

O wyższości generatora RC z przesuwnikiem fazowym nad generatorem z mostkiem Wienera

W generatorze RC przez zastąpienie mostka Wienera przesuwnikiem fazowym można nawet kilkakrotnie zmniejszyć zawartość harmonicznych. Taki generator o stałej częstotliwości może być łatwo dostrajany zmianą tylko jednego elementu. W opisanym niżej generatorze dwuzakresowym uzyskuje się lepszą rozdzielczość regulacji częstotliwości niż w konwencjonalnej konstrukcji o trzech zakresach, a zespół 3 rezystorów służących do przestrajania nie wymaga dobrej współbieżności zmienianych rezystancji.

Z literatury poświęconej generatorom RC napięć sinusoidalnych można dowiedzieć się najczęściej, że układy z przesuwnikiem fazowym nie mają żadnych zalet. Te opinie mogą być uzasadnione, gdy dotyczą układów prostych, pozbawionych środków niezbędnych do uzyskania dobrej jakości sygnału, natomiast odniesione do poprawnych konstrukcji są całkowicie błędne. Istnieje wiele rodzajów generatorów małych i średnich częstotliwości, ale wśród tych, których jakość można uznać za dobrą, czyli takich, które generują przebieg o zawartości harmonicznych równy co najwyżej dziesiątej części procenta, najpopularniejsze wydają się być generatory z mostkiem Wienera.

Należy wyjaśnić, dlaczego generatory takie mają mieć na ogół dobre własności, rzekomo lepsze niż ich odpowiedniki z przesuwnikiem fazowym. W generatorach tego typu czteroelementowy czwórnik Wienera jest wstawiony w gałąź dodatniego sprzężenia zwrotnego dwustopniowego wzmacniacza. Duże wzmocnienie takiego wzmacniacza redukuje się ujemnym sprzężeniem zwrotnym do ok. 3, wystarczającym do wzbudzenia układu. Gałąź oporowa, którą wprowadza się ujemne sprzężenie zwrotne, tworzy

Nowoczesne techniki generowania przebiegów stosowane m.in. w generatorach funkcyjnych, arbitralnych, DDS spowodowały, że stare, klasyczne już metody praktycznie odeszły w zapomnienie. Czasami warto jednak do nich wrócić, gdyż mają one kilka cennych zalet. Zrobimy to w poniższym artykule, rewidując przy okazji pewien utarty pogląd.

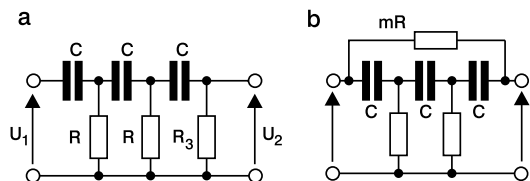
wraz z częścią RC mostek. Dobroć mostka Wienera jest proporcjonalna do wzmocnienia wzmacniacza k i wynosi $k/9$. Jeśli k jest duże, np. kilkaset, to otrzymuje się dobroć porównywalną z osiąganą z obwodami rezonansowymi LC. W odróżnieniu od układów LC, sam czwórnik Wienera (podobnie jak i inne czworniki RC) ma kiepskie własności selektywne i dopiero przez wykorzystanie dużego zapasu wzmocnienia do utworzenia silnego sprzężenia zwrotnego wzmacniacza uzyskuje się dobrą jakość generatora. Aby jakość ta nie była popsuta, trzeba generator wyposażyć w układ stabilizacji amplitudy. Dobrze działający i nie wprowadzający zniekształceń układ stabilizacji amplitudy może wiązać się ze znaczącym rozbudowaniem całej konstrukcji. Bez niego jednak stabilną amplitudę uzyskuje się dopiero wtedy, gdy chwilowe napięcia wyjściowe osiągają wartości bliskie napięciu zasilania, a więc punkty pracy, w których wzmocnienie spada do zera. Ponieważ, jak wspomniano wyżej, brak wzmocnienia to równocześnie utrata własności selektywnych, więc taki oszczędnie zaprojektowany generator nie może być dobry.

Prosty układ z przesuwnikiem fazowym może być zestawiony tylko z jednostopniowym wzmacniaczem, ale wtedy wzmocnienie w porównaniu ze wzmocnieniem dwustopniowego wzmacniacza generatora z mostkiem Wienera jest kilkadziesiąt razy mniejsze.

W dodatku często takie proste generatory są pozbawione układu stabilizacji amplitudy. To wyjaśnia różnice jakości tych generatorów, ale nie może dotyczyć układów podobnie skonstruowanych. Można bowiem wykorzystać zarówno w generatorze z mostkiem Wienera, jak i z przesuwnikiem fazowym ten sam wzmacniacz operacyjny i stworzyć zbliżone warunki pracy do porównania obu tych układów. Wówczas okazuje się, że generatory z przesuwnikiem fazowym górują nad układem z mostkiem Wienera niemal pod każdym względem

Zastosowanie przesuwników fazowych RC w generatorach

Przy konstruowaniu generatorów RC potrzebna jest przede wszystkim znajomość własności selektywnego czwornika sprzężenia zwrotnego, gdy jego transmitancja napięciowa jest rzeczywista, tzn. napięcie wyjściowe jest albo zgodne fazowo z napięciem wejściowym U_1 , albo jest przesunięte względem niego o 180° , a także, gdy $U_2=0$. Częstotliwość, przy której taki stan występuje oznaczamy przez f_0 , a uzyskiwane wtedy napięcie wyjściowe przez U_{20} . Na rys. 1a pokazano sześcioelementowy przesuwnik fazowy RC, który przed kilkudziesięciu laty tworząc gałąź ujemnego sprzężenia zwrotnego jednostopniowego wzmacniacza został wykorzystany w lampowym generatorze napięć sinusoidalnych. W tym przesuwniku napięcie



Rys. 1. Przesuwnik fazowy RC a) wersja podstawowa, b) ulepszona wersja

wyjściowe U_{20} jest przesunięte fazowo o 180° względem napięcia wejściowego U_1 i wynosi $-U_1/29$, gdy $R_3=R$. Dodać należy, że podobny przesuwnik, w którym zamieniono wzajemnie rezystory z kondensatorami, nie jest przydatny w generatorach napięć sinusoidalnych, gdyż jest filtrem dolnoprzepustowym nie wprowadzającym ujemnego sprzężenia zwrotnego dla częstotliwości harmonicznych. W generatorze z przesuwnikiem zbudowanym według rys. 1a częstotliwości harmoniczne są tłumione, gdyż jest to filtr górnoprzepustowy, ale od kilkudziesięciu lat wiadomo, że stosowanie tego przesuwnika w generatorach nie ma sensu, gdyż można go zastąpić znacznie lepszym przesuwnikiem według rys. 1b. Np. przez zamianę rezystora $R_3=R$ w przesuwniku według rys. 1a na rezystor $mR=30R$, jak na rys. 1b układ staje się filtrem środkowozaporowym, ale otrzymuje się takie samo napięcie wyjściowe U_{20} przy lepszych własnościach selektywnych. Z obliczeń wynika, że np. w sygnale generatora druga harmoniczna powinna być ponad dwukrotnie mniejsza. Poza tym rezystor mR zapewnia stałoprądowe sprzężenie zwrotne potrzebne do ustalania punktu pracy wzmacniacza. Niżej zostaną omówione własności takiego ulepszanego przesuwnika oraz

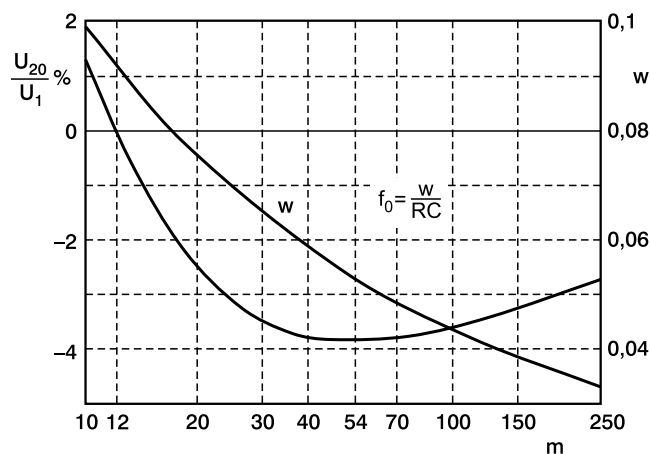
jego odmiany lepiej przystosowanej do przestrajania.

Własności ulepszanego przesuwnika fazowego

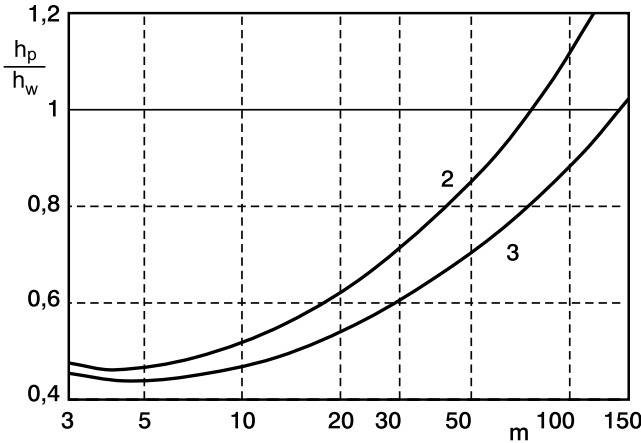
Rezystancja mR ma istotny wpływ na własności przesuwnika według rys. 1b. Wykres z rys. 2 przedstawia zależność

względnego napięcia wyjściowego U_{20}/U_1 od współczynnika m . Napięcie to jest największe, gdy $m=54$ i wynosi wtedy $-U_1/26$ (taką wartość otrzymuje się w przesuwniku według rys. 1a, gdy $R_3=2R$), natomiast $f_0=1/6RC$. Korzystając z charakterystyki amplitudowo-fazowej czwórnik RC można obliczyć jakie będzie sprzężenie zwrotne dla częstotliwości harmonicznych i wynikające stąd zmniejszenie ich zawartości w przypadku zastosowania takiego układu w generatorze. Na wykresie z rys. 3 przedstawiono względną zawartość drugiej i trzeciej harmonicznej generatora z przesuwnikiem fazowym w stosunku do uzyskiwanych z konwencjonalnym mostkiem Wiena, przy założeniu tych samych środków i warunków pracy w obu porównywanych przypadkach. Widać, że w generatorach z przesuwnikiem fazowym zawartość harmonicznych może być dwukrotnie mniejsza. Inną istotną cechą przesuwników wg rys. 1b jest możliwość ich przestrajania w niewielkich granicach za pomocą tylko jednego elementu R lub C . Wykres rys. 2 pokazuje, że np. przy zmianie rezystancji mR od $40R$ do $75R$ względne napięcie wyjściowe zmienia się zaledwie o mniej niż 0,1% napięcia U_1 , i dzięki temu można regulować częstotliwość f_0 w granicach ok. $\pm 10\%$. W generatorach znajdujących także zastosowanie czwórnik RC, których napięcie wyjściowe $U_{20}=0$. Taki przypadek ma miejsce w przesuwniku fazowym według rys. 1b, gdy $m=12$. Wtedy częstotliwość $f_0=1/2\sqrt{3}RC$. Zero napięcia wyjściowego uzyskuje się też przy odpowiednim zróżnicowaniu pojemności, co można wykorzystać do skokowej zmiany

częstotliwości. Ponadto napięcie wyjściowe będzie dalej równe zero, gdy suma rezystancji 2 rezystorów R będzie stała. Istnieje więc możliwość przestrajania potencjometrem, którego ślizgacz jest połączony z węzłem wspólnym dla wejścia i wyjścia. Przy przesuwaniu ślizgacza potencjometru suma rezystancji pozostaje stała, ale zmienia się ich iloczyn i częstotliwość f_0 . Niestety ten sposób przestrajania przesuwnika ma istotne wady. Zmiany częstotliwości zaczynają być znaczące dopiero, gdy obie rezystancje bardzo się różnią, a wtedy własności selektywne układu znacznie się pogarszają. Inną wadą takiego układu jest wpływ rezystancji ślizgacza potencjometru, uniemożliwiający uzyskanie zera sygnału wyjściowego. W praktyce oznacza to, że do takiej regulacji częstotliwości nie nadają się potencjometry warstwowe. Duża rezystancja styku takich potencjometrów (kilka procent ich rezystancji całkowitej) wynika z rozptywu prądu na pasku, na którym naniesiona jest warstwa oporowa. Im szerszy jest ten pasek, tym rezystancja ta jest większa. Częstotliwości generatora można także regulować zmieniając pojemność jednego z trzech kondensatorów C . Ciągłą zmianę pojemności można zrealizować przy pomocy wzmacniaczy operacyjnych, ale lepiej jest zastosować inną odmianę przesuwnika, łatwiejszą do przestrajania. Taka odmiana przesuwnika według rys. 1b o identycznych lub podobnych własnościach (dotyczy to np. częstotliwości f_0 , rys. 2 i rys. 3) jest przedstawiona na rys. 4. Przestrajanie tego przesuwnika w szerokich granicach wymaga równoczesnego zmieniania trzech rezystancji, lecz do niewielkiej zmiany częstotliwości można wykorzystać tylko jeden z 3 rezystorów. Wyjaśnia to wykres na rys. 5. Dla $a=b=1$ i c od 0,5 do 2, napięcia wyjściowe przy częstotliwości f_0 nie różnią się więcej niż o 1/150 napięcia wejściowego. Częstotliwość może się zmieniać wtedy o ok. $\pm 20\%$ w stosunku do jej średniej wartości. W generatorach z mostkiem Wiena w podobnym przypadku, przy ustalaniu częstotliwości za pomocą tylko jednej rezystancji, zmiana napięcia wynosi aż ponad 8% napięcia wejściowego. Widać więc, że konwencjonalny mostek Wiena nie nadaje się do takiej regulacji częstotliwości, tym bardziej, że istnieją jego odmia-

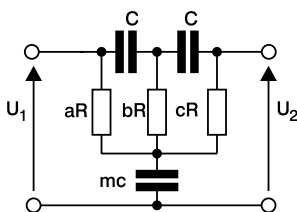


Rys. 2. Napięcie wyjściowe przesuwnika wg rys. 1b w procentach napięcia wejściowego oraz w – licznik we wzorze na częstotliwość f_0 w zależności od współczynnika m (por. rys. 1b)



Rys. 3. Względna zawartość drugiej i trzeciej harmonicznej generatora z przesuwnikiem fazowym w zależności od współczynnika m . Zawartość tych harmonicznych generatora z mostkiem Wiena służy jako odniesienie

ny umożliwiające przestrajanie za pomocą tylko jednego elementu. Układy takie wymagałyby szerszego omówienia, wykraczającego poza tematykę tego artykułu, ale należy wyjaśnić, że warto je stosować tylko, gdy zakres przestrajanych częstotliwości nie jest zbyt duży np. 1:4. Jeśli jest większy, własności generatora pogarszają się, a wymagania stawiane dla rezystora regulowanego są trudne do spełnienia. Wykres z rys. 6 pokazuje, że przesuwnik według rys. 4 może być także przestrajany rezystancją aR . Również w tym przypadku dla a od 0,9 do 2,5 zmiana względnego napięcia wyjściowego jest bardzo mała (ok. $U_1/270$). Generator o jednej stałej częstotliwości dostrojonej np. przez zmianę rezystancji cR może być w zasadzie uproszczoną wersją opisanego niżej generatora z rys. 7. Mała wrażliwość względnego napięcia wyjściowego U_{20} czwórnika na zmiany rezystancji jego elementów ma istotne znaczenie dla jego przestrajania w szerokim zakresie, gdyż pozwala na zastosowanie zespołu 3 regulowanych rezystorów o małych wymaganiach co do współbieżności zmian rezystancji. Jeśli np. dwie rezystancje różnią się o 20%, to z wykresu na rys. 6 można



Rys. 4. Odmiana przesuwnika fazowego wg rys. 1b

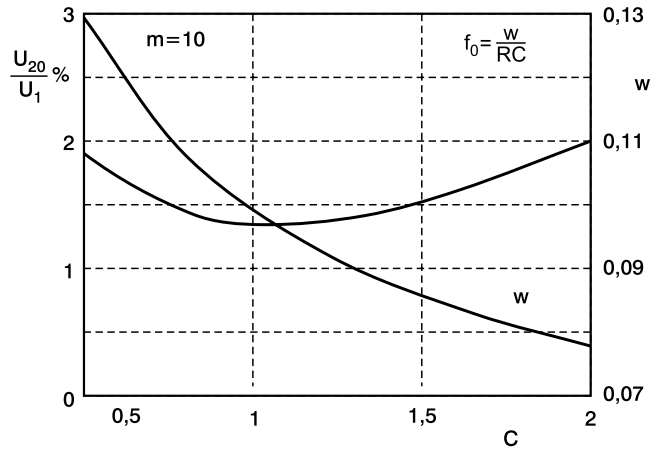
odczytać, że spowodowana tym zmianą względnego napięcia wyjściowego będzie wynosić zaledwie ok. 0,26% napięcia U_1 . W mostku Wiena w podobnym przypadku taka zmiana jest prawie 9 razy większa, a to oznacza duże napięcie na elemencie nieliniowym w układzie regulacji amplitudy i związane z tym znaczne zwiększenie zniekształceń. Należy jeszcze wspomnieć, że przez zastąpienie w przepięciu wg rys. 1b rezystorów kondensatorami i odwrotnie (np. zamiast rezystora mR jest kondensator C/m) otrzymuje się także filtr środkowopasowy, ale o gorszych własnościach selektywnych. Np. tłumienie harmonicznych jest niemal 40% mniejsze niż by to wynikało z wykresu na rys. 3. Zależność napięcia U_{20} od współczynnika m jest taka, jak na rys. 2, ale częstotliwość

$$f_0 = \sqrt{3/2} \pi RC, \text{ gdy } m=12.$$

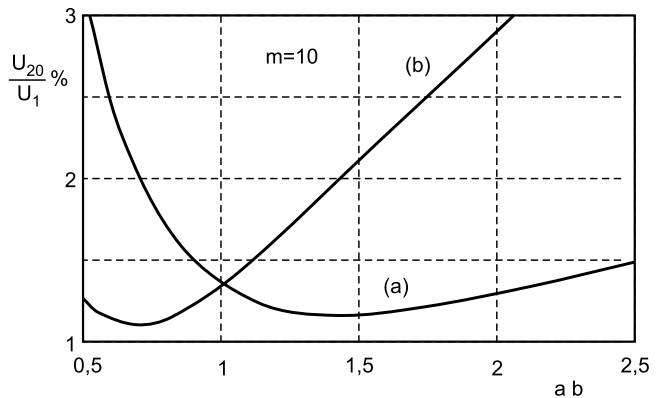
Przesuwnik fazowy chociaż jest układem biernym może wzmacniać napięcie. Np., jeśli w przesuwniku wg rys. 1b napięciem wyjściowym będzie napięcie na rezystorze mR , wtedy dla $m=30$ wzmocnienie wyniesie 30/29. Możliwe jest więc zestawienie generatora ze wzmacniaczem o wzmocnieniu mniejszym od 1, np. wtórnikiem emiterowym. Jednak taki generator poza prostotą nie będzie miał żadnych korzystnych własności.

Dwuzakresowy generator częstotliwości akustycznych

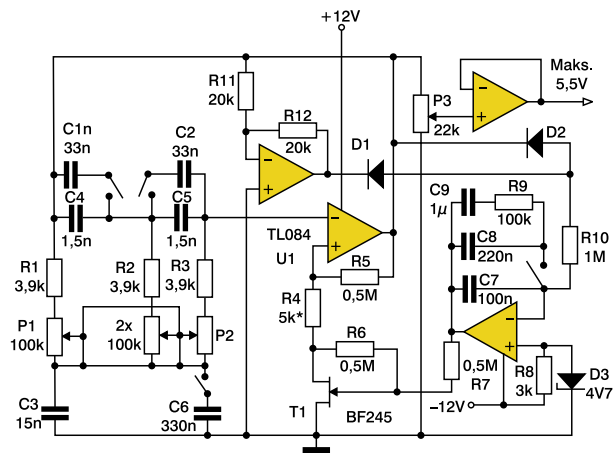
W generatorze pokazanym na rys. 7 przyjęto $m=10$, a wtedy $f_0=0,0989/RC=\text{ok. } 1/10RC$. Ponieważ dla $m<12$ napięcie wyjściowe U_{20} jest dodatnie, więc generator pracuje w układzie mostkowym, w którym oporowy dzielnik napięcia wprowadza dodatkowo sprzężenie zwrotne. Regulacja tego sprzężenia odbywa się za pomocą powszechnie stosowanego układu stabilizacji amplitudy z tranzystorem polowym i wzmacniaczem operacyjnym, zapewniającego stałość napięcia (w stanie ustalonym) w całym paśmie częstotliwości. Do porównywania z wzorcowym napięciem diody Zenera użyte jest średnie wyprostowane napięcie dwupołówkowe, co znacznie polepsza proces ustalania się amplitudy, szczególnie w zakresie częstotliwości mniejszych. Do przestrajania służą handlowe potencjometry połączone osiami (podwójny i pojedynczy)



Rys. 5. Napięcie wyjściowe w procentach napięcia wejściowego oraz licznik w ze wzoru na częstotliwość f_0 przesuwnika wg rys. 4 w zależności od współczynnika c , gdy $a=b=1$ i $m=10$



Rys. 6 Napięcie wyjściowe w procentach napięcia wejściowego przesuwnika wg rys. 4 przy $m=10$ w zależności od współczynnika a , gdy $b=c=1$ oraz od współczynnika b , gdy $a=c=1$



Rys. 7. Praktyczna konstrukcja generatora dwuzakresowego napięć o częstotliwości od ok. 28 Hz do ok. 17 kHz i bardzo małych zniekształceniach nieliniowych

o charakterystyce logarytmicznej, C – podwójny, A (wzgl. B wg innych oznaczeń) – pojedynczy. Pojedynczy rezystor nie ma innego zamocowania, a zatem można niezależnie obracać jego korpus. Jednak kąt obrotu jest ograniczony do kilkunastu stopni przez odpowiednio umocowane zderzaki. Przekręcając sprzężone osie rezystorów o kąt większy, zmienia się równocześnie 3 rezystancje, natomiast podczas obracania korpusu rezystora pojedynczego możliwa jest zmiana tylko jednej rezystancji. Ponadto przy niezależnym obracaniu potencjometru pojedynczego jego rezystancja przechodzi w obszar $a > 1$ (dzięki odpowiednio usytuowanym zderzakom), przez co utrzymuje się mały poziom napięcia wyjściowego (por. rys. 6). Podobny efekt można otrzymać łącząc osie potencjometrów z luzem kątowym. Tym sposobem osiąga się 3 razy lepszą rozdzielczość przy regulacji częstotliwości. W praktyce oznacza to także, że taka rozdzielczość jest w dwuzakresowym generatorze lepsza niż uzyskiwana w konwencjonalnym układzie z trzema zakresami o podobnym przedziale częstotliwości. Z kondensatorami o mniejszych pojemnościach otrzymuje się częstotliwości od ok. 650 Hz do 17 kHz, a po dołączeniu równoległe pojemności większych – od ok. 28 Hz do 750 Hz. Wraz z przełączeniem na zakres częstotliwości mniejszych włączane są także dodatkowe człony RC w obwodzie sprzężenia zwrotnego wzmacniacza stabilizacji amplitudy. Dalsze powiększenie pojemności w tych członach mogłoby jeszcze trochę zmniejszyć za-

wartość harmonicznych w sygnale o najmniejszych częstotliwościach, ale wtedy niekorzystne wydłuża się ustalanie amplitudy. Zminimalizowanie zawartości harmonicznych można przeprowadzić przez powiększenie rezystancji rezystora R4 szeregowo z tranzystorem FET i w ten sposób obniżyć na nim napięcie, aż do wartości, przy której nie jest jeszcze przekroczony obszar działania regulacji amplitudy. Dopuszczalne zwiększenie tej rezystancji jest uzależnione od stosunku pojemności m . W pobliżu wartości $m=10$ zmiana jej o np. +10% (tj. na $m=11$) powoduje zmniejszenie względnego napięcia wyjściowego o ok. 0,7% (por. rys. 2). Dlatego w takim przypadku rezystancja rezystora R4 musiałaby być zmniejszona z wartości np. 5 k Ω do np. 1,5 k Ω . Z powyższego wynika, że przy przełączaniu zakresów częstotliwości dla zachowania tej samej optymalnej rezystancji rezystora R4 potrzebne jest takie skorygowanie pojemności, aby stosunek m nie zmieniał się. Nominalne pojemności dwóch kondensatorów przesuwnika są jednakowe, ale zależnie od ich tolerancji rzeczywiste wartości mogą się różnić. Wtedy do obliczeń współczynnika m należy przyjąć ich średnią wartość. Od wspomnianych wyżej działań, a także innych uwarunkowań (np. współbieżności rezystancji zastosowanych rezystorów regulowanych), zależą zniekształcenia nieliniowe, ale osiągnięcie zawartości harmonicznych rzędu setnych części procenta w paśmie częstotliwości średnich nie powinno być problemem. W każdym razie zawartość ta jest w tym generatorze znacząco mniejsza niż po zastosowaniu mostka Wienera z podobnymi elementami układowymi. Do odczytu częstotliwości trzeba posługiwać się częstościomierzem. Popularne uniwersalne mierniki cyfrowe często są wyposażone w zakresy pomiaru częstotliwości, jednak na ogół o dokładności pozostawiającej wiele do życzenia. Podobnie jest zresztą i na zakresach AC – nie zaleca się sprawdzania napięć wyjściowych opisywanego generatora takimi przyrządami, bo kilkudziesię-

cioprocentowe błędy przy pomiarach częstotliwości akustycznych nie należą do rzadkości. W modelowym generatorze do odczytu częstotliwości został użyty przetwornik częstotliwość-napięcie cechowany przy pomocy generatora kwarcowego.

Wnioski

Porównywanie dwóch generatorów, w których zastosowano różne czwórniki RC ma tylko wtedy sens, gdy oba układy zostały zestawione z identycznych względnie podobnych elementów (dotyczy to przede wszystkim wzmacniacza i układu stabilizacji amplitudy). Także warunki eksploatacji muszą być zbliżone. Przy takim oczywistym zastrzeżeniu można na podstawie przedstawionych wyżej własności przesuwników i opisu przykładowego układu sformułować następujące zalety generatorów, w których konwencjonalne mostki Wienera zastąpiono przesuwnikami fazowymi.

1. W sygnale z generatora z przesuwnikiem fazowym zawartość harmonicznych może być kilkakrotnie mniejsza. Wynika to zarówno z lepszych właściwości selektywnych takiego układu (por. rys. 3), jak i znacznie mniejszego napięcia na nieliniowym elemencie regulacji amplitudy (np. na tranzystorze FET).
2. W generatorach o stałym sygnale dostrojenie do żądanej częstotliwości jest prostsze, gdyż łatwo je przeprowadzić zmianą tylko jednego elementu R lub C.
3. Do płynnego przestrajania w szerszych granicach potrzebna jest równoczesna zmiana trzech rezystancji, w mostku Wienera tylko dwóch, jednak ten trzeci regulowany rezystor może być wykorzystany do polepszenia rozdzielczości ustawianej częstotliwości, jak to wyjaśniono na przykładzie generatora z rys. 7. Dzięki takiemu rozwiązaniu liczba przełączanych zakresów może być mniejsza przy tym samym przedziale przestrajanych częstotliwości.
4. Współbieżność zmian rezystancji rezystorów regulowanych nie musi być dobra, może być nawet ok. 8 razy gorsza niż to wymagałby układ z mostkiem Wienera. Dzięki temu można stosować do regulacji częstotliwości tanie, handlowe potencjometry.

Jan Szrednicki