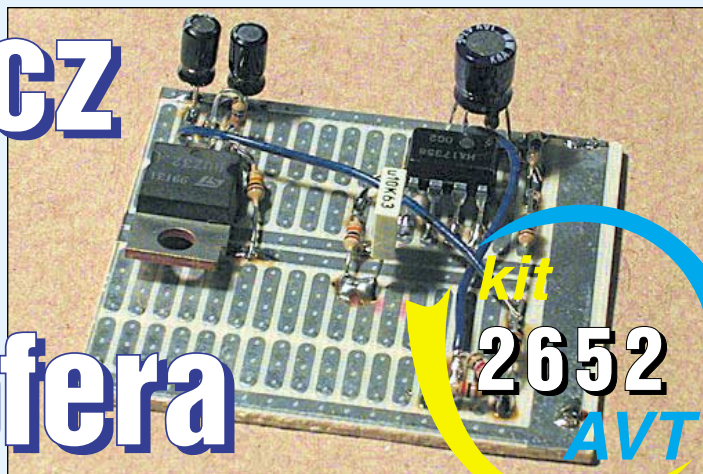




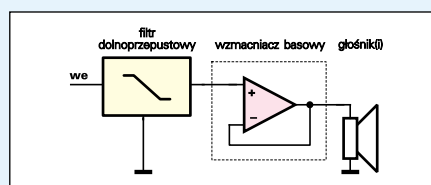
Wzmacniacz prądowy do subwoofera



Wielu melomanów posiada - z racji ograniczeń mieszkaniowych - niewielkie zestawy głośnikowe - tzw. monitory, dlatego uzupełniają oni dolną część pasma akustycznego subwooferem - kolumną odtwarzającą tylko najniższe częstotliwości. Ci wszyscy, dla których muzyka jest w życiu ważna, chcieliby słuchać basu takiego jakim on jest naprawdę, a nie buczenia i dudnienia. Z kolei, aby się do tego stanu zbliżyć, potrzebny jest dobry system: filtr - wzmacniacz - zestaw głośnikowy, którego cena przyprawia o ból głowy. Ja też lubię posłuchać kontrabas i perkusji, a szastać pieniędzmi nie powinienem; zrobiłem więc pewne doświadczenie...

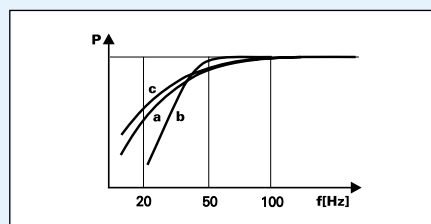
W „normalnym” systemie subwoofera, według **rysunku 1**, mamy filtr dolnoprzepustowy i wzmacniacz zasilający głośnik umieszczony w obudowie. Ponieważ, jak pokazuje **rysunek 2**, charakterystyka głośnika opada w stronę niższych częstotliwości już od ok. 100Hz, stosuje się kilka różnych systemów akustycznych, które służą mają przesunięciu możliwie nisko punktu załamania charakterystyki częstotliwościowej. Powszechnie stosowanym rozwiązaniem jest układ „bass-reflex”, czyli odpowiednich wymiarów rura promieniująca najniższe częstotliwości w fazie z membraną głośnika. W ten sposób trochę sztucznie można wzmocnić częstotliwości w okolicy 30-100Hz. Za to poniżej częstotliwości rezonansowej głośnika w obudowie charakterystyka spada już „na łeb, na szyję” i właściwie nie się już nie da z tym zrobić. Pokazuje to charakterystyka *b* na rysunku 2. Ponadto w okolicy częstotliwości rezonansowej wzrasta wielokrotnie wartość impedancji cewki głośnika i w związku z tym maleje prąd płynący w cewce. A mniejszy prąd - to mniejsze wychylenia membrany i mniejsze ciśnienie akustyczne. Aby uzmysłowić sobie, co się dzieje w tym zakresie basu, trzeba jeszcze dodać zmiany fazy fali ciśnienia akustycznego w stosunku

do fazy sygnału wejściowego oraz opóźnienia w związku z istnieniem rury bass-refleksowej. To wszystko powoduje, że odczuwamy bas jako rozmyty, rozlazły, dudniący, a mimo pozornie dużej dawki mocy ciągle brakuje tego solidnego, najniższego basu.



Rys. 1

Rys. 2 Charakterystyka głośnika



Niektórzy ratują się w tym momencie podkręcaniem regulatora basu do maksimum, ale to przezwycięża tylko pogarsza sprawę. Basu nie da się wymusić, jeśli nie ma go na płycie. Możemy starać się jedynie mniej lub bardziej prawidłowo odtworzyć to, co zostało zapisane na krążku CD.

Z punktu widzenia poprawności odtwarzania fazy lepsze jest rozwiązanie kolumny subwoofera jako zamkniętej. W tym przypadku jednak mamy do czynienia z charakterystyką częstotliwościową *a* na rysunku 2. Pewną poprawę daje zastosowanie dwóch jednakowych głośników w układzie „tandemu”, co pokazuje charakterystyka *c* oraz **fotografia 1**.

Mamy więc w miarę mocny bas, kolumna szybko reaguje na impuls (brak otworu), ale w dalszym ciągu przydałoby się więcej najniższego basu z zakresu 20-30Hz. I tu doszliśmy do sedna sprawy.



Fot. 1 Zastosowanie dwóch jednakowych głośników w układzie „tandemu”

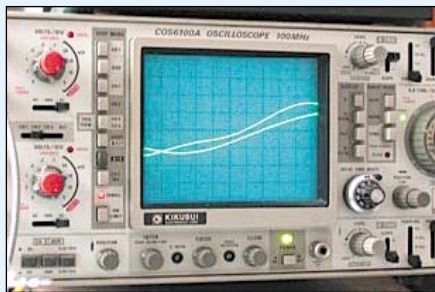
Idea

Zróbmy taki eksperyment: zbadajmy kształt prądu płynącego przez głośniki. W tym celu trzeba wstawić szeregowo z głośnikami niewielki rezystor, na którym spadek napięcia świadczyć będzie o płynącym prądzie. Przynajmniej tak mówi prawo Ohma, a dlaczego mielibyśmy je kwestionować?

I tutaj ci, którzy dysponują oscyloskopem 2-kanalowym, będą zadziwieni. W układzie z rysunku 1, tylko z dodanym opornikiem rzędu 0,47Ω między głośnikami a masą, podajemy na wejście sygnał sinusoidalny i oglądamy przebieg napięcia na tymże rezystorze na tle sinusoidy wejściowej. Okazuje się, że w okolicy odczuwanej jako niski bas, czyli powiedzmy 20-60Hz, prąd płynący przez głośniki wcale nie odzwierciedla sygnału podanego do wejścia wzmacniacza. Inne jest wszystko: amplituda, faza i kształt! Pokazuje to **fotografia 2**.

Głośnik to dość skomplikowany instrument i nie podejmując się wytlumaczyć do końca zjawisk, które się tam pojawiają. Wydaje się jednak, że powinno nam bardziej zależeć na jak najlepszym odwzorowaniu prądu w cewkach głośników. Bardziej niż na odwzorowaniu napięcia na ich zaciskach. W końcu to prąd powoduje wychylenie membrany, a nie samo istnienie napięcia na zaciskach cewki głośnika.

W całym tym eksperymencie chciałem uzyskać właśnie to - aby odwzorowaniem napięcia wejściowego wzmacniacza był **prąd głośników**, a nie napięcie na głośnikach.

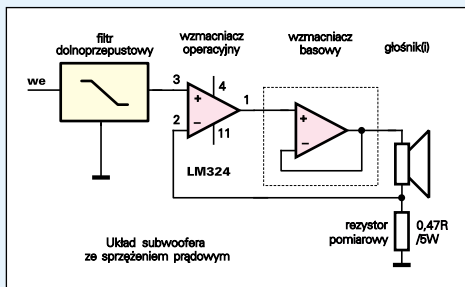


Fot. 2 Prąd płynący przez głośniki nie odzwierciedla sygnału podanego do wejścia wzmacniacza

Opis układu

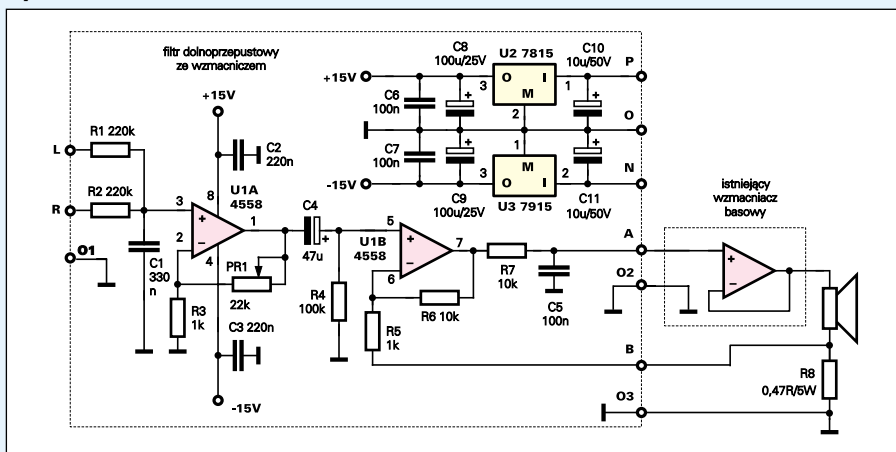
Zastosowałem zatem układ przedstawiony w postaci poglądowej na **rysunku 3**.

Sygnał wejściowy (z filtra dolnoprzepustowego) podany jest nie bezpośrednio na wejście naszego klasycznego wzmacniacza mocy, tylko na wejście nieodwracające dodatkowego wzmacniacza operacyjnego. Do jego wejścia odwracającego doprowadziłem sygnał będący spadkiem napięcia na dodatkowym rezystorze połączonym szeregowo z głośnikiem (głośnikami). Rezystor ten wtrącony został w obwód głośnika, aby można było na bieżąco mierzyć jego prąd. Teraz dodatkowy wzmacniacz musi wypracować taki sygnał,



Rys. 3

Rys. 4



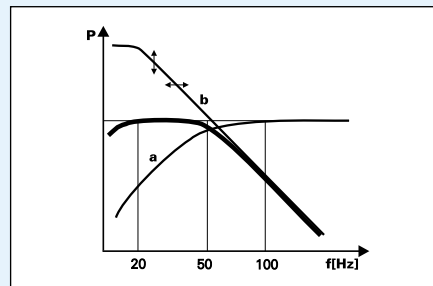
aby spadek napięcia na rezystorze pomiarowym był równy sygnałowi wejściowemu co do amplitudy, fazy i kształtu, mimo wszelkich przeciwności ze strony głośnika i jego obudowy, które chciałyby temu przeszkodzić.

W zależności od zasilania, jakie najwygodniej będzie użyć dla dodatkowego wzmacniacza, trzeba zaprojektować odpowiedni układ rzeczywisty. Najbardziej prawidłowym wydaje się symetryczne zasilanie napięciem $\pm 15V$. Ponieważ na początku użyłem do subwoofera starego wzmacniacza 50W firmy Braun z demobilu, z jednym napięciem $+65V$ i kondensatorem na wyjściu, musiałem nieco przekompilować układ polaryzacji wejść, aby nie robić dodatkowego symetrycznego zasilacza. Został jednak przy prostym i przejrzystym zasilaniu symetrycznym. Rzeczywisty układ będzie wyglądał jak na **rysunku 4**.

Dwa rezystory wejściowe (z obu kanałów stereo) i kondensator 330nF tworzą odpowiedni filtr górnopasowy, którego charakterystykę (**rysunek 5 - b**) dobrałem tak, że po złożeniu jej z opadającą w kierunku małych częstotliwości charakterystyką akustyczną całej reszty systemu subwoofera (**rysunek 5 - a**) usiłuje ona zbliżyć ją do moich potrzeb. Jednocześnie w kierunku wyższych częstotliwości odcina ona wyższe partie basu i resztę pasma z nachyleniem 6dB/okt. - w zakresie gdzie charakterystyka głośnika jest już płaska. Trzeba poświęcić trochę czasu, aby dobrze „zestroić” ten filtr z resztą systemu akustycznego, czyli aby charakterystyka systemu subwoofera wspólnie z charakterystyką np. monitorów zlewały się w jeden dźwiękowy obraz, że tak malowniczo to ujmę. A wspomniana „reszta systemu” to nie tylko wzmacniacz i głośniki, to również pomieszczenie odsłuchowe z całym jego wyposażeniem w firanki, dywaniki, meble itd.

I jeszcze coś na temat filtra: ponieważ jego charakterystyka jest jednostajnie opadająca w zakresie słyszalnych częstotliwości (**rysunek 5 - b**), strojenie może polegać wyłącznie na regulacji wzmocnienia wzmacniacza operacyjnego za filtrem za pomocą potencjometru P. Nie potrzeba

zmieniać elementów R i C w samym filtrze, bo przesuwamy charakterystykę **b** w pionie. Na to samo by wyszło, gdybyśmy zmieniali elementy RC i krzywa ta przesuwałaby się w poziomie. Można stosować tu wymyślne filtry n-tego rzędu, ale uważam, że znacznie ważniejszą sprawą na tym etapie jest uzyskanie prądowego sterowania głośników.



Rys. 5

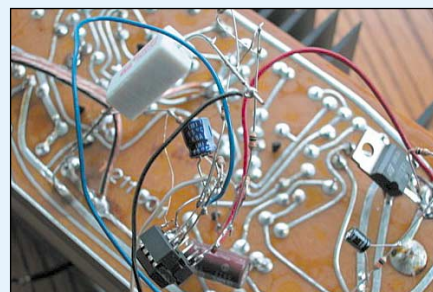
Wracamy zatem do meritum. Po zbudowaniu układu z **rysunku 4** możemy przystąpić do zbadania jego działania. Na wszelki wypadek proponuję na początku podłączyć głośnik przez dodatkowy rezystor rzędu 33Ω/5W. Układ przy źle dobranych parametrach lubi się wzbudzić na częstotliwości kilku herców, co może się okazać zabójcze dla głośników. Oczywiście ten rezystor powinien być włączony między wyjście wzmacniacza a głośnik, aby jego wartość - dla pomiaru prądu - nie dawała się do rezystora pomiarowego 0,47Ω.

Trzeba zwrócić dużą uwagę na stabilność układu - należy zacząć od niewielkiego wzmocnienia dodatkowego wzmacniacza. Można ją regulować wartością rezystora R6. Małe wzmocnienie daje gorsze parametry sygnału wyjściowego, ale zapewnia bardziej stabilną pracę. Po tem można zwiększyć wzmocnienie tego stopnia aż do granicy stabilności, po czym zmniejszyć je dla bezpieczeństwa o ok. 30%.

Jak widać z **fotografii 3**, podczas pierwszych prób i pomiarów zastosowałem montaż „wisząco-pajęczynowy”, ale tak mnie interesowały wyniki, że nie myślałem o estetyce.

Po dobraniu wzmocnienia możemy podać na wejście całego układu sinusoidę o częstotliwościach w zakresie 10-100Hz i zaobserwować, jak na jej tle zachowuje się napięcie na rezystorze 0,47Ω. Satisfakcja gwarantowana!

Moim zamysłem było to, aby pozostawić dotychczas używany wzmacniacz basowy



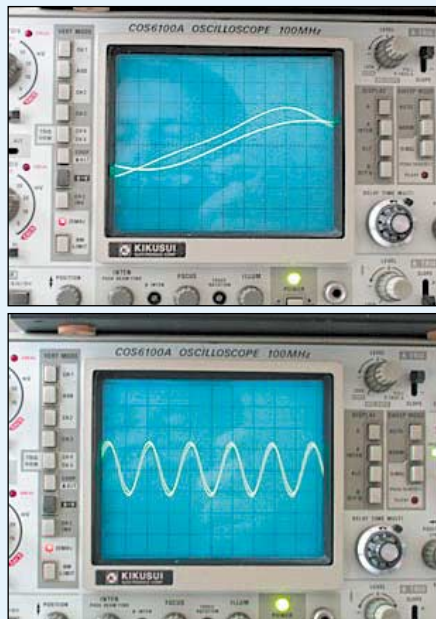
Fot. 3 Montaż „wisząco - pajęczynowy”

bez żadnych zmian. Na schematach jest on obwiedziony przerywaną linią. Sprzężenie zwrotne (napięciowe) uwzględniłem w jego symbolu, bo ono prawie zawsze istnieje - w takiej czy innej postaci. Nie musimy się jednak nim zajmować, bo traktujemy wzmacniacz mocy jako odrębne, autonomiczne urządzenie, które wzmacnia swój sygnał wejściowy. Wzmacnia i napięcie, i prąd, ale w taki sposób, że jego **napięcie wyjściowe** odwzorowuje kształt **napięcia wejściowego**. My zaś - dla celów naszego doświadczenia - potrzebujemy, aby napięcie wejściowe odwzorowane było przez **prąd wyjściowy**, ponieważ przypuszczamy, że tak będzie lepiej.

Ocenę właściwości tego układu pozostawiam Czytelnikom, którzy na pewno zechcą to sprawdzić. Ja w każdym razie nie wracam do poprzedniego - klasycznego - układu. Według mnie nareszcie mam niski bas, odtworzony bardziej precyzyjnie, bez niekontrolowanych „dodatków” ze strony głośników i obudowy.

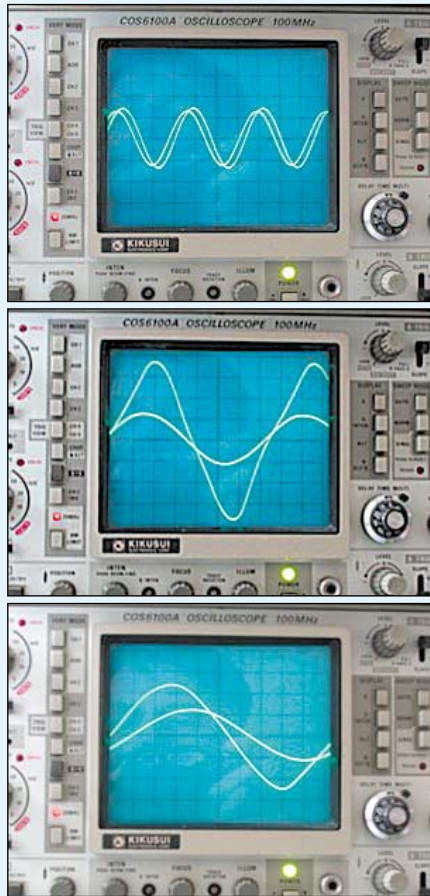
Warto sprawdzić, na ile obecne zasilanie głośnika odbiega od poprzedniego. Zobaczymy zatem kształt napięcia na głośniku przy zmianach częstotliwości w okolicach rezonansu głośnika.

Jak widać z **fotografii 4a,b,c,d,e** jest on zdecydowanie inny niż sygnał wejściowy. Jest inny, niż był w układzie „normalnym”. I musi taki być, jeśli chcemy, aby kształt prądu w głośnikach pozostawał taki, jaki jest kształt napięcia zapisany na płycie. Krótko



Fot. 4 a, b, c, d, e

Kształt napięcia na głośniku przy zmianach częstotliwości okolicach rezonansu głośnika



mówiąc: teraz nasz stary wzmacniacz jest zmuszony do produkowania napięcia wyjściowego o takim kształcie, aby prąd w głośniku wyglądał tak, jak chce tego producent płyty. Uzyskane przebiegi przedstawione są na oscylogramach - fotografia 4a,b,c,d,e.

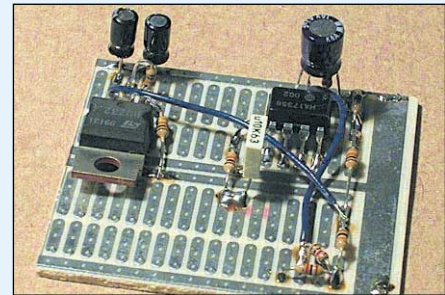
Na początek - dla sprawdzenia działania samego układu sterowania prądowego, podałem jednak sygnał (sinusoidę) za filtrem. Na wszystkich zdjęciach sinusoida o stałej amplitudzie przedstawia sygnał zdjęty z opornika 0,47/5W w obwodzie głośnika, czyli jest to kształt prądu, jaki płynie przez cewkę głośnika. Jego kształt, amplituda oraz faza są stałe dla zakresu częstotliwości 10-100Hz, tak samo jak w sygnale podanym na wejście + dodatkowego wzmacniacza operacyjnego (za filtrem dolnoprzepustowym na **rysunku 4**). Zmieniający się sygnał - to napięcie na wyjściu wzmacniacza mocy.

Ustawienia oscyloskopu: Kanał 1: napięcie na rezystorze 0,47Ω/5W; 0,2V/dz. Kanał 2: napięcie wyjściowe wzmacniacza mocy; 2V/dz. Podstawa czasu: 5ms/dz.

Po tych pomiarach nastąpił kilkutygodniowy okres słuchania muzyki w nowym układzie subwoofera.

Montaż i uruchomienie

Po testach wykonałem nieco solidniejszy montaż dodatkowych układów na płytce uniwersalnej (**fotografie 5 i 6**) zamkniętej w małej obudowie z tworzywa sztucznego i podłączyłem do „prawdziwego” wzmacniacza mocy.



Fot. 5 Montaż na płytce uniwersalnej

Fot. 6



Jak widać na **fotografii 7**, jest to wybitnej urody i dobrej jakości piecyk firmy Mitsubishi Electric. Duży rezystor 0,47Ω umieściłem we wnętrzu wzmacniacza mocy, aby nie prowadzić dość długich przewodów głośnikowych do dodatkowej obudowy.

Prosty układ dodatkowy według rysunku 4 można zmontować na niewielkiej płytce drukowanej, pokazanej na **rysunku 6**. Można w niej wykorzystać różnego typu wzmacniacze operacyjne, np. TL072, niekoniecznie typ podany na schemacie.

Ciąg dalszy na stronie 23.

Wykaz elementów

R1,R2	.....	220kΩ
R3,R5	.....	1kΩ
R4	.....	100kΩ
R6,R7	.....	10kΩ
R8	.....	0,22Ω/5W
PR1	.....	22kΩ
C1	.....	330nF
C2,C3	.....	100nF ceramiczny
C4	.....	47µF
C5	.....	100nF
C6,C7	.....	100nF ceramiczny
C8,C9	.....	100µF/25V
C10,C11	.....	10µF/50V
U1	.....	4558
U2	.....	7815
U3	.....	7915

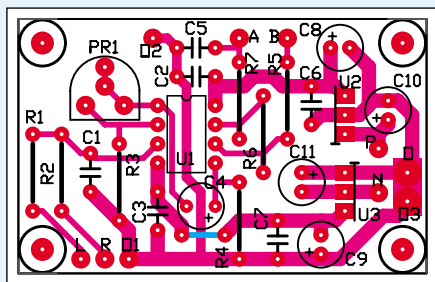
Komplet podzespołów z płytką jest dostępny w sieci handlowej AVT jako kit szkolny AVT-

Ciąg dalszy ze strony 15.

Podsumowanie

Ciekaw jestem Waszych opinii na ten temat, zarówno teoretycznych, jak praktycznych. Bo teoria może się tu lekko „rozchodzić”

Rys. 6 Schemat montażowy



z praktyką (chyba tylko pozornie, przez naszą niekompletną wiedzę), tak jak np. w przypadku anten telewizyjnych.

Następnym etapem powinno być zbadanie rzeczywistego ruchu membrany głośnika, bo-

Fot. 7 Piecyk firmy Mitsubishi Electric



wiem dopiero jej wychylenia powodują zmiany ciśnienia akustycznego. Najlepiej byłoby, aby fala akustyczna generowana przez głośnik była pod względem amplitudy, fazy i w ogóle kształtu zgodna z napięciem wejściowym wzmacniacza. Bywają do tego celu stosowane specjalne przetworniki przyklejane do membrany, np. optyczne, które badają rzeczywisty ruch membrany i dają sygnał sprzężenia zwrotnego. Na razie jednak wydaje mi się, że opisany w artykule sposób przynosi już pozytywne efekty.

Stoi przede mną pokusa, aby do badania wychyleń membrany użyć światła (może wiązki podczerwieni albo światła laserowego), ale zdaje się, że jest to zadanie nieco przestające możliwości domowego warsztatu.

Marek Klimczak
matik1@poczta.onet.pl