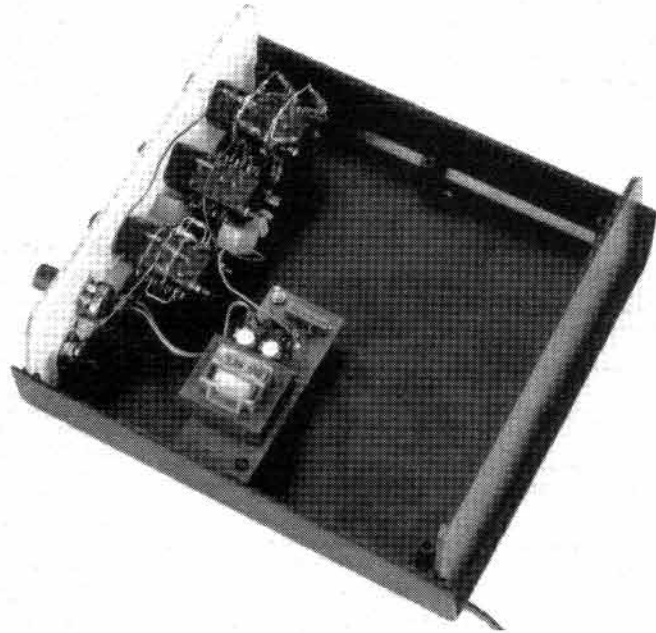


Laboratoryjny generator przebiegu sinusoidalnego m.cz.

kit AVT-149



Przedstawiamy kolejny układ generatora przebiegu sinusoidalnego. Tym razem elementem stabilizującym amplitudę drgań będzie żarówka. Choć podstawowy schemat układu jest bardzo popularny, początkującym nie zawsze udaje się uzyskać zadowalające wyniki.

Przedstawiona w artykule analiza typowych przyczyn niepowodzeń pozwoli świadomie dobrać odpowiednie elementy i warunki pracy.

Prezentowany generator laboratoryjny, z uwagi na bardzo dobre parametry, jest zalecany nie tylko do pracowni domowych. Niski koszt podzespołów będzie dodatkową zachętą do wykonania tego układu.

W poprzednim numerze EP (12/94) opisaliśmy prosty generator przebiegu sinusoidalnego z mostkiem Wiena i stabilizacją diodową. Obecnie prezentujemy układ wykorzystujący nieliniowe właściwości żarówki. Niektórzy młodzi i ambitni elektronicy być może są przeciwni stosowaniu we współczesnych układach takich „nieelektronicznych”, starych rozwiązań, ale prostota układu i dobry efekt końcowy stanowią wystarczające uzasadnienie takiego kroku. Einstein powiedział przecież, że wszystko powinno być robione możliwie prosto - byle nie prościej.

Mamy nadzieję, że nasz układ mieści się w granicach zakreślonych przez Einsteina.

Idea przyświecająca przy opracowaniu niniejszego tematu było uzyskanie dobrych parametrów przy możliwie najniższej cenie. Chcemy po prostu dostarczyć rozwiązanie może nie ambitne, ale praktyczne i funkcjonalne, na miarę najskromniejszej nawet kieszeni.

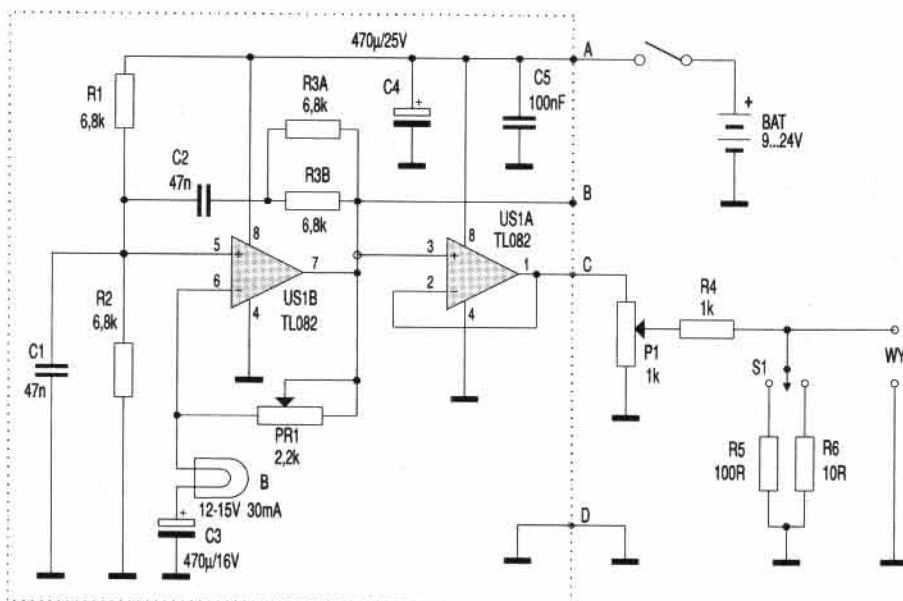
Do tematu generatorów i innych przyrządów pomiarowych będziemy stale powracać. Niedługo przedstawimy prosty i tani częstotłomierz, następnie miernik zniekształceń nieliniowych. A za czas jakiś opiszemy rozbudowany generator przebiegu sinusoidalnego ze stabilizacją amplitudy za pomocą transoptorów, tranzystorów FET i innych wynalazków.

Przypomnijmy teraz, że metale mają spory, dodatni współczynnik temperaturowy rezystancji. W czasie normalnej pracy żarnik (włókno) żarówki ma temperaturę kilku tysięcy stopni Celsjusza. Łatwo się więc domyślić, że rezystancja tak

Parametry modelu

(zastosowane elementy nie były selekcjonowane)

Zakres częstotliwości pracy:	2,7Hz..22kHz
Maksymalne napięcie wyjściowe:	8Vpp
Zniekształcenia THD+N (w całym pasmie):	<0.04%
Rozrzut wielkości amplitudy na poszczególnych zakresach (w całym pasmie):	< 7%
Rezystancja obciążenia:	dowolna
Czas ustalania amplitudy:	< max 3s



Rys. 1. Schemat elektryczny generatora serwisowego

gorącego włókna jest kilkakrotnie większa od rezystancji tego włókna w stanie zimnym. Nawet jeśli zasili się żarówkę napięciem dużo mniejszym od znamionowego, to wystąpią zauważalne zmiany rezystancji włókna.

Idea jest więc bardzo prosta - aby uzyskać stabilizację amplitudy wystarczy zamienić jeden z rezystorów w pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego na naszą nieliniową rezystancję żarówki.

Przedstawiamy dwa projekty: jeden to serwisowy generator zasilany z baterii 9V, drugi to kompletny generator laboratoryjny z obudową, płytą czołową i wszystkimi pokrętłami.

Generator serwisowy

Schemat elektryczny układu modelowego jest pokazany na rysunku 1. Jest to układ przeznaczony do zasilania bateryjnego. Jednakowe rezystory R1, R2 ustalają stałoprądowy punkt pracy równy połowie napięcia zasilającego. Dla ułatwienia $R3A = R3B = R1 = R2 = R$. Stąd gdy $C1 = C2 = C$ generowana częstotliwość wynosi:

$$f = \frac{1}{\pi RC}$$

Helitrim PR1 pozwala ustawić żądaną wartość amplitudy.

Gdy żarówka jest zimna (ma małą rezystancję), wzmacnienie układu jest większe od 3 - pojawiają się drgania. Wzrost amplitudy drgań spowoduje podgrzanie włókna, wzrost jego rezystancji, wzmacnienie się

zmniejszy i amplituda ustabilizuje się na określonym poziomie, zależnym od stosunku rezystancji PR1 i włókna żarówki.

Jak zwykle jednak problem tkwi w szczegółach. Z literatury wynika, że można w takim układzie uzyskać współczynnik zniekształceń nieliniowych poniżej 0,01%. Jednak nie wszystkim udało się osiągnąć zadowalające parametry. Przy takich zniekształceniach trzeba bowiem uwzględnić parametry samego wzmacniacza operacyjnego, choćby szybkość narastania napięcia wyjściowego i wydajność prądową wyjścia. Bądź co bądź, do podgrzania włókna potrzebny jest znaczący prąd. Przy obciążeniu wyjścia prądem rzędu kilku do kilkudziesięciu miliamperów nieuchronnie wzrosną zniekształcenia nieliniowe wnoszone przez wzmacniacz. Musimy więc zastosować żarówkę o jak najmniejszym prądzie pracy i wzmacniacz mający odpowiednią szybkość i obciążalność wyjścia.

Po drugie, ponieważ dla zapewnienia warunków generacji potrzebne jest wzmocnienie równe trzy, więc na żarówce wystąpi napięcie zmienne równe jednej trzeciej napięcia wyjściowego. Gdy spróbujemy uzyskać bardzo małą amplitudę wyjściową takiego generatora, to wtedy na żarówce wystąpi napięcie zbyt małe do poprawnej pracy układu.

W sumie zmiany rezystancji spowodowane są przez zmiany temperatury, a więc dla naszych celów najlepsze są jak najmniejsze żarówecz-

ki, wymagające jak najmniej mocy do ich podgrzania.

Wartości elementów jak na schemacie zapewniają częstotliwość około 1000Hz.

Przy testowaniu modelu wypróbowano jego działanie z trzema wzmacniaczami operacyjnymi: TL062, TL082 i NE5532 oraz z następującymi żarówkami:

- 1 - telefoniczna 60V 20mA (8mA)
- 2 - telefoniczna 24V 20mA (15mA)
- 3 - telefoniczna 60V 50mA (20mA)
- 4 - telefoniczna 60V 50mA (38mA)
- 5 - miniaturowa bez oprawy 12-15V 30mA (29mA)
- 6 - miniaturowa samochodowa 24V 2W (75mA)
- 7 - rowerowa 6V 0,6W.

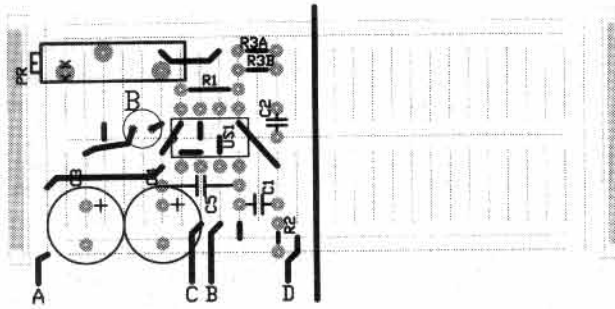
W nawiasach podano prąd żarówki przy napięciu 15V.

Przy zasilaniu napięciem 9V z żarówką nr 1 o największej rezystancji i układem TL082 uzyskano maksymalny sygnał o wartości 4Vpp ze zniekształceniami (THD+N) ok. 0,04%. THD+N oznacza zawartość harmonicznych i szumów własnych. Układ nie był jednak wystarczająco stabilny - na żarówce wystąpiło zbyt małe napięcie; objawiło się to kilkuprocentowymi wahaniami (o częstotliwości kilku herców) amplitudy sygnału.

Lepsze wyniki osiągnięto z żarówką nr 2 - żarówki takie są stosowane do podświetlenia wskaźników wychyłowych w sprzęcie powszechnego użytku. Wahaniamy amplitudy były tu mniejsze. Układ TL062, jak należało się spodziewać, okazał się zupełnie nieprzydatny z uwagi na małą wydajność prądową wyjścia. Z układem TL082 przy napięciu zasilania 8V można było uzyskać (THD+N = 0,04%) napięcie sygnału 2,5Vpp, a z NE5532 - 4,5Vpp. Okazało się, że już przy tej żarówce w grę wchodzi tylko układ NE5532 mający dużą obciążalność prądową wyjścia. Dalsze próby przeprowadzono z układem NE5532.

Żarówki o jeszcze mniejszej rezystancji (nr 3, 4, 5, 6) przy napięciu zasilania 8V nie sprawdziły się - wystąpiły znaczne wahania amplitudy. Otrzymano przebieg 1kHz modulowany amplitudowo częstotliwością kilku Hz.

Przy zastosowaniu żarówki rowerowej o niskim napięciu 6V, opisane szkodliwe drgania nie wystąpiły, z uwagi jednak na małą rezystancję żarówki maksymalna wiel-



Rys. 2. Rozmieszczenie elementów na płytce uniwersalnej modelu generatora serwisowego

kość sygnału wyniosła 3Vpp przy czym zniekształcenia wzrosły do 0,1%.

Ostatecznie zdecydowano się na żarówkę nr 2. Niezniekształcony sygnał o wartości 4Vpp (THD+N = 0,04%) można uzyskać przy napięciu zasilania 7,5V (zużyta bateria 9V). Przy napięciach zasilania 10..12V wahania amplitudy nie przekraczają 3%. Pobór prądu wynosi 8mA.

Przeprowadzono też próby przy zasilaniu napięciem 24V. W tych warunkach można było w zależności od żarówki uzyskać sygnał od 10Vpp, THD+N = 0,11% (żarówka nr 7) do 21Vpp, THD+N = 0,035% (żarówka nr 1). Opisane wcześniej wahania amplitudy nie wystąpiły

z uwagi na większe napięcia - w większości żarówek było nawet widoczne żarzenie się włókna. W takich warunkach najlepsza z uwagi na pobór prądu okazała się wersja z żarówką nr 1.

Układ ma dwa wyjścia. Bezpośrednie wyjście generatora (B) nie powinno być obciążane rezystancją mniejszą niż 4,7kΩ. Wyjście buforowane (C) można obciążać rezystancją nie mniejszą od 100Ω.

Model zmontowano zgodnie ze schematem montażowym pokazanym na **rysunku 2**. Uruchomienie nie następuje trudności, a przy braku drgań należy zwiększać czynną rezystancję PR1 aż do ich wystąpienia.

Układ umieszczony w obudowie i uzupełniony potencjometrem do regulacji napięcia wyjściowego będzie wartościowym przyrządem serwisowym.

Generator laboratoryjny

Schemat układu modelowego jest pokazany na **rysunku 3**. Proszę zauważyć, że prostego układu chyba już nie da się wymyślić.

Ponieważ układ charakteryzuje się dużym współczynnikiem tłumienia tętnień zasilania, możliwe okazało się użycie prostego, niestabilizowanego zasilacza.

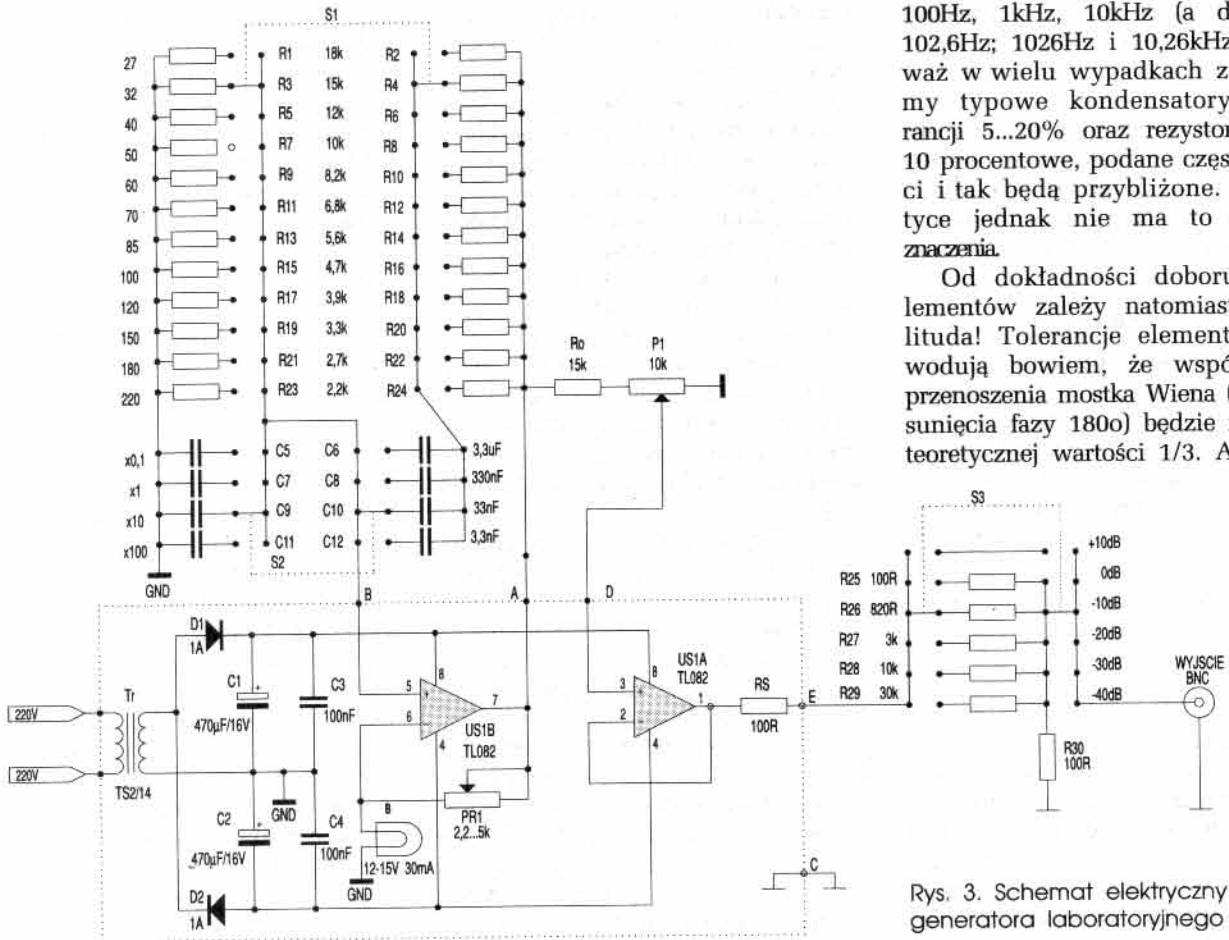
Użycie dwóch dwusekcyjnych przełączników i podanych na schemacie elementów RC pozwala uzyskać częstotliwości od 2,7Hz do 22kHz w sekwencji 2,7; 3,2; 4; 5; 6; 7; 8,5; 10; 12; 15; 18; 22 itd, wynikającej z zastosowania typowych rezystorów z szeregu E12.

Tym razem częstotliwość generatora wynosi:

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

Przy zastosowaniu kondensatorów 330nF, 33nF i 3,3nF i rezystorów z szeregu E12 dla rezystancji R = 4,7kΩ otrzymamy częstotliwości 100Hz, 1kHz, 10kHz (a dokładniej 102,6Hz; 1026Hz i 10,26kHz). Ponieważ w wielu wypadkach zastosujemy typowe kondensatory o tolerancji 5...20% oraz rezystory 5 lub 10 procentowe, podane częstotliwości i tak będą przybliżone. W praktyce jednak nie ma to żadnego znaczenia.

Od dokładności doboru par elementów zależy natomiast... amplituda! Tolerancje elementów spowodują bowiem, że współczynnik przenoszenia mostka Wiena (dla przesunięcia fazy 180o) będzie różny od teoretycznej wartości 1/3. Aby uzys-



Rys. 3. Schemat elektryczny generatora laboratoryjnego

kać w takim wypadku jednakową amplitudę wyjściową należałoby zastosować bardziej czuły obwód regulacji w gałęzi ujemnego sprzężenia zwrotnego (zrobimy to przy następnej okazji). Nasza żarówka radzi sobie z tym niezbyt dobrze. Dla sprawdzenia, specjalnie użyto w modelu nieselekcjonowanych elementów i mimo to uzyskano zupełnie zadowalające rezultaty.

Dla uzyskania większej dokładności można wyselekcjonować jednakowe pary rezystorów i kondensatorów - amplituda wyjściowa będzie zawsze jednakowa z dokładnością nawet 1%. Jeśli ktoś ma odpowiednie przyrządy, warto to zrobić, jednak do typowych zastosowań nie jest to konieczne.

Z transformatorem TS2/14 oraz żarówkami nr 2 i 5 uzyskano stabilny sygnał i możliwość obciążenia wyjścia nawet rezystancją kilkudziesięciu omów. Na wyjściu dodano jeszcze szeregowy rezystor 100Ω i w ten sposób przy zastosowaniu NE5532 uzyskano pewność, że dla dowolnego obciążenia sygnał wyjściowy nie będzie zniekształcony.

Fotografia pokazuje gotowy przyrząd wykonany według niniejszego opisu.

Ostatni parametr - czas ustalania amplitudy - jest związany z faktem, że po załączeniu zasilania lub przełączeniu zakresu amplituda przebiegu waha się i potrzeba trochę czasu do jej ustalenia.

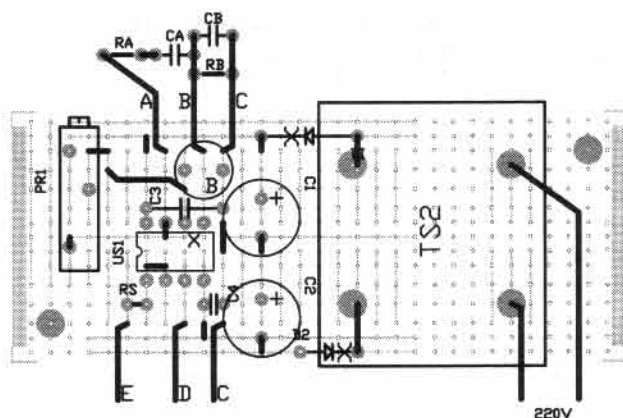
Dokładniejsze próby wykazały, że z żarówką nr 5 można uzyskać częstotliwości do 100kHz, amplituda spada jednak przy tym o kilka...kilkanaście procent. Z żarówką nr 2 nie udało się tego uzyskać, pojawiała się bowiem wspomniana wcześniej szkodliwa modulacja amplitudy.

Rozrzut występuje też między różnymi egzemplarzami żarówek jednokowego typu.

Zachęcamy do eksperymentów, może uda się dodać jeszcze jeden zakres z kondensatorem 330pF?

W razie pojawienia się okresowych wahań amplitudy na najwyższym zakresie częstotliwości należy trzymać się następujących zasad:

Ustawić możliwie dużą wartość amplitudy generatora. Należy to zrobić przy zwarceniu wyjścia na zakresie +10dB, przy ustawieniu P1 na maksimum i obniżonym napięciu sieci (np. 200V) - chodzi o to, żeby



Rys. 4. Rozmieszczenie elementów na płytce uniwersalnej w modelu generatora laboratoryjnego

napięcie zasilające było takie, jak w najgorszych warunkach pracy.

Można ewentualnie spróbować równolegle z żarówką dołączyć rezystor o wartości rzędu 1kΩ i skorygować ustawienie PR1.

W układzie modelowym świadomie zrezygnowano z obwodu regulacji składowej stałej na wyjściu. Jest to użyteczne w generatorze funkcji przy przebiegach trójkątnym i prostokątnym; w generatorze „sinusa” naprawdę nie jest to potrzebne.

Na wyjściu generatora wystąpi zazwyczaj niewielkie napięcie stałe - napięcie nierównoważenia wzmacniacza. Taka składowa stała o wartości kilku...kilkudziesięciu miliwoltów nikomu i niczemu nie zaszkodzi.

Celowo pominięto wyłącznik sieciowy - jako przyrząd laboratoryjny nasz generator będzie zasilany wraz z innymi przyrządami z jednej listwy zasilającej i wyłączany wspólnym wyłącznikiem na listwie. W modelu zrezygnowano nawet z kontrolki LED. Gdyby była użyta, nie powinna pobierać więcej niż 5mA z naszego małego zasilacza.

Przełącznik zakresów napięcia wyjściowego i potencjometr pozwalają zmniejszyć amplitudę przebiegu wyjściowego do pojedynczych miliwoltów.

W modelu nie zaobserwowano negatywnego wpływu transformatora sieciowego. Jeśli jednak w mostku byłyby użyte rezystory o większej rezystancji (co z układem NE5532 nie jest zalecane), to celowe może się okazać umieszczenie transformatora z dala od reszty układu.

Osoby chcące zastosować tańszy układ TL082 powinny zmniejszyć maksymalny poziom sygnału przez zwiększenie R_o lub zwiększyć wartość rezystora wyjściowego R_s .

Autor przy opracowaniu modelu mierzył zniekształcenia za pomocą automatycznego miernika zniekształceń PMZ-11. Wyniki podane w artykule odczytane są ze wskaźnika tego przyrządu. Jest jednak pewne, że w sytuacjach, gdy miernik wykazał zniekształcenia 0,035...0,04% rzeczywiste zniekształcenia są mniejsze. Po kalibracji przyrządu i zwarceniu wejścia wskaźnik pokazuje wynik 0,015...0,02%. Są to szumy własne przyrządu. Ponadto, część wykazywanych zniekształceń to harmoniczne wprowadzane przez układy przyrządu pomiarowego, a nie zniekształcenia badanego sygnału (jest to głównie druga harmoniczna sygnału mierzonego).

Rzeczywiste parametry prezentowanych układów są jeszcze lepsze niż podane w artykule. Po wykonaniu modelu zmierzono harmoniczne za pomocą dobrego analizatora widma. Zniekształcenia były na poziomie szumu - tak małe, że nie sposób było ich zobaczyć na ekranie analizatora. Poziom drugiej i trzeciej harmonicznej jest mniejszy niż -80dB, czyli zniekształcenia są mniejsze niż 0,01%!

Montaż i uruchomienie

Montaż układu z rysunku 3 na płytce uniwersalnej PU-02 według **rysunku 4** nie powinien sprawić trudności. Transformator jest mocowany w powiększonych ($\phi=1,2\text{mm}$) otworach płytki uniwersalnej.

Należy pamiętać o przecięciu trzech ścieżek: pod diodami D1 i D2 oraz pod US1. Konieczne też dla bezpieczeństwa trzeba usunąć wszystkie ścieżki w pobliżu sieciowych wyprowadzeń transformatora, jak też koło otworów mocujących $\phi=3,2\text{mm}$.

Najpierw warto zmontować i u-

ruchościć płytkę z przylutowanymi prowizorycznie elementami $R = 4,7k\Omega$, $C = 33nF$ ($f = 1kHz$). Zalecamy taki jak na rysunku 3 układ połączeń przełączników S1 i S2, z uwagi na minimalizację ewentualnych zakłóceń.

W modelu elementy ustalające częstotliwość zamontowano na wyprowadzeniach przełączników obrotowych.

W pierwszym modelu (na fotografii) autor użył komputerowego wydruku rysunku płyty czołowej (zamieszczonego na wkładce). Do tego należy zastosować przezroczystą płytę czołową - kawałek plexi o grubości 3mm, przy czym papierowy rysunek czołówki (ewentualnie naklejony na karton) jest umieszczony na wewnętrznej stronie płyty. To proste rozwiązanie zapewnia dobry efekt estetyczny, unikamy także zabrudzenia lub wytarcia rysunku przy częstym używaniu.

Inny kolor czołówki można uzyskać wykonując wydruk na barwnym papierze.

Można też wykonać kserokopię rysunku czołówki nie na papierze, tylko na przezroczystej folii. Niestety,

WYKAZ ELEMENTÓW

Rezystory

R1, R2: $18k\Omega$
 R3, R4, R0: $15k\Omega$
 R5, R6: $12k\Omega$
 R7, R8: $10k\Omega$
 R9, R10: $8,2k\Omega$
 R11, R12: $6,8k\Omega$
 R13, R14: $5,6k\Omega$
 R15, R16: $4,7k\Omega$
 R17, R18: $3,9k\Omega$
 R19, R20: $3,3k\Omega$
 R21, R22: $2,7k\Omega$
 R23, R24: $2,2k\Omega$
 R25, R30, R5: 100Ω
 R26: 820Ω
 R27: $3k\Omega$
 R28: $10k\Omega$
 R29: $30k\Omega$
 PR1: helitrim $2,2...5k\Omega$
 P1: $10k\Omega$ A

Kondensatory

C1, C2: $470\mu F/16V$

C3, C4: $100nF$ ceramiczny
 C5, C6: $3,3\mu F$ lub ($3 \times 1\mu F + 330nF$)
 C7, C8: $330nF$
 C9, C10: $33nF$
 C11, C12: $3,3nF$

Półprzewodniki

D1, D2: dowolne 1A np. 1N4001
 US1: NE5532

Różne

Tr: TS 2/14
 B: żarówka 12-15V 30mA
 S1-S3: przełączniki 12-pozycyjne dwuobwodowe z pokrętkami
 wkręt M3/22...30mm 1szt + nakrętka M3 3szt.
 blachowkręt 2,9mm/10...12mm 1szt.
 rysunek płyty czołowej
 płytka uniwersalna PU-02
 pokrętło potencjometru
 gniazdo BNC
 taslemka 5-przew. ok. 15cm
 sznur sieciowy z wtyczką
 obudowa kpl. (+nóżki, wkręty)

nie wszystkie punkty ksero posiadają taką folię.

W przypadku użycia folii można ją umieścić zarówno na wewnętrznej, jak i na zewnętrznej stronie orygi-

nalnej płyty czołowej, podkładając pod spód kawałek papieru odpowiedniej barwy.

Piotr Górecki, AVT