

# Generatory napięć sinusoidalnych o małych zniekształceniach, uzyskiwanych z napięć schodkowych

*W opisywanych generatorach przebieg schodkowy jest otrzymywany przez przełączanie dobranych rezystorów i wygładzany filtrem dolnoprzepustowym. Takie układy znajdują zastosowanie głównie jako źródła napięcia sinusoidalnego o małych zniekształceniach i stałej częstotliwości. Podano wytyczne, którymi zaleca się kierować przy ich konstruowaniu.*

Wśród scalonych generatorów napięć sinusoidalnych o zmienianych częstotliwościach wyróżniają się układy DDS. Ich zalety sprawiły, że zastąpiły kiedyś powszechnie stosowane analogowe generatory RC. Jednak w wielu przypadkach potrzebne są generatory pojedynczej, stałej częstotliwości będące np. jednym z wielu elementów układu pomiarowego. Wtedy żądane wymagania mogą spełniać układy znacznie prostsze i tańsze w budowie. Niżej omówiono te, w których jest wytwarzane napięcie schodkowe o poziomach ustalanych przez odpowiednio dobrane rezystory.

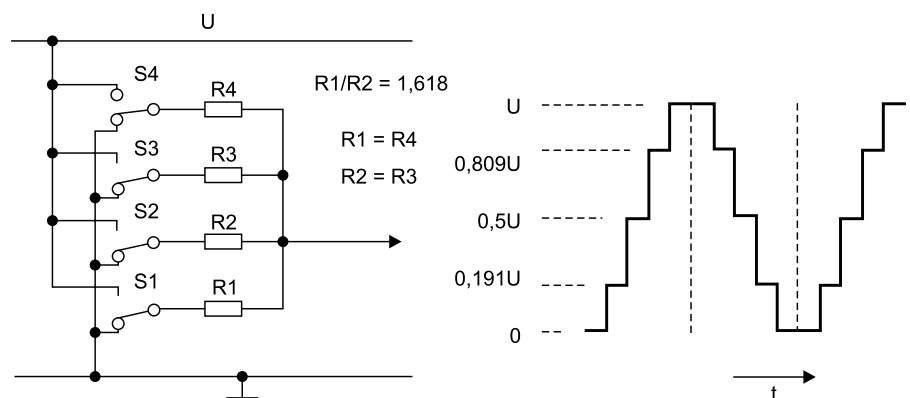
Ilość schodków aproksymowanego tym sposobem przebiegu sinusoidalnego jest niewielka, inaczej niż w układach DDS, gdzie pamięć ROM mieści kilka tysięcy próbek. Można więc mieć wątpliwości, czy przetworzenie takiego przebiegu schodkowego w mało odkształcony sinusoidalny jest zadaniem łatwym. Jednak dzięki odpowiednio zaprojektowanym schodkom może nie zawierać harmonicznych niższego rzędu, a wtedy jego filtrowanie jest ułatwione. W celu takiego zminimalizowania zniekształceń należy w obliczeniach wybierać wartości funkcji sinus dla kątów  $(1,5 + x/n)\pi$ . W tym wyrażeniu  $n$  jest założoną ilością poziomów w jednym okresie tworzonego przebiegu, a  $x$  liczbą nieparzystą od 1 do  $(n - 1)$ . Wystarczy znalezienie wartości tylko dla jednej ćwiartki okresu, gdyż pozostałe będą się powtarzać lub różnić się znakiem. Można wykazać, że tworzona

tym sposobem aproksymacja przebiegu sinusoidalnego o częstotliwości  $f_0$  nie zawiera harmonicznych mniejszych, niż  $(n - 1)f_0$ . Jest to zaleta, gdyż harmoniczne znacznie różniące się częstotliwością od podstawowej można skutecznie wytłumić za pomocą prostych filtrów dolnoprzepustowych.

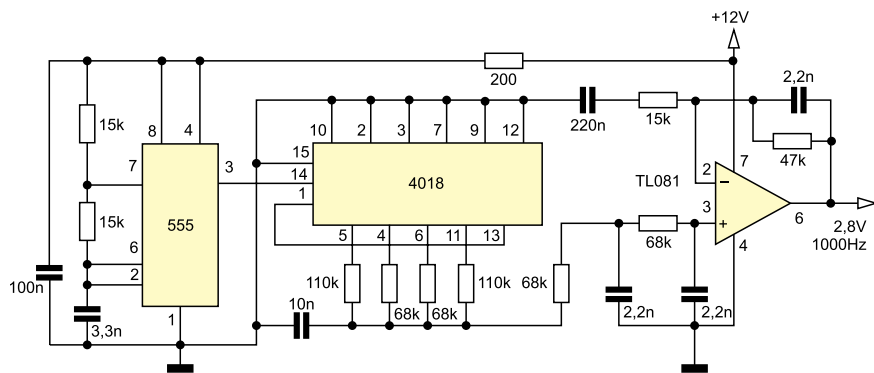
Ważną cechą konstrukcyjną generatora jest także sposób dołączenia (wzgl. przełączania) rezystorów. Rezystory mogą tworzyć np. dzielnik napięcia, którego wyjścia są połączone poprzez multiplexer CMOS z wtórnikiem na wzmacniaczu operacyjnym. W innym rozwiązaniu multiplexer łączy rezystory dołączone do źródła dodatniego lub ujemnego napięcia z wejściem wzmacniacza operacyjnego pracującego jako przetwornik prąd/napięcie. Rezystancje rezystorów są odwrotnie proporcjonalne do przyjętych wartości funkcji

sinus, a z wejściem wzmacniacza operacyjnego połączony jest zawsze tylko jeden rezystor. Jednak załączanie i wyłączanie rezystora powoduje powstawanie zakłóceń w.c.z. w odpowiedzi wzmacniacza operacyjnego. Mogą one powodować znaczące spadki napięcia na rezystancjach lub indukcyjnościach źle zaprojektowanych ścieżek masy i w ten sposób dodawać się do napięcia wyjściowego.

Rezystory mogą być przełączane także innym sposobem pokazanym na **rysunku 1**. Układ ten jest zasilany z jednego źródła o napięcia  $U$  i ilustruje przypadek, w którym napięcie schodkowe jest tworzone z  $n=10$  poziomów. Na początku pierwszej połowy przebiegu schodkowego klucze elektroniczne łączą rezystory  $R1...R4$  z masą układu, po czym kolejno ze źródłem napięcia  $U$ . W następnej połowie okresu sekwencja przełączeń jest odwrotna. W rezultacie otrzymujemy przebieg schodkowy także pokazany na rysunku 1. W odróżnieniu od układu ze wzmacniaczem operacyjnym, wszystkie rezystory są czynne tzn. połączone ze źródłem zasilania lub masą (poza momentami przełączania). Dzięki temu, rezystancja wyjściowa zespołu rezystorów jest stała i można go ob-



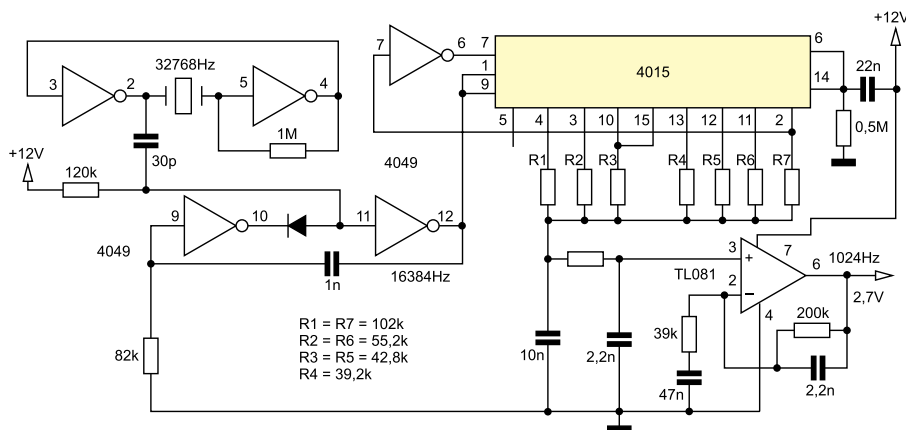
Rysunek 1. Wytwarzanie przebiegu schodkowego o dziesięciu poziomach



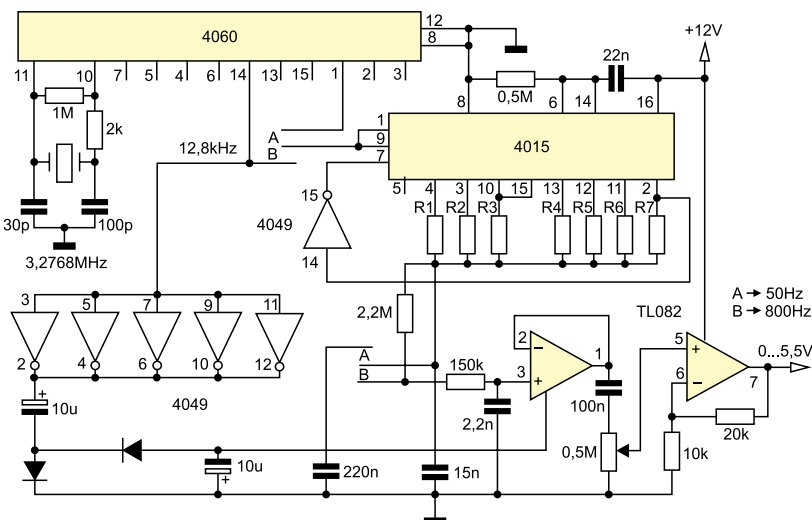
Rysunek 2. Generator częstotliwości 1000 Hz i zniekształceniach ok. 0,05%

ciążąc pojemnością w celu filtracji przebiegu schodkowego. Wzmacniacz operacyjny jest zbędny i nie ma problemu zakłóceń podczas włączania rezystorów. Dla wyeliminowania składowej stałej układ łączy się z odbiornikiem poprzez kondensator. Ze względu na wymienione zalety ten sposób włączania rezystorów jest używany w opisywanych niżej generatorach. Wysokości kolejnych schodków wynoszą:  $\sin(1,5 + 3/n)\pi - \sin(1,5 + 1/n)\pi$ ,  $\sin(1,5 + 5/n)\pi - \sin(1,5 + 3/n)\pi$  itd. Dla uzyskania założonych poziomów napięć rezystancje przełączanych rezystorów powinny być odwrotnie proporcjonalne do

obliczonych wysokości schodków. W układzie z rysunku 1, przy  $n=10$  poziomach, stosunek wysokości schodka pierwszego do drugiego wynosi 0,618, a zatem stosunek rezystancji  $R1/R2=1/0,618=1,618$ . Przebieg schodkowy pokazany na rysunku 1 znacznie różni się od sinusoidy, jego współczynnik zniekształceń wynosi ok. 18%, ale jak wyjaśniono wyżej, wartość ta jest spowodowana harmonicznymi wyższego rzędu. Pozostałe o częstotliwościach mniejszych mogą pojawić się w sygnale wskutek niedoskonałości wytwarzanego przebiegu schodkowego np. niedokładności użytych rezystorów.



Rysunek 3. Stabilizowany kwarcowo generator o częstotliwości 1024 Hz



Rysunek 4. W tym generatorze można wybrać jedną lub kilka częstotliwości o stabilizowanych kwarcowo; tu 50 Hz lub 800 Hz. Rezystory R1....R7 są identyczne jak w generatorze z rysunku 3

Na rysunku 2 pokazano generator o częstotliwości 1000 Hz, w którym rolę kluczy z rysunku 1 spełnia licznik Johnsona 4018 wytwarzający wraz z rezystorami  $n=10$  poziomów. Sygnał wejściowy o częstotliwości 10 kHz dla tego licznika uzyskuje się z multiwibratora 555. Stopień wyjściowy jest zbudowany ze wzmacniacza operacyjnego i członów RC tworzących filtr dolnoprzepustowy zmniejszający zawartość harmonicznymi w składowej zmiennej sygnału wyjściowego do ok. 0,05%. W tym rozwiązaniu zrezygnowano z użycia wzmacniacza operacyjnego w typowym układzie aktywnego 3-biegunowego filtra dolnoprzepustowego. Taki filtr będzie lepszy tylko wtedy, gdy jego elementy będą dokładnie wyselekcjonowane. Tymczasem dobór elementów zastosowanego układu nie jest krytyczny dla spełnienia założonych wymagań. Jednak w napięciu wyjściowym, oprócz składowych wynikających z kształtu generowanego przebiegu schodkowego, mogą pojawić się także inne niepożądane sygnały. Ma to miejsce, gdy do napięcia wyjściowego dodają się spadki napięcia na ścieżkach masy. Jeśli wysoka jakość generatora wynikająca z małej zawartości harmonicznymi ma być zachowana, to także i te napięcia muszą być małe np. mniejsze od miliwolta. Między innymi w tym celu obwód zasilania multiwibratora jest bocznikowany przez kondensator. Oprócz tego rozplanowanie ścieżek masy musi być starannie przemyślane. Te uwagi dotyczą nie tylko generatora z rysunku 2 lecz i pozostałych. Generator zawiera zaledwie 2 pary jednakowych rezystorów. Ich rezystancje mogą być inne, niż podane na schemacie, ale stosunek ich rezystancji musi być równy 1,618 i powinny być tak duże, aby można było pominąć wpływ rezystancji wyjściowych układu CMOS.

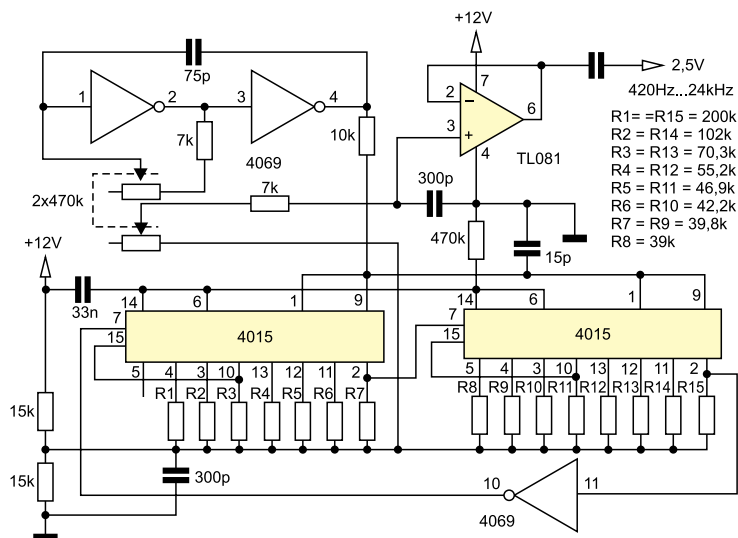
Jeśli jest wymagana duża stałość częstotliwości, to można zastosować układ jak na rysunku 3. Do wytwarzania napięcia schodkowego służy m.in. rejestr przesuwany 4015, który wraz z siedmioma rezystorami wytwarza  $n=16$  poziomów. Wejściowym napięciem rejestru są impulsy z multiwibratora monostabilnego wyzwalanego sygnałami generatora z kwarcem zegarkowym o częstotliwości 32768 Hz. Ponieważ czas trwania impulsu multiwibratora jest dłuższy niż okres generatora kwarcowego, więc wyzwalanie powoduje co drugi impuls. W ten sposób częstotliwość generatora kwarcowego jest dzielona przez dwa, a wytwarzane napięcie schodkowe ma częstotliwość 1024 Hz. Filtr dolnoprzepustowy wytłumia harmoniczne do poziomu nieprzekraczającego 0,05%.

W wielu przypadkach potrzebne są generatory o przełączanych i stabilnych częstotliwościach, natomiast nie jest wymagana bardzo mała zawartość harmonicznymi. W generatorze pokazanym na rysunku 4 układ 4060 pracuje jako generator kwarcowy o czę-

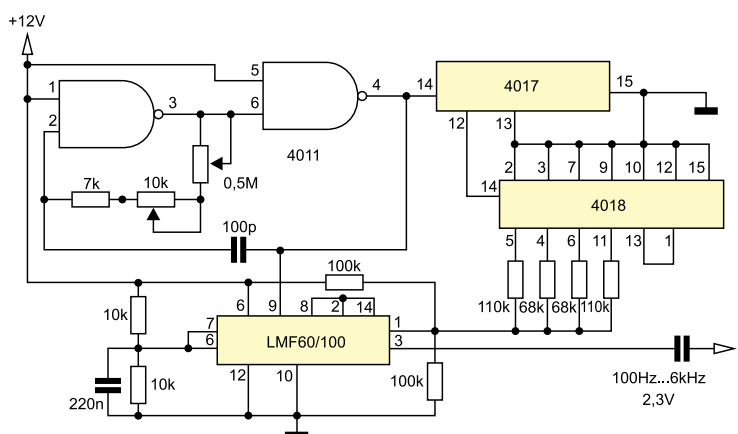
stotliwości 3,2768 MHz i jako dzielnik częstotliwości. Do wytwarzania napięcia schodkowego służy, podobnie jak w generatorze z rysunku 3, rejestr 4015 i taki sam zestaw rezystorów R1...R7. Do działania układu potrzebny jest inwerter, tu zastosowano jedną z sześciu bramek 4049. Pozostałe 5 użyto w układzie wytwarzającym ujemne napięcie do zasilania stopnia wyjściowego ze wzmacniaczem operacyjnym. Dzięki temu napięcie wyjściowe tego generatora może być stosunkowo duże (ok. 5,5 Vsk). Zależnie od sposobu połączenia rejestru z wyjściami układu 4060 jest możliwe uzyskanie kilku częstotliwości generatora, maksymalnie 12,8 kHz. Na rysunku 4 pokazany jest przypadek, w którym można wybrać częstotliwość 50 Hz lub 800 Hz, zależnie od połączeń A lub B. Do wygładzania przebiegu schodkowego służy bierny filtr dolnoprzepustowy, w którym stałe czasowe RC są zmieniane zależnie od wybranej częstotliwości. Pierwszym członem filtru jest rezystancja wyjściowa zespołu rezystorów R1...R7, która wynosi 7,8 kΩ. Zawartość harmoniczných przebiegu schodkowego jest znaczna, ale jak już wspomniano, są to częstotliwości stosunkowo duże, więc po ich wytłumieniu w filtrze THD nie przekracza 0,2%. W układzie zamiast przełączników mechanicznych można zastosować multiplexery np. 4051 lub 4052.

Chociaż generatory omawianego typu znajdują zastosowanie głównie jako źródła stałych częstotliwości, to jednak możliwe jest także ich płynne przestrajanie. Na **rysunku 5** pokazano generator o częstotliwości zmieniającej w zakresie ok. 420 Hz...24 kHz. Do wytwarzania przebiegu schodkowego o  $n=32$  poziomach zastosowano dwa rejestry przesuwne 4015 i 15 rezystorów. Częstotliwość wejściową dla tego układu uzyskuje się z multiwibratora zbudowanego z 2 inwerterów układu 4069. Potencjometr podwójny służy zarówno do zmiany częstotliwości multiwibratora, jak i stałej czasowej biernego filtra dolnoprzepustowego. Filtr tylko nieznacznie zmniejsza sygnał o częstotliwości podstawowej, natomiast 11-krotnie tłumi harmoniczne, gdyż te o znaczących wartościach mają częstotliwości ponad 30-krotnie wyższe od podstawowej. Dzięki temu stałość napięcia wyjściowego przy zmianach częstotliwości jest utrzymana w dopuszczalnych granicach, a zawartość harmoniczných w sygnale wyjściowym wynosi ok. 0,6%. Nie jest to wartość bardzo mała, ale częstotliwości harmoniczných są tu stosunkowo wysokie i mogą nie mieć znaczenia w wielu przypadkach, gdy są poza pasmem użytecznym np. akustycznym. Ponadto, gdy potrzebny jest sygnał o bardzo małych zniekształceniach, o wybranej częstotliwości np. 1000 Hz, można uzupełnić układ odpowiednim torem z filtrem aktywnym.

W generatorach przestrajanych w sposób płynny można zastosować scalone filtry



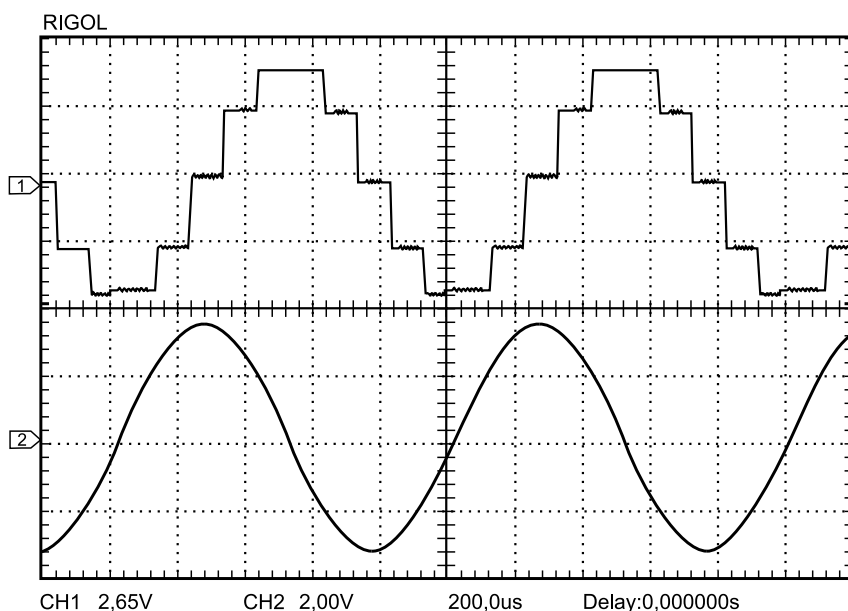
**Rysunek 5. Generator o płynnie zmienianej częstotliwości od ok. 420 Hz...24 kHz**



**Rysunek 6. Napięcie schodkowe tego generatora jest wygładzane przez filtr z przełączaną pojemnością**

z przełączaną pojemnością (SC), jak pokazano na **rysunku 6**. Układ LMF60/100 jest dolnoprzepustowym filtrem Butterwortha 6-go rzędu i zawiera 2 wzmacniacze operacyjne. Stosunek częstotliwości zegarowej do częstot-

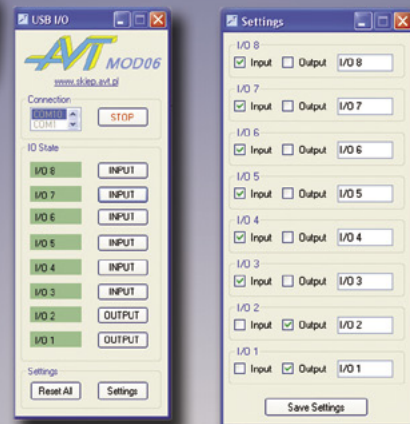
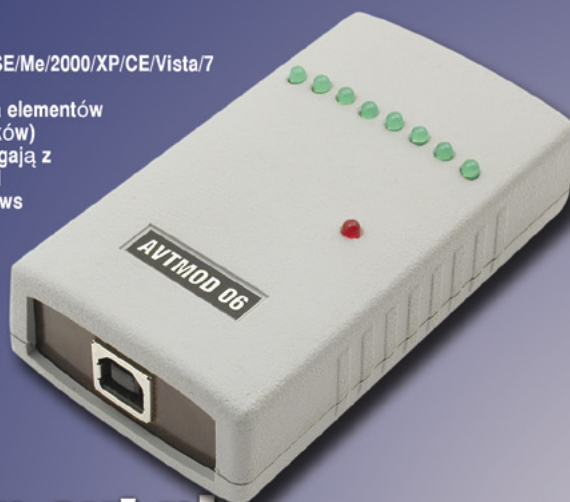
liwości odcięcia wynosi 100. Do wytwarzania przebiegu schodkowego o 10 poziomach wykorzystano układ z licznikiem 4018, podobny jak w generatorze z rysunku 2. Częstotliwość multiwibratora zbudowanego z bramek 4011



**Rysunek 7. Składowe zmiennoprądowe napięcie na wejściu (1) i wyjściu (3) układu LMF60/100 w generatorze z rysunku 6**

# Uniwersalny moduł portów I/O na USB AVTMOD06

- interfejs w standardzie USB
- 8 programowanych linii we/wy
- sterowniki dla Windows 98/98SE/Me/2000/XP/CE/Vista/7 oraz MAC-OS i Linuksa
- możliwość łatwego dołączenia elementów wykonawczych (np. przekaźników)
- operacje na liniach I/O przebiegają z wykorzystaniem komend ASCII
- dołączona aplikacja dla Windows
- zasilanie z portu USB



[www.sklep.avt.pl](http://www.sklep.avt.pl)

jest także częstotliwością zegarową, a więc jest 100 razy większa od częstotliwości przebiegu schodkowego. Rolę potrzebnego dzielnika zmniejszającego 10-krotnie częstotliwość spełnia licznik Johnsona 4017. Rezystory układu są obciążane dzielnikiem rezystywnym, aby obniżyć napięcie do dopuszczalnego poziomu wejściowego układu LMF60/100. Częstotliwość tego generatora można regulować zgrubnie i dokładnie w zakresie ok. 100 Hz...6 kHz zmieniając rezystancję w obwodzie multiwibratora. Filtr 6-go rzędu skutecznie zmniejsza harmoniczne przebiegu schodkowego do bardzo niskiego poziomu. Jednak filtr wykorzystuje technikę próbkowania, a jego napięcie wyjściowe może zmieniać się tylko podczas przełączania pojemności. Zatem jest ono także przebiegiem schodkowym, ale o 100 poziomach. Powstałe w ten sposób składowe są niewielkie, a ich częstotliwości są co najmniej 100 razy większe od podstawowej, więc zwykle są poza pasmem użytecznym. W napięciu wyjściowym pojawiają się także produkty mieszania tych harmonicznych przebiegu schodkowego, które przekraczają 50-krotnie częstotliwość generowaną. Jednak w praktyce w tym układzie ich wpływ na kształt przebiegu można pominąć.

## Podsumowanie

We wszystkich opisanych wyżej generatorach dla uzyskania stałości amplitudy na ogół wystarczy stabilizacja napięcia zasilania. Jednak w filtrach należy stosować elementy dobrej jakości. Uwaga ta szczególnie dotyczy kondensatorów. Przy dużym współczynniku temperaturowym pojemności niestabilność amplitudy generowanego przebiegu mogłaby być zauważalna. Istotną zaletą zaprezentowanych generatorów i innych o podobnej zasadzie działania jest

brak problemów ze stabilizacją i ustalaniem się amplitudy. Umożliwia to konstruowanie układów o dowolnie niskich częstotliwościach. W przedstawionych wyżej generatorach można otrzymywać częstotliwości do kilkudziesięciu kiloherców. Małe zniekształcenia wymagane są głównie dla napięć

o częstotliwościach akustycznych. W takich przypadkach, gdy potrzebna jest tylko jedna częstotliwość, lepiej jest zastosować zamiast generatora RC np. układ podobny do przedstawionego na rysunku 2.

Jan Szrednicki  
j.szrednicki@upcpoczta.pl

R E K L A M A

**AutomatykaOnLine.pl**  
WORTAL AUTOMATYKI PRZEMYSŁOWEJ

*„Jestem zadowolony z mojej nowej pracy. Znalazłem ją w ogłoszeniach na portalu AutomatykaOnLine”*

Wortal AutomatykaOnLine jest źródłem cennych informacji z zakresu automatyki. Codziennie aktualizowane wiadomości gospodarcze. Nowinki techniczne. Baza wiarygodnych podwykonawców. Informacje o produktach. Ogłoszenia pracodawców i poszukujących pracy. Forum wymiany doświadczeń. Rozwiązania techniczne. Twój partner w biznesie.

Wortal AutomatykaOnLine  
ul. Puławska 303, 02-785 Warszawa, tel./fax: 046 857 73 72, e-mail: redakcja@automatykaonline.pl