

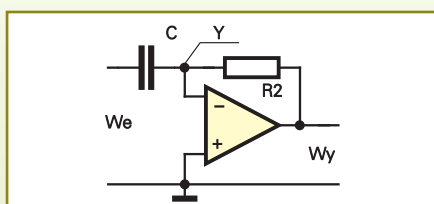
Wzmacniacze operacyjne

Odcinek 4

W czwartym odcinku cyklu o wzmacniaczach operacyjnych wracamy do podstawowych układów pracy. Zajmiemy się układami, w których występują przebiegi zmienne. To ważny materiał, nie pomijaj niczego.

Układ różniczkujący

We wzmacniaczu odwracającym z rysunku 16 (EdW 10/99 str. 44) pozostawiamy R2, a zamiast R1 wstawiamy kondensator. Otrzymujemy układ jak na **rysunku 28**. Działanie tego dziwoląga rozpatrzmy z dwóch stron:



Rys. 28

OTO PIERWSZY PUNKT WIDZENIA: nadal jest to rodzaj wzmacniacza odwracającego, którego wzmacnienie zapewne wynosi, analogicznie jak w układzie z rysunku 16:

$$G = R2 / Xc$$

Tym razem wzmacnienie nie jest stałe, zależy od częstotliwości. Dla przebiegów stałych kondensator stanowi przerwę. Jego oporność jest nieskończenie wielka. Czyli dla częstotliwości równej zeru wzmacnienie też będzie równe zero. Zgadza się z intuicją - taki układ w ogóle nie przenosi sygnałów stałych.

Ze wzrostem częstotliwości oporność kondensatora maleje. Oporność (ściślej reaktancję) kondensatora obliczamy ze znanego wzoru:

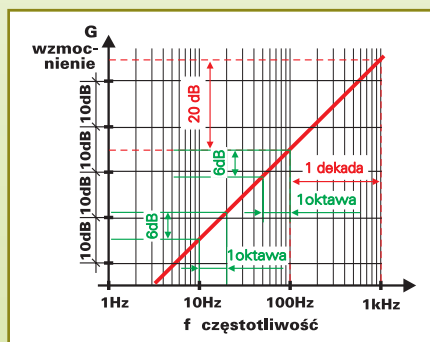
$$Xc = 1 / 2\pi fC$$

Czym większa częstotliwość f , tym mniejsza oporność Xc , a tym samym większe wzmacnienie G . Zaznaczając zarówno częstotliwość, jak i wzmacnienie w mierze logarytmicznej, uzyskuje się przebieg wzmacnienia w funkcji częstotliwości jak na **rysunku 29**. Otrzymaliśmy układ, który wykazuje cechy filtra górnoprzepustowego.

Zawsze przy podwojeniu częstotliwości (wzrost o jedną oktawę) wzmacnienie rośnie

dwukrotnie, czyli o 6dB. Tak samo przy dziesięciokrotnym wzroście częstotliwości (o jedną dekadę) wzmacnienie rośnie dziesięciokrotnie, czyli o 20 decybeli. Dlatego zazwyczaj mówi się o wzroście (lub spadku) charakterystyki 6dB/oktawę (6dB/okt.) lub równoważnym mu wzroście (spadku) 20dB na dekadę (20dB/dek.).

Celowo na rysunku 29 nie zaznaczyłem na osi pionowej konkretnych wartości wzmacnienia. Będą one różne dla różnych wartości R2, C. Celowo też na osi poziomej zaznaczyłem niskie częstotliwości w zakresie 1Hz...1kHz. Już teraz możesz się domyślić, że przy bardzo dużych częstotliwościach wzmacnienie nie będzie nieskończenie wielkie, ograniczeniem będą tu właściwości wzmacniacza operacyjnego. Na razie nie będziemy się w ten temat wgłębiać.



Rys. 29

A TERAZ DRUGI PUNKT WIDZENIA. Gdy na wejściu układu z rysunku 28 panuje napięcie stałe o dowolnej wartości... nic się nie dzieje. Układ zachowuje się jak wódnik z rysunku 9 (EdW 10/99 str. 42) z końcówką dodatnią bezpośrednio zwartą do masy. Napięcie wyjściowe jest równe zero.

A jeśli napięcie wejściowe będzie się zmieniać?

Spokojnie, to nic trudnego. Na pewno wiesz i czujesz intuicyjnie, że przyrost napię-

cia na kondensatorze jest wprost proporcjonalny do wartości prądu ładowania - czym większy prąd ładowania, tym szybciej rośnie napięcie. Czy równie dobrze czujesz tę zależność "w drugą stronę"? Że prąd płynący przez kondensator jest proporcjonalny do szybkości zmian napięcia na jego zaciskach. Właśnie - zmiana napięcia na zaciskach kondensatora powoduje przepływ prądu - czym szybsze te zmiany napięcia, tym większy prąd. Jeśli tego nie rozumiesz, koniecznie uzupełnij braki w wykształceniu. Zupełnie początkujący mogą wykorzystać pokrewny materiał z „Listów od Piotra“ z EdW 12/96...4/97, wyjaśniający działanie podstawowych elementów w oparciu o analogię hydrauliczną.

Powinieneś, a nawet musisz wiedzieć, iż prąd płynący przez kondensator zależy od szybkości zmian napięcia na jego zaciskach oraz od pojemności. Przypominam szkolny wzór

$$I = C \Delta U / \Delta t$$

gdzie $\Delta U / \Delta t$ to właśnie szybkość zmian napięcia w czasie. Czym szybsze zmiany, tym prąd jest większy (i czym większa pojemność, tym prąd większy, ale to na razie nieistotne). Ilustruje to **rysunek 30a**, gdzie przyczyną jest zmiana napięcia, a skutkiem - przepływ prądu. Zauważ, że chodzi o **prąd stały**. Tak, prąd stały! Żeby przez kondensator płynął prąd stały o niezmiennych wartościach, napięcie na kondensatorze musi liniowo, czyli jednostajnie narastać (lub opadać). Oczywiście w praktyce stan taki nie może trwać wiecznie, bo przy zbyt wysokim napięciu kondensator uległby uszkodzeniu (przebicciu). Niemniej jednak generalna zależność jest prosta: przez kondensator płynie prąd zależny od szybkości i kierunku zmian napięcia.

Teraz już przejdź do przykładów pokazanych na **rysunku 30b**. Pamiętaj, że podczas normalnej pracy wejście "ujemne" wzmacniacza operacyjnego ma potencjał masy, czyli zera. Tak więc na kondensatorze pojawia

się pełne napięcie wejściowe. Prąd, jak zawsze, musi się zamknąć w jakimś obwodzie. Założyliśmy, że przez końcówki wejściowe (idealnego) wzmacniacza operacyjnego żaden prąd nie płynie, a więc prąd musi popłynąć przez rezystor R2 do wyjścia. Znowь zaczynamy jakby od końca: na wyjściu musi się ustalić takie napięcie, by zapewnić przepływ przez R2 tego samego prądu I, który płynie przez kondensator pod wpływem zmian napięcia wejściowego.

Możesz to także rozumieć inaczej, jeszcze prościej - prąd (wejściowy) musi płynąć przez R2, a więc wywoła na nim spadek napięcia. W każdym razie napięcie wyjściowe ustali się na poziomie

$$U_{wy} = I \cdot R2$$

Tak jest zarówno wtedy, gdy napięcie wejściowe wzrasta i prąd płynie ze źródła przez kondensator, rezystor i wyjście, jak też w sytuacji, gdy napięcie wejściowe się zmniejsza, i prąd płynie w przeciwnym kierunku - starannie przeanalizuj oba przypadki pokazane na rysunku 30b.

W każdym przypadku wartość napięcia wyjściowego jest proporcjonalna do wartości prądu I. A prąd I jest proporcjonalny do szybkości zmian napięcia:

$$U_{wy} = R2 \cdot C \cdot (\Delta U_{we} / \Delta t)$$

Czyli...

napięcie wyjściowe jest proporcjonalne do szybkości i kierunku zmian napięcia wejściowego.

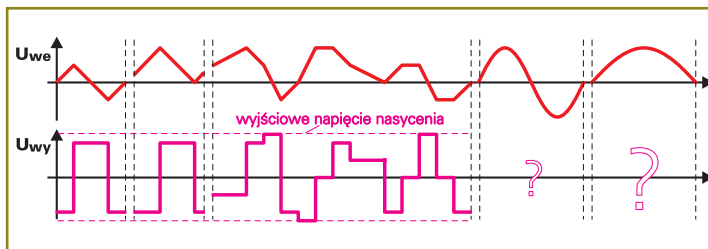
Proste? I to, ogólnie biorąc, jest właśnie owo straszne różniczkowanie!

Ściślej biorąc, podany wcześniej wzór w podręcznikach akademickich jest zapisywany w ogólniejszej postaci

$$i = C \cdot dU_{we} / dt$$

ale Ty nie musisz się wgłębiać w rozważania, czym różni się $\Delta U_{we} / \Delta t$ od dU_{we} / dt .

Utrwal sobie podane informacje analizując przykładowe przebiegi z **rysunku 31**. Zwróć uwagę, że przy zbyt dużej szybkości zmian, wyjście wzmacniacza się nasyci. Aby nie dopuścić do nasycenia, należałoby zmniejszyć wartość R2 bądź C. Jak widzisz, układ nadaje się na przykład do zamiany przebiegu trójkątnego na prostokątny, a jak się jeszcze okaże, także do wielu innych przydatnych celów. Słusznie się też domyślasz, że zbocza przebiegu wyjściowego nie będą idealne. O ich stromości zadecyduje



Rys. 31

szybkość samego wzmacniacza operacyjnego - tą sprawą zajmiemy się w przyszłości.

Nieobowiązkowo, w ramach gimnastyki umysłu możesz się zastanowić, co układ z rysunku 28 zrobi z przebiegami sinusoidalnymi o różnych częstotliwościach.

Integrator - układ całkujący

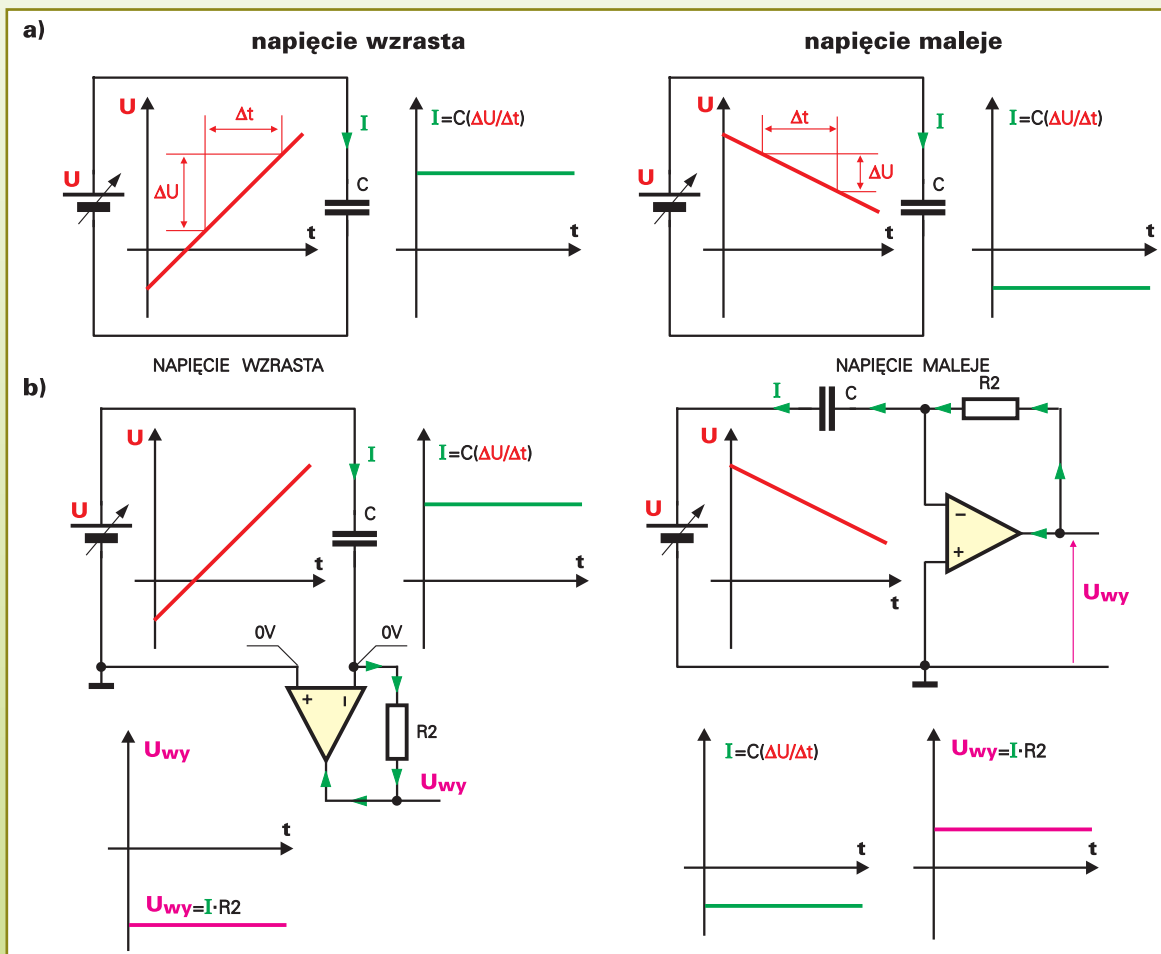
Znowь straszna nazwa - integrator. Nie bój się - tym razem we wzmacniaczu odwracającym zamieniamy R2 na C - zobacz **rysunek 32**. I znowь koniecznie powinieneś rozumieć działanie tego układu przynajmniej z dwóch różnych punktów widzenia.

OTO PIERWSZY. Mamy wzmacniacz odwracający, którego wzmocnienie wynosi, zgodnie z rysunkiem 16:

$$G = Xc / R1$$

Ze wzrostem częstotliwości oporność kondensatora Xc maleje. Tym samym maleje też wzmocnienie. Już tu wiadać, że układ ma właściwości filtrujące - tłumi wyższe częstotliwości. Zaznaczając częstotliwość i wzmocnienie w mierze logarytmicznej, uzyskuje się przebieg wzmocnienia w funkcji częstotliwości jak na **rysunku 33**.

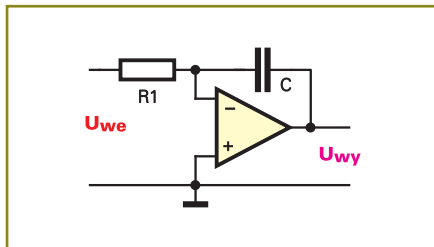
Także i tu przy podwojeniu częstotliwości (wzrost o jedną oktawę) wzmocnienie maleje dwukrotnie, czyli o 6dB, ponieważ tak maleje reaktancja Xc . Mówimy, że charakterystyka amplitudowa integratora opada



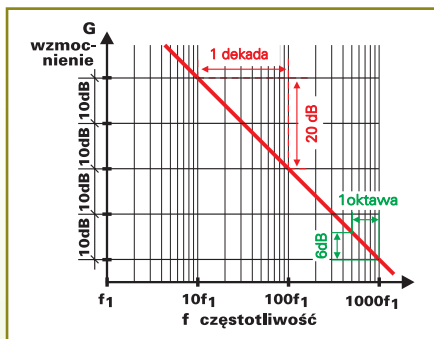
Rys. 30

z szybkością 6dB/oktawę (-6dB/okt.) czyli 20dB na dekadę (-20dB/dek.).

A teraz działanie tego układu z DRUGIEGO PUNKTU WIDZENIA. Przykładamy do wejścia

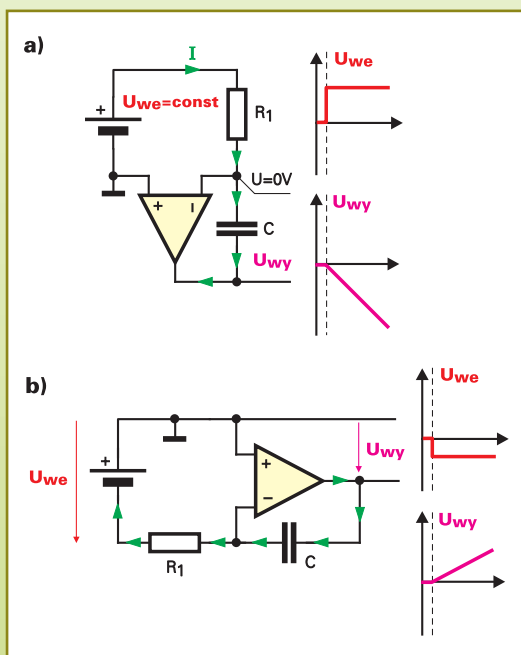


Rys. 32



Rys. 33

jakieś napięcia stałe - zobacz rysunek 34. Nie bój się, nic nie wybuchnie! Nie ma wątpliwości, że w obu przypadkach to ten sam układ, tylko inaczej narysowany (celowo rysuję kolejne układy w różny sposób, byś się do tego przyzwyczajał). Zwróć uwagę na kierunki prądów. Przypomnij sobie żelazną zasadę - w czasie normalnej pracy napięcie na obu wejściach jest jednakowe, w tym wypadku równe potencjałowi masy (wirtualne



Rys. 34

zwarcie). Przez rezystor R1 w obu przypadkach popłynie prąd o wartości $I = U_{we} / R1$

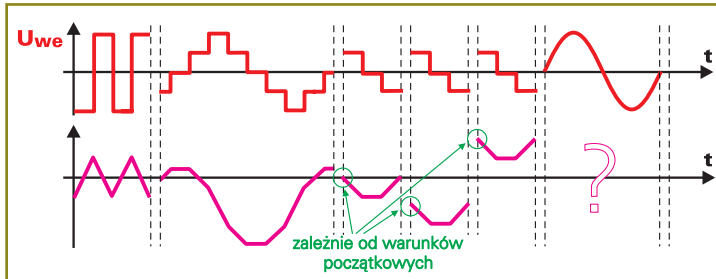
Prąd ten musi się zamknąć w jakimś obwodzie. Musi popłynąć

przez kondensator C. Prąd stały przez kondensator? Oczywiście, przed chwilą o tym mówiliśmy. Prąd stały popłynie przez kondensator pod warunkiem, że napięcie na kondensatorze, będące także napięciem wyjściowym, będzie się zmieniać.

Ale jak wymusić zmianę napięcia na kondensatorze? To proste - płynący prąd I będzie ładował kondensator C i napięcie na nim będzie się zmieniać. I to wszystko! Nie łapiesz? Więc może lepiej wyobraź to sobie inaczej, niejako od końca - wzmacniacz operacyjny musi tak zmieniać napięcie wyjściowe, by zapewnić przepływ przez kondensator prądu dokładnie takiego samego jak prąd wejściowy płynący przez rezystor R1. A skąd wzmacniacz operacyjny będzie wiedział, że ma zmieniać swe napięcie wyjściowe? I co by się działo, gdyby napięcie wyjściowe "nie chciało" się zmieniać?

Wzmacniacz operacyjny nie musi odznaczać się inteligencją. Gdyby nie chciał zmieniać napięcia i przez kondensator nie płynąłby prąd, natychmiast wzrosłoby napięcie na wejściu "ujemnym", co niewątpliwie wymusiłoby na wyjściu zmianę w kierunku napięć ujemnych. A więc zgadza się! Dla zachowania równości napięć na wejściach, napięcie wyjściowe będzie się zmieniać. Przeanalizuj działanie układu, czy rzeczywiście wszystko się zgadza? Masz rację, układ będzie pracował, byleby tylko wyjście wzmacniacza nie weszło w nasycenie. Praktycznie oznacza to, że napięcie stałe o jednej biegunowości nie powinno być podawane na wejście zbyt długo, bo napięcie wyjściowe dojdzie do dolnego bądź górnego napięcia nasycenia wzmacniacza.

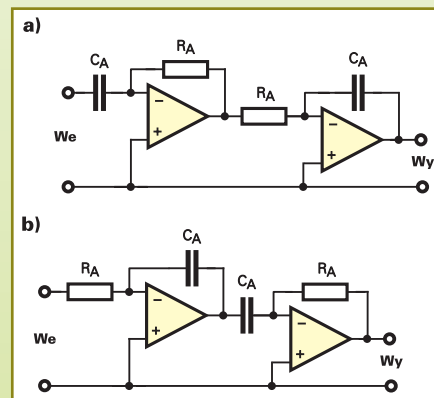
A jaka będzie szybkość zmian napięcia na wyjściu? Słusznie się domyślasz, że zależy ona przede wszystkim od napięcia podanego na wejście, ale także od pojemności kondensatora i wartości R1. Czym większa pojemność, tym mniejsze zmiany na wyjściu. Tak samo czym większa rezystancja, tym mniejszy prąd i mniejsze zmiany na wyjściu. Uwzględniając przypomniany wcześniej wzór, moglibyśmy wyprowadzić zależność napięcia wyj-



Rys. 35

ściowego od wejściowego. Nie chcę Cię straszyc całkami, więc na razie niech interesuje nas jedynie fakt, że szybkość zmian napięcia wyjściowego zależy od wartości napięcia wejściowego. Możemy obrazowo, choć nieprecyzyjnie stwierdzić, że układ zamienia stałe napięcie wejściowe na... nachylenie, a bardziej trafnie: **szybkość zmian przebiegu wyjściowego jest proporcjonalne do znaku i wartości napięcia na wejściu**. I to, z grubsza biorąc, jest to straszne całkowanie! Straszne? Jak widzisz, wcale nie. A nazwa integrator to to samo, co układ całkujący.

Czy wobec tego integrator służy do zamiany napięcia stałego na zmienne? To nie jest dobre sformułowanie - nie utrwalaj go sobie w pamięci. Przeanalizuj raczej przykład zastosowania, pokazany na rysunku 35 - zamianę przebiegu prostokątnego na trójkątny. Zauważ, że w integratorze poziomy zależą od warunków początkowych - trzy jednakowe przebiegi wejściowe dają na wyjściu przebieg tego samego kształtu, ale o różnej składowej stałej. Jeśli na matematyce zdołali Ci wbić do głowy pojęcie całki nieoznaczonej, wcale się temu nie dziwisz.



Rys. 36

Choć może na razie właściwości układu całkującego mogą Ci się wydawać dziwne, z czasem je docenisz. Czy zauważyłeś, że działanie układów całkującego i różniczkującego są niejako odwrotne? Przeanalizuj więc, czy rzeczywiście w układach z rysunku 36 na wyjściu wystąpi taki sam przebieg, jak na wejściu? Odpowiedź znajdziesz za miesiąc.

Piotr Górecki

Układy pochodne

Zastanówmy się teraz, jak będzie się zachowywał układ z **rysunku 37**.

Do wzmacniacza odwracającego z **rysunku 16** dodajemy kondensator C1 w szeregu z rezystorem R1. Całość przypomina trochę układ różniczkujący z **rysunku 28**. Tym razem przeanalizujemy działanie tylko z jednego punktu widzenia. Analogicznie jak w poprzednich przypadkach możemy zapisać wzór na wzmacnienie układu

$$G = R2 / (R1 + Xc)$$

Zarówno wzór, jak i rysunek 37 wskazują, że przy bardzo dużych częstotliwościach, gdy oporność kondensatora będzie pomijalnie mała, wzmacnienie wyniesie

$$G = R2 / R1$$

Dla bardzo małych częstotliwości oporność kondensatora będzie dużo większa od R1, wobec czego możemy pominąć R1 i zapisać

$$G = R2 / Xc$$

W tym zakresie wzmacnienie będzie rosło ze wzrostem częstotliwości (porównaj rysunek 29), bo reaktancja kondensatora będzie maleć. Interesuje nas częstotliwość charakterystyczna, przy której liczbowe wartości R1 i Xc są równe (pomijamy tu zależności fazowe)

$$|R1| = |Xc|$$

Podstawiając $Xc = 1 / 2\pi f C1 = R1$ i przekształcając otrzymujemy (umowną) częstotliwość graniczną

$$fd = 1 / 2R1C1$$

Gdy zaznaczymy wzmacnienie i częstotliwość w skali logarymicznej, przebieg charakterystyki częstotliwościowej układu będzie wyglądał jak na **rysunku 38**. Otrzymaliśmy użyteczny filtr górnoprzepustowy. Powyżej częstotliwości granicznej, czyli w paśmie przepustowym, charakterystyka jest płaska, a wzmacnienie wynosi

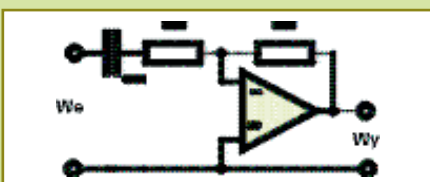
$$G=R2/R1$$

Poniżej częstotliwości granicznej

$$fd = 1 / 2R1C1$$

wzmacnienie zmniejsza się z szybkością 6dB/okt. (20dB/dek.). Zauważ, że wartość R2 nie wpływa na częstotliwość graniczną, a jedynie na wzmacnienie w paśmie przepustowym.

Ponieważ chcę Ci wszystko przedstawić jak najprościej, pomijam zależności fazowe. Przyjmij więc na wiarę, że dla tej częstotliwości granicznej fg wzmacnienie jest $(2)^{1/2}$, czyli 1,41 razy, inaczej mówiąc o 3dB mniejsze niż w paśmie przepustowym.



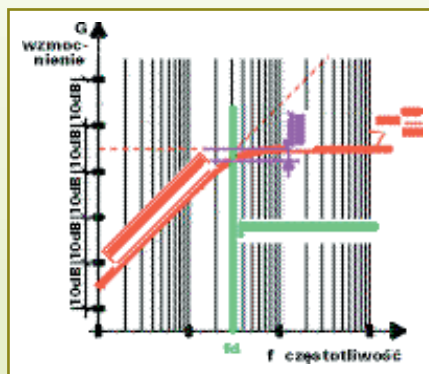
Rys. 37

Porównaj teraz układy z **rysunków 16, 28 i 37**. Dodanie kondensatora C1 zmniejszyło wzmacnienie dla małych częstotliwości, czyli przekształciło szerokopasmowy wzmacniacz w filtr górnoprzepustowy. Układ taki jest bardzo często stosowany. W ramach gimnastyki szarych komórek dobierz teraz wartości R1 i C we wzmacniaczu mikrofonowym z **rysunku 39**, by wzmacnienie w paśmie przepustowym było równe 30, a częstotliwość graniczna wynosiła 32Hz. Prawidłowe wartości znajdziesz na końcu tego artykułu.

A teraz kolejny układ z **rysunku 40**. Nie będę pisał wzoru na wzmacnienie, bo nie chcę Cię przestraszyć (równoległe połączenie R2, C2). Domyślasz się, że ta krzyżówka integratora ze wzmacniaczem odwracającym dla prądu stałego (i bardzo małych częstotliwości) będzie miała wzmacnienie równe

$$G = R2 / R1$$

bo oporność C2 będzie nieskończenie wielka. Natomiast przy dużych częstotliwościach wzmacnienie będzie spadać z szybkością 6dB/oktawę, bo oporność kondensatora C2 zmniejsza się ze wzrostem częstotliwości,



Rys. 38

podobnie jak w układzie z **rysunku 32**. Znow na jakiejś częstotliwości granicznej, liczbową wartość rezystancji R2 będzie równa oporności Xc kondensatora C2. Nietrudno zgadnąć, że charakterystyka częstotliwościowa będzie wyglądać jak na **rysunku 41**. Otrzymaliśmy filtr dolnoprzepustowy o wzmacnieniu w paśmie przepustowym

$$G = R2 / R1$$

i częstotliwości granicznej

$$fg = 1 / 2R2C2$$

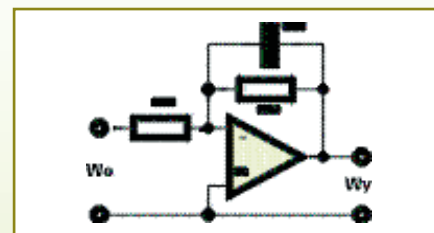


Rys. 39

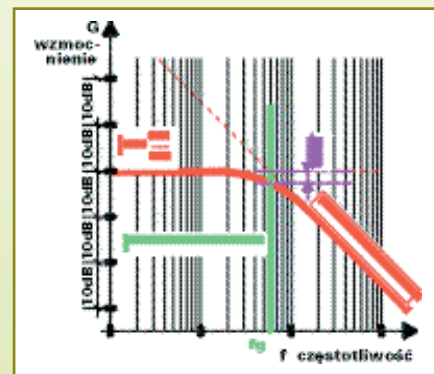
Taki układ jest bardzo często stosowany do obciążenia niepotrzebnych wysokich częstotliwości.

Zestawiając układ według **rysunku 42** otrzymasz filtr pasmowy. W ramach rozrywki dobierz wartości elementów R2, C1, C2 tego układu, by dolna częstotliwość graniczna wynosiła $fd=50$ Hz, górna $fg=20$ kHz, a wzmacnienie $G=5$. Jak podobają Ci się wartości kondensatorów? A może lepiej byłoby zwiększyć R1 do, powiedzmy, 15k? Sprawdź, czy Twoje wyliczenia zgadzają się z odpowiedzią podaną na końcu artykułu.

Jeśli już zrozumiałeś podane zależności, odpowiedz, jak będzie wyglądać charakterystyka, gdy częstotliwość fd graniczna będzie wyższa niż fg ? Przykład masz na **rysunku 43a**. Częstotliwość fd wynosi 795Hz, natomiast fg : 159Hz. Jakie będzie wzmacnienie w poszczególnych częściach pasma? Spróbuj narysować charakterystykę tego układu



Rys. 40



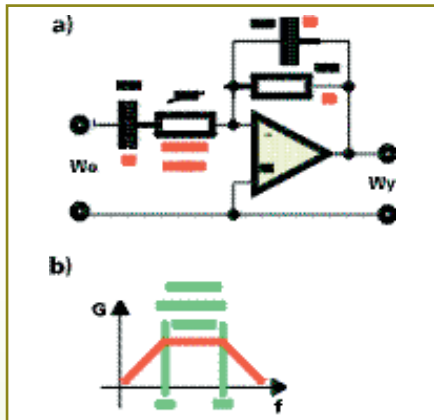
Rys. 41

(znajdziesz ją na końcu artykułu, na **rysunku 43b**).

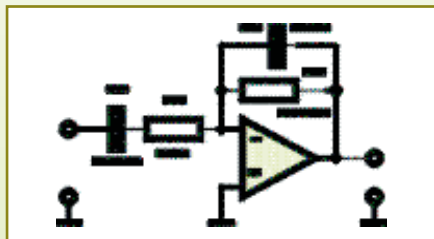
Na **rysunku 44a** znajdziesz kolejny układ. Nie ma on szerszego zastosowania. Nie będziesz także stosował wynalazku z **rysunku 44b**, choć czasem bywa spotykany w praktyce (jest to w istocie integrator o zmodyfikowanej charakterystyce).

Spotyka się natomiast układy jak na **rysunkach 45 i 46**. Znajdziesz tam schemat i charakterystykę obliczoną z pomocą programu symulacyjnego. Te dwa przykłady pokazują, jak łatwo jest kształtować charakterystykę częstotliwościową, "doczepiając" do

wzmacniacza odwracającego odpowiednie obwody RC. Przeanalizuj dokładnie rysunki 45 i 46, ponieważ prawdopodobnie będziesz kiedyś potrzebował układu o podobnej charakterystyce. Zwróć uwagę na wartości wzmacnienia i punkty załamania charakterystyki. Przykładowo na rysunku 46b wzmacnienie przy najmniejszych częstotliwościach (równe 100) wyznaczają rezystory R2 i R1. Przy zwiększaniu częstotliwości zmniejsza

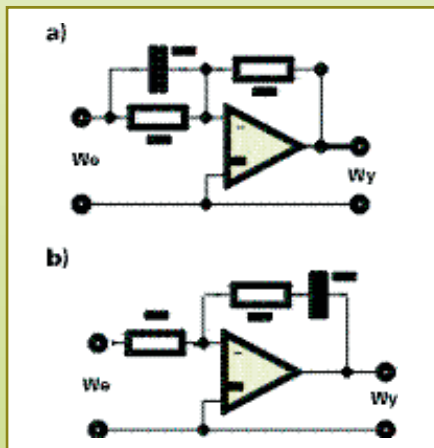


Rys. 42



Rys. 43a

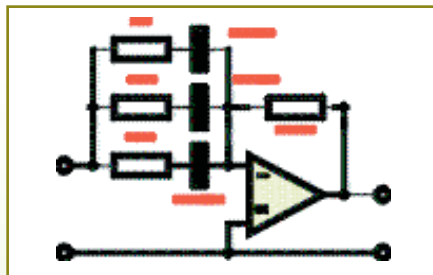
się reaktancja kondensatorów. Pierwsze załamanie charakterystyki występuje wtedy, gdy reaktancja C2A staje się mniejsza od R2 (około 0,15Hz). Charakterystyka opada, bo zmniejsza się reaktancja C2A. Gdy przy większych częstotliwościach (około 1Hz) reaktancja ta stanie się mniejsza od R2A, cha-



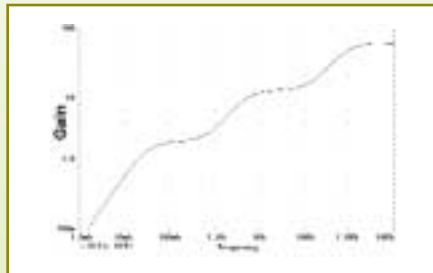
Rys. 44

rakterystyka trochę się prostuje, a wzmacnienie wyznaczone jest przez równoległe połączenie R2, R2A oraz R1. Jeszcze dalej (około 10Hz) charakterystyka znów zaczyna opadać, bo reaktancja C2B okazuje się mniejsza niż R2B. Przy częstotliwości około 100Hz znów zaczyna się prostować, a wzmacnienie ustala teraz równoległe połączenie R2, R2A, R2B oraz R1. Powyżej 10kHz wzmacnienie spada za sprawą C2C, by powyżej częstotliwości 50kHz ustabilizować się na poziomie wyznaczonym przez równoległe połączenie R2, R2A, R2B, R2C oraz R1.

Czy teraz już potrafiłbyś zaprojektować wzmacniacz o charakterystyce jak na rysun-



Rys. 45a



Rys. 45b

ku 47, gdzie wypadkowe nachylenie charakterystyki wynosi 3dB/okt. Taki właśnie filtr jest potrzebny, żeby szum biały zamienić na bardziej użyteczny szum różowy. Jak to zrobić? Masz jakiś pomysł? Na końcu artykułu, na rysunku 47b, znajdziesz przykład takiego filtra. Schemat nie jest mój, zaczerpnąłem go z jakiegoś starego angielskojęzycznego czasopisma, nie ręczę więc za jego dokładność.

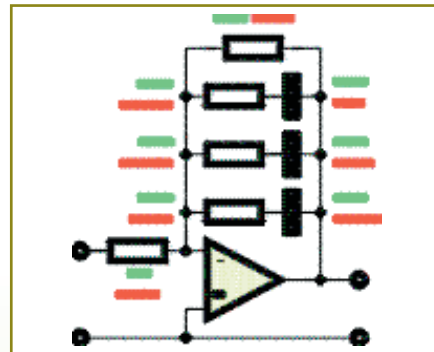
Wzmacniacz nieodwracający

A teraz mam ważne pytanie. Czy tak samo można kształtować charakterystykę wzmacniacza nieodwracającego? Jak myślisz? Czy układy z rysunku 48 będą mieć te same właściwości, jak analogiczne układy z rysunków 28, 32, 40?

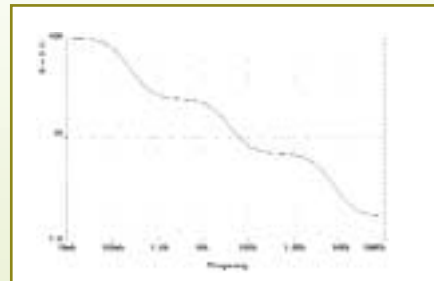
Jeśli uważasz, że wszystko będzie dokładnie tak samo, mylisz się! Charakterystyki będą trochę podobne, ale nie takie same. W szczególności nie musisz się wgłębiać, ale powinieneś pamiętać, że w przypadku wzmacniacza nieodwracającego wzmacnienie nie

może być mniejsze od jedności. A to na przykład w przypadku filtrów jest istotna wada. Tłumienie filtrów zapewne okaże się niewystarczające - zastanów się, jak będzie wyglądała charakterystyka filtru z rysunku 48c?

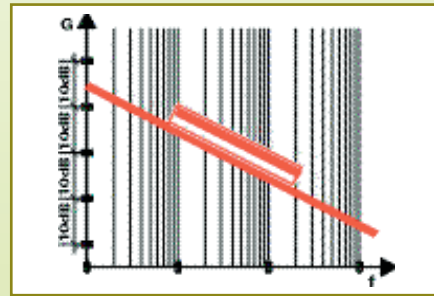
Obliczenia matematyczne są tu zdecydowanie trudniejsze. Jeśli więc będziesz chciał "bawić się" z charakterystyką w jakiś bar-



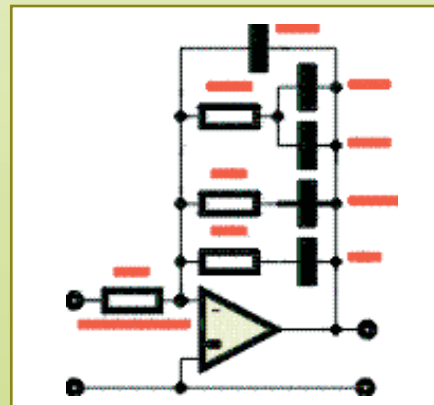
Rys. 46a



Rys. 46b



Rys. 47a



Rys. 47b

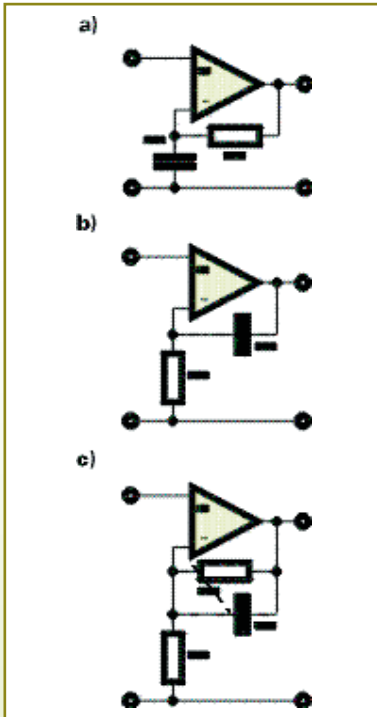
dziej wymyślny sposób, stosuj wzmacniacz odwracający. Właśnie układ odwracający genialnie nadaje się do wszelkich układów o modyfikowanej charakterystyce częstotliwościowej czy przejściowej. Czy nie masz wrażenia, że we wzmacniaczu odwracającym zależności są bardziej przejrzyste niż w nieodwracającym? Zastanów się nad tym. Fakt, że oporność wejściowa nie jest duża, nic nie

filtr górnoprzepustowy o częstotliwości granicznej

$$f = 1 / 2R3C3$$

Na **rysunku 51** znajdziesz konkretny przykład, z życia wzięty. Częstotliwości graniczne określone przez R1C1 jak i R3C3 są równe i wynoszą 159Hz. Wzmocnienie w paśmie przepustowym wyznaczone przez R2 i R1 wynosi 23. Kolor zielony ma charakte-

rystyka wzmacniacza, gdyby C3 miał bardzo dużą wartość (lub gdyby był zwarty) - wzmocnienie minimalne jest równe 1. Charakterystyka w kolorze niebieskim pokazuje przypadek, gdy pojemność C1 jest bardzo duża, a pasmo ograniczone jest tylko przez R3, C3. Czerwony kolor ma charakterystyka wypadkowa układu z rysunku 51a. Obecność dwóch filtrów R1C1 i R3C3 powoduje, że



Rys. 48

znaczy w porównaniu z łatwością kształtowania charakterystyki częstotliwościowej i przejściowej.

Zapomnij więc o wynalazkach z rysunku 48. W praktyce będziesz wykorzystywał jedynie prosty układ z **rysunku 49a**. Tak jak we wcześniejszych układach dolną częstotliwość graniczną f_d obliczysz ze wzoru

$$f_d = 1 / 2R1C1$$

natomiast górną

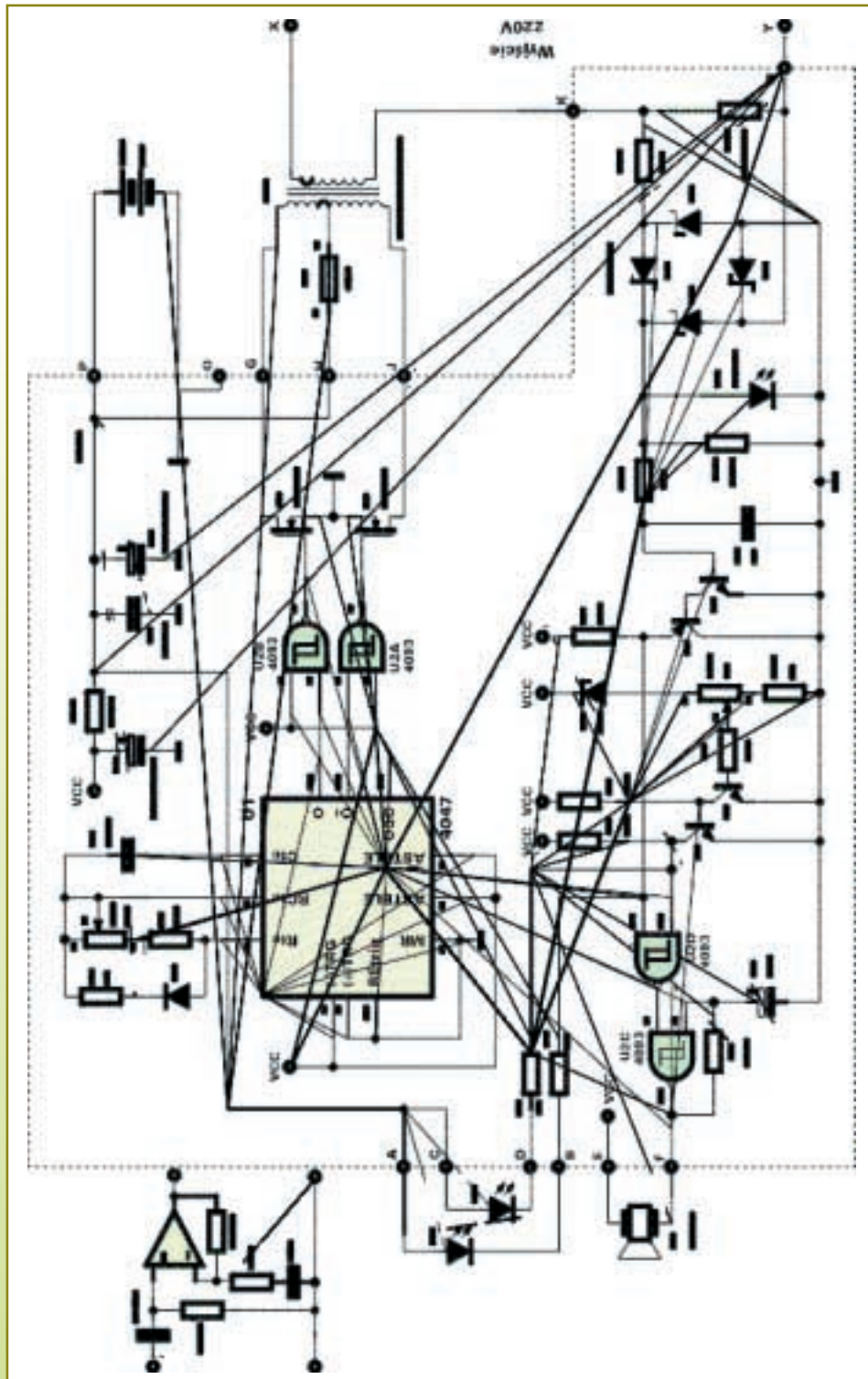
$$f_g = 1 / 2R2C2$$

Wzmocnienie w paśmie przepustowym wynosi oczywiście

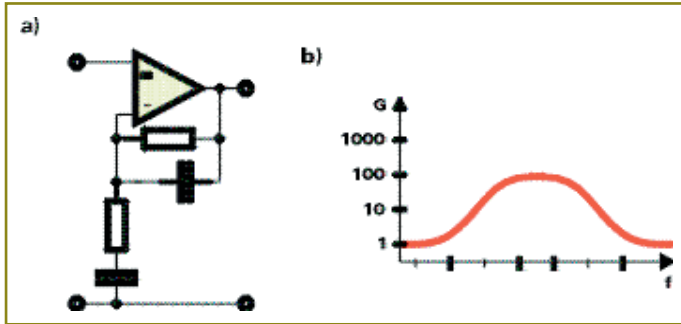
$$G = 1 + R2/R1$$

o ile f_d nie będzie większa od f_g (porównaj rysunek 43b). Pamiętaj, że wzmocnienie nie będzie mniejsze od jedności także poza pasmem przepustowym, jak pokazuje przykładowy **rysunek 49b**.

Często będziesz także stosował obwód wejściowy jak na **rysunku 50**. Właśnie w takiej konfiguracji pracuje zdecydowana większość... wzmacniaczy mocy audio. Powinieneś wiedzieć, że elementy R3C3 tworzą dodatkowy



Rys. 51



Rys. 49

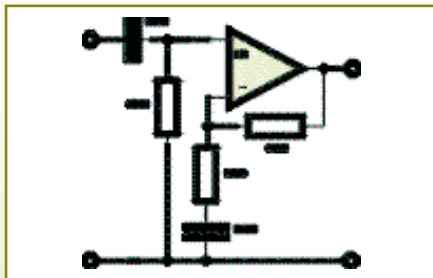
Przy małej wartości $R1=100$ należy zastosować $R2=510$ (500), $C1 = 33 \mu F$ (31,8 μF), $C2 = 15 nF$ (15,58nF).

Tak duże wartości kondensatorów są w wielu przypadkach niepraktyczne, dlatego lepiej zwiększyć $R1$

charakterystyka zmienia się z szybkością 12dB/okt., czyli 40dB/dek. Ale zmieniła się też częstotliwość charakterystyczna, przy której wzmocnienie spada o 3dB: zamiast 159Hz wynosi teraz 249Hz. Jeśli więc chcesz, by wypadkowa charakterystyka przy spadku -3dB sięgała od dołu, powiedzmy,

do 15k i wtedy: $R2=75k$, $C1=220nF$, $C2=100pF$.

Piotr Górecki



Rys. 50

20Hz, częstotliwości wyznaczone przez $R1C1$ i $R3C3$ powinny być przynajmniej o 1/3 mniejsze, czyli w tym wypadku nie wyższe niż 13Hz.

Tyle w tym odcinku. Na koniec jeszcze odpowiedzi na pytania z artykułu.

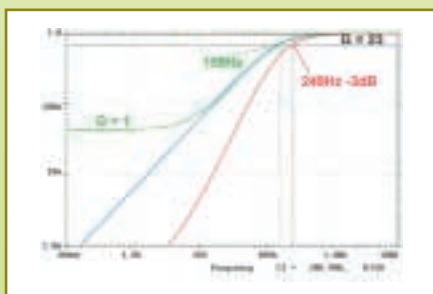
Odpowiedź do rysunku 36

Na wyjściach obydwu układów powinien wystąpić przebieg taki sam, jak na wejściach. Jednak w rzeczywistości ze względu na ograniczony zakres napięć wyjściowych oraz ograniczoną szybkość obu wzmacniaczy operacyjnych niektóre przebiegi (o dużym nachyleniu zboczy i dużych amplitudach) mogą zostać zniekształcone.

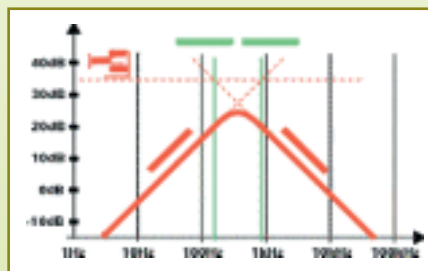
Odpowiedź do rysunku 39

$R1=5k$, $C1=1\mu F$.

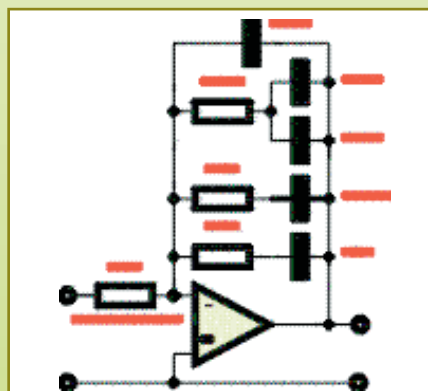
Odpowiedź do rysunku 42



Rys. 51b



Rys. 43b



Rys. 47b Filtr 3dB/okt.