

# Miernik dobroci elementów

W wielu zastosowaniach dobroć Q jest ważnym parametrem zarówno cewek, jak i kondensatorów. W praktyce mówimy zwykle tylko o dobroci cewek, ponieważ w większości wypadków to cewka jest elementem ograniczającym wypadkową dobroć obwodu rezonansowego LC. Dobroć cewki definiuje się dla danej częstotliwości jako stosunek reaktancji  $X_L$  do zastępczej szeregowej rezystancji strat R (suma wszystkich strat, w tym omowych, związanych ze zjawiskiem naskórkowości, wzbudzaniem prądów wirowych, strat na wypromieniowanie, strat w rdzeniu). Dobroć cewki i kondensatora zależy od częstotliwości. Wbrew potocznym wyobrażeniom, dobroć cewki nie jest największa dla najmniejszych częstotliwości, ponieważ wartość reaktancji rośnie proporcjonalnie do częstotliwości, zaś straty zwykle nie rosną proporcjonalnie. Dla danej cewki istnieje zakres częstotliwości, gdzie dobroć jest największa. Dobroć jest szczególnie ważna w przypadku elementów, które przenoszą duże moce, gdyż straty w nich występujące powodują nagrzewanie, często do wysokiej temperatury. Natomiast w przypadku filtrów pracujących na niskich poziomach mocy, mała dobroć zastosowanych elementów powoduje zwiększone tłumienie w paśmie przenoszenia, jak również zniekształcenie charakterystyki filtru. Przykład filtru, w którym zastosowano elementy o małej dobroci (w tym wypadku kondensatory) pokazano na **rysunku 1**, a ten sam filtr z elementami o wyższej dobroci na **rysunku 2**. Oczywiście, aby wykorzystać zalety obwodu o dużej dobroci, powinien być on odpowiednio dopasowany do elementu, z którym współpracuje. Różnicami w dobroci elementów możemy wytłumaczyć szereg z pozorów dziwnych zjawisk zachodzących w obwodach w.cz. Typowe mierniki stosowane przez amatorów nie mierzą dobroci elementów,

a tylko ich pojemność lub indukcyjność. Fabryczne mierniki dobroci są trudno dostępne, a ich koszt często leży poza możliwościami finansowymi wielu amatorów.

## Pomiar dobroci

Istnieje kilka metod pomiaru dobroci. Dobroć elementów w warunkach amatorskich najczęściej wyznacza się pośrednio w obwodzie rezonansowym LC, mierząc 3-decybelowe pasmo obwodu i wyliczając dobroć zgodnie ze wzorem:

$$Q = \frac{F_{\text{rezonansowa}}}{\text{Pasma } 3\text{dB}}$$

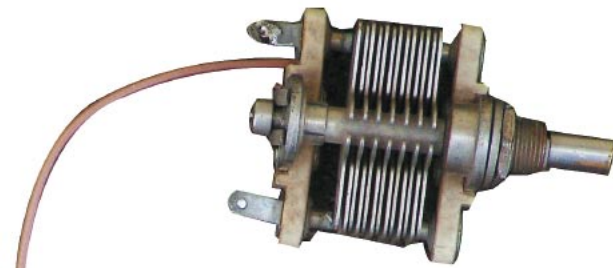
gdzie:

$Q$  – dobroć obwodu,

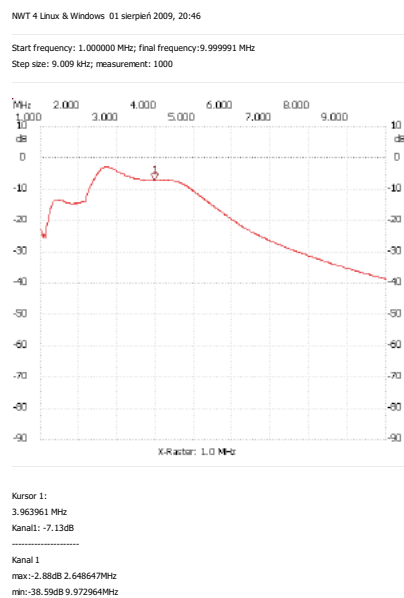
$F_{\text{rezonansowa}}$  – częstotliwość rezonansowa obwodu.

Graficzną reprezentację pasma 3dB zamieszczono na **rysunku 3**. Metoda pasma 3-decybelowego w przypadku manualnego wyznaczania potrzebnych częstotliwości jest uciążliwa, możliwe jest jednak jej zautomatyzowanie dzięki zastosowaniu miernika z serii NWT, który po uaktywnieniu odpo-

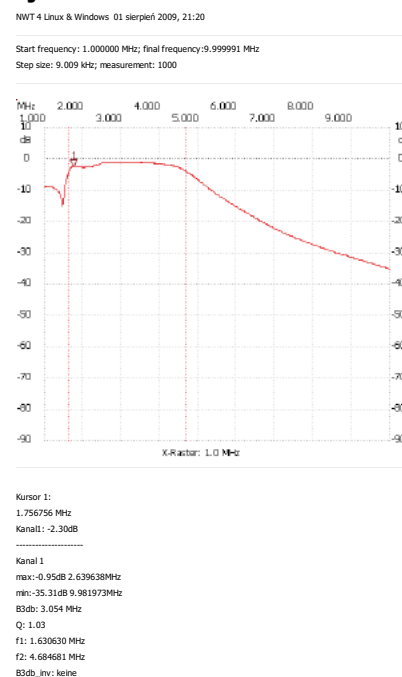
wiednich opcji sam wylicza pasmo 3dB obwodu i jego częstotliwość rezonansową. W fabrycznych miernikach dobroci najczęściej łączy się szeregowy obwód rezonansowy do źródła sygnału o bardzo małej impedancji wewnętrznej, rzędu miliomów. Oporność wyjściowa analizatora z serii NWT wynosi 50Ω i z tego powodu nie może być on użyty bezpośrednio w tej metodzie. Do obniżenia impedancji źródła sygnału można użyć dzielnika rezystorowego, dzielnika pojemnościowego lub transformatora o odpowiednio dużym przełożeniu. Rozwiązanie z zastosowaniem transformatora jest najczęściej stosowane w przyrządach fabrycznych. Schemat opisywanego układu pokazany jest na **rysunku 4**. W opisanym układzie zastosowano niezależnie dwie metody obniżenia impedancji wyjściowej. Pierwsza z nich to zastosowanie wtórniaka emiterowego, pracującego w klasie A, druga to użycie transformatora o przekładni 40:1, co obniża impedancję wyjściową wtórniaka  $40^2$ , czyli aż 1600 razy. Do wyjścia transformatora podłączony jest obwód szeregowy L1, C1, a sygnał mierzony pobierany jest w punkcie ich połączenia przez dzielnik pojemnościowy (obniżenie wpływu i tak wysokiej rezystancji tranzystora polowego). W celu umożliwienia pomiarów na różnych częstotliwościach, w układzie występuje kondensator C1 o zmiennej pojemności – wysokiej jakości trymer. Masa kabla podłączona jest z obudową trymera, a żyła gorąca z cewką, dzielnikiem pojemnościowym (C14, C15) i drugą z elektrod trymera. Zastosowany tranzystor SST310 jest odpowiednikiem tranzystora J310 w obudowie SMD. Tranzystor ten pracuje jako wtórnik źródłowy o wysokiej impedancji wejściowej i impedancji

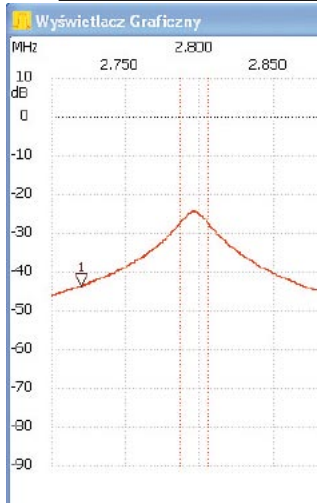


**Rys. 1**



**Rys. 2**



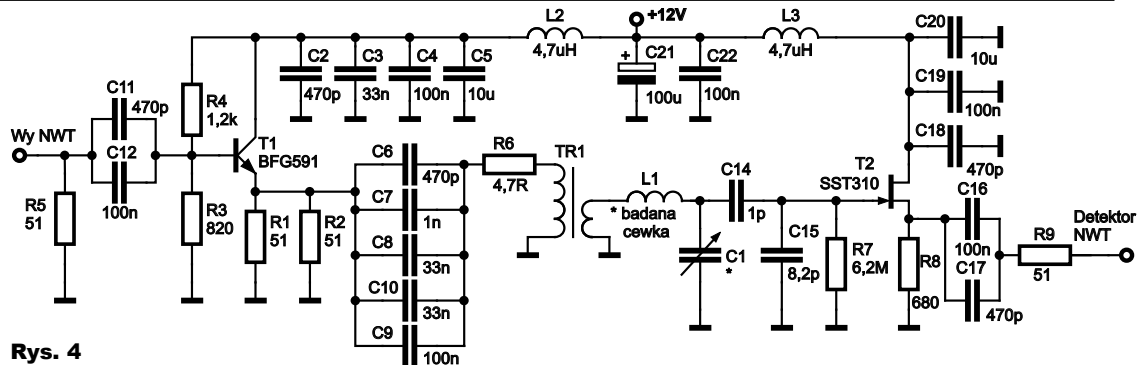


Rys. 3

wyjściowej 50Ω. Od strony wyjścia NWT dopasowanie opisanego układu do analizatora NWT zapewnia rezystor R5. Wejście wtórnika emiterowego podłącza się do wyjścia generatora NWT, a wyjście wtórnika źródłowego do wejścia detektora NWT. Niektóre z kondensatorów lutowane są na sobie, w tym wypadku kondensator o mniejszej pojemności montowany jest na spodzie. Zmontowany układ pokazany jest na **fotografii tytułowej**, a schemat montażowy pokazany jest na **rysunku 5**.

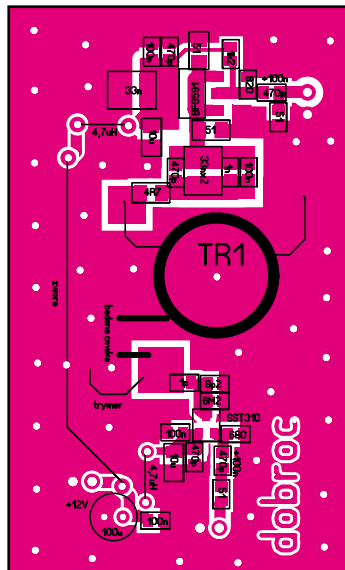
## Budowa układu

Układ zbudowany ze sprawdzonych elementów działa od razu. Największym problem jest prawidłowe wykonanie transformatora obniżającego impedancję wyjściową o bardzo małej rezystancji i indukcyjności uzwojenia wtórnego. Uzwojenie pierwotne wykonano przez nawinięcie równomiernie na całym obwodzie rdzenia o średnicy 16mm (materiał F2001) 40 zwojów emalowanego drutu nawojowego o średnicy 0,5mm. Drut powinien dobrze przylegać do powierzchni rdzenia. Dziwnie wyglądające, nietypowe uzwojenie wtórne wykonane jest z rurki miedzianej o średnicy minimalnie mniejszej niż średnica wewnętrznego otworu rdzenia pierścieniowego (po uwzględnieniu jej redukcji przez drut nawinięty na powierzchni rdzenia) i okrągłego kawałka folii miedzianej. Rurkę miedzianą o wymaganej średnicy wykonano przez nawinięcie na wiertło paska blachy miedzianej (grubość 0,2mm), w miejscu zetknięcia się dwóch krawędzi blaszki (z nadmiarem około 2mm) wykonano połączenie lutowane (szew). Wysokość rurki musi być około 2mm wyższa niż wysokość rdzenia z nawiniętym uzwojeniem pierwotnym. Tak powstała rurka miedziana wlutowano do płytki drukowanej w postaci podobnej do komina, nałożono na nią rdzeń. Potem górną część uzwojenia wtórnego



Rys. 4

Rys. 5



transformatora wykonano z blaszki miedzianej grubości 0,2mm, o kształcie zbliżonym do koła, o średnicy 3 mm większej niż średnica rdzenia. Środkowy otwór w blaszce uzyskano przez rozcięcie koła do połowy i wycięcie koła o średnicy równej średnicy rurki miedzianej. Powstałe przecięcie w powierzchni koła zlutowano. Tak powstała górna część uzwojenia przylutowano do rurki miedzianej, przylutowanej wcześniej do płytki drukowanej. Bardzo ważne, by podczas prac nie dopuścić do zwarcia obu uzwojeń; jako separator między uzwojeniami można zastosować cienką

folię teflonową, uzyskaną np. ze starszych kabli teflonowych, które mają dielektryk w formie wielokrotnie nawijanej folii. Szczegóły budowy transformatora pokazane są na **fotografii 1** i na **fotografii tytułowej**. Do krawędzi górnej powierzchni transformatora dołącza się mierzona cewkę.

Opisany nietypowy transformator powstał po eksperymentach z różnymi konstrukcjami. Charakteryzuje się on najlepszymi parametrami spośród przebadanych konstrukcji, a jednocześnie jest stosunkowo prosty do wykonania. Od staranności wykonania tego transformatora w dużej mierze zależy dokładność pomiarowa przyrządu. Kondensator strojeniowy C1 najlepiej wykonać jako element zewnętrzny, podłączany krótkim odcinkiem teflonowego kabla koncentrycznego (można użyć też kabla z dielektrykiem polietylenowym z nieco gorszym skutkiem). Istotne jest, aby zastosować złącza kablowe z gwintowanym połączeniem (np. typu TNC, SMA), ze względu na najmniejszą rezystancję styku. Złącza typu BNC nie powinny być stosowane. Takie rozwiązanie umożliwia użycie wymiennych kondensatorów, jak również badanie dobroci kondensatorów stałych. Ważne jest, aby zastosowany kondensator zmienny C1 miał możliwie wysoką dobroć. Dlatego kondensatory z dielektrykiem foliowym nie powinny być stosowane w tym układzie – można stosować tylko trymery z dielektrykiem powietrznym. Dobroć trymera można ocenić przez porównanie

wypadkowej dobroci obwodu LC z cewką o dużej dobroci, najlepiej z kilkoma kondensatorami z dielektrykiem NPO/COG (ważne!) lub jeszcze lepiej – kondensatorem porcelanowym (np. firmy ATC). Wypadkowa dobroć obwodu rezonansowego z trymerem nie powinna być mniejsza niż z kondensatorami stałymi o odpowiedniej pojemności. Kilka przykładów wykonania cewek o dużej dobroci podano w literaturze [1]. Zastosowane złącza do podłączania badanej cewki powinny zapewniać bardzo dobry kontakt elektryczny i powinny być podłączone do odpowiednich punktów układu za pomocą możliwie krótkich przewodów o dużym przekroju (małej rezystancji i indukcyjności własnej). Płytkę należy zamontować w obudowie ekranującej, a połączenie płytki z masą wykonać za pomocą szerokiego paska folii miedzianej (minimalna indukcyjność i rezystancja połączenia). Folia miedziana musi mieć bezpośrednie połączenie z ekranem złącza, do którego podłączony jest trymer. Podczas pomiarów nie należy dotykać obwodu LC rękoma, a w bezpośrednim pobliżu elementów LC nie powinny znajdować się żadne przedmioty metalowe.

## Pomiar

W celu wykonania pomiarów należy ustawić tryb pełny (NWT pracuje jako wobuloskop) oraz zaznaczyć opcje 3dB/Q (automatycznie aktywuje się też opcja linia marker). Odpowiednie ustawienia programu pokazano na **rysunku 6**. Należy uruchomić skanowanie w szerokim zakresie częstotliwości, by znaleźć częstotliwość rezonansową (maksimum sygnału), a następnie dostroić obwód do pożądanego częstotliwości za pomocą trymera. Po ustawieniu właściwej częstotliwości, należy zawęzić zakres mierzony do około 500 kHz i ustawić dużą liczbę punktów pomiarowych, by jak najdokładniej wyznaczyć częstotli-

Fot. 1





wości pasma 3dB i częstotliwość środkową. Autor zwykle stosuje maksymalną liczbę punktów pomiarowych równą 9999. Układ pokaże nam zmierzoną wartość dobroci Q (rysunek 7).

Oczywiście w układzie mierzymy dobroć Qrez słabo obciążonego obwodu rezonansowego, na którą wpływ ma także dobroć kondensatora Qc. Dobroć cewki QL wynosi:

$$Q_L = (Q_{rez} * Q_c) / (Q_c + Q_{rez})$$

Zakładając, że dobroć Qc jest dużo większa, niż Qrez, możemy przyjąć:

$$Q_L = (Q_{rez} * Q_c) / Q_c \sim Q_{rez}$$

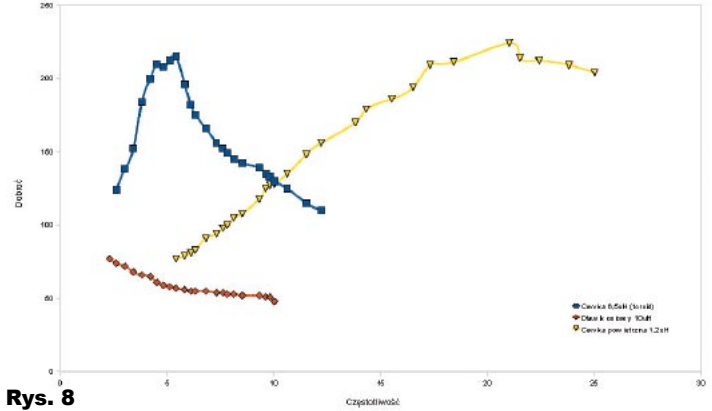
Dlatego należy stosować w tym układzie jak najlepszej jakości kondensatory, najlepiej o dobroci Qc=3000 lub większej.

W celu zapewnienia odpowiedniej dokładności pomiarów, sonda NWT (AD8307) powinna być skalibrowana. Czynność ta jest bardzo prosta i sprowadza się do zwarcia wejścia z wyjściem analizatora NWT za pomocą odcinka kabla koncentrycznego, uaktywnienia opcji kalibracji i zapisania danych kalibracyjnych. Większą dokładność pomiaru dobroci możemy uzyskać, stosując sondę liniową, dającą większy przyrost sygnału na wyjściu na dB mierzonego sygnału, kosztem mniejszej dynamiki. Oczywiście i w tym wypadku sonda powinna być skalibrowana oraz być uaktywniona z poziomu programu. W przypadku, gdy sygnał mierzony leży poza zakresem sondy pomiarowej (jest zbyt mały), można zastosować wzmacniacz szerokopasmowy np. AVT-2939/3. W płytce AVT-2939/3 można użyć również wzmacniaczy innych typów niż proponowane układy GAL-i. Wystarczy jedynie zmienić wartość opornika redukującego napięcie zasilania – wartości te podawane są w kartach katalogowych wzmacniaczy. Ważne jest, by wzmacniacz był bezwarunkowo stabilny, miał w miarę równomierną charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową i odpowiednio wysoko położony punkt kompresji jedynocybelowej. W układzie tym można użyć np. wzmacniaczy ERA-3. Bardzo ważne jest, by mak-

symalny poziom, jaki daje generator NWT bez załączonych tłumików, nie przekraczał 5...6dBm. Większy poziom sygnału wyjściowego powoduje pojawienie się w widmie generatora częstotliwości harmonicznych.

### Wyniki pomiarów

Wyniki pomiarów trzech różnych cewek: dławik 10µH osiowy, cewka powietrzna o 10 zwojach na średnicy 2cm i długości 3cm z drutu nawojowego emaliowanego o średnicy 0,6mm i indukcyjności 1,2uH oraz cewka na rdzeniu toroidalnym 44-2 o indukcyjności 6,5µH, pokazano na rysunku 8. Cewki te badano w nieco różnym zakresie częstotliwości, bo nie zawsze można było dostroić obwód do wymaganej częstotliwości ze względu na ograniczony zakres zmian pojemności trymera. Na rysunku tym widać zależność dobroci różnych rodzajów cewek od częstotliwości. Szczególnie dobrze widać to zjawisko dla cewki powietrznej o małej indukcyjności, gdzie reaktancja indukcyjna rośnie liniowo, a straty w dużym zakresie częstotliwości rosną niewiele z uwagi na brak rdzenia. Otrzymana wartość dobroci badanego dławika osiowego w pełni pokrywa się z danymi katalogowymi. Producent dławika deklarował, że jego dobroć jest większa od 50 dla częstotliwości 7,8MHz. Dławiki osiowe nie mają dużych dobroci. Największe wartości dobroci uzyskała cewka na rdzeniu toroidalnym (materiał czernony, typ 2) i cewka powietrzna. W przypadku cewek na rdzeniach, o dobroci cewki decyduje głównie rodzaj zastosowanego materiału rdzenia, średnica drutu i sposób nawinięcia uzwojenia (nie należy nawijać uzwojenia zwój na zwój – tzw. masowo). Materiał rdzenia powinien być odpowiednio dobrany do częstotliwości pracy cewki. W przypadku cewek powietrznych, znaczący wpływ na wynik pomiarów mają elementy ekranujące, np. zbliżenie z jednej strony do cewki powierzchni stalowej na odległość 3 mm spowodowało spadek dobroci cewki z 190 do 140 przy tylko 3-procentowym obniżeniu częstotliwości rezonansowej. Spadek dobroci był mniejszy dla większych odległości powierzchni ekranujących od cewki. Dobroć cewki powietrznej zależy od grubości zastosowanego drutu i sposobu nawinięcia cewki. Aby wyznaczyć dobroć kondensatorów, należy wpierw wyznaczyć



Rys. 8

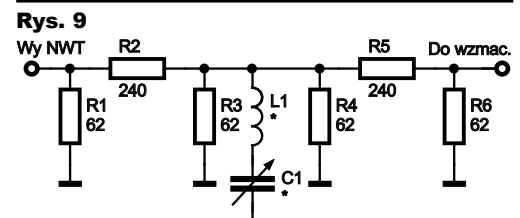
dobroć cewki, stosując jak najwyższej dobroci kondensator wzorcowy, np. dobry trymer powietrzny, stały kondensator mikowy lub porcelanowy – zapewnia to dobroć kondensatora na poziomie nawet 3900–4700. W układzie pomiarowym do wyznaczenia dobroci kondensatora należy zastosować cewkę o możliwie dużej dobroci. Do obliczenia dobroci cewki posłużymy się wzorem:

$$Q_c = (Q_{rez} * Q_L) / (Q_L - Q_{rez})$$

Bardzo ciekawie wypada porównanie dwóch materiałów stosowanych w produkcji kondensatorów X7R i NP0 (COG). Na częstotliwości 2,6 MHz dobroć obwodu z kondensatorem 470pF wykonanym z ceramiki NP0 wynosiła około 150, podczas gdy z obwodem z ceramiką X7R tylko 35!!! Dobroć kondensatorów z ceramiki NP0 mieści się w zakresie od 650 do 1500 (F = 10,14MHz). Otrzymany wynik dobroci dla kondensatora X7R całkowicie dyskwalifikuje go do zastosowania np. w filtrze w.cz. Na rysunku 1 pokazany jest właśnie filtr z użyciem tych kondensatorów, a na rysunku 2 – z użyciem kondensatorów NP0. Różnica w parametrach filtrów jest bardzo wyraźna, przy czym dobroć cewek wynosiła około 80. Wadą ceramiki NP0 jest jej wysoka cena, szczególnie w przypadku kondensatorów o większych pojemnościach (powyżej 1nF) i gorsza dostępność w porównaniu do ceramiki X7R.

### Inne zastosowania analizatora NWT

Układ z rysunku 9 również umożliwia pomiar dobroci cewek i kondensatorów, ma jednak również inne ciekawe zastosowania. Składa się on z dwóch tłumików po 20dB, zapewniających stabilną impedancję widzianą zarówno przez NWT, jak i wzmacniacz pomiarowy. Układ ten musi współpracować ze wzmacniaczem szerokopasmowym (np. AVT-2939/3) ze względu na duże tłumienie wnoszone przez



Rys. 9

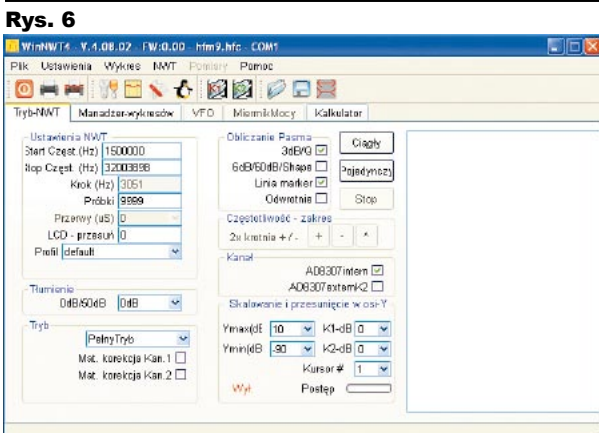
no\_label

Kursor 1:  
2.719497 MHz  
Kanał 1: -43.49dB

---

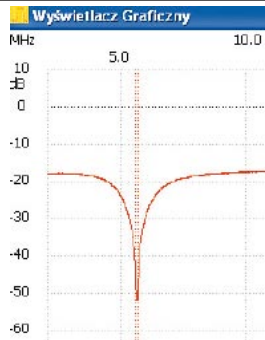
Kanał 1  
max: -24.37dB 2.794858MHz  
min: -58.17dB 3.164542MHz  
B3dB: 19.093 kHz  
Q: 146.44  
f1: 2.786372 MHz  
fm: 2.795919 MHz  
f2: 2.805465 MHz  
B3dB-Inw.: None

Rys. 7

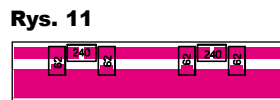


Rys. 6

tłumiki. Pomiędzy tłumikami znajduje się szeregowy obwód rezonansowy, pracujący jako filtr wycinający częstotliwości rezonansowe. Charakterystyka takiego obwodu pokazana jest na **rysunku 10**. Układ w połączeniu z szerokopasmowym wzmacniaczem pomiarowym zamieszczony jest na **fotografii 2**. Do obliczenia dobroci przez program NWT w tym wypadku należy uaktywnić opcje 3dB/Q i odwrotnie. Przy wykorzystaniu tego układu do pomiarów dobroci ważne są wszystkie wcześniejsze zalecenia. W układzie tym nie ma możliwości zastosowania sondy liniowej w celu poprawy rozdzielczości przy wyznaczaniu pasma 3dB, ze względu na jej małą dynamikę, nieprzekraczającą głębokości „dołka” rezonansowego. Wszystkie opisane w artykule cewki zbadano zarówno tym układem, jak wcześniej opisanym miernikiem dobroci, a różnice między wynikami nie przekraczały 6%. Dobroć obwodu można również wyznaczyć w tym układzie, znając głębokość „dołka” rezonansowego, impedancję układów współpracujących (50Ω) i indukcyjność cewki, mierząc ją za pomocą miernika indukcyjności. W tym wypadku nie musimy wyznaczać częstotliwości pasma 3dB, jednak metoda ta wymaga ręcznego wykonania obliczeń. Układ ten można stosować do pomiaru dobroci na częstotliwościach znacznie wyższych niż w układzie z transformatorem, pod warunkiem przestrzegania zasad montażu w.c.z. i stosowania elementów (kondensatorów) odpowiednio wysokiej jakości. Układ ten analizowano za pomocą symulatora i stwierdzono, że pracuje poprawnie w zakresie dobroci od 20 do 400. Schemat montażowy układu pokazany jest na **rysunku 11**. Wyprowadzenia rezystorów podłączone do masy powinny być połączone z spodnią warstwą masy za pomocą szerokiego paska folii miedzianej. Układ ten można również wykorzystać do porównania jakości kondensatorów, np. odsprzegających. W tym wypadku badany kondensator montuje się w miejsce obwodu szeregowego, między tłumik a masę. Dla przykładu pokazano wyniki pomiarów dwóch kondensatorów 100nF MKT 63V o długości nóżek 2 cm – **rysunek 12** oraz kondensatora 33nF SMD typu NP0 w obudowie 1825 – **rysunek 13**. Z załączonych rysunków widać, że kondensator 33nF ma znacznie lepsze właściwości – głębszy „dołek”. Różnica pomiędzy tymi kondensatorami w tłumieniu sygnałów radiowych wynosi 20dB, mimo trzykrotnie mniejszej pojemności kondensatora ceramicznego. Skrócenie nóżek kondensatora MKT do 4mm poprawia tłumienie sygnałów o 9dB względem wartości zmierzonych z nóżkami nieskracanymi, mającymi po 2cm. Układ ten, po przecięciu połączenia między tłumikami i zmontowaniu układu pokazanego na **rysunku 14**, umożliwia wyznaczenie własnej częstotliwości rezonansowej badanej cewki. Pojemności sprzęgające powinny w tym wypadku być jak najmniejsze, dające jednak wyraźne maksimum sygnału zwykle poniżej 1pF. Układ warto zaopa-



Rys. 10



tryć w gniazda typu goldpin, ze względu na fakt, że po kilkunastu lutowaniach płytka będzie nadawała się do wyrzucenia (warto posiadać kilka takich płytek). Do podłączenia sygnału należy w tym wypadku wykorzystać złącza z kabelkami zakończonymi stykami z listwy goldpin, które uszkadzają się znacznie trudniej niż gniazda. Na zakończenie chciałbym podziękować Waldkowi 3Z6AEF za bardzo cenne uwagi na temat tego tekstu. Chciałbym również zachęcić do samodzielnego wykonywania pomiarów i eksperymentowania.

Rafał Orodziński  
sq4avs@gmail.com

Literatura:  
<http://w7zoi.net/coilq.pdf>  
<http://my.execpc.com/~endlr/intex.html>  
<http://sp-hm.pl/thread-337-page-1.html>  
 „Miernik dobroci” Marian Salomon – „Krótkofalowiec Polski”

### Wykaz elementów Płytki 1

#### Rezystory

R1,R2	51Ω (1206)
R3	820Ω (0805)
R4	1,2kΩ (0805)
R5,R9	51Ω (0805)
R6	4,7Ω (1206)
R7	6,2MΩ (0805)
R8	680Ω (0805)

#### Kondensatory

C1	trymer o maksymalnie dużej dobroci – od jakości tego elementu w bardzo dużym stopniu zależy dokładność pomiarów – w oryginale pojemność maksymalna wynosiła 470pF
C2,C6,C11,C17,C18	470pF (0805) NP0
C3,C8,C10	33nF (1825) NP0 – można użyć w mniejszym rozmiarze, nie zamieniać na X7R
C4,C9,C12,C16,C19,C22	100nF (0805)
C5,C20	10μF/25V ceramiczny

C7	1nF (0805) NP0
C14	1pF (0805) najlepiej ATC, z nieco gorszym skutkiem NP0
C15	8,2pF (0805) najlepiej ATC, z nieco gorszym skutkiem NP0
C21	100μF/16V

#### Półprzewodniki

T1	BFG591
T2	SST310

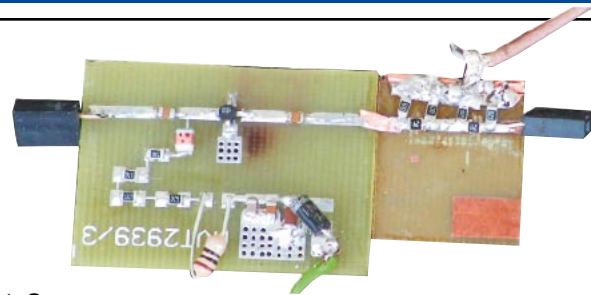
#### Pozostałe

L1	cewka badana
L2,L3	4,7μH
Tr1	na rdzeniu F2001, można też użyć rdzenia FT82-43, w tym wypadku transformator montowany jest od spodu płytki – opis w tekście

#### Płytki 2

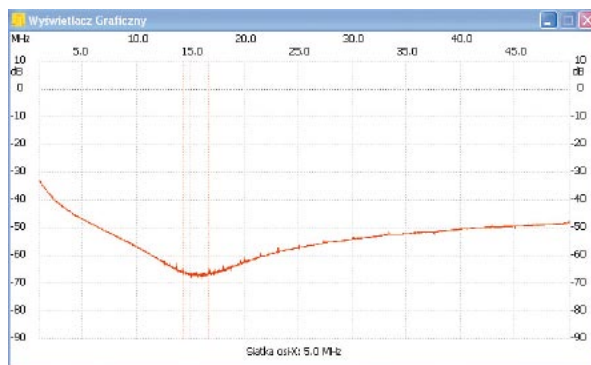
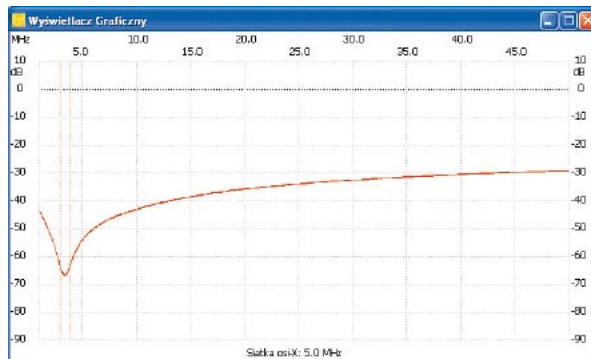
##### Rezystory

R1,R3,R4,R6	62Ω (0805)
R2,R5	240Ω (0805)



Fot. 2

Rys. 12



Rys. 13

Rys. 14

