

PKE – Praktyczny Kurs Elektroniki

Wykład 10

Illuminofonia

Na powyższej fotografii pokazany jest układ **Illuminofonii**. Dwie pracujące równolegle diody LED zaświecają się, gdy do mikrofonu dotrą głośniejsze dźwięki o średnich częstotliwościach. Fotografia wstępna pokazuje wersję jednokanałową z filtrem średnich częstotliwości. W układzie można zastosować filtr o innych parametrach. Z uwagi na ograniczenia wynikające z zestawu elementów EdW09, trudno byłoby wykonać układ kilkukanałowy.

Opis układu dla „zaawansowanych”

Schemat ideowy **Illuminofonii** z fotografii tytułowej pokazany jest na **rysunku A**. Na schemacie żółtymi podkładkami wyróżnione są dwa wzmacniacze przebiegów zmiennych (W1, W2). Taką konfigurację

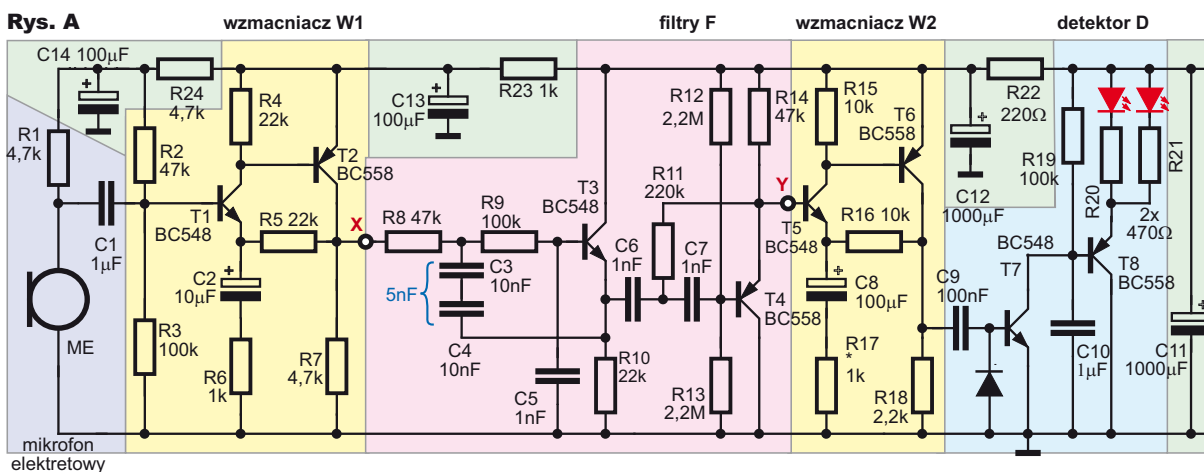
wykorzystywaliśmy w ostatnim układzie poprzedniego wykładu. Wzmocnienie tych wzmacniaczy wyznaczone jest przez wartość rezystorów R6 i R17 (a właściwie stosunki R5/R6 oraz R16/R17). Różną podkładką wyróżniony jest obwód filtru F, a właściwie dwóch kaskadowo połączonych filtrów: dolnoprzestupowego z tranzystorem T3 i górnoprzestupowego (T4). Podkładka niebieska wyróżnia obwód detektora aktywnego i sterownika diod LED.

Zasada działania jest bardzo prosta – silniejsze dźwięki powodują zaświecanie diod LED. Sygnał z właściwie spolaryzowanego mikrofonu elektretowego ME jest wstępnie wzmacniany we wzmacniaczu W1, potem filtr F przepuszcza tylko sygnały z określonego pasma częstotliwości – w tym przypadku przepusz-

cza średnie tony, natomiast tłumi i tony niskie, i wysokie. Przepuszczone sygnały są dodatkowo wzmacniane we wzmacniaczu W2. Sygnały o amplitudzie powyżej 0,6V przechodzą przez C9 i powodują otwieranie tranzystora T7, który pracuje tu w roli detektora. Otwarcie tranzystora T7 nawet na krótki czas rozładuje C10, który potem powoli ładuje się przez R19, zapobiegając zbyt szybkiemu migotaniu diod. Obniżenie napięcia na kolektorze T7 i na C10 powoduje przewodzenie T8 i zaświecenie diod LED.

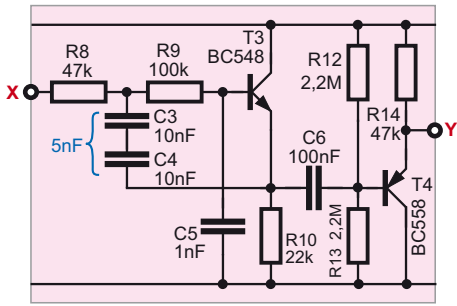
Zwróć uwagę na wyróżnione zielonymi podkładkami obwody filtracji zasilania, niezbędne w układach o dużym wzmocnieniu.

Montując układ, nie zapominaj o prawidłowym umieszczeniu elementów biegunowych, w tym mikrofonu elektretowego ME,



którego wprowadzenie ujemne połączone jest z obudową – szczegóły podane były w poprzednim wykładzie.

Wersja z rysunku A i fotografii tytu-



Rys. B łożewj reaguje na tony średnie. Układ można łatwo zmodyfikować, by reagował na tony niskie. **Rysunek B** pokazuje zmodyfikowany obwód filtru F, gdzie filtr dolnoprzepustowy ma częstotliwość graniczną około 130Hz. Moglibyśmy całkowicie zrezygnować z filtru górnoprzepustowego, ale pozostawiamy tranzystor T4 tylko dlatego, by zachować optymalne napięcia stałe w obwodzie wzmacniacza W2. Obwód C6+R12+R13 wprawdzie jest filtrem górnoprzepustowym, ale o częstotliwości granicznej około 1,6Hz, więc na pewno nie ogranicza pasma akustycznego, które zaczyna się od 16...20Hz.

Aby natomiast iluminofonia reagowała na tony wysokie, wystarczy zmodyfikować filtr według **rysunku C**. Tu mamy wyłącznie filtr górnoprzepustowy (o częstotliwości granicznej około 2,5kHz). W takich wersjach zapewne warto zmienić też kolor LED.

W każdej wersji trzeba będzie prawdopodobnie dobrać wzmacnienie W2 za pomocą rezystora R17 (100Ω...10kΩ), by uzyskać zbliżoną czułość dla wszystkich pasm częstotliwości. Z kolei dynamikę świecenia diody można zmienić według upodobania, zmieniając pojemność C10 (0nF, 10nF, 100nF, 1μF) i rezystancję R19 (22kΩ...220kΩ). Jasność diod LED można zmieniać za pomocą rezystorów R20 i R21 (220Ω...1kΩ), pamiętając, że czym jaśniej świecą diody, tym szybciej rozładuje się mała bateria 9-woltowa. Taki układ lepiej byłoby zasilac z akumulatora lub z zasilacza stabilizowanego.

Kto ma więcej elementów, może zbudować iluminofonię trzykanałową według idei z **rysunku D**. Mikrofon i wzmacniacz W1 pozostaną wspólne. Trzeba tylko zwielowokrotnić zespoły filtrów F według rysunków B i C, wzmacniacza W2 i detektora D.

Poznajemy elementy i układy elektroniczne

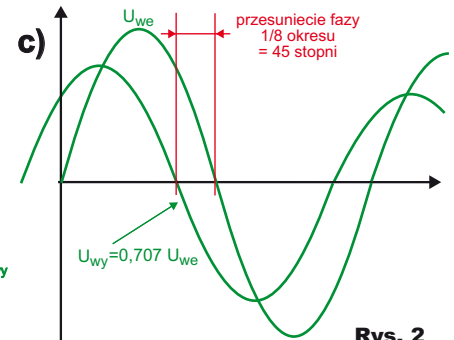
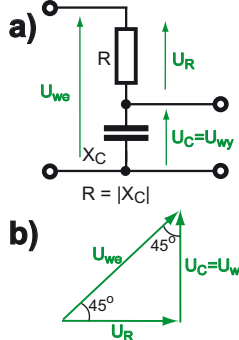
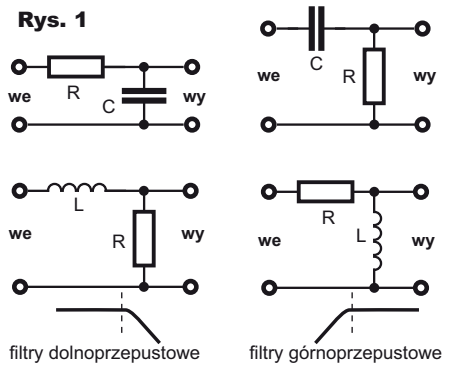
Filtry. Wcześniej mówiliśmy, że dla częstotliwości wysokich kondensator stanowi zwarcie, a dla częstotliwości bardzo

niskich i dla prądu stałego – przerwę. To ogromne uproszczenie! W poprzednim wykładzie nieco uściśliliśmy to zagadnienie. Wiemy, że reaktancja kondensatora i cewki liniowo zmienia się z częstotliwością, a w skali podwójnie logarytmicznej wykres jest linia prosta. Wiemy też już, że dzielnik zawierający rezystor i kondensator jest filtrem RC, przepuszczającym i tłumiącym sygnały o różnych częstotliwościach. Poznaliśmy prosty filtr RC dolnoprzepustowy i górnoprzepustowy – zobacz rysunek 10 w poprzednim wykładzie. Analogicznie można byłoby zrealizować filtry dolno- i górnoprzepustowe RL z użyciem cewek, jak pokazuje **rysunek 1**. W praktyce tego nie robimy z uwagi na liczne wady cewek. Wykorzystujemy natomiast

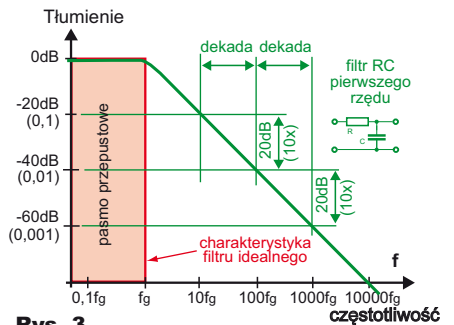
powszechnie obwody RC, nie zawsze traktując je zresztą jako filtry. Rozszerzymy informacje z poprzedniego wykładu: w takich obwodach (filtrach) przy jakiejś częstotliwości f liczbową wartość reaktancji X staje się równa rezystancji R . W przypadku filtrów RC mamy $X_C = 1/2\pi$, więc umowna częstotliwość graniczna ma wartość $f_g = 1/2\pi RC$. Przy tej właśnie częstotliwości $X_C = R$, jak dla filtru dolnoprzepustowego pokazuje **rysunek 2a**. Pomimo równości $X_C = R$, z uwagi na przesunięcie fazy w kondensatorze, napięcie wyjściowe nie jest dwa razy mniejsze od napięcia wyjściowego, tylko stanowi około 0,707 napięcia wyjściowego (dokładnie jest pierwiastek z dwóch razy

mniejsze). Ilustruje to graficznie **rysunek 2b**. Te 0,707 wartości napięcia wyjściowego to w mierze logarytmicznej -3dB (dokładniej biorąc -3,103dB). Co ważne, wyjściowy przebieg sinusoidalny o częstotliwości f_g jest przesunięty względem

Rys. 1



Rys. 2



Rys. 3

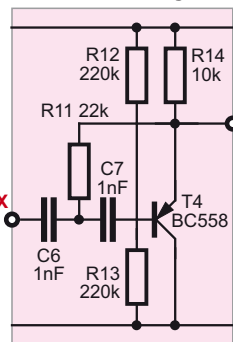
wejściowego dokładnie o 45 stopni, co jest zilustrowane na **rysunku 2c**.

A tak przy okazji: zapamiętaj, że we wszystkich filtrach jako częstotliwość graniczną przyjmujemy taką, przy której sygnał jest tłumiony o 3dB. Znormalizowaną charakterystykę amplitudową omawianych prostych filtrów RC (oraz RL) poznałeś w poprzednim wykładzie na **rysunku 10d**.

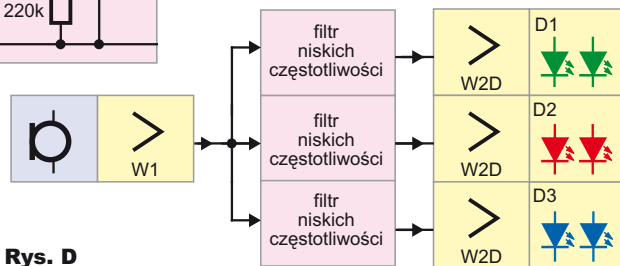
Idealem byłby filtr o dokładnie prostokątnej charakterystyce, narysowanej kolorem czerwonym na **rysunku 3**. Taki filtr w paśmie przepustowym miałby tłumienie równe zero – przepuszczałby pożądane sygnały, a w paśmie zaporowym miałby

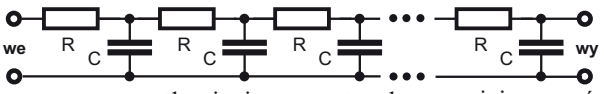
tłumienie nieskończenie wielkie. Idealnych filtrów nawet nie próbuje realizować. Poznane proste filtry RC, choć bywają bardzo często wykorzystywane, nie są zbyt skuteczne, czyli mają małą stromość zboczności charakterystyki. Ich

Rys. C



Rys. D





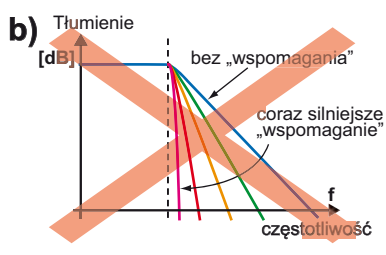
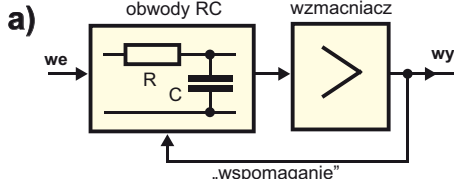
Rys. 4 tłumienie wzrasta dwukrotnie przy dwukrotnej zmianie częstotliwości, czyli 6 decybeli na oktawę (6dB/okt.), a dziesięciokrotnie przy dziewięciokrotnej zmianie częstotliwości, czyli 20 decybeli na dekadę (20dB/dek.). Ilustruje to zielona charakterystyka na rysunku 3. Są to tak zwane filtry *pierwszego rzędu*. Często potrzebne są skuteczniejsze filtry o ostrzejszych, bardziej stromych zboczach. W praktyce skutecznych filtrów nie realizujemy przez kaskadowe połączenie kilku jednakowych sekcji według **rysunku 4**, ponieważ przy takim połączeniu poszczególne sekcje wpływają na siebie i efekt byłby daleki od oczekiwanego. Problem między innymi w tym, że każda następna sekcja stanowi obciążenie dla poprzedniej.

Zagadnienia związane z bardziej złożonymi, „ostrzejszymi” filtrami są bardzo trudne, a zrozumienie ich właściwości wymaga znajomości wyższej matematyki. Nie sposób tego krótko wytłumaczyć. Przyjmij tylko do wiadomości, że ist-

nieje mno-
stwo odmian
najróżniej-
szych fil-
trów, gdzie
częstotliwość
wyznaczają
odpowiednio
dobre
elementy
RC, a właści-
wości są
znakomicie
poprawione

Rys. 5 przez zasto-
wmacnia-
czami
sowa n i e
czy. Takie filtry RC ze wzmacniaczami
nazywamy *filtrami aktywnymi*.

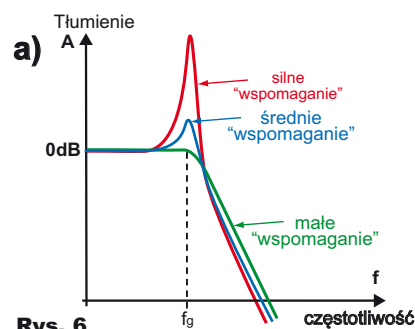
Można w uproszczeniu powiedzieć, że filtr aktywny to filtr RC „wspomagany” wzmacniaczem, co dla filtra dolnoprzepustowego można zobrazować na **rysunku 5a**. Ale tu od razu trzeba przestrzec przed błędnym wyobrażeniem. Otóż początkujący często wyobrażają sobie, że czym większe, silniejsze jest to „wspomaga-



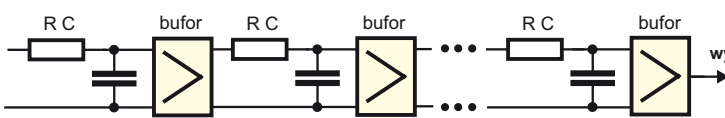
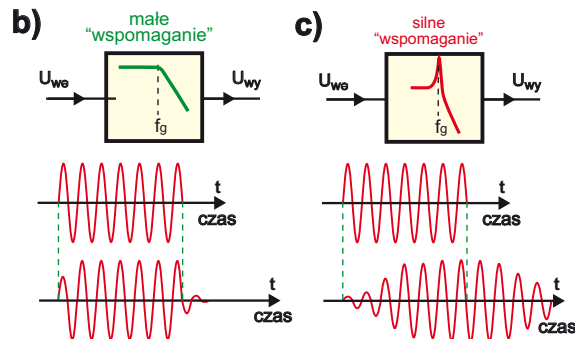
styki amplitudowej filtru. Takie błędne wyobrażenie zobrazowane jest na (przekreślonym) **rysunku 5b**. W rzeczywistości silniejsze „wspomaganie” praktycznie nie zmienia nachylenia zbocza charakterystyki, a za to ma silny wpływ na inne ważne właściwości. Otóż po pierwsze przy silnym „wspomaganie”, na skraju charakterystyki amplitudowej, w okolicy częstotliwości granicznej f_g

pojawia się tzw. podbicie – niepożądany garb, jak pokazuje w uproszczeniu **rysunek 6a**. Po drugie mówimy, że filtr zaczyna „dzwonić”, to znaczy drgania o częstotliwościach zbliżonych do granicznej f_g utrzymują się w nim po zaniku sygnału wejściowego, co z kolei ilustruje **rysunek 6b** oraz **6c**. Najczęściej silne „wspomaganie” nie jest więc pożądane, a jest wręcz wadą.

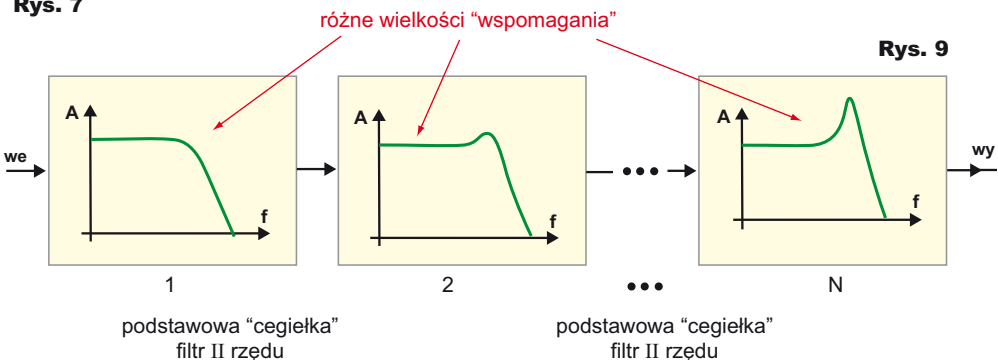
W praktyce, aby uzyskać filtr o większej stromości zbocza, łączymy kaskadowo kilka odpowiednio dobranych „sekcji RC”. W najprostszym przypadku można poprawić stromość, stosując *jednakowe* sekcje RC i bufor (wtórniki) pośredniczące według **rysunku 7**. W ten sposób moglibyśmy poprawić stromość zbocza filtru, uzyskując nachylenie $n \cdot 20\text{dB/dekadę}$, ale w większości zastosowań nie jest to optymalny sposób, choćby z uwagi na nieoptymalny przebieg charakterystyki w pobliżu



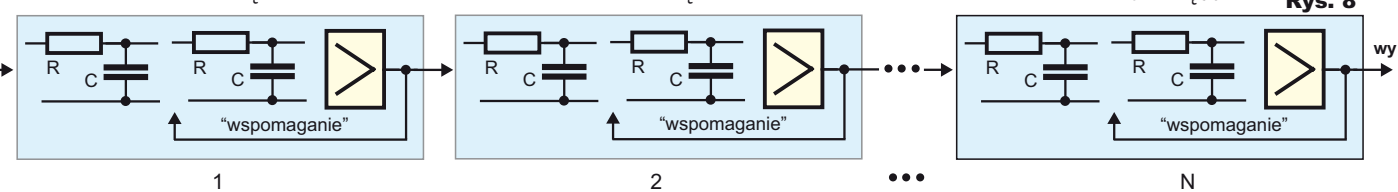
Rys. 6



Rys. 7

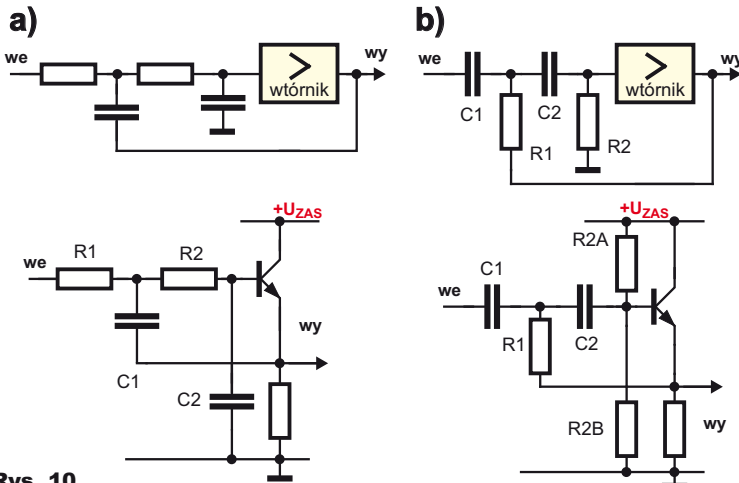


Rys. 9



Rys. 8

nie”, tym bardziej strome jest zbocze charakterystyki częstotliwości granicznej f_g . Filtry o dużej stromości zbocza realizujemy nieco inaczej. W praktyce powszechnie wykorzystuje się liczne odmiany filtrów aktywnych, gdzie podstawowa „sekcja – cegielka” to tak zwany filtr *drugiego rzędu*, który daje stromość charakterystyki 40dB/dek, czyli 12dB oktawę, co odpowiada złożeniu dwóch ogniw RC. Łączymy kaskadowo kilka takich „cegiełek” drugiego rzędu według **rysunku 8**, przy czym zależnie od pożądanych parametrów całości dotyczących podbicia i „dzw-



Rys. 10

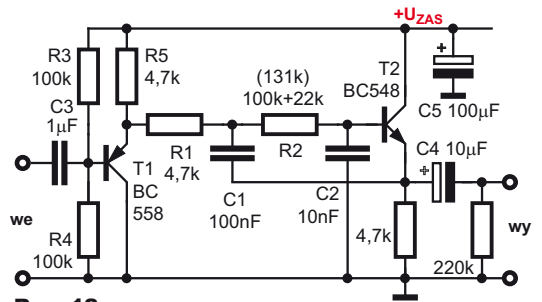
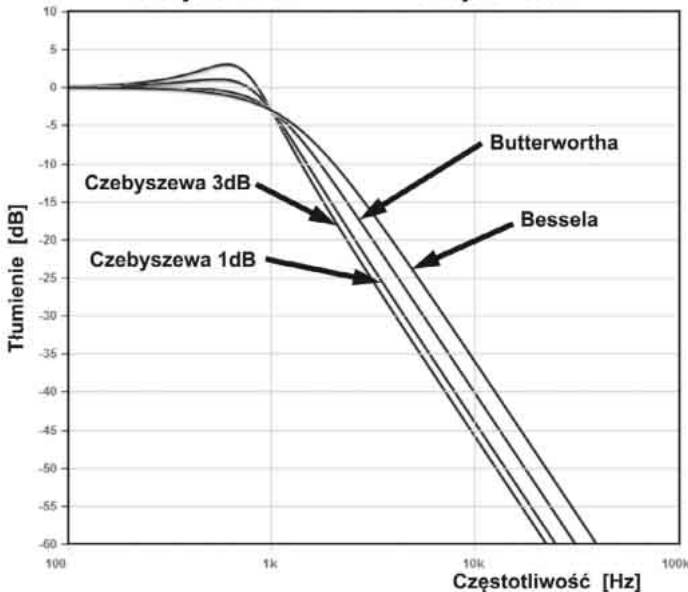
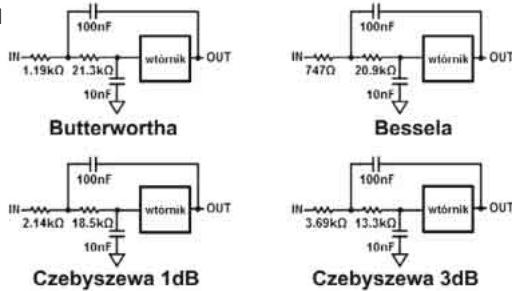
nienia”, cegiełki te nie są identyczne, tylko różnią się wartościami elementów. Przykład pokazany jest w uproszczeniu w rysunku 9.

W praktyce bardzo często wystarczają filtry drugiego rzędu, ale można też spotkać filtry 20. rzędu, czyli zawierające aż dziesięć „cegiełek”. Nie zaszkodzi wiedzieć, że dziś oprócz omawianych właśnie filtrów analogowych, coraz częściej wykorzystuje się ich odpowiedniki cyfrowe, gdzie rolę filtru odgrywa odpowiedni program – to jednak zupełnie oddzielne zagadnienie.

wspomnijmy tylko o jednym ich rodzaju. Fachowo bywają one nazywane filtrami Sallena-Keya i są odmianą tzw. filtrów ze źródłem sterowanym (VCVS). My wykorzystajmy proste rozwiązanie, gdzie wzmacniaczem jest... zwyczajny wtórnik,

Rysunek 10a pokazuje schemat filtru dolnoprzepustowego. „Wspomaganie” z wyjścia do

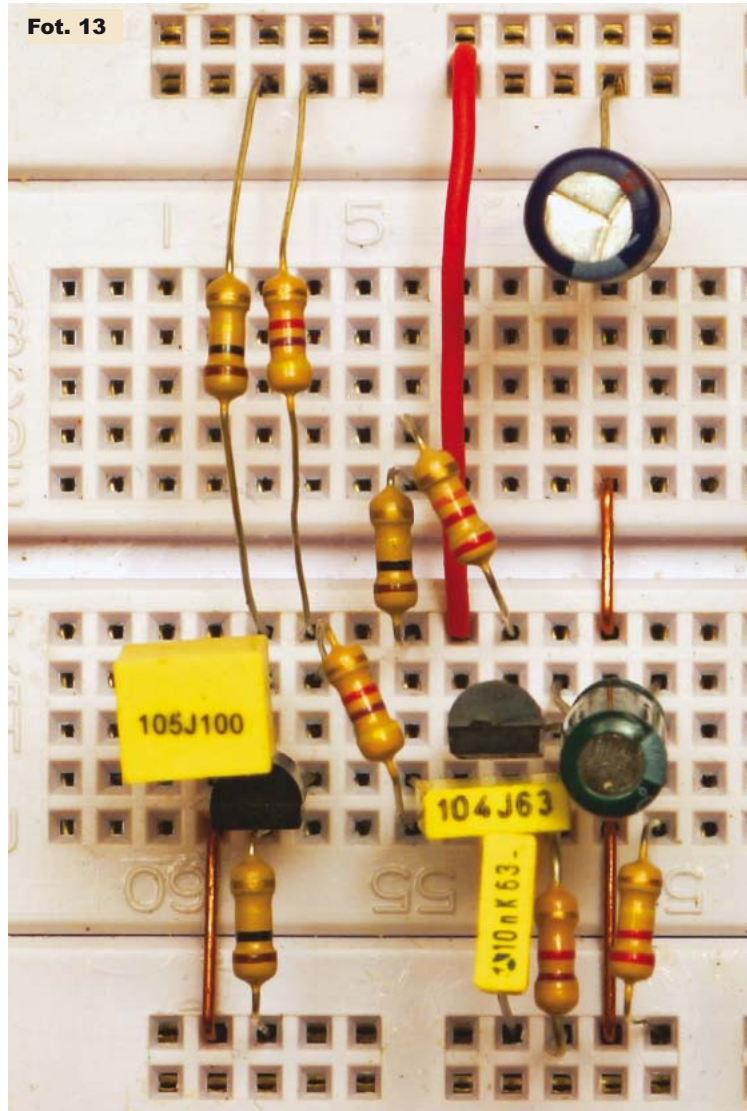
Rys. 11

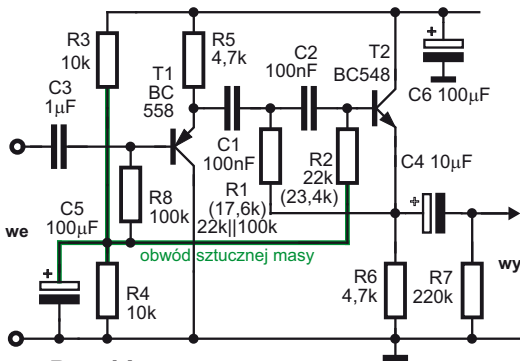


Rys. 12

śród niezliczonych odmian filtrów aktywnych na razie obwodów RC realizowane jest tu przez kondensator C1. Analogicznie rysunek 10b przedstawia filtr górnoprzepustowy. Zasadniczo wystarczyłby tylko jeden rezystor R2, ale w praktycznej realizacji tranzystor musi być spolaryzowany, więc dajemy dwa jednakowe rezystory R2A i R2B, które dodatkowo wyznaczają punkt pracy tranzystora. Dobierając odpowiednio wartości obu ogniw RC, ustalamy zarówno częstotliwość graniczną, jak też wielkość „wspomagania”, optymalną dla danego zastosowania. Istnieje nieskończenie wiele

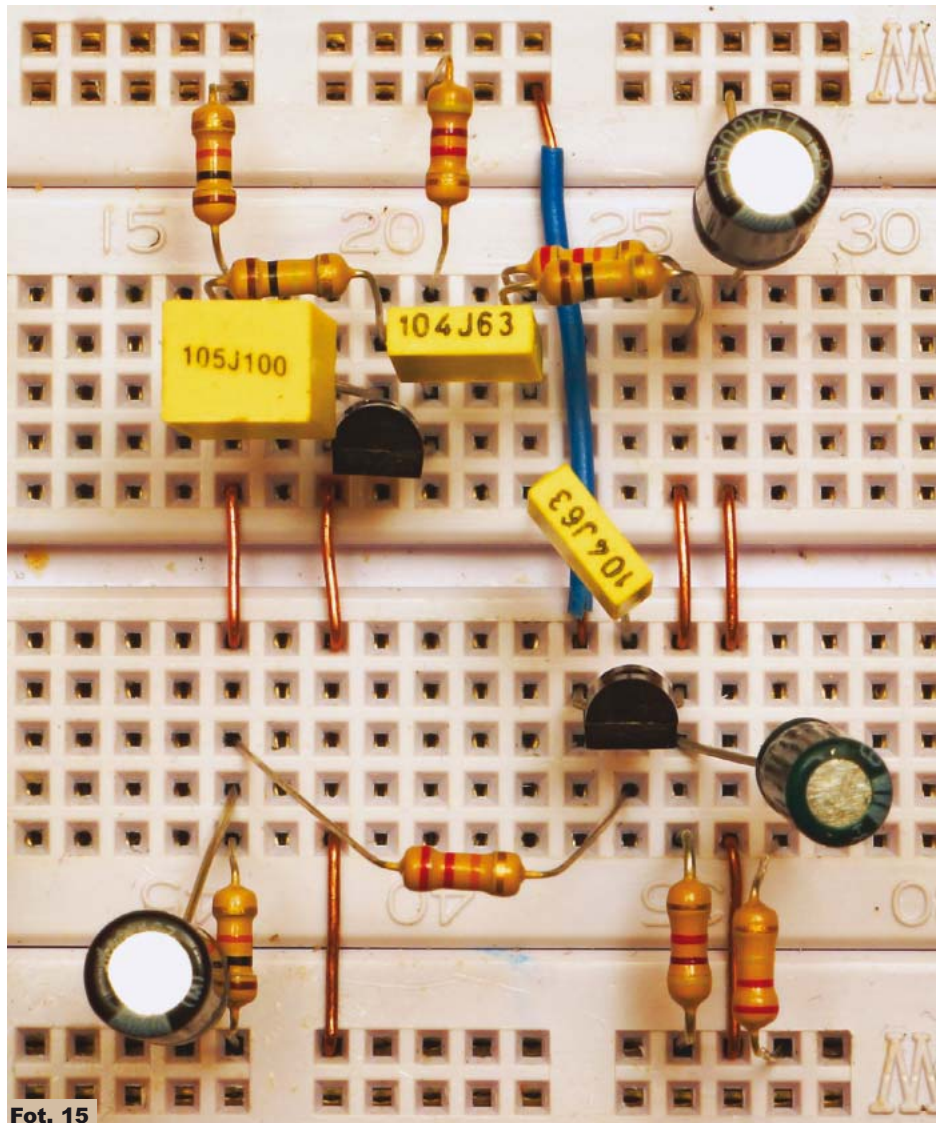
Fot. 13





Rys. 14 kombinacji wartości elementów, które dają użyteczne charakterystyki. **Rysunek 11** pokazuje przebieg najpopularniejszych, niejako standardowych charakterystyk amplitudowych filtrów przy różnej wielkości (niewielkiego) „wspomagania” – filtry o takim przebiegu charakterystyk nazywane są od nazwisk wynalazców filtrami Bessela, Butterwortha i Czebyszewa. Charakterystyka Butterwortha jest najbardziej płaska. Filtry Czebyszewa mają zafalowania charakterystyki, ale też nieco lepsze tłumienie sygnałów niepożądanych. Natomiast filtry o charakterystyce Bessela wprawdzie mają nieco słabsze tłumienie sygnałów niepożądanych, ale za to najworniej przenoszą impulsy i dlatego dobrze nadają się do układów audio.

A teraz przejdźmy do praktyki. **Rysunek 12** i **fotografia 13** pokazują prosty filtr dolnoprzepustowy do subwoofera (o charakterystyce Bessela), uzupełniony wtórnikiem wejściowym na tranzystorze T1. Częstotliwość graniczna wynosi około 160Hz i można ją modyfikować, proporcjonalnie zmieniając pojemności C1, C2 ($C1=10 \cdot C2$). Zapamiętaj, że w tego rodzaju filtrach trzeba stosować dobrej jakości kondensatory – foliowe, natomiast



Fot. 15

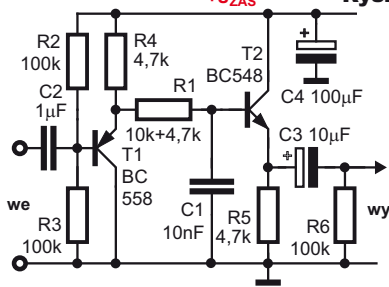
kondensatory ceramiczne o pojemności większej od 1nF, w tym nasze „lizaczki” 100nF, najczęściej mają małą stabilność i do takich filtrów się nie nadają. Mało stabilne ceramiczne „lizaczki” 100nF nadają się natomiast znakomicie do filtracji obwodów zasilania.

Rysunek 14 i **fotografia 15** pokazują tak zwany filtr kroków (górnoprzepustowy o częstotliwości około 100Hz). W głosie ludzkim nie ma składowych poniżej 100Hz – taki filtr jest powszechnie włączany

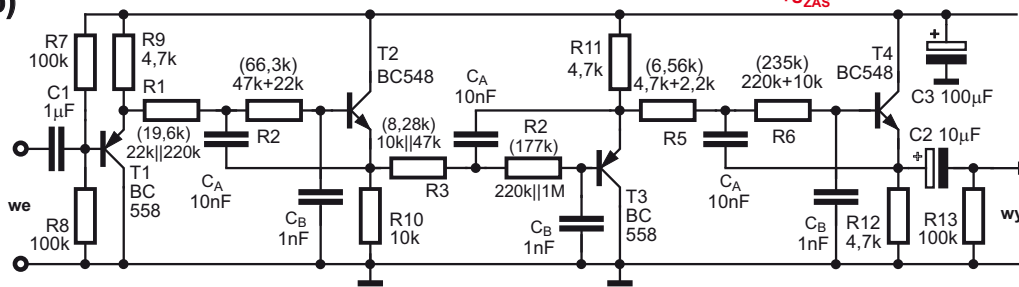
w torach mikrofonowych, gdzie obcina sygnały (zakłócenia) o częstotliwościach poniżej 100Hz, między innymi odgłosy kroków na scenie – stąd nazwa. W roli R1 wykorzystujemy tu połączone równolegle rezystory 22kΩ i 100kΩ. Zwróć uwagę, że w przeciwieństwie do rysunku 10b, mamy tu tylko jeden rezystor R2 (22kΩ). Aby prawidłowo spolaryzować tranzystory, dodaliśmy (zaznaczony kolorem zielonym) obwód sztucznej masy.

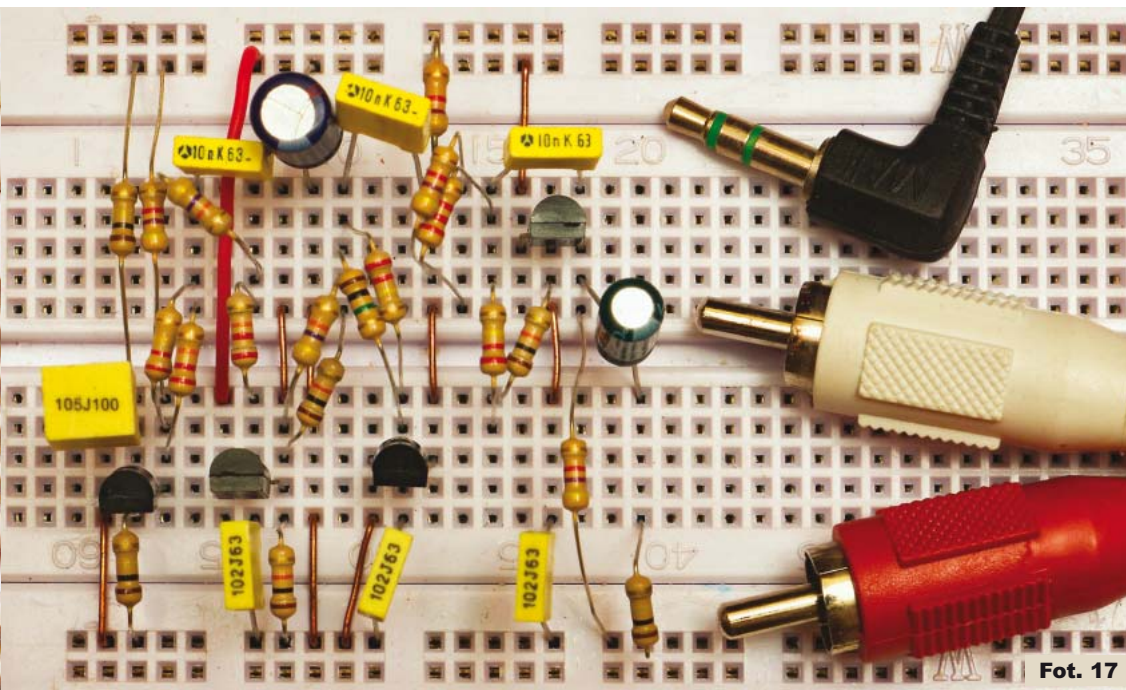
Zachęcam Cię też gorąco do zrealizowania dwóch filtrów dolnoprzepustowych o częstotliwości granicznej 1kHz według **rysunku 16**. Ten prosty to zwykły filtr pierwszego rzędu, ten drugi, rozbudowany, to filtr o charakterystyce Bessela, szóstego rzędu, czyli o dużej stromości charakterystyki amplitudowej, a jednocześnie dobrych parametrach dynamicznych. Potrzebne wartości rezystancji

a) Rys. 16



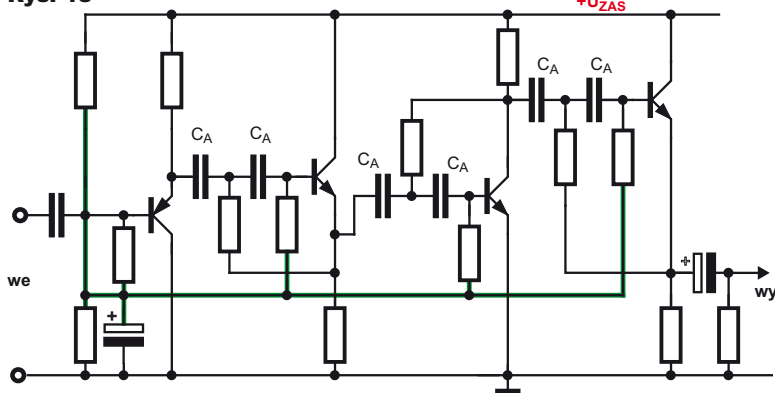
b) Rys. 16





Fot. 17

Rys. 18



zestawiamy przez łączenie równoległe lub szeregowo dwóch rezystorów, natomiast w nawiasach podane są optymalne wartości rezystancji. **Fotografia 17** pokazuje realizację tego filtra. Jeżeli masz kabelki z odpowiednimi wtyczkami (minijack, RCA-chinch), możesz zbudować i włączyć najpierw jeden, potem drugi filtr pomiędzy odtwarzacz CD/DVD lub odtwarzacz MP3 i wejście AUX wzmacniacza mocy domowego zestawu audio. Wtedy na słuch sprawdzisz, na ile skutecznie w obu filtrach obcinane są wyższe częstotliwości.

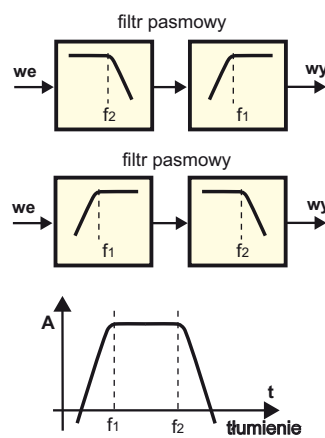
Jeśli chcesz, możesz zmieniać częstotliwość graniczną tego filtra, wymieniając wartości jednakowych par kondensatorów C_A , C_B , gdzie $C_A/C_B=10$.

Analogicznie mógłbyś zbudować skuteczny filtr górnoprzepustowy, na przykład według **rysunku 18**. Nie będziemy tego robić z kilku powodów, między innymi z powodu kłopotu z wartościami kon-

densatorów, których w zestawie EdW09 jest niewiele.

Trzeba też wiedzieć, że złożenie odpowiednio dobranego filtra dolno- i górnoprzepustowego pozwala zbudować filtr pasmowy według idei z **rysunku 19**. Takie rozwiązanie wykorzystaliśmy w układzie tytułowej iluminofonii. Ale gdyby był potrzebny skuteczniejszy filtr, o znacznie ostrzejszych zboczach, można by go zbudować, łącząc filtry według rysunków 16b i 18. Tylko elementy należałoby dobrać tak, żeby filtr zamiast charakterystyki Bessela, odpowiedniej dla toru audio, miał charakterystykę Czebyszewa, która zapewnia lepsze tłumienie sygnałów spoza pasma przepustowego.

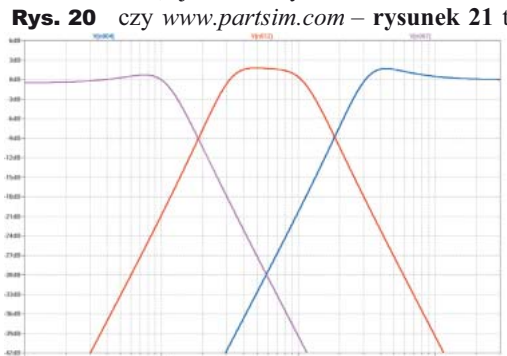
Projektowanie filtrów o zadanych parametrach to niełatwe zadanie. Praktykom, którzy potrzebują jedynie nieskomplikowanych filtrów, polecam moją książkę *Wzmacniacze operacyjne*, wydana



Rys. 19

są darmowe, jak choćby LTSpice z firmy Linear Technology (www.linear.com/designtools/software). Znakomicie nadają się także do sprawdzania charakterystyk filtrów. **Rysunek 20** pokazuje zrzut ekranu, pokazujący charakterystyki trzech filtrów z projektu wstępnego z rysunków A, B, C.

Programy symulacyjne dostępne są też online, jak choćby www.circuitlab.com czy www.partsim.com – **rysunek 21** to

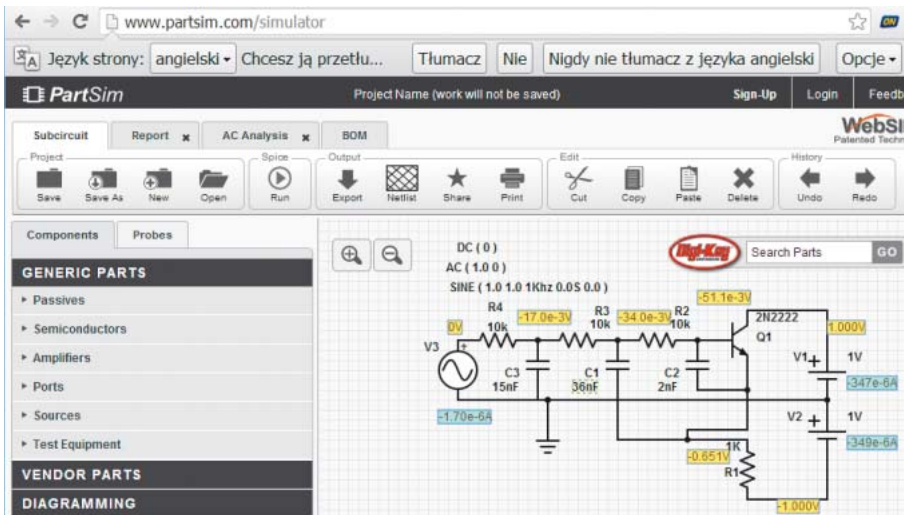


przez BTC (www.btc.pl/index.php?ukey=product&productID=316).

Tam, w rozdziale 4 są zawarte praktyczne wskazówki, jak dobrać elementy takich i innych filtrów. Dostępne są także różne specjalizowane programy komputerowe do projektowania filtrów (*Filter Wizard*). Oferują je m.in. znane firmy: Analog Devices, Texas Instruments, National Instruments. Szereg prostych apletów można też znaleźć na różnych stronach internetowych.

Popularne są również uniwersalne programy do tzw. symulacji. Za pomocą takich programów można w symboliczny

spółbiczny sposób (zaskakująco prosty i ciekawy) opisać dowolny układ elektroniczny i zbadać jego różnorodne właściwości. Współczesne programy pozwalają dodatkowo w łatwy sposób narysować schemat i wtedy program ze schematu sam tworzy symboliczny opis układu, potrzebny do symulacji. Niektóre z takich programów

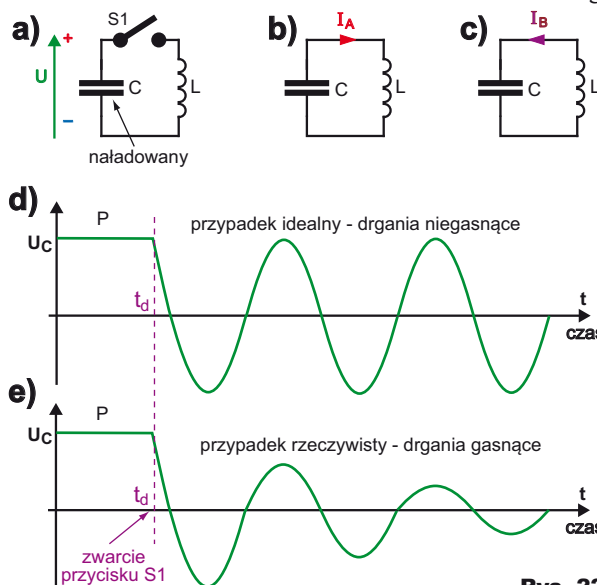


Rys. 21

zrzut ekranu z symulacji filtra dolnoprzepustowego trzeciego rzędu na stronie www.partsim.com.

Rezonans. Trzeba też wiedzieć, że zaskakujący efekt daje połączenie cewki i kondensatora i to nie tylko z uwagi na zmiany wartości reaktancji X_L i X_C , ale głównie z uwagi na przesunięcie fazowe między prądem i napięciem. Otrzymujemy wtedy obwód LC, w którym występuje tzw. rezonans.

Zjawisko rezonansu związane jest z faktem, że i kondensator, i cewka mogą magazynować energię. A rezonans w sumie polega na tym, że cewka i kondensator na przemian wymieniają się zgromadzoną energią. W idealnym przypadku, w układzie z **rysunku 22a**, po jednorazowym naładowaniu kondensatora i po zwarceniu styku S1 prąd popłynie z naładowanego kondensatora do „pustej” cewki, jak pokazuje **rysunek 22b**. Cewka najpierw przejmie całą energię, a potem zacznie tę energię oddawać z powrotem do kondensatora, co zilustrowane jest w uproszczeniu na **rysunku 22c**. Kondensator odzyska całą energię, a potem cykl będzie się powtarzał. Co ciekawe, dziwne i bardzo ważne, w idealnym przypadku energia krążyłaby w nieskończoność między



zwykłym kondensatorem i cewką, a zupełnie nieoczekiwanie napięcie (i prąd) miałyby kształt sinusoidalny, jak pokazuje **rysunek 22d**. Co jeszcze dziwniejsze, przy jednokrotnym (impulsowym) pobudzeniu, w obwodzie rezonansowym pojawiają się drgania sinusoidalne. I jest to kolejny argument, że właśnie przebieg sinusoidalny jest w pewnym sensie pierwotny, podstawowy. Częstotliwość tego przebiegu, czyli liczba drgań na sekundę, jest wyzna-

czona przez indukcyjność cewki i pojemność kondensatora według wzoru:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

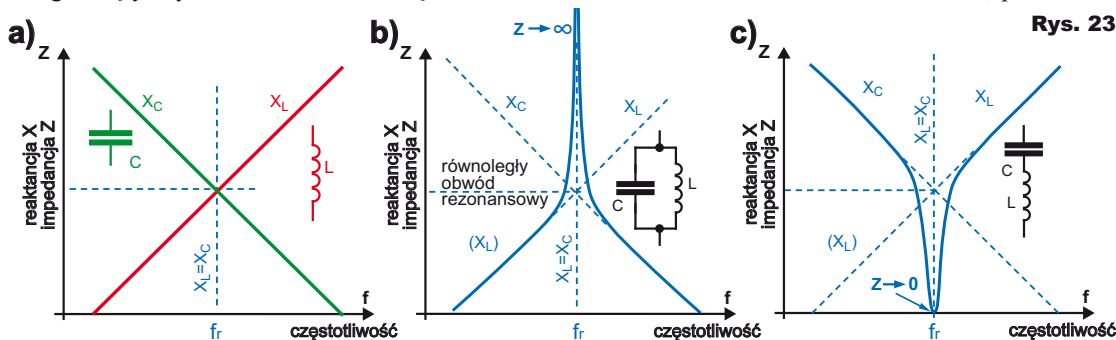
Częstotliwość rezonansu własnego f jest wyrażona w hercach (Hz), gdy indukcyjność L podamy w henrach (H), a pojemność C w faradach (F). Przy częstotliwości rezonansowej reaktancja pojemnościowa X_C jest równa indukcyjnej X_L . Ze wzrostem częstotliwości reaktancja X_L rośnie, a X_C maleje, jak pokazuje to w skali logarymicznej **rysunek 23a**.

Początkujących zaskakuje i dziwi fakt, że przy częstotliwości rezonansowej f_r , gdy $X_L = X_C$ przy równoległym połączeniu elementów LC (czyli w równoległym obwodzie rezonansowym), wypadkowa oporność – impedancja Z staje się... nieskończenie wielka. Ilustruje to **rysunek 23b**. Natomiast w szeregowym obwodzie LC przy częstotliwości rezonansowej oporność wypadkowa – impedancja staje się... równa zero, co ilustruje **rysunek 23c**. Tak byłoby w przypadku idealnych elementów L , C .

Zauważ, że taką samą częstotliwość rezonansową f_r można uzyskać z cewką o dużej wartości L i kondensatorem o małej wartości C . Albo odwrotnie – taką samą częstotliwość dadzą mała indukcyjność L i duża pojemność C . Byle tylko iloczyn LC był jednakowy. Takie obwody będą się jednak różnić wartością reaktancji charakterystycznej w stanie rezonansu $X_C = 1 / 2\pi fC = 2\pi fL = X_L$. Wartość liczbową tej tzw. oporności charakterystycznej, inaczej *rezystancji charakterystycznej*, można obliczyć prościej – jest ona równa

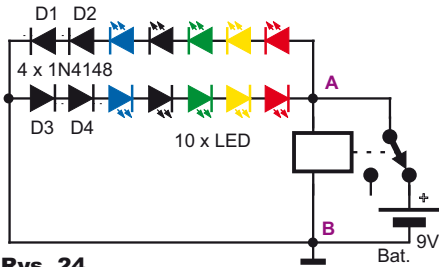
$$\sqrt{\frac{L}{C}}$$

Ale w rzeczywistym obwodzie rezonansowym mamy do czynienia z jeszcze inną rezystancją. Otóż w realnych układach występują rezystancje (dru tu cewki, przewodów) oraz dodatkowe straty, więc w każdym



Rys. 23

cyklu drgań część energii zamienia się na ciepło i jest tracona. Otrzymujemy przebieg sinusoidalny gasnący, jak pokazuje **rysunek 22e**. Zależnie od tego jak duże są straty energii w rezystancjach i jak szybko gasną drgania,



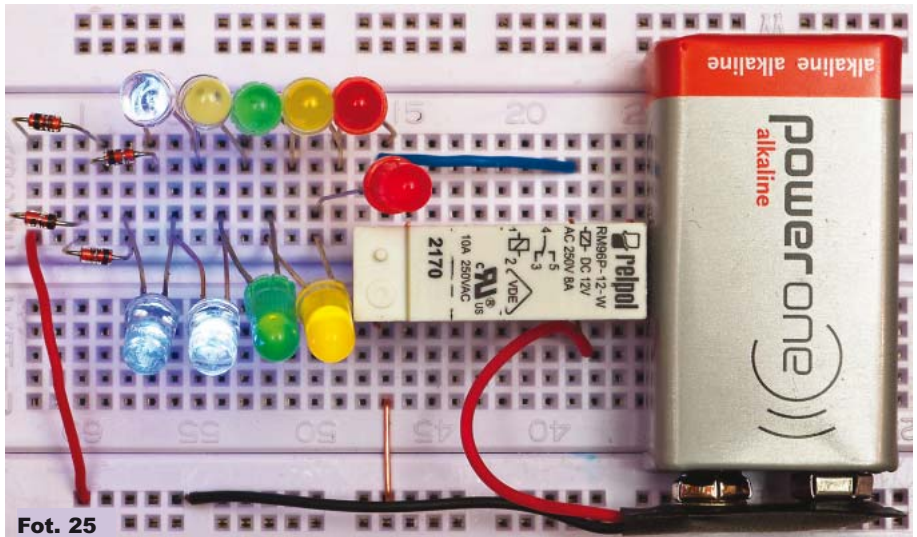
Rys. 24

mówimy, że cewka i obwód rezonansowy mają mniejszą lub większą dobroć (oznaczaną Q). Dobroć pokazuje, ile razy rezystancja charakterystyczna jest większa od rezystancji strat.

W praktyce w obwodach LC zawsze występują straty, więc rezystancja rzeczywistego równoległego obwodu (rysunek 22b) jest wielokrotnie większa niż oporność charakterystyczna, ale nie jest nieskończenie wielka. Podobnie w szeregowym obwodzie (rysunek 22c) podczas rezonansu oporność nie staje się równa zero, tylko ma jakąś niewielką wartość (zwykle nieco większą od rezystancji uzwojenia użytej cewki).

W zestawie EdW09 mamy niewiele elementów, w tym tylko jedną i to bardzo kiepską cewkę (cewkę przekaźnika), więc trudno badać, a choćby tylko zaobserwować zjawisko rezonansu. Jednak można zauważyć dziwne zjawisko w prostutkim układzie, który badaliśmy w ramach wykładu 6. Mianowicie możesz jeszcze raz wykonać generator na przekaźniku i dołączyć równolegle do cewki dwa jednakowe łańcuchy LED, włączane przeciwnie według rysunku 24 i fotografii 25. Każdy łańcuch zawiera 5 diod LED i dwie zwykłe diody 1N4148. Sprawdziłem, że taki łańcuch zaczyna leciutko świecić przy napięciu 10,5V. My zasilamy układ z baterii 9-woltowej. W spoczynku żaden z dwóch łańcuchów LED nie ma prawa świecić. W wykładzie 6 dowiedzieliśmy się, że w chwili przerywania obwodu cewka, która nie lubi zmian prądu, wytwarza ujemne napięcie samoindukcji i prąd płynie przez „dolny” łańcuch diod od punktu B do punktu A, które świecą dość jasno. Jednak podczas działania układu leciutko świeci także „górny” łańcuch, to znaczy, że w pewnych chwilach prąd płynie od punktu A do B, a to znaczy, że w pewnych chwilach w punkcie A występuje napięcie dodatnie względem masy o wartości ponad 10,5V. Możesz się o tym przekonać, realizując taki układ lub oglądając umieszczony w Elportalu filmik (www.elportal.pl/pke).

Za przyczynę można uznać rezonans, choć w układzie nie ma kondensatora, niemniej są, niezaznaczone na schemacie,



Fot. 25



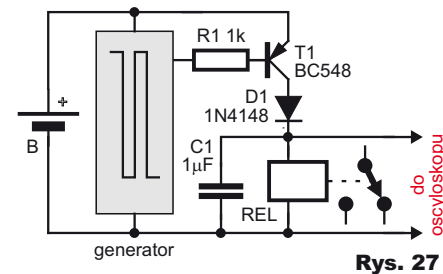
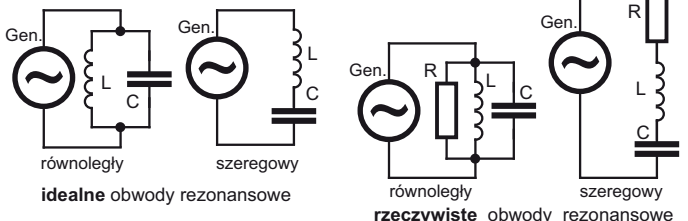
Rys. 26

wszelchobecne małe pojemności montażowe i tak zwana pojemność własna cewki.

Jedyna nasza cewka (przekaźnika) ma dużą rezystancję i gaśnięcie drgań jest dużo szybsze niż na rysunku 7e. Rysunek 26a to zrzut z ekranu oscyloskopu, pokazujący drgania (bardzo szybko) gasnące, występujące na obwodzie rezonansowym złożonym z kondensatora 1uF i cewki naszego przekaźnika w układzie z rysunku 27. Drgania pojawiają się w chwili, gdy tranzystor T1 zostaje zatkany i przez cewkę przekaźnika przestaje płynąć prąd. Wcześniej mówiliśmy, że cewka wytwarza pojedynczy impuls napięcia samoindukcji. W przypadku obwodu rezonansowego powstają drgania gasnące. W tym przypadku drgania gasną bardzo szybko właśnie z uwagi na duże straty energii w rezystancji cewki przekaźnika. Rysunek 26b pokazuje gasnące drgania rezonansowe w obwodzie z inną cewką o znacznie lepszych parametrach (o mniejszej rezystancji, czyli o większej dobroci Q).

Rys. 28

W podręcznikach szkolnych analizuje się obwody rezonansowe równoległe i szeregowo – rysunek 28. Co ciekawe, obwód



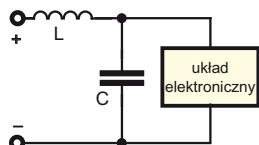
Rys. 27

rezonansowy „lubi” przebiegi o częstotliwościach zbliżonych do częstotliwości rezonansu własnego

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Tym bardziej lubi, fachowo: jest bardziej selektywny, im mniejsze są straty w rezystancjach, czyli czym większa jest dobroć Q.

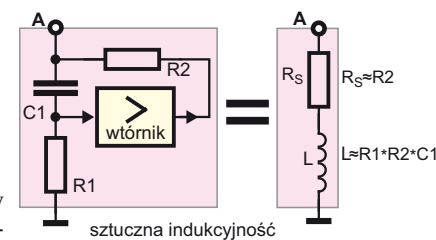
Obwody rezonansowe były i nadal są wykorzystywane w filtrach, na przykład we wszelkich urządzeniach radiowych. Ale trzeba pamiętać, że wszędzie tam, gdzie występuje indukcyjność i pojemność,



Rys. 29

mamy obwód rezonansowy o lepszej lub gorszej dobroci.

Tak jest i w obwodzie filtracji zasilania według rysunku 5b z wykładu 8. Aby przy stosowaniu dławika według rysunku 29 uzyskać dobrą filtrację, a nie tłumione sinusoidy z rysunków 7e i 10, należy prawidłowo dobrać elementy, zastosować dławik o małej dobroci i być może celowo dodać w szereg z kondensatorem C niewielki rezystor. Elementy filtru nieprawidłowo dobrane, „zbyt dobre”, mogą wręcz pogorszyć sytuację, powodując nadmierne duże drgania rezonansowe. Warto też wiedzieć, że każdy kawałek drutu i każda ścieżka na płytce ma jakąś małą indukcyjność i też jest małą cewką, więc we wszystkich układach mamy też mnóstwo niepożądanych obwodów rezonansowych – na szczęście przy małych wartościach indukcyjności i pojemności pasozytniczych, ich częstotliwości rezonansowe są bardzo duże, rzędu nawet miliardów herców, czyli gigaherców i nie wpływają na działanie ogromnej większości układów.



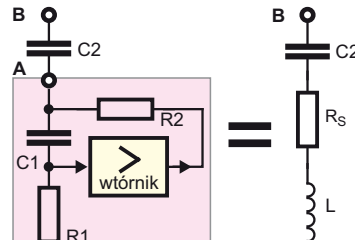
Rys. 30

sztuczna indukcyjność

Są za to wyzwaniem dla konstruktorów szybkich układów.

Cewki od dawna nie były lubiane przez hobbystów. Co ciekawe, można w dość proste sposoby zrealizować układ elektroniczny, który pod pewnymi względami zachowuje się jak cewka. Prosty sposób masz na rysunku 30. Taki układ, w przeciwieństwie do cewki, nie magazynuje energii w polu magnetycznym, jednak jeśli chodzi o przeciwstawianie się zmianom prądu i przesunięcie prądu względem napięcia – zachowuje się jak cewka. Ścisłej biorąc, jak cewka o rezystancji szeregojowej równej R2

Taka sztuczna indukcyjność pozwala stworzyć obwód rezonansowy. Dołączając kondensator C2 według rysunku 31, tworzymy szeregowy obwód rezonansowy. Takie obwody rezonansowe są bardzo często stosowane w tzw. korektorach graficznych, zwanych equalizerami. W ramach cyklu PKE nie możemy zrea-

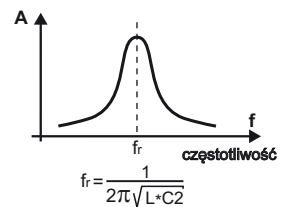
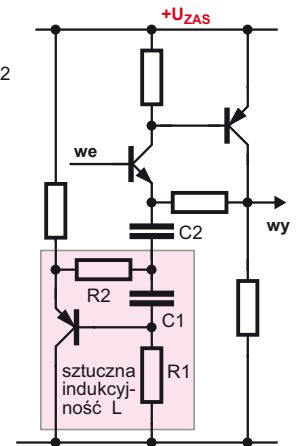


Rys. 31

szeregowy obwód rezonansowy

lizować takiego korektora, choćby dlatego, że w zestawie EdW09 nie ma ani jednego potencjometru.

Moglibyśmy wykorzystać taki obwód rezonansowy np. we wzmacniaczu według rysunku 32, uzyskując filtr pasmowy – selektywny. Jednak właściwości takiego filtra nie są optymalne. Filtry pasmowe realizujemy inaczej. Do filtrów wrócimy jeszcze w jednym z następnych wykładów.



Rys. 32

we wzmacniaczu

we wzmacniaczu według rysunku 32, uzyskując filtr pasmowy – selektywny. Jednak właściwości takiego filtra nie są optymalne. Filtry pasmowe realizujemy inaczej. Do filtrów wrócimy jeszcze w jednym z następnych wykładów.

Piotr Górecki

R E K L A M A

Super kompaktowy zestaw narzędzi 1PK-943B

Całość zapakowana w poręczne etui zapinane na zamek błyskawiczny

W zestawie:

- uchwyt z grzechotką
- szypce proste wydłużone 160mm
- klucz nastawny 6 cali
- elastyczna przedłużka 190mm
- magnetyczny adaptor bitów 60mm
- adaptor nasadek
- bity:
 - Phillips PH1, PH2, PH3
 - Pozidrive: PZ1, PZ2, PZ3
 - płaskie: 1/8", 5/32", 3/16", 1/4", 9/32"
 - imbus Hex: H2, H2.5, H3, H4, H5, H5.5, H6 mm
 - Torx: T10, T15, T20, T25, T27, T30, T40
 - kwadrat: S1, S2, S3
- wiertła: 1.5, 2.5, 3, 4, 5mm
- klucze nasadowe:
 - calowe: 3/16", 7/32", 1/4", 9/32", 5/16", 11/32", 3/8", 7/16", 1/2"
 - 5mm, 6mm, 7mm, 8mm, 9mm, 10mm, 11mm, 12mm, 13mm
- etui 217x165x55mm



Pro'sKit

www.sklep.avt.pl handlowy@avt.pl tel.: 22 257 84 50

