznej jest ściskanie lub rozciąganie jej zwojów. Rozwiązanie takie jest często spotykane w głowicach UKF prostych odbiorników radiowych.

Bardziej technicznie zaawansowanym sposobem jest zastosowanie cewki z rdzeniem magnetycznym gwintowanym. Pokręcanie rdzenia znajdującego się w gwintowanym karkasie umożliwia jego przesuwanie w stosunku do uzwojenia i zmianę indukcyjności cewki. Rozwiązanie to umożliwia jedynie dostrajanie cewki, a pokazano je na rys. 4a. Stosowane jest powszechnie w obwodach wejściowych i heterodyny strojonych kondensatorem zmiennym oraz w filtrach p.c.z. odbiorników radiowych. Możliwe jest zastosowanie do przestrajania cewki zwłaszcza przy w.c.z., rdzenia z materiału przewodzącego niemagnetycznego (aluminium, mosiądz). O ile rdzeń magnetyczny zwiększa indukcyjność cewki, tak rdzeń niemagnetyczny powoduje jej zmniejszenie.

Cewki przestrajane w większym zakresie nazywane są wariometrami. Najczęściej stosowanym rozwiązaniem jest cewka z przesuwającym rdzeniem magnetycznym lub niemagnetycznym pokazana na rys. 4b. Zaletą wariometru w stosunku do kondensatora zmiennego jest odporność na wstrząsy i wibracje. Cecha ta przesądziła o powszechności strojenia wariometrami w odbiornikach samochodowych. Aktualnie rozwiązanie to jest wypierane przez stosowanie diod pojemnościowych.

Możliwe jest uzyskanie indukcyjności zmiennej bez stosowania rdzenia magnetycznego. Do tego celu niezbędne jest zastosowanie dwóch cewek powietrznych w układzie pokazanym na rys. 4c. Cewki te łączy się szeregowo, a między nimi występuje sprzężenie magnetyczne reprezentowane indukcyjnością wzajemną M . Jedna z cewek posiada możliwość zmiany położenia, przez co uzyskuje się zmianę indukcyjności wzajemnej. Jeśli obie cewki posiadają taką samą indukcyjność L , otrzymuje się następujący zakres zmian indukcyjności:

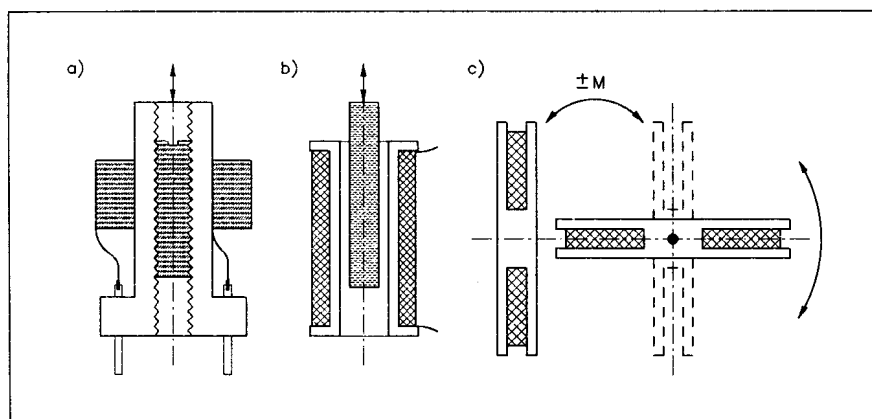
$$L_{\min} = 2L - 2M$$

$$L_{\max} = 2L + 2M$$

Najmniejsza indukcyjność wzajemna występuje w położeniu prawej cewki pokazanym na rysunku linią ciągłą. Największa w położeniu pokazanym linią przerywaną i może zmieniać znak po obróceniu cewki o 180°.

Parametry cewek zmiennych

Dla cewek dostrajanych w niewielkim zakresie podaje się indukcyjność znamionową odpowiadającą neutralnemu położeniu rdzenia i wyrażony w % zakres zmian indukcyjności.



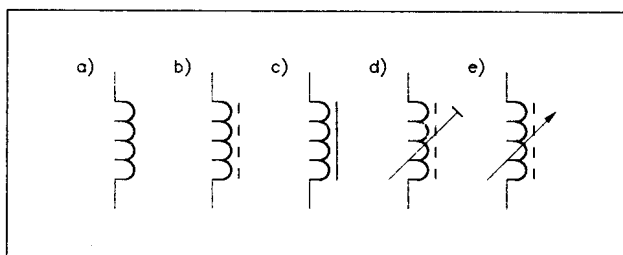
Rys. 4 Budowa indukcyjności zmiennych

Zakres zmian indukcyjności wynosi od 5 – 20%. Określa się także dobroć cewki i temperaturowy współczynnik indukcyjności. Producent podaje także zasadnicze zastosowanie danego typu cewki, np. filtr p.cz. AM, czy FM. Istotne dla takiej cewki jest także rozmieszczenie wyprowadzeń niezbędne do prawidłowego zaprojektowania płytki drukowanej.

Dla wariometrów podaje się jedną z indukcyjności skrajnych (najczęściej $L_{\max}$) i przyrost indukcyjności δL lub stosunek $L_{\max}/L_{\min}$. Określa się dobroć minimalną lub podaje jej przebieg w funkcji zmian indukcyjności. Wariometry najczęściej przewidziane są do konkretnego zastosowania np. do przestrajania obwodów odbiornika radiowego AM lub FM. Wykonywane są wtedy jako zestawy wariometrów sprzężonych. Istotnym parametrem jest wówczas współbieg zmian indukcyjności wariometrów składowych. Często zamiast indukcyjności operuje się bezpośrednio częstotliwościami uzyskiwanymi w obwodzie z wariometrem. Temperaturowy współczynnik zmian indukcyjności jest szczególnie istotny dla sekcji heterodyny.

Stosowanie cewek indukcyjnych

Zacznijmy tradycyjnie od symboli cewek używanych przy rysowaniu schematów. Przedstawiono je na rys. 5.



Rys. 5 Oznaczenia schematowe indukcyjności

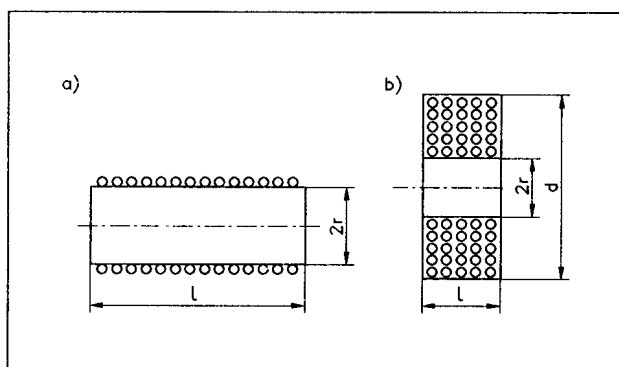
Rys. 5a, to oznaczenie schematowe cewki stałej powietrznej (bez rdzenia). Rys. 5b pokazuje oznaczenie cewki stałej z rdzeniem ferrytowym, a 5c – cewki stałej z rdzeniem żelaznym. Oznaczenie cewki dostrajanej (przestrajanej w niewielkim zakresie) z rdzeniem ferrytowym uwidacznia rys. 5d. Oznaczenie wariometru strojonego rdzeniem ferrytowym pokazuje rys. 5e.

Zasadniczym czynnikiem różnicującym wykonanie indukcyjności jest przewidywana częstotliwość pracy. Cewki pracujące przy niskich częstotliwościach mają zwykle większe indukcyjności, a cewki pracujące przy wyższych częstotliwościach indukcyjności mniejsze. Przy niskich częstotliwościach wykorzystuje się na rdzenie magnetyczne cewek blachy żelazne lub permalloyowe (do 50 kHz). Przy wyższych częstotliwościach stają się one źródłem znacznych strat energii i korzystniejsze jest stosowanie rdzeni ferrytowych (od 10 kHz). Przy bardzo dużych częstotliwościach stosuje się cewki powietrzne, a nawet proste odcinki drutu srebrzonego o określonej długości.

Czynnikiem istotnie pogarszającym dobroć cewek przy wysokich częstotliwościach jest zjawisko naskórkowości. Zjawisko to powoduje zmniejszanie czyn-

nego przekroju przewodnika ze wzrostem częstotliwości i tym samym wzrost jego rezystancji zmniejszający dobroć cewki. Stosuje się szereg zabiegów dla zmniejszenia wpływu zjawiska naskórkowości. Pierwszym jest zmniejszanie średnicy przewodu nawojowego, pomagające jednak tylko przy najniższych częstotliwościach (do 300 kHz). Przy częstotliwościach wyższych (300 kHz – 2 MHz) stosuje się do nawijania cewek tzw. *licę*. Lica to spłot izolowanych bardzo cienkich drucików miedzianych umieszczonych najczęściej w oplocie jedwabnym. Przykładowe oznaczenia to $7 \times 0,06$ (7 drucików o średnicy 0,06 mm), $20 \times 0,05$ (20 drucików o średnicy 0,05 mm). Na falach krótkich i ultrakrótkich (od 3 MHz) stosowany jest do nawijania cewek o dużej dobroci drut miedziany srebrzony. Korzystne właściwości przy b.w.cz. posiada taśma miedziana srebrzona.

Najprościej jest wymaganą indukcyjność kupić w sklepie z podzespołami, ale często trzeba ją wykonać we własnym zakresie. Dlatego też podamy kilka wzorów pozwalających na obliczenie indukcyjności cewek. Pierwsze będą dotyczyły cewek powietrznych – jednowarstwowej i wielowarstwowej. We wzorach istotne znaczenie mają podstawowe wymiary tych cewek, więc przytaczamy ich rysunki mechaniczne – rys. 6.



Rys. 6 Wymiary cewek powietrznych: a) jednowarstwowa, b) wielowarstwowa

Wzór na obliczenie indukcyjności cewki jednowarstwowej ma następującą postać:

$$L = 0,394r^2z^2/(9r + 10l)$$

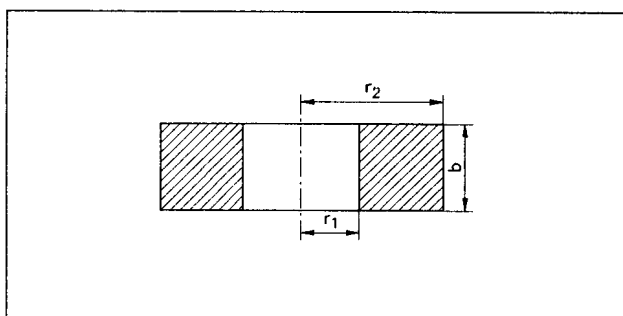
gdzie: L – indukcyjność [μH],
 r, l – wymiary [cm],
 z – ilość zwojów.

Kolejny wzór służy do obliczenia indukcyjności cewki wielowarstwowej:

$$L = 0,315r^2z^2/(6r + 9l + 10d)$$

Indukcyjność uzyskuje się w [μH], jeśli wymiary r, l, d będą podane w [cm]. W obu wzorach ilość zwojów podana jest do kwadratu, co jest charakterystyczne dla wszystkich rodzajów cewek. Podwojenie ilości zwojów oznacza 4 – krotne zwiększenie indukcyjności.

Kolejny wzór będzie dotyczył indukcyjności cewki na rdzeniu magnetycznym toroidalnym o przekroju prostokątnym. Charakterystyczne wymiary takiego rdzenia pokazane są na rys. 7.



Rys. 7 Wymiary rdzenia toroidalnego

Wzór ma następującą postać:

$$L = 0,002z^2b\mu_r \ln(r_2/r_1)$$

gdzie: L – indukcyjność [μH],
 z – ilość zwojów,
 μ_r – względna przenikalność magnetyczna rdzenia,
 b, r_1, r_2 – wymiary [cm].

Bardzo prosty jest wzór do obliczania indukcyjności cewki z rdzeniem kubkowym:

$$L = A_L z^2$$

gdzie: L – indukcyjność [μH],
 A_L – stała indukcyjności,
 z – liczba zwojów.

Stała indukcyjności jest podawana przez producenta rdzenia i najczęściej drukowana na rdzeniu. Połówki rdzeni są dobierane fabrycznie i nie jest wskazane mieszanie połówek z różnych kompletów. Przy montażu trzeba zwracać uwagę na dokładne przyleganie połówek.

Zazwyczaj zadanie będzie zupełnie odwrotne do rozwiązań według podanych wzorów – mamy wymaganą indukcyjność cewki L , a trzeba obliczyć ilość zwojów potrzebną do jej uzyskania. W tym celu niezbędne jest przekształcenie podanych wzorów tak aby obliczyć z^2 , a po wyciągnięciu pierwiastka uzyskać z . Wcześniej trzeba założyć odpowiednie wymiary mechaniczne, do czego jest potrzebna odrobina doświadczenia lub znajomość wymiarów rdzenia. Problem wymiarów odpada

przy rdzeniu kubkowym. Sądzimy, że te proste przekształcenia nie przekroczą możliwości matematycznych naszych czytelników.

Często wśród zapasów np. filtrów brakuje nam tego jaki przewidział projektant urządzenia. Jak poradzić sobie w tej sytuacji? Trzeba przeglądnąć zapasy i ewentualnie zastosować filtr o najbardziej zbliżonych parametrach dobierając pojemność zewnętrzną. Dla poznania parametrów niezbędny jest katalog producenta. Polecamy zaopatrzenie się w "Poradnik. Podzespoły elektroniczne – elementy bierne", (J. Borczyński, A. Milczewski) wydany przez WKŁ.

Jeśli filtr o zbliżonych parametrach nie wchodzi w grę trzeba spróbować nawinąć dokładnie taki, jaki jest wymagany. We wspomnianym Poradniku są podane indukcyjności i ilości zwojów. Na tej podstawie można obliczyć stałą indukcyjności (analogiczną do używanej przy obliczaniu indukcyjności cewki z rdzeniem kubkowym) dla posiadanej indukcyjności.

$$A_L = L/z^2$$

Mając stałą indukcyjności można obliczyć ilość zwojów niezbędną do uzyskania zakładanej indukcyjności:

$$z^2 = L/A_L$$

Otrzymana liczba to kwadrat ilości zwojów, z którego trzeba wyciągnąć pierwiastek aby otrzymać właściwą liczbę zwojów.

Osobnym zagadnieniem jest praca indukcyjności ze składową stałą. Przepływ prądu stałego nie gra żadnej roli w przypadku cewek powietrznych. Oczywiście poza wytrzymałością prądową drutu. W przypadku cewek z rdzeniem prąd stały powoduje wstępne namagnesowanie rdzenia. Przy zbyt dużej wartości może spowodować tzw. nasycenie rdzenia (pełne namagnesowanie) objawiające się spadkiem indukcyjności cewki. Zjawisku temu można częściowo przeciwdziałać przez zastosowanie rdzenia ze szczeliną powietrzną. Jest to istotne zwłaszcza dla dławików filtrujących z rdzeniem żelaznym stosowanych w filtrach zasilaczy sieciowych.

W szczeliny często wyposażane są rdzenie kubkowe (wewnątrz kubka), co w istotny sposób zmniejsza możliwość uzyskania stałej indukcyjności. Szczelina powoduje więc zmniejszenie indukcyjności cewki, ale pozwala zwiększyć dopuszczalne natężenie prądu stałego przepływającego przez nią.

Ciąg dalszy w następnym numerze.