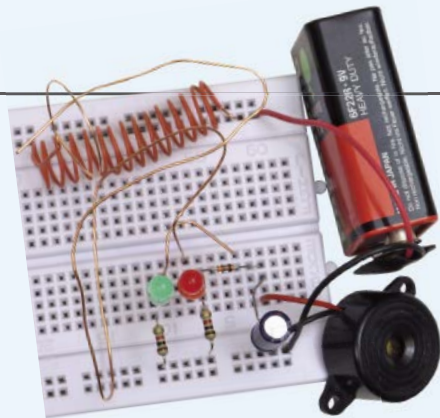




PRAKTYCZNY KURS cz. 14 ELEKTRONIKI



Oto czternasta część PRAKTYCZNEGO KURSU ELEKTRONIKI, który zainaugurowaliśmy w MT 2/2013 i będziemy kontynuować w kolejnych wydaniach. Zainteresowanie kursem jest olbrzymie, dlatego zdecydowaliśmy się umożliwić czytelnikom dołączenie do niego w dowolnym momencie. Wszystkie poprzednie części są dla wszystkich dostępne w formacie PDF na stronie www.mt.com.pl. Można z nich korzystać w komputerze lub sobie je wydrukować. Można też kupić wszystkie archiwalne numery MT na www.ulubionykiosk.pl. Publikacja każdej kolejnej części jest zawsze poprzedzona jedną stroną wstępnych informacji (jest to właśnie ta strona), żeby nowi czytelnicy mogli zapoznać się z zasadami KURSU i dołączyć do kursantów. ZAPRASZAMY!

Jeśli nie masz błędnego pojęcia o elektronice, ale chętnie byś poznał jej podstawy, to nadarza Ci się niepowtarzalna okazja. We współpracy z bratnią redakcją miesięcznika „Elektronika dla Wszystkich” publikujemy w „Młodym Techniku” cykl fascynujących lekcji dla zupełnie początkujących. Jest to **Praktyczny Kurs Elektroniki (PKE)** z akcentem na **Praktyczny**, gdyż każda lekcja składa się z **projektu i wykładu z ćwiczeniami**, przy czym **projekt** to konkretny układ elektroniczny samodzielnie montowany i uruchamiany przez „kursanta”. Pewnie myślisz sobie – pięknie, ale jak ja mam montować układy, nie mając lutownicy ani żadnych części elektronicznych. Otóż jest rozwiązanie. Lutownicy nie będziesz w ogóle używać, gdyż wszystkie układy będą montowane na **platce stykowej**, do której wkłada się „nóżki” elementów na wcisk.

I rzecz najważniejsza! Wydawnictwo AVT przygotowało zestaw **EdW09**, zawierający płytkę stykową i wszystkie elementy, jakie będą potrzebne do wykonania kilkunastu projektów zaplanowanych w PKE. Zestaw **EdW09** można kupić w sklepie internetowym www.sklep.avt.pl lub w sklepie firmowym AVT (Warszawa, ul. Leszczyńska 11) – cena brutto 47 zł.

Ale Ty nie musisz kupować! Dostaniesz ten zestaw **za darmo**, jeśli jesteś prenumeratorem MT lub wykupisz wkrótce prenumeratę. Wystarczy wysłać na adres: prenumerata@avt.pl dwa zdania:

„Jestem prenumeratorem MT i zamawiam bezpłatny zestaw EdW09. Mój numer prenumeraty:

Jeśli otrzymamy to zamówienie przed 28 marca 2014 roku, to zestaw **EdW09** wyślemy Ci w połowie kwietnia 2014, wraz z majowym numerem MT.

Uwaga uczniowie!

Szkoły prenumerujące MT otrzymują **Pakiety Szkolne PS EdW09**, zawierające po **10 zestawów EdW09** (każdy zestaw EdW09 zawiera komplet elementów z płytką stykową) skalkulowane na zasadach non profit w promocyjnej cenie 280 zł brutto za jeden pakiet PS EdW09 (tj. z rabatem 40% – 28 zł brutto za pojedynczy zestaw EdW09, którego cena handlowa wynosi 47 zł). Upewnij się, czy Twoja szkoła prenumeruje MT (niemal wszystkie szkoły ponadpodstawowe i wiele podstawowych otrzymują MT w prenumeracie sponsorowanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego) i przekaż nauczycielom informację o **Praktycznym Kursie Elektroniki** z promocyjnymi dostawami **Pakietów Szkolnych PS EdW09** do ćwiczeń praktycznych.

Zestaw EdW09 zawiera następujące elementy (specyfikacja rodzajowa):

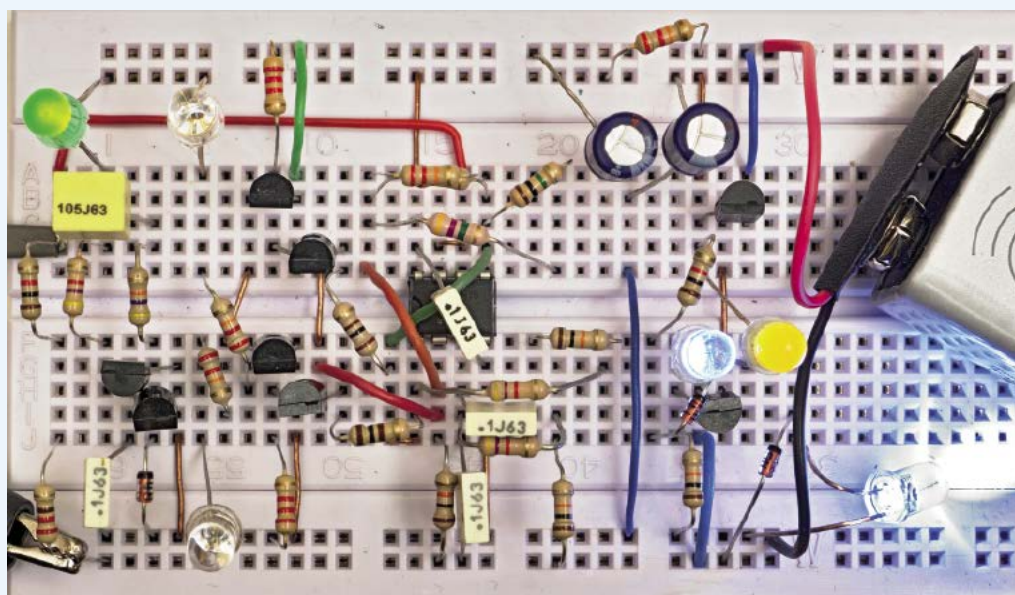
- | | |
|--------------------------------|-----------|
| 1. Diody prostownicze | 4 szt. |
| 2. Układy scalone | 4 szt. |
| 3. Tranzystory | 8 szt. |
| 4. Fotorezystor | 1 szt. |
| 5. Przekaznik | 1 szt. |
| 6. Kondensatory | 22 szt. |
| 7. Mikrofon | 1 szt. |
| 8. Diody LED | 11 szt. |
| 9. Przewód | 1 m |
| 10. Mikroswitch | 2 szt. |
| 11. Piezo z generatorem | 1 szt. |
| 12. Rezystory | 64 szt. |
| 13. Srebrzanka | 1 odcinek |
| 14. Zatrzaśk do baterii 9V | 1 szt. |
| 15. Płytki stykowe prototypowa | 1 szt. |
| 840 pól stykowych | 1 szt. |

Cena zestawu **EdW09** – 47 zł brutto
(www.sklep.avt.pl)

Uwaga Szkoły

Tylko dla szkół prenumerujących „Młodego Technika” przygotowano **Pakiety Szkolne** zawierające 10 zestawów EdW09 (**PS EdW09**) w promocyjnej cenie 280 zł brutto, tj. z rabatem 40%.

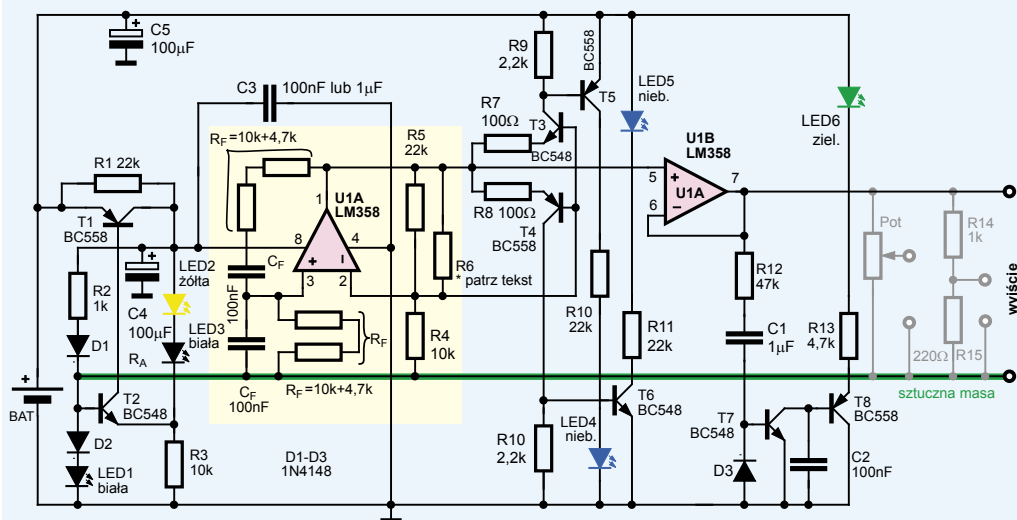
Autorem **Praktycznego Kursu Elektroniki** jest **Piotr Górecki**, redaktor naczelny kultowego w świecie hobbystów – elektroników miesięcznika „Elektronika dla Wszystkich” i autor legendarnych cykli artykułów i książek uczących elektroniki od podstaw.



Projekt 14

Wzorcowy generator sinusoidalny

Na fotografii wstępnej pokazany jest model generatora sygnału sinusoidalnego. Jak wiadomo, matematyczny przebieg sinusoidalny jest przebiegiem podstawowym, elementarnym, „pierwotnym” i w pewnym sensie czystym. Wbrew pozorom, wygenerowanie takiego przebiegu nie jest wcale proste – każdy realny przebieg jest w pewnym stopniu zniekształcony. W wielu przypadkach potrzebny jest generator przebiegu sinusoidalnego o jak najmniejszych zniekształceniach. My w ramach kursu PKE z racji ograniczonego składu zestawu EdW09 realizujemy tylko proste układy. Jednak nawet za pomocą skromnych środków możemy zrealizować układy o zaskakująco wysokich parametrach, na





przykład generator bardzo czystego „sinusa” według **rysunku A**. Taki autonomiczny generator może być znakomitą pomocą przy pomiarach, głównie sprzętu audio. Wprowadzie czysty sygnał sinusoidalny można dziś wygenerować za pomocą karty dźwiękowej komputera, ale lepiej jest, jeśli generator będzie oddzielnym urządzeniem, najlepiej zasilanym z baterii, a nie z zasilacza, a komputer może być wykorzystany do pomiarów jako analizator, a nie jako generator.

Opis układu dla „zaawansowanych”

Chcemy zbudować generator o wysokich parametrach zasilany z baterii 9V, dlatego na wszelki wypadek zastosujemy stabilizator napięcia z tranzystorami T1, T2. Zasadniczo taki stabilizator nie jest konieczny, ale zasadą jest, że wszelkie precyzyjne układy zasilamy napięciem stabilizowanym, a nie napięciem wprost z baterii, które znacznie się zmienia podczas wyładowania.

Aby w pełni wykorzystać baterię, zastosowaliśmy prosty stabilizator typu LDO (Low Drop Out – o małym minimalnym spadku napięcia), który utrzymuje na wyjściu około 7V, gdy napięcie baterii jest o co najmniej 0,1V większe. Tylko 0,1V między wejściem i wyjściem stabilizatora wystarczy do jego prawidłowej pracy. Rezystor „rozruchowy” R1 jest potrzebny, bo bez niego taki stabilizator nie zacznie pracować po dołączeniu baterii. Zasadniczo tego typu stabilizatory realizuje się według idei z **rysunku B** z trzema tranzystorami. Napięcie wyjściowe ustala tu dzielnik R_A, R_B . Dioda Zenera wytwarza stabilne napięcie odniesienia U_{REF} a układ dąży do tego, by napięcie U_A było równe U_{REF} . Gdy napięcie na wyjściu jest za duże, bardziej otwiera się tranzystor T_A i przejmuje więcej prądu, płynącego przez rezystor R_E . Zmniejsza tym samym prąd płynący przez T_B , czyli prąd bazy tranzystora T_C . Zmniejszenie prądu bazy zmniejsza też prąd kolektora T_C , a to zmniejsza napięcie wyjściowe i przywraca równowagę.

W modelu zamiast diody Zenera DZ, źródłem napięcia odniesienia jest szeregowe połączenie krzemowej diody D2 i białej diody LED, co daje napięcie o wartości nieco powyżej 3,5V. Obwód ten jest też wykorzystywany jako sztuczna masa, niezbędna przy zasilaniu generatora pojedynczym napięciem jednej baterii. W układzie wykorzystane są wszystkie tranzystory z zestawu EdW09 i po prostu zabrakło jeszcze jednego tranzystora do stabilizatora (T_A). Dlatego układ jest uproszczony i zamiast T_A i dzielnika R_A, R_B włączone są dwie diody świecące (LED2, LED3), które pełnią funkcję diody Zenera.

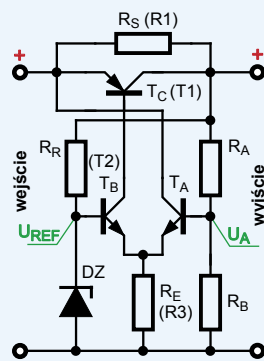
Podczas pracy stabilizatora mocno świeci biała dioda LED1, przez którą płynie znaczny prąd około 3mA. Słabiej świecą też diody LED2, LED3, które przy okazji są też monitorem stanu baterii – gdy nie świecą, napięcie jest za niskie i baterię trzeba wymienić.

Najważniejszą częścią projektu jest wyróżniony żółtą podkładką klasyczny generator z mostkiem Wiena, zbudowany na wzmacniaczu operacyjnym U1A. Częstotliwość generatora wyznaczają pary jednakowych elementów R_F, C_F : ($f = 1/2\pi R_F C_F$). Rezystory R4, R5 gwarantują, że układ zacznie wytwarzać drgania po włączeniu zasilania. Sygnał sinusoidalny z wyjścia oscylatora U1A podawany jest na wtórnik U1B i dalej na wyjście. Na wyjściu można włączyć potencjometr (1kΩ...2,2kΩ), a ja w modelu dodałem dzielnik R14, R15 i podałem zeń sygnał na wejście liniowe laptopa audio, który wraz z odpowiednim programem posłuży jako oscyloskop i analizator.

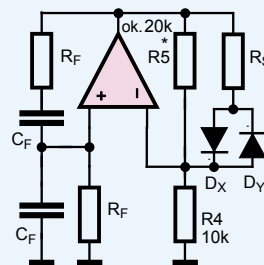
W każdym generatorze z mostkiem Wiena potrzebny jest układ stabilizacji amplitudy wytwarzanego przebiegu. W zasadzie generator mógłby mieć prosty schemat, jak na **rysunku C**, gdzie wykorzystany jest prosty stabilizator-ogranicznik z diodami krzemowymi D_X, D_Y .

Gdy wartość R5 jest zbyt duża, generator chce wytworzyć przebieg o dużej amplitudzie, a wtedy w szczytach sinusoidy przez diody D_X, D_Y płynie prąd i następuje ograniczanie amplitudy drgań – przebieg wyjściowy jest jednak znacząco zniekształcony. Jeśli zmniejszymy wartość R5, generator chce wytworzać przebieg o mniejszej amplitudzie – diody D_Y, D_X , również przewodzą, ale ich prąd, a także zniekształcenia przebiegu są mniejsze. Czym mniejszy prąd diod, tym mniejsze zniekształcenia przebiegu sinusoidalnego. Gdy jednak nadmiernie zmniejszymy wartość R5, generator przestanie wytwarzać drgania i nie zacznie pracy po włączeniu zasilania.

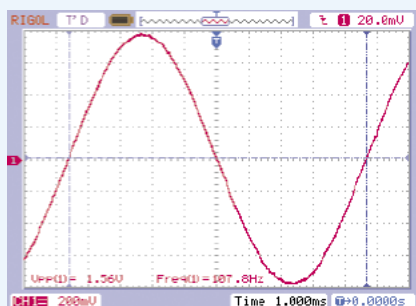
W takich prostych generatorach Wiena ze stabilizacją diodową w roli R5 stosuje się potencjometr i tak ustawia jego wartość, żeby niezależnie od zmian temperatury i innych czynników zagwarantować szybkie powstanie i utrzymanie drgań, a jednocześnie



B



C



D

by zniekształcenia nie były zbyt duże.

Cała sztuka budowy i regulacji takiego generatora polega na dobraniu jak najmniejszej wartości R5:

- nie może ona być za mała, bo generator po włączeniu zasilania nie zacznie pracować;
- nie może być za duża, bo przebieg będzie zniekształcony.

W Internecie można znaleźć mnóstwo schematów podobnych do tego z rysunku C, ale trudno byłoby znaleźć rozwiązanie z dwoma monitorami, jak w naszym projekcie. My nie mamy w zestawie ani jednego potencjometru, który umożliwiłby taką regulację, więc potrzebną rezystancję uzyskamy, dołączając równolegle do

R5 rezystor R6 lub kilka rezystorów o większej wartości. Aby to zrobić bez przyrządów, mamy też w układzie dwa monitory, kontrolujące parametry wytwarzanego przebiegu sinusoidalnego.

Monitor amplitudy zbudowany jest na tranzystorach T7, T8. Jeśli na wyjściu generatora wystąpi przebieg o amplitudzie powyżej 0,6V, zaświeci się zielona dioda LED6.

Monitor zniekształceń zawiera tranzystory T3, T4, których złącza baza-emiter pełnią funkcję diod D_v , D_x z rysunku B. Ściślej biorąc, prąd baz tych tranzystorów odpowiada prądom, płynącym przez diody D_v , D_x . Ponieważ zniekształcenia wytwarzanego przebiegu są proporcjonalne do prądów baz, sprawdzamy, czy prądy te nie są zbyt duże. Wykorzystujemy do tego prądy kolektorów T3, T4, które są proporcjonalne do prądów baz. Jeśli zniekształcenia, a tym samym prądy baz i kolektorów T3, T4 będą zbyt duże, spadki napięcia na R9 i R10 będą otwierać tranzystory T5, T6 i zaświecać niebieskie diody LED4, LED5. Próg zadziałania monitora zniekształceń wyznaczają rezystory R9, R10.

Rysunek D – zrzut z ekranu oscyloskopu – pokazuje, że w układzie modelowym uzyskujemy ładny przebieg sinusoidalny o częstotliwości 107,8Hz i wartości międzyszczytowej 1,56V, co daje amplitudę 0,78V i wartość skuteczną 0,55V. Jeśli świeci zielona dioda LED6, a nie świecą niebieskie LED4, LED5, to wytwarzany przebieg ma zniekształcenia poniżej 1%. Staranny dobór rezystancji R5 pozwala uzyskać dużo mniejsze zniekształcenia.

W naszym układzie mamy do dyspozycji nieprecyzyjne elementy, w tym rezystory o tolerancji 5%. Dlatego dobór optymalnej wartości rezystancji R5 polega na dołączeniu równolegle do niej rezystora R6 lub kilku rezystorów. Zapewne bez rezystora R6 będą świecić i LED6, i niebieskie LED4, LED5. Należy dołączyć R6 o nominalnie 100kΩ. Zapewne wszystkie te diody wtedy zgasną – wypadkowa rezystancja jest za niska. Nominał 100kΩ trzeba odłączyć i wstawić 220kΩ. Jeśli po dołączeniu R6 = 220kΩ zielona dioda LED6 zgaśnie, trzeba zastosować R6 = 470kΩ. Najprawdopodobniej jednak po dołączeniu R6 = 220kΩ dioda LED6 będzie nadal świecić. Jeśli zgasną przy tym niebieskie LED4, LED5, procedurę można byłoby zakończyć. Jednak niezależnie od stanu niebieskich diod warto równolegle do R5, R6 dodać kolejny rezystor (470kΩ, 1MΩ, 2,2MΩ, 4,7MΩ, 10MΩ) lub szeregowe ich połączenie, przy którym zielona LED6 świeci, a po dołączeniu baterii zaświeca się w czasie nie dłuższym niż jedna sekunda. Tak dostrojony układ będzie wytwarzał sinusoidę o zaskakująco małych zniekształceniach.

Uwaga! Po każdej zmianie w układzie, w szczególności zmianie R_f i C_p , procedurę doboru rezystancji należy powtórzyć!

Jak pokazuje fotografia wstępna, w modelu z kondensatorami $C_p = 100\text{nF}$ do R5, oprócz rezystancji R6 = 220kΩ, równolegle dołączone są też dwa rezystory o sumarycznej wartości 5,7MΩ (4,7MΩ + 1MΩ).

Tego rodzaju generator możesz z powodzeniem wykorzystywać do pomiarów. Dla ciekawości sprawdź, jak brzmi czysta sinusoida i jak ucho odbiera zniekształcenia – w tym celu do wyjścia generatora dołącz słuchawki przez rezystor o wartości 470Ω lub 1kΩ.

Wykład z ćwiczeniami 14

Poznajemy elementy i układy elektroniczne

W projekcie wstępnym wykorzystaliśmy generator oparty na mostku Wienera, według idei z **rysunku 1**. Uważni Czytelnicy spostrzegli też, że podobny generator wykorzystywaliśmy już wcześniej



– patrz wykład 9, rysunki 11 i 12. Dwa jednakowe rezystory R_F i kondensatory C_F tworzą obwód selektywny, który przy częstotliwości $f = 1/2\pi R_F C_F$ najmniej tłumi sygnał (trzykrotnie) i nie przesuwają wtedy fazy. Sprężenie zwrotne przez ten obwód jest dodatnie, ale aby skompensować trzykrotne tłumienie, w generatorze potrzebne są rezystory R_A , $2R_A$, które zapewnią wzmocnienie równe 3, by wzmocnienie wypadkowe wynosiło 1 i by układ wytwarzał drgania.

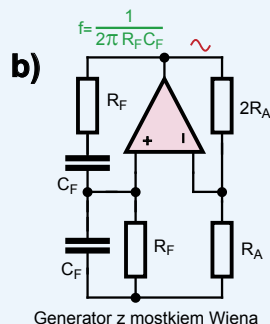
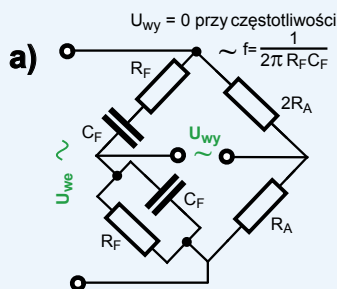
Z uwagi na zmiany temperatury i innych czynników, „początkowe” wzmocnienie powinno być nieco większe od jedności, a po powstaniu drgań powinno być na bieżąco regulowane, by miało wartość dokładnie równą jedności, co zagwarantuje wytwarzanie nieznkształconego przebiegu sinusoidalnego. W praktyce układ generatora musi zawierać obwód stabilizacji amplitudy wytwarzanego przebiegu. W literaturze znajdziesz rozmaite rozwiązania takiej stabilizacji. W zasilanej napięciem symetrycznym wersji z **rysunku 2a** zwykła żaróweczka (o jak najmniejszym prądzie)

ma dodatni współczynnik cieplny. Gdy powstaną drgania, przez żarówkę popłynie prąd *zmienny*, co rozgrzeje włókno, zwiększy jego rezystancję i tym samym zmniejszy wzmocnienie, stabilizując amplitudę wytwarzanego „sinusa”. Tego rodzaju proste generatory z żarówką były dawniej bardzo często wykorzystywane, nawet w sprzęcie profesjonalnym. W wersji z **rysunku 2b** do stabilizacji amplitudy służy termistor o ujemnym współczynniku cieplnym (NTC), który po powstaniu drgań pod wpływem prądu i nagrzewania zmniejsza swoją rezystancję, zmniejszając wzmocnienie.

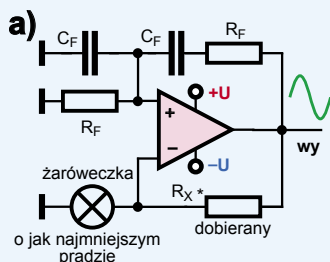
Jeżeli masz w domu żarówczkę o naprawdę małym prądzie, np. od choinki lub telefoniczną o prądzie 20mA, możesz spróbować zrealizować prościutki generator według rysunku 2a, zasilany napięciem symetrycznym $\pm 4,5V \dots \pm 9V$. Z uwagi na bardzo małą rezystancję zimnego włókna żarówki potrzebna wartość rezystancji R_X wyniesie kilkanaście do kilkudziesięciu omów, a wtedy problemem okaże się mała wydajność prądowa wzmacniacza operacyjnego.

Powtarzalność i dobre parametry zapewnia obwód regulacyjny z tranzystorem polowym złączowym (JFET) – prosty przykład na **rysunku 3a**. Jeszcze lepsze, znikomo małe zniekształcenia można uzyskać w generatorze z transoptorem zawierającym fotorezystor według idei z **rysunku 3b**. Dopracowane wersje takich generatorów z odpowiedniej jakości wzmacniaczem operacyjnym pozwalają wytworzyć bardzo czysty, niemal idealny przebieg sinusoidalny o zawartości zniekształceń rzędu tysięcznych części procenta.

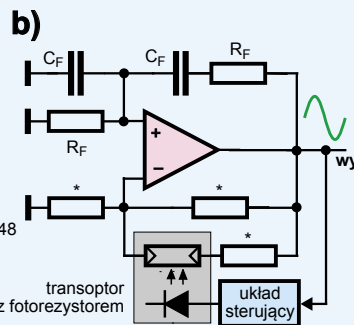
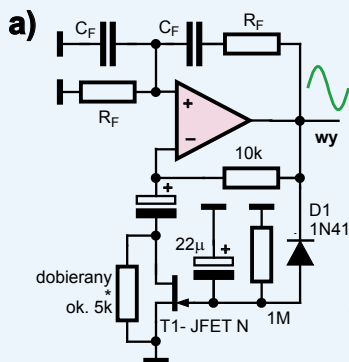
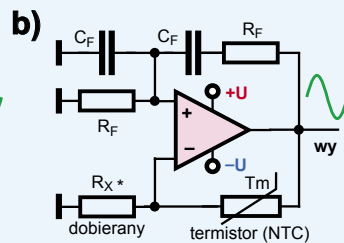
Przy okazji wspomnijmy, że **zniekształcenia nieliniowe** to realne zniekształcenia. To każde, jakiegokolwiek odkształcenie przebiegu sinusoidalnego, który, jak wiemy, jest przebiegiem podstawowym, elementarnym. Co bardzo ciekawe i ważne w praktyce, każdy przebieg okresowy, powtarzalny, jest „zniekształconym



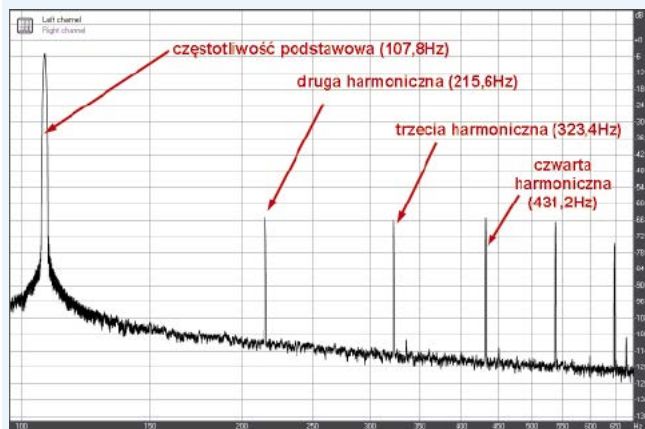
Generator z mostkiem Wiena



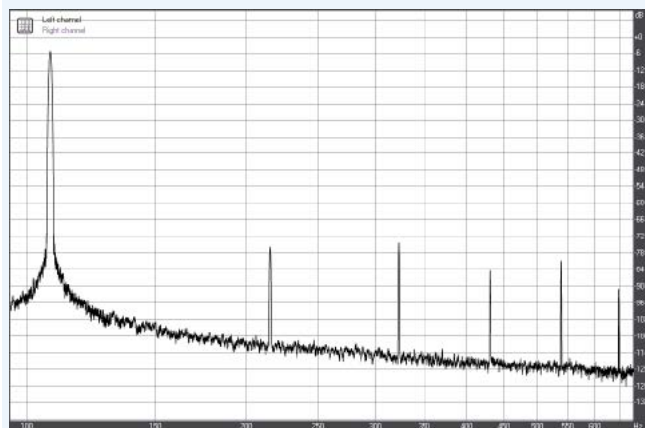
o jak najmniejszym prądzie

UWAGA! ZASILANIE NAPIĘCIEM SYMETRYCZNYM!

4



5



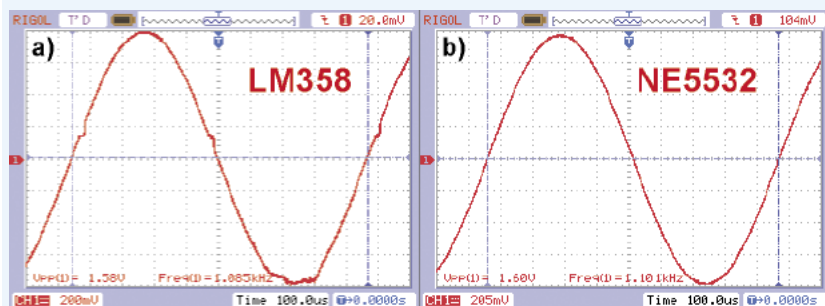
przebiegiem sinusoidalnym”. Jak to było zasygnalizowane w wykładzie 9, każdy przebieg powtarzalny o częstotliwości f jest w rzeczywistości sumą sinusoidalnych składowych o częstotliwościach harmonicznich $2f$, $3f$, $4f$, $5f$,... Na przykład przebieg prostokątny można rozłożyć, choćby za pomocą filtrów, na elementarne składowe sinusoidalne: podstawową o częstotliwości f , oraz na harmoniczne (wyłącznie nieparzyste) o częstotliwościach $3f$, $5f$, $7f$,... Można byłoby także zbudować z harmonicznich przebieg o dowolnym kształcie. Interesujące zobrazowanie tego znajdziesz np. na stronach: www.falstad.com/fourier czy też www.indiana.edu/~acoustic/s522/fourapdkp.html. Zniekształcenie przebiegu sinusoidalnego polega więc na obecności dodatkowych harmonicznich, dlatego mówimy o **zniekształceniach harmonicznich**. Natomiast **współczynnik THD** (Total Harmonic Distortion), podawany w procentach, wyraża sumaryczną zawartość wszystkich harmonicznich w danym przebiegu. Jeśli zawartość harmonicznich nie przekracza 1%, sygnał uznaje się za „przyzwoity

sinus”. Szczegółową analizę (metodami matematycznymi, z wykorzystaniem transformaty Fouriera) przeprowadzają analizatory widma, powszechnie stosowane w odtwarzaczach audio. Dostępne są też programy komputerowe do takich pomiarów, jak choćby słynny darmowy **RMAA** (<http://audio.rightmark.org/download.shtml>). Pochodzący z niego **rysunek 4** pokazuje zawartość harmonicznich w sygnale generatora z ćwiczenia wstępnego. Jak widać, harmoniczne są o około 60dB, czyli 1000 razy mniejsze od składowej podstawowej, co oznacza, że zniekształcenia są rzędu 0,1%. Nasz wzmacniacz operacyjny LM358 ma słabą dynamikę – wymiana na szybszy i lepszy NE5532 (którego, niestety, nie masz w zestawie EdW09) pozwala, jak pokazuje **rysunek 5**, uzyskać harmoniczną rzędu -70dB poniżej podstawowej, czyli znakomitą wartość współczynnika THD rzędu 0,03%. Natomiast popularny wzmacniacz TL072 nie zapewnia takiej poprawy.

W układach audio często wykorzystuje się częstotliwość 1kHz, którą moglibyśmy uzyskać przy $C_p = 10nF$ i $R_p = 15,9k\Omega$. Jednak przy takich elementach i częstotliwości przebieg jest wyraźnie

zniekształcony, jak pokazuje **rysunek 6a**. Natomiast **rysunek 6b** pokazuje przebieg przy zastosowaniu wzmacniacza operacyjnego NE5532 (**fotografia 7**). Wtedy może- my uzyskać

6





zniekształcenia THD rzędu 0,1% – znakomicie jak na tak prosty układ, zawierający wyłącznie nieprecyzyjne elementy. W lepszej wersji generatora tytułowego zastosowalibyśmy też stabilniejsze rezystory o rezystancji 1% i dobralibyśmy tranzystory T3, T4, by miały jak najbardziej jednakowe parametry (wzmocnienie prądowe). Na wyjściu należałoby jeszcze dodać (zaznaczony na rysunku A szarym kolorem) potencjometr, np. o wartości 1kΩ...4,7kΩ.

Zachęcam do samodzielnych eksperymentów z tego rodzaju generatorami. Jeżeli nawet nie masz oscyloskopu, do pomiarów możesz wykorzystać komputer/laptop, w którym jest dobra karta z wejściem liniowym (wejście mikrofonowe zwykle się nie nadaje, bo dodany jest tam wzmacniacz o słabych parametrach) z zainstalowanym odpowiednim programem (**fotografia 8**). Z darmowych, oprócz wspomnianego **RMAA – RightMark Audio Analyzer**, możesz wykorzystać **Audacity** (<http://audacity.sourceforge.net>) do nagrywania i analizowania widma (**rysunek 9**). Możesz też wykorzystać zaskakująco potężny i niezbyt skomplikowany w obsłudze podstawowych funkcji analizator **SpectrumLab** ze strony www.qsl.net/dl4yhj/spectra1.html, a konkretnie z linku http://dl4yhj.ssl7.com/speclab/install_speclab.zip.

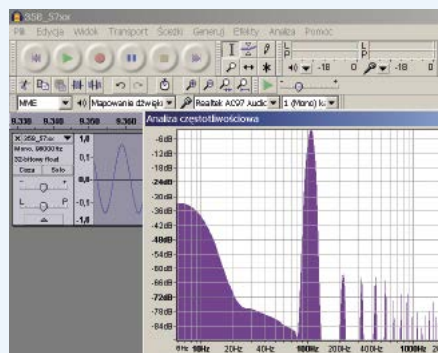
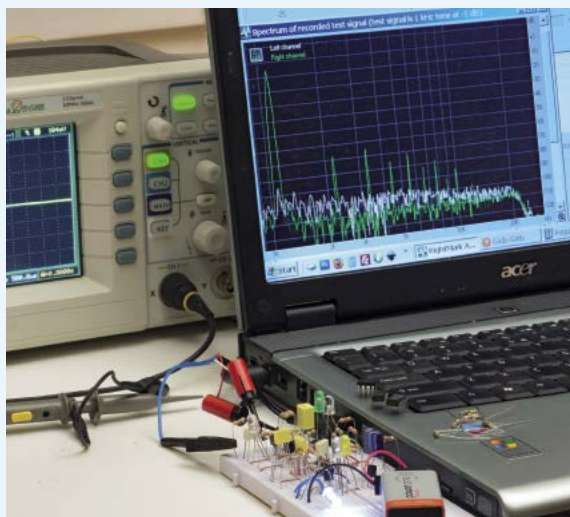
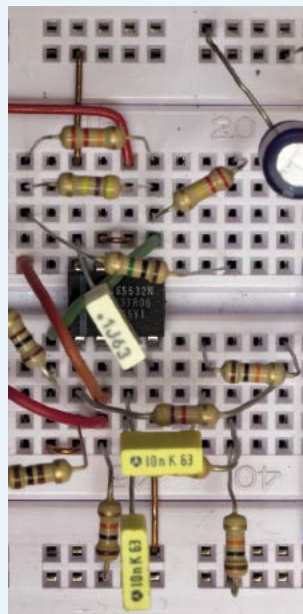
W darmowym SpectrumLab oprócz dokładnego analizatora znajdziesz też funkcję dwukanałowego oscyloskopu – **rysunek 10**. Zamienisz swój komputer w oscyloskop, tylko pamiętaj, że na wejście karty dźwiękowej nie można podać zbyt dużych napięć i potrzebny będzie dzielnik (stąd R14, R15 na rysunku A i w modelu).

Przebieg sinusoidalny można też wytwarzać na kilka innych sposobów.

Generatory z przesuwnikiem fazowym. Z wykładów 9 i 10 dowiedzieliśmy się, że w obwodach RC (także RL) występuje przesunięcie fazy między przebiegiem wejściowym i wyjściowym. Jak pokazuje **rysunek 11**, jeden obwód (filtr) RC może przesunąć fazę maksymalnie o 90 stopni, a teoretycznie dwa jednakowe obwody RC mogłyby przesunąć fazę o 180 stopni, czyli **odwrócić fazę – a wtedy sprzężenie zwrotne z ujemnego stanie się dodatnie**. Niestety, czym większe jest przesunięcie fazy, tym większe jest też tłumienie sygnału przez taki filtr – wróć do początku wykładu 10 i zamieszczonych tam rysunków 1 i 2.

Aby przesunąć fazę o 180 stopni, czyli „odwrócić” sygnał i nie stłumić go przy tym nadmiernie, potrzebne są co najmniej trzy ogniwa RC, czyli co najmniej filtr 3-ogniowy. Zgodnie z rysunkiem 11, prosty obwód z **rysunku 12a** przesuwa fazę o 180 stopni dla jakiejś częstotliwości, większej od $f_0 = 1 / 2\pi R_F C_F$ i przy okazji znacznie tłumi sygnał. Jeśli dodamy wzmacniacz odwracający odpowiednim wzmocnieniu (R_B/R_A), wtedy skompensujemy to tłumienie i otrzymamy generator (**rysunek 12b**).

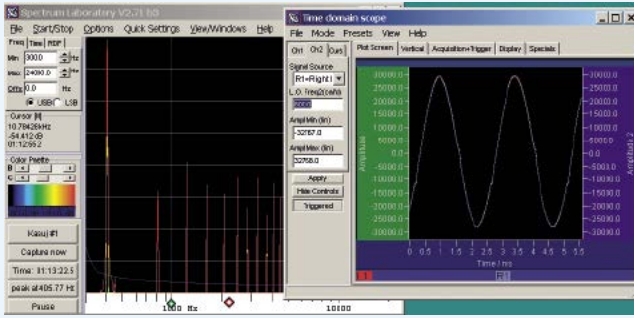
Ogólnie biorąc, **wzmacniacz ze sprzężeniem zwrotnym zamienimy w generator przebiegu sinusoidalnego, jeśli dla jakiejś częstotliwości wypadkowe**



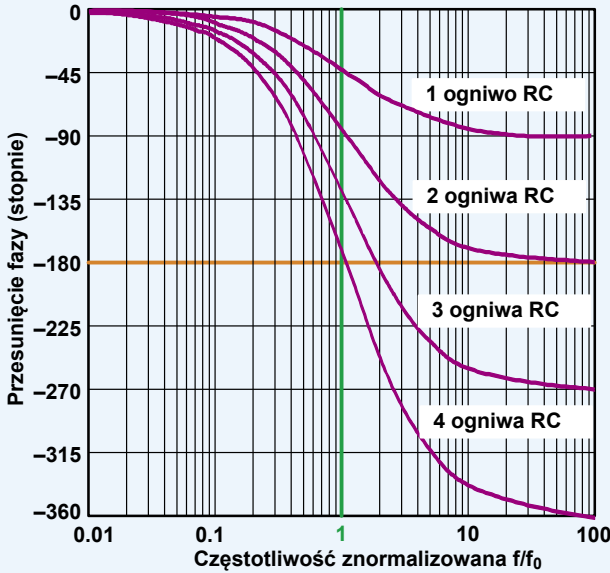
7

8

9



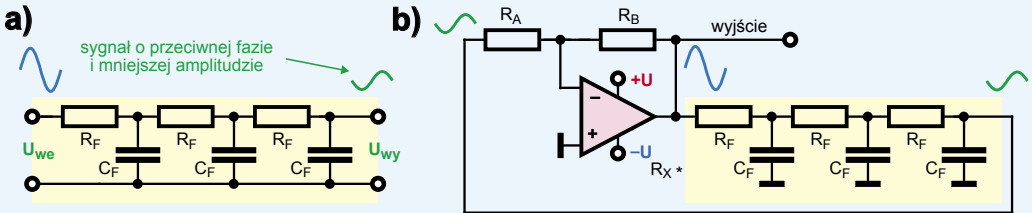
10



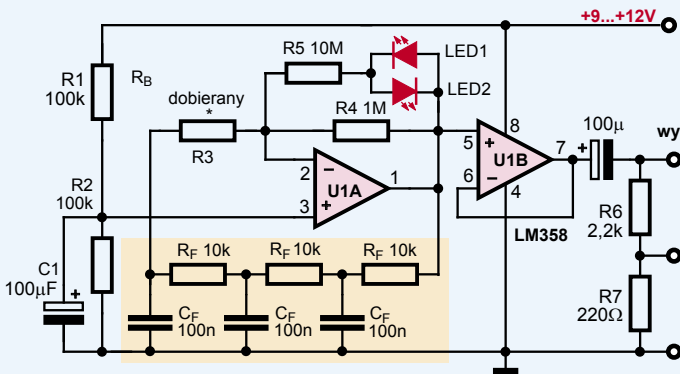
11

przesunięcie fazy będzie równe 0 stopni (dodatnie sprzężenie zwrotne) i jednocześnie wzmocnienie wypadkowe układu będzie dokładnie równe 1 – są to tzw. warunki fazy i amplitudy. Te same warunki dotyczą też generatora z mostkiem Wiena. Gdy wzmocnienie wypadkowe będzie większe od jedności, układ będzie generował przebieg z obciętymi wierzchołkami – trapezowy, a nawet prostokątny. Gdy wzmocnienie będzie mniejsze od jedności, układ nie będzie generował, tylko będzie filtrem „dzwoniącym” tym bardziej, im bliższe jedności będzie wzmocnienie wypadkowe.

Na rysunku 13 i na fotografii 14 masz generator z trzystopniowym przesuwnikiem fazowym. Wartości R_F oraz C_F nie muszą być jednakowe – zawsze dla jakiejś częstotliwości przesunięcie fazy wyniesie 180 stopni i taką częstotliwość może wytworzyć generator, jeżeli wzmocnienie wypadkowe będzie odpowiednio. Rezystancje R_4 i R_3 ustalają wzmocnienie wypadkowe na wartość nieco większą od jedności, żeby po włączeniu zasilania generator pewnie rozpoczął pracę. W praktyce R_3 trzeba dobrać – zwiększać, zaczynając od 22kΩ aż do progu



12



13

gaszenia drgań. W moim modelu ta rezystancja jest złożona z szeregowo połączonych rezystorów 22kΩ, 4,7kΩ, 1kΩ, 470Ω. Obwód z diodami LED1, LED2 i rezystorem R5 jest ogranicznikiem amplitudy. Taki prosty ogranicznik wprowadza oczywiste pewne zniekształcenia, niemniej przy dużej wartości R5 (10MΩ) możemy uzyskać generator przyzwoitego przebiegu sinusoidalnego

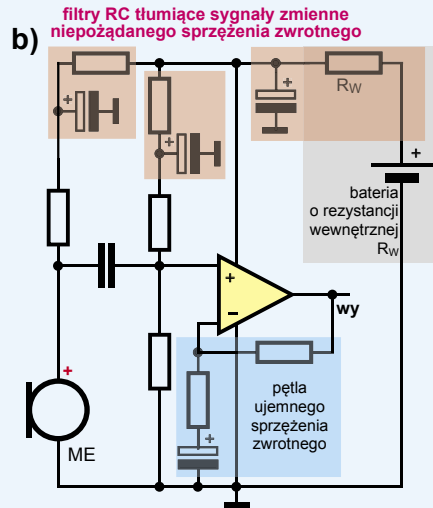
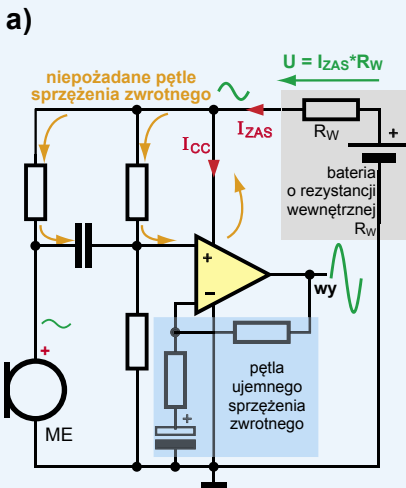
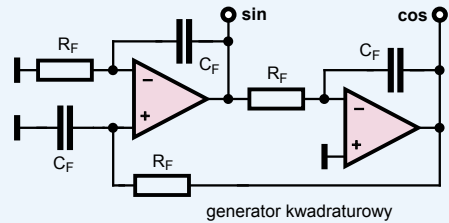
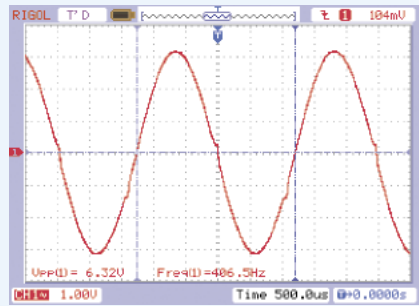
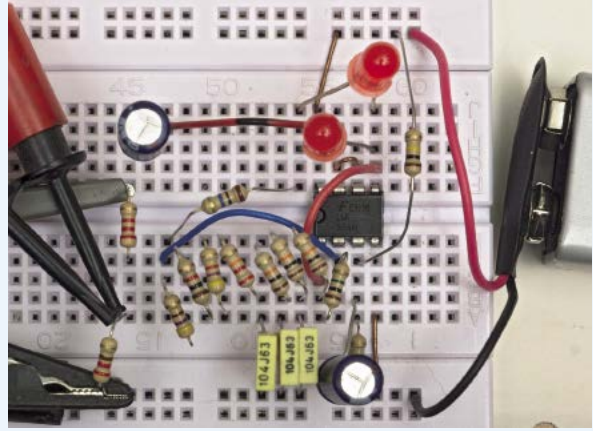


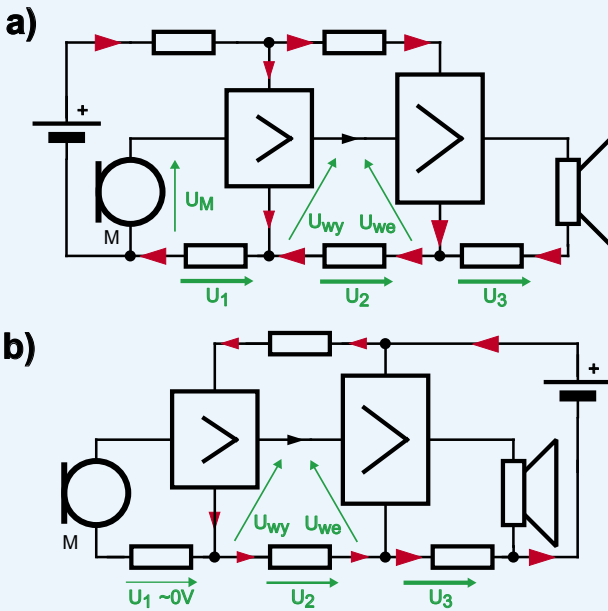
(rysunek 15). Znow kiepskie właściwości wzmacniacza LM358 spowodowały widoczną deformację sygnału, natomiast ze wzmacniaczem NE5532 można uzyskać zniekształcenia rzędu 0,2%.

Taki generator z przesuwnikiem fazowym jest bardziej kapryśny niż generator z mostkiem Wiena i nie wykorzystujemy go w praktyce. Rysunek 16 pokazuje koncepcję generatora kwadraturowego, który na swoich dwóch wyjściach daje przebiegi sinusoidalne o fazach przesuniętych o 90 stopni, czyli o jedną czwartą okresu. W praktyce także i taki generator musi być wyposażony w jakiś obwód ograniczania i stabilizacji amplitudy.

W Internecie znajdziesz takie i pokrewne generatory z przesuwnikami fazowymi, np. generator Bubby (*Bubba oscillator*), który daje na czterech wyjściach sygnały o fazie przesuniętej o 45 stopni. Generatory z przesuwnikami fazowymi doprowadziły nas do kolejnego bardzo ważnego tematu.

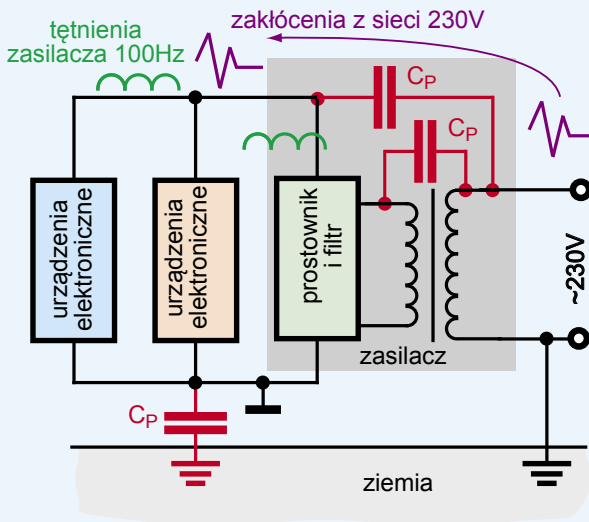
Samowzbudzenie. Problem obwodów zasilania. Co ważne, kilka obwodów RC przesunie o 180 stopni fazę sygnałów o jakiejś częstotliwości i tym samym zmieni sprzężenie z ujemnego na dodatnie. Tłumaczy to, dlaczego wzmacniacze dość często same zmieniają się w generatory, czyli następuje w nich niepożądane samowzbudzenie. Dotyczy to np. konstruowanych przez hobbystów tranzystorowych wzmacniaczy mocy. Otóż w realnych układach wzmacniających występuje mnóstwo „ukrytych” obwodów opóźniających RC, zarówno wewnątrz wzmacniacza, w pętli sprzężenia zwrotnego, a także w obwodach zasilania. Zwykle takie szkodliwe rezystancje i pojemności są małe, więc znaczące przesunięcie i odwrócenie fazy





nie, więc łatwo zamienia się w generator, bo dla jakiejś częstotliwości spełnione są wspomniane warunki amplitudy i fazy. Aby do tego nie dopuścić, musimy stłumić sygnał niepożądanego sprzężenia zwrotnego, czyli zmniejszyć tętnienia w obwodzie szyny zasilania. Między innymi dlatego w obwodzie zasilania włączamy filtry RC – przykład na **rysunku 17b**. Tłumią one niepożądane sygnały, ale jednocześnie przesuwają ich fazę – jeśli okażą się za mało skuteczne, to one wyznaczają częstotliwość generacji podczas samowzbudzenia.

Problem niepożądanych pętli sprzężenia zwrotnego występuje też w obwodzie masy. Ćwiczenia wykładu 12 pokazały problem „zapomnianych rezystancji” i udowodniły, że na rezystancjach ścieżek i przewodów masy, gdzie płyną duże prądy, występują znaczące spadki napięć, które mogą być porównywalne z sygnałami z mikrofonu – niewątpliwie nie będzie to korzystne. Zależnie od wzajemnego rozmieszczenia obwodów, gdzie płyną większe prądy, te spadki napięć mogą się dodawać lub odejmować od sygnałów wejściowych. Po pierwsze, obwód masy powinien więc mieć jak najmniejszą rezystancję, dlatego zwykle ścieżki i połączenia masy są grubsze od innych ścieżek i połączeń. Po drugie, problem może zostać zminimalizowany przez odpowiednie skonfigurowanie obwodów masy.



skutkujące samowzbudzeniem występuje dopiero przy wysokich częstotliwościach. I zwykle na takich wysokich częstotliwościach wzbudza się system.

Trzeba też wiedzieć i pamiętać, że we wzmacniaczach tworzą się dodatkowe obwody sprzężenia zwrotnego, między innymi przez obwody zasilania i obwody masy. I tak jak ilustruje **rysunek 17a**, choćby tylko z uwagi na spadek napięcia na niezerowej rezystancji wewnętrznej zasilacza/baterii R_w napięcie zasilające waha się w takt poboru prądu (w takt sygnału). Te zmiany wracają potem przez rezystory polaryzujące na wejście wzmacniacza – niewątpliwie tworzą się dodatkowe pętle sprzężenia zwrotnego. Sprzężenie zwrotne jest tym silniejsze, im większa jest rezystancja wewnętrzna baterii (R_w). Wzmacniacz mikrofonowy z zasady ma duże wzmocnienie

Rysunek 18a pokazuje ewidentnie błędną konfigurację, ponieważ duże prądy zasilające wzmacniacza mocy, modulowane wzmacnianym sygnałem, powodują znaczące spadki napięć w obwodzie masy przedwzmacniacza. Spadek napięcia U_1 dodaje się do sygnału mikrofonowego (lub odejmuje), a spadek napięcia U_2 dodaje się lub odejmuje od sygnału wyjściowego przedwzmacniacza. Na pewno spowoduje to zniekształcenia i grozi też samowzbudzeniem systemu. Prawidłowa jest konfiguracja z **rysunku 18b**, gdzie przez masę przedwzmacniacza nie płyną duże prądy zasilające wzmacniacza mocy. Rezystancje w obwodzie masy są identyczne, ale spadki napięć na nich (U_1, U_2) są teraz zdecydowanie mniejsze i problem jest mocno



zredukowany (choć nie wyeliminowany całkowicie).

W literaturze często zaleca się konfigurację zwaną *star ground*, czyli masę w postaci gwiazdy. Nie zawsze jednak jest to optymalne, a czasem wręcz niemożliwe. Problem prowadzenia obwodów masy okazuje się poważny, szczególnie w urządzeniach audio, w rozbudowanych układach pomiarowych, a także systemach, gdzie układy analogowe (wzmacniacze) współpracują z cyfrowymi (np. mikroprocesorami).

Aby uniknąć problemu, stosuje się tam oddzielne obwody zasilania układów analogowych i cyfrowych, a masy analogową (GNDA) i cyfrową (GNDD) łączy się tylko w jednym, sensownym punkcie.

Zakłócenia zewnętrzne. Omawiany właśnie problem niepożądanych sygnałów w obwodach zasilania i masy dotyczy nie tylko samowzbudzenia i zniekształceń, ale także przenikania zakłóceń zewnętrznych. I tak **obwód masy nigdy nie powinien tworzyć zamkniętej pętli**, ponieważ w takiej jednozwojowej cewce „obce” pola magnetyczne zaindukują prądy, które wywołają spadki napięć i przejdą do toru sygnałowego, głównie jako brum sieci 50Hz.

Z kolei napięcie zasilające może zmieniać się pod wpływem czynników przechodzących z sieci energetycznej, jak ilustruje **rysunek 19**. Będą to niedoskonałe słumione tętnienia wyprostowanego napięcia sieci (100Hz) oraz różne krótkie i szybkie zakłócenia impulsowe z sieci energetycznej przechodzące przez szkodliwe pojemności C_p w zasilaczu i pojemności do ziemi.

Problem ten najostrzej występuje w układach z lampami elektronowymi. Układy z tranzystorami komplementarnymi, w tym wzmacniacze operacyjne, łatwiej jest optymalizować pod względem przenikania zakłóceń z szyny zasilania. W katalogach wzmacniaczy operacyjnych podawany jest parametr oznaczany PSR lub PSRR – tłumienie tętnień zasilania, wyrażany w decybelach, a czasem też zależność tego tłumienia od częstotliwości i temperatury. Niestety, choć wzmacniacze operacyjne dobrze tłumią tętnienia zasilania, jednak te mogą przenikać do toru sygnałowego przez inne obwody. Dlatego w niektórych układach spotyka się rozbudowane, kilkustopniowe filtry obwodów zasilania i obwodów polaryzacyjnych, niekiedy zawierające także dławiki (cewki), a regułą jest równoległe łączenie kondensatora elektrolitycznego 10 μ F...1000 μ F, który dobrze radzi sobie z przebiegami o mniejszych częstotliwościach z małym kondensatorem ceramicznym 100nF, który lepiej tłumie ewentualne „śmieci” o wysokich częstotliwościach. Dobrym zwyczajem jest zasilanie obwodów sygnałowych ze (scalonych) stabilizatorów. Natomiast wzmacniacze mocy audio z zasady są zasilane napięciem filtrowanym, ale niestabilizowanym.

Na koniec gorąco zachęcam do samodzielnych eksperymentów – zbuduj tego rodzaju czuły wzmacniacz mikrofonowy, najlepiej dwustopniowy, na przykład według **rysunku 20** (w zasadzie warto byłoby dołączyć jeszcze monitor napięć zmiennych z diodą LED, np. wg rysunku A, by kontrolować też wzbudzenie na częstotliwościach ponadakustycznych). Dołącz do wyjścia słuchawki, ale **NIE podłączaj mikrofonu**. Usuwając zaznaczone różowymi podkładkami kondensatory, przekonaj się, na ile skłonność do samowzbudzenia zależy od skuteczności filtracji zasilania. Podłączaj zasilanie w różnych miejscach. Możesz też rozdzielić obwód masy i pomiędzy takie dwie części włączyć rezystor 10 omów (lub dwa połączone równoległe, dające 5 Ω), udający fatalnie zrealizowane połączenie – dołączaj zasilanie z różnych stron takiej „rezystancji masy”.

W wykładzie 14 omówiliśmy dwa bardzo ważne zagadnienia – realizację generatorów sinusoidalnych oraz zapobieganie samowzbudzeniu. Za miesiąc nadal będziemy wykorzystywać wzmacniacze operacyjne. ■

