

Zaczynamy nowy cykl o wzmacniaczach operacyjnych. Temat jest ogromny. Ale nie bój się! W praktyce wystarczy Ci niewielka część dostępnej wiedzy. Obiecuję Ci, że wszystko o czym będziemy mówić, okaże się zaskakująco proste. Nie masz więc żadnych powodów, żeby się bać tych bardzo pożytecznych elementów. Wzmacniacze operacyjne już niebawem uznasz za podzespoły bardzo przyjazne, uniwersalne, wręcz doskonałe. Aby jak najszybciej umożliwić Ci praktyczne ich wykorzystanie, zaplanowałem następującą kolejność: najpierw nie-

wielki tyk historii, potem garść niezbędnych informacji ogólnych na temat parametrów, następnie zapoznam Cię z kilkoma najbardziej podstawowymi układami pracy i zaraz potem podam niezbędne wskazówki, dzięki czemu od razu będziesz mógł wykorzystać zdobytą wiedzę w praktyce. Dopiero potem, w następnych odcinkach, zajmiemy się kolejnymi układami pracy, czyli dalszymi przykładami wykorzystania wzmacniaczy operacyjnych i wtedy podam Ci dalsze istotne informacje, rozszerzające horyzonty.

Łyk historii

Jak wiadomo, pierwszy prawdziwy cyfrowy komputer (ENIAC) powstał dopiero w drugiej połowie lat 40. Wcześniej, już w latach 20. naukowcy zauważyli, że pewne procesy można symulować za pomocą odpowiednio dobranych obwodów elektrycznych. Co więcej, okazało się, że układy elektroniczne zawierające wzmacniacze i przemysłnie skonfigurowane obwody RC mogą być przydatne do... rozwiązywania skomplikowanych, różniczkowych równań matematycznych. W czasie II wojny światowej naukowcy usilnie szukali różnych nowych sposobów obliczeń. Potrzebne to było nie tylko w raczkującej wtedy fizyce nuklearnej, ale też na przykład do obliczania, badania i symulowania innych zjawisk, przede wszystkim lotu pocisków i rakiet. Powstawały więc najprawdziwsze... **komputery analogowe**. Zestaw obwodów RC, wzmacniaczy, potencjometrów i innych bloków umożliwiał przeprowadzenie w bardzo prosty sposób dodawania, odejmowania, całkowania i różniczkowania. A przy użyciu dodatkowych sprytnych sposobów można było przeprowadzać także logarytmowanie, mnożenie, dzielenie, podnoszenie do potęgi i pierwiastkowanie. Kluczowymi "cegiełkami" takich analogowych komputerów były specyficzne wzmacniacze

(oczywiście lampowe). Właśnie te wzmacniacze, po dodaniu odpowiednich zewnętrznych obwodów sprzężenia zwrotnego, wykonywały wspomniane operacje matematyczne. W latach 40. przyjęła się ich nazwa **wzmacniacze operacyjne**. Były to duże urządzenia, zawierające kilka czy kilkanaście lamp elektronowych; pobierały wielkie ilości energii. Po pewnym czasie stworzono tranzystorowe wzmacniacze operacyjne, budowane z pojedynczych elementów. Potem pojawiły się wzmacniacze operacyjne w postaci układów scalonych, najpierw hybrydowych, potem małych, monolitycznych. Niewątpliwym punktem zwrotnym było zbudowanie w 1967 roku znanego do dziś monolitycznego wzmacniacza operacyjnego o oznaczeniu $\mu A741$ (w skrócie 741). Miał on swych poprzedników, np. układy $\mu A702$ czy $\mu A709$ (znanymi w kraju odpowiednikami $\mu A709$ były czeskie MAA501...504), ale wcześniejsze układy miały istotne wady. Kostka 741 okazała się istną rewelacją. I to nie tylko pod koniec lat 60., ale o wiele dłużej. Potem pojawiły się kolejne kostki, żeby wymienić tylko kilka: LM101 (krajowy odpowiednik ULY7701), LM108 (z tzw. tranzystorami "superbeta"), $\mu A715$ (szybki), $\mu A725$ (precyzyjny), $\mu A740$ (z wejściami FET), LF356 (z wejściami FET), CA3130 (MOSFET),

$\mu A776$ (programowany), LM358 (podwójny), LM324 (poczwórny), TL08X (FET), itd. Rozwój technologii umożliwiał wytwarzanie wzmacniaczy operacyjnych coraz bardziej zbliżonych do ideału. Dziś na rynku można spotkać niezliczone mnóstwo typów scalonych wzmacniaczy operacyjnych wielu firm. Ocenia się, że produkcja wzmacniaczy operacyjnych na całym świecie sięga setek milionów sztuk na rok. Niektóre szacunki mówią o produkcji ćwierć miliarda sztuk rocznie.

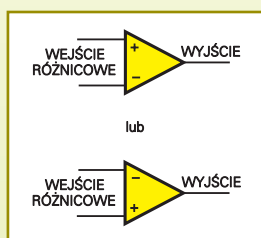
Skąd taka niesamowita popularność? Przecież po komputerach analogowych zostało jedynie mgliste wspomnienie, a młode pokolenie nawet nie wie, że takie komputery skutecznie konkurowały kiedyś z cyfrowymi.

Komputerów analogowych istotnie już nie ma, okazało się jednak, że zakres zastosowań wspomnianych wzmacniaczy jest ogromny. W elektronice cyfrowej podstawowymi cegiełkami są bramki, z których powstają potem bardziej skomplikowane układy, choćby mikroprocesory. W innych dziedzinach elektroniki (technika analogowa) tą podstawową cegiełką jest dziś wzmacniacz operacyjny, a nie pojedynczy tranzystor. Jak się więc okazuje, ta straszna nazwa "operacyjny" jest dzisiaj mocno myląca - wzmacniacze operacyjne nie są wcale używane do roz-

wiązywania równań różniczkowych drugiego rzędu, tylko do **wykonywania wszelkich wzmacniaczy, generatorów, filtrów, regulatorów i wielu innych pożytecznych układów**. Przetwarzają napięcia stałe i zmienne. W zasadzie należałoby więc poszukać lepszej nazwy; na razie ciągną się jednak zaszczości historyczne. Na marginesie warto wspomnieć, że w języku polskim nie mamy żadnego skrótu zastępującego długiśm określenie "wzmacniacz operacyjny". W literaturze anglojęzycznej często spotyka się skrót "op amp", "opamp" lub nawet OA, pochodzące od "operational amplifier". Może Czytelnicy EdW zaproponują lepszą polską nazwę oraz skrót zamiast długiego i nieco straszącego "wzmacniacz operacyjny"? Czekamy na propozycje!

Podstawy

Działanie wzmacniacza operacyjnego jest beznadziejnie proste, choć na pierwszy rzut oka może Ci się wydać dziwne. Choć istnieją setki typów wzmacniaczy operacyjnych, podstawowe zasady ich



Rys. 1.

bacz **rysunek 1**.

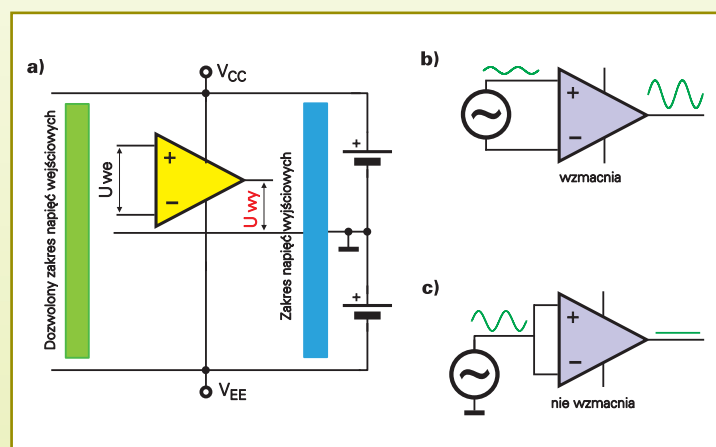
W rzeczywistości wzmacniacz ma jeszcze dwie końcówki zasilania, ale końcówek zasilania zazwyczaj nie rysuje się na schematach ideowych. Trzeba o tym pamiętać.

Zazwyczaj wzmacniacz operacyjny jest zasilany napięciem symetrycznym względem masy, jak pokazują to **rysunek 2**, czasem zaznacza się napięcia zasilające skrótami V_{CC} (dodatnie) i V_{EE} (ujemne). Napięcie wyjściowe może wtedy przyjmować wartości dodatnie lub ujemne względem masy. Oczywiście napięcie wyjściowe nie może wyjść poza zakres napięcia zasilającego. Zakres napięć wyjściowych jest zawsze trochę mniejszy niż całkowite napięcie zasilania - wynika to z budowy wewnętrznej. Zakres napięć, jakie mogą się pojawić na wyjściu, zazna- czyłem na rysunku 2 kolorem niebieskim.

Wzmacniacz oczywiście wzmacnia napięcie wyjściowe. Początkujących często przestrasza fakt, że wzmacniacz operacyjny ma dwa wejścia, a nie jedno. O jakie więc napięcie wejściowe tu chodzi? To bardzo ważne pytanie - chodzi o **różnicowe napięcie wejściowe**, czyli **napięcie między dwoma wejściami**. Wzmocnienie

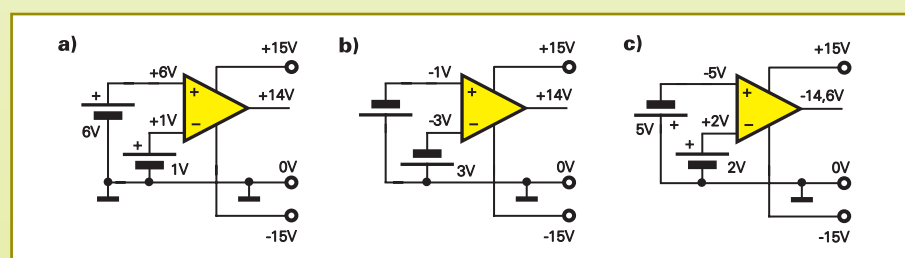
wzmacniacza operacyjnego jest bardzo duże, wręcz ogromne i wynosi 30000...1000000 razy w zależności od typu. Tym samym wystarczy bardzo mała zmiana napięcia wejściowego (rzędu mikrowoltów), by znacząco zmienić napięcie wyjściowe (o kilka czy kilkanaście woltów). Już tu widzisz, że w czasie "normalnej", czyli liniowej pracy wzmacniacza (gdym napięcie wyjściowe zawiera się w zakresie zaznaczonym na rysunku 2 kolorem niebieskim), napięcie na obu wejściach będzie praktycznie jednakowe.

Nie znaczy to wcale, że zawsze napięcia wejściowe są bliskie masy. Uważaj! To różnicowe napięcie wejściowe może występować niejako na tle dużego napięcia wspólnego. Na rysunku 2a kolorem zielonym zazna- czyłem dopuszczalny zakres wspólnych napięć wejściowych. Zauważyłeś zapewne, że i ten zakres jest mniejszy od napięcia zasilającego. Zapa-



Rys. 2.

Może jednak wydaje Ci się to bardzo dziwne - po co komu wzmacniacz o tak o g r o m n y m wzmocnieniu i trochę dziwnych właściwościach wejścia? "Goły" wzmacniacz rzeczywiście prezentuje się nieco osobliwie. Wszystko jednak nieba-



Rys. 3.

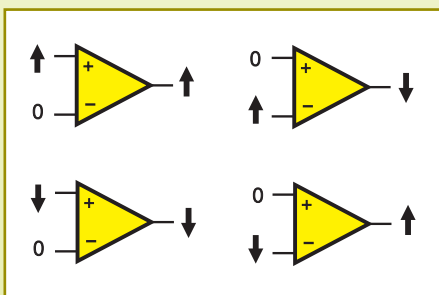
miętaj, że napięcia wejściowe wzmacniacza wcale nie muszą być bliskie masy - **o napięciu wyjściowym decyduje jedynie napięcie różnicowe**, czyli różnica napięć między wejściami, a nie napięcie wspólne. Ilustrują to **rysunki 2b i 2c**.

Jak wspomniałem, w czasie normalnej pracy różnicowe napięcie wejściowe jest bardzo małe. Wzmacniaczowi nic się jednak nie stanie, jeśli napięcie wejściowe (różnicowe) będzie duże, powiedzmy jeden czy kilka woltów - napięcie wyjściowe będzie wtedy zbliżone do dodatniego albo ujemnego napięcia zasilania.

Rysunek 3 pokazuje kilka takich przypadków i przykładowych napięć. Mówimy, że wzmacniacz wejdzie w nasycenie lub po prostu się nasyci. Podsumowujemy: gdy napięcie na wejściu "+" (nieodwracającym) rośnie, to rośnie też napięcie wyjściowe. Wzrost napięcia na wejściu "-" (odwracającym) powoduje zmniejszanie się napięcia wyjściowego. Zmniejszanie się napięcia na wejściu "minusowym" powoduje wzrost napięcia wyjściowego. Pokazuje to **rysunek 4** - dobrze utrwal sobie te proste zasady. (W dalszej części cyklu obok pełnej nazwy "wejście nieodwracające" będzie zamiennie używane nieprecyzyjne określenie "wejście dodatnie". Tak samo obok "wejście odwracające", będzie używane uproszczone określenie "wejście ujemne".)

Przeanalizuj podane dotąd wiadomości - teraz już z grubsza wiesz, jak działa wzmacniacz operacyjny.

wzmocnienie było równe milion (a są takie wzmacniacze), wymagana zmiana na wejściu wyniesie tylko 5 mikrowoltów. 5 czy nawet 50 mikrowoltów to niewyobrażalnie mało - śmiało można zaniedbać takie zmiany i patrząc niejako od końca powiedzieć, że przy zmianach napięcia wyjściowego, napięcie wejściowe praktycznie się nie zmienia. Czyli w czasie normalnej pracy napięcia na obu wejściach wzmacniacza muszą być, i praktycznie są, jednakowe. Pomyśl chwilę! Na pierwszy rzut oka to dziwny wniosek. Ale naprawdę tak powinienes to widzieć na początku Twojej przygody ze wzmacniaczami operacyjnymi. Jeśli napięcie wejściowe byłoby większe, wyjście natychmiast weszłoby w stan nasycenia, a przecież w ogromnej większości zastosowań tak nie jest - na wyjściu występują przecież napięcia o wartościach zawierających się w tak zwanym zakresie liniowym, pomiędzy napięciami zasilania. A więc w takich układach zewnętrzne elementy współpracujące muszą być tak włączone, by jakimś sposobem utrzymać na obu wejściach jednakowe napięcie. Jak? Szczegóły poznasz za chwilę, ale już teraz czujesz przez skórę, że w grę tu będzie wchodzić jakieś sprzężenie zwrotne, czyli podanie sygnału z wyjścia na wejście(-a). Do tego wątku wrócimy, a na razie spojrzysz na sprawę napięć wejściowych jeszcze inaczej.



Rys. 4.

Jeśli napięcia na obu wejściach podczas normalnej (liniowej) pracy są praktycznie równe, to możemy powiedzieć, że są one... zwarte. Nie protestuj! Nie jest to rzeczywiste zwarcie; w literaturze nazywane jest zwarcie wirtualnym - zobacz rysunki 5a...5c. Jeśli więc w jakimś układzie jedno z wejść (w praktyce dodatnie) jest połączone z masą, to drugie, ujemne wejście też w czasie liniowej pracy ma praktycznie potencjał masy. Mówimy, że jest to masa wirtualna. Ilustruje to rysunek 5d.

Mam nadzieję, że to rozumiesz. Jeśli straszysz Cię ta "wirtualna masa", nie załamuj się - z czasem zrozumiesz. Podałem Ci te określenia tylko dlatego, że występują w literaturze. A w sumie chodzi

tylko o to, że do wywołania dużych zmian napięcia wyjściowego potrzebne jest małe (różnicowe) napięcie wejściowe, a wobec tego **w czasie normalnej pracy napięcia na obu wejściach są praktycznie jednakowe**.

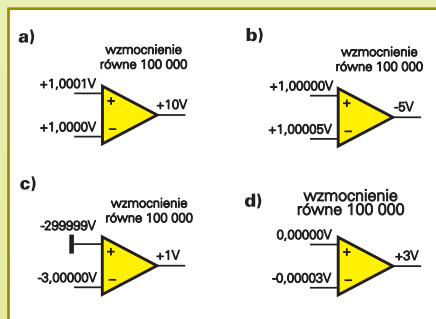
I kolejna sprawa. Wiem, że dla początkujących niepokojącą sprawą jest fakt, że obecnie dostępne są setki typów wzmacniaczy operacyjnych. Czyżby to znaczyło, że zasada działania każdego jest inna?

Nie! Jak wspomniałem, przedstawiona generalna zasada działania dotyczy wszystkich "normalnych" wzmacniaczy operacyjnych. O "nienormalnych" (transimpedancyjnych, Nortona, ze sprzężeniem prądowym) opowiem później, żeby Ci nie mącić w głowie.

W takim razie może do poszczególnych zastosowań trzeba użyć konkretnego wzmacniacza operacyjnego, a inne się nie nadają? Czy trzeba poznać wszystkie dostępne typy i rodzaje wzmacniaczy operacyjnych? Nie bój się! W pracowni elektronika-hobbysty stale powinny być pod ręką trzy lub cztery typy popularnych i bardzo tanich wzmacniaczy operacyjnych (np. LM358, TL072, LF356, NE5532). Gdyby wyjątkowo potrzebny był jakiś szczególny typ, można go kupić oddzielnie. Skąd więc tyle różnych typów wzmacniaczy?

Sprawa ma co najmniej dwa aspekty. Po pierwsze poszczególne opracowania są chronione patentami. Firma ma możliwość albo kupić od właściciela patentów licencję (na jakiś bardziej popularny układ), albo opracować od podstaw nowy wzmacniacz (o podobnych, a zwykle nieco lepszych parametrach, ale o innej budowie wewnętrznej i pod inną nazwą).

Po drugie, co znacznie ważniejsze, postęp technologiczny umożliwia wytwarzanie coraz to lepszych układów. Lepszych, to znaczy, bardziej zbliżonych do ideału.



Rys. 5.

Ideałem byłoby, aby wzmacniacz operacyjny:

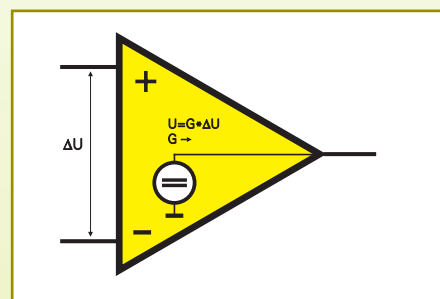
- miał prądy wejściowe równe zeru, co jest równoznaczne z nieskończeniem wielką rezystancją wejściową,
- miał wzmocnienie napięciowe nieskończenie duże,

- rezystancja wyjściowa powinna być równa zeru (co oznacza nieograniczoną wydajność prądową wyjścia),

- układ powinien być nieskończenie szybki (napięcie wyjściowe powinno się zmieniać nieskończenie szybko).

Pożądane byłoby też, by nie pobierał prądu ze źródła zasilania.

Taki idealny wzmacniacz można traktować jak czarną skrzynkę, zawierającą źródło napięcia (wyjściowego), sterowane (małym, różnicowym) napięciem wejściowym. Spotykany w literaturze schemat zastępczy (model) idealnego wzmacniacza operacyjnego pokazany jest na **rysunku 6**. Właśnie taki prościutki model będzie nam potrzebny do wstępnych rozważań i analiz. W pierwszym przybliżeniu (dla zrozumienia podstawowych zależności i przeprowadzenia kluczowych obliczeń) warto założyć, iż każdy wzmacniacz operacyjny jest idealny.



Rys. 6. Model idealnego wzmacniacza operacyjnego

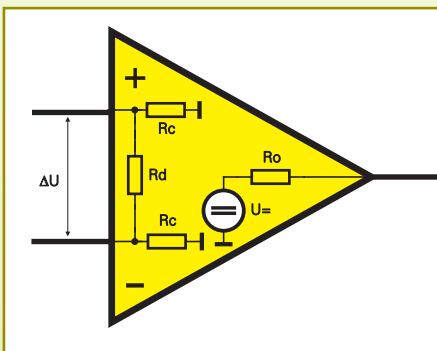
Choć w naszym realnym świecie nie ma elementów idealnych, parametry wielu współczesnych wzmacniaczy operacyjnych naprawdę są bliskie ideału. Oto przykłady.

W obwodach wejściowych wprawdzie płyną prądy, ale zazwyczaj są one rzędu nanoamperów lub nawet pikoamperów (miliardowych i bilionowych części ampera). Rezystancja wejściowa nie jest wprawdzie nieskończenie duża, ale zawsze jest większa niż 1MΩ, a często wynosi setki i tysiące megaomów. Wzmocnienie wprawdzie nie jest nieskończone, ale jest ogromne - 100000...1000000 razy i więcej. Wydajność prądowa wyjścia też jest ograniczona, zwykle do kilkunastu... kilkudziesięciu miliamperów, ale w praktycznych zastosowaniach wystarcza to całkowicie. Warto jeszcze dodać, że typowy wzmacniacz operacyjny w spoczynku pobiera ze źródła(źródeł) zasilania niewielki prąd, rzędu 1mA (większy prąd pobiera tylko wtedy, gdy jest obciążony). Są wzmacniacze, które w spoczynku pobierają tylko kilka czy kilkadziesiąt mikroamperów prądu.

I tu masz wyjaśnienie wątpliwości - rzeczywiste wzmacniacze operacyjne różnią się między sobą wartościami tych i jeszcze

innych parametrów, na przykład szybkością czy wartością dopuszczalnych napięć zasilających (zwykle do $\pm 18V$, ale w niektórych typach tylko do $\pm 6V$). Są więc wzmacniacze operacyjne uniwersalne - tanie, powszechnie dostępne i w sumie bardzo dobre. Ale jest i znacznie droższa elita: wzmacniacze precyzyjne, wzmacniacze szybkie i superszybkie, wzmacniacze o szczególnie małych prądach wejściowych, wzmacniacze niskoszumne, wzmacniacze o zwiększonej wydajności wyjścia, wzmacniacze mikromocowe, itd.

Dowiedziałeś się już z grubsza, na czym polegają różnice między poszczególnymi typami wzmacniaczy. Uwzględniając wspomniane wcześniej ograniczenia, można narysować schemat zastępczy jak na **rysunku 7**. Co prawda i on nie prezentuje wszystkich ograniczeń i właściwości (np. nie zawiera informacji o szybkości wzmacniacza), ale pomaga zrozumieć, czym różnią się poszczególne wzmacniacze.



Rys. 7. Uproszczony model rzeczywistego wzmacniacza operacyjnego

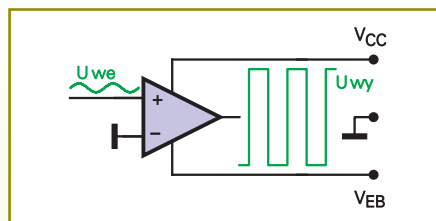
Uzbrojony w podane informacje jesteś gotowy do zapoznania się z podstawowymi układami pracy wzmacniacza operacyjnego. To historyczna chwila - wkraczasz w świat najprawdziwszej techniki analogowej, której tak się bałeś. Analiza okaże się bardzo łatwa. Oprócz podanych właśnie wiadomości o wzmacniaczu operacyjnym potrzebne będą:

1. umiejętność logicznego myślenia,
2. dobre zrozumienie prawa Ohma, czyli zależności prądu, napięcia i rezystancji,
3. prądowe prawo Kirchhoffa, mówiące, że prąd nie może "zginąć po drodze",
4. zrozumienie podziału napięcia na dzielniku rezystorowym oraz dodatkowo
5. zależność prądu od zmian napięcia w kondensatorze (i odwrotnie).

Przy analizie będziemy niekiedy zaczynać jakby od końca i zastanawiać się, co by było, gdyby... Ale i to nie będzie trudne. Zaczynamy więc!

Najprostsze aplikacje

Na **rysunku 8** masz najprostszy przykład zastosowania wzmacniacza operacyjnego. Wejście "ujemne", czyli odwracające, zwieramy do masy. Na wejście "dodatnie" podajemy niewielki sygnał sinusoidalnie zmienny. I co?



Rys. 8.

Jeśli napięcie wejściowe różni się od zera więcej niż o wspomniane wcześniej mikrowolty, napięcie na wyjściu przybiera wartość bliską albo dodatniemu, albo ujemnemu napięciu zasilania. Jedynie dla niesamowicie małych sygnałów "w okolicach zera", napięcie wyjściowe teoretycznie przybierałoby wartości pośrednie. Teoretycznie, ponieważ w grę wchodzi tu inne czynniki, którymi na razie nie będę mącił Ci w głowie. Wspomnę tylko, że słaby sygnał z jakiegokolwiek mikrofonu ma wartości rzędu co najmniej 1mV, czyli setki a nawet tysiące razy więcej (!) niż zakres liniowej pracy wejścia wzmacniacza operacyjnego. Jak z tego widać, nasz wzmacniacz ma zbyt dużą czułość i w połączeniu z **rysunku 8** jego przydatność jest problematyczna - napięcie wyjściowe albo jest bliskie dodatniemu, albo ujemnemu napięciu zasilania (czyli jest w stanie nasycenia). W tym wypadku zamienia mały przebieg sinusoidalny na prostokątny. Owszem, układ taki jest dość często używany, ale nie jako wzmacniacz, tylko komparator, porównujący napięcia na obu wejściach.

A teraz zbadajmy właściwości układu z **rysunku 9**. Mamy jedno wejście i jedno wyjście.

Przypuśćmy, że wejście zwieramy do masy. Napięcie na wejściu "+" jest równe zeru. Analizę zaczynamy jakby od końca. Zastanawiamy się, co by było, gdyby...

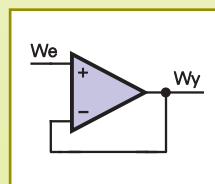
Na chwilę założmy, że napięcie wyjściowe (i napię-

cie na wejściu "-") byłoby równe na przykład +1V. Tak duże napięcie różnicowe (1V) momentalnie spowodowałoby zmianę napięcia wyjściowego na ujemne (bo napięcie na wejściu odwracającym jest dodatnie - porównaj rysunek 4). Jeśli z kolei napięcie wyjściowe (i napięcie na wejściu "-") stałoby się ujemne, momentalnie napięcie wyjściowe powinno stać się dodatnie. Coś tu nie gra! Czyżby układ stał się generatorem? Nie! Na wyjściu takich napięć nie będzie - ustali się po prostu napięcie równe zeru. Wtedy napięcie na obu wejściach też będzie równe zeru. Zerowe (różnicowe) napięcie wejściowe daje zerowe napięcie wyjściowe. Zgadza się?

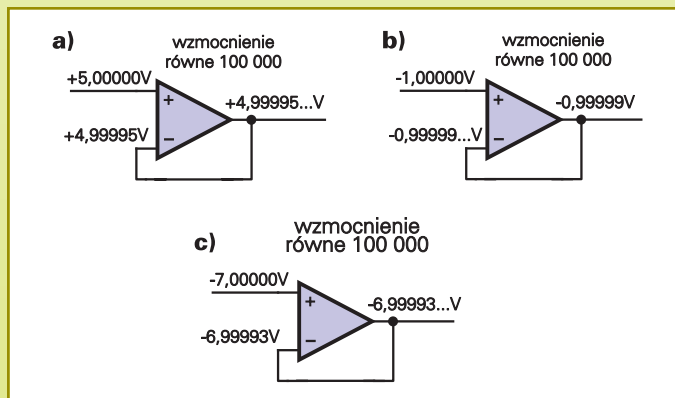
Zauważ, że próba zmiany napięcia na wejściu "minusowym" w jakimś kierunku wywołuje natychmiast reakcję i zmianę napięcia wyjściowego w przeciwnym kierunku, by przywrócić na wejściu "ujemnym" napięcie takie samo, jak na wejściu "dodatnim". Mówimy, że występuje tu bardzo silne ujemne sprzężenie zwrotne z wyjścia na wejście odwracające. Już chyba się zorientowałeś, że to (ujemne) sprzężenie pełni dobroczynną, stabilizującą rolę.

Jeśli teraz na przykład zmienimy napięcie na wejściu "dodatnim" z zera do +5V, napięcie wyjściowe (i napięcie na wejściu "-") natychmiast także się zmieni i stanie się równe +5V (zobacz **rysunek 10a**). Oto uzasadnienie. Zaczniemy od końca. Aby napięcie na wyjściu było równe +5V, różnicowe napięcie wejściowe musi wynosić kilka czy kilkadziesiąt mikrowoltów. Na wejściu "+" występuje już napięcie wejściowe +5V, a więc napięcie na drugim wejściu (i napięcie wyjściowe) rzeczywiście będzie równe +5V z dokładnością do tych drobnych mikrowoltów.

Na **rysunkach 10b, 10c** zobaczysz sytuację przy różnych napięciach wejściowych. Przeanalizuj dokładnie podane przykłady. Jak widzisz, otrzymaliśmy układ, który na wyjściu powtarza napięcie wejściowe (stałe i zmienne). W literatu-



Rys. 9.



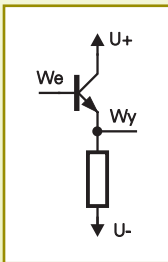
Rys. 10.

rze nazywany jest on, niezbyt chyba szczęśliwie, wtórnikiem (nieodwracającym).

(Tylko dla dociekliwych - sprawdźcie, jakie będzie napięcie wyjściowe dla trzech przypadków z rysunku 10, gdyby wzmacnienie wzmacniacza było równe 10x, 1000x, 10000000x. O ile będzie się różnić od wejściowego? Komentarza nie trzeba!)

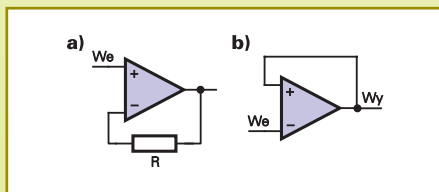
Ale po co taki układ, który nie wzmacnia, a nawet minimalnie osłabia? Nie zapomnij, że rezystancja wejściowa wzmacniacza operacyjnego jest bardzo duża. Nasz wtórnik będzie więc miał ogromną rezystancję wejściową (co najmniej rzędu megaomów) i znaczną wydajność prądową wyjścia (co najmniej kilkanaście mA), co umożliwi obciążenie wyjścia nawet stosunkowo małą rezystancją rzędu 600Ω czy 1kΩ. Nic dziwnego, że nasz wtórnik czasem nazywany jest transformatorem impedancji. Ma bowiem bardzo dużą rezystancję wejściową (nie obciąża źródła) i bardzo małą rezystancję wyjściową (rzędu drobnych ułamków oma).

Wcześniej znałeś tylko "kulawy" układ wtórnika tranzystorowego (rysunek 11). Poznany właśnie wtórnik ze wzmacniaczem operacyjnym jest w ogromnej większości przypadków nieporównanie lepszy, bo nie tylko dokładniej odwzorowuje napięcie wejściowe (nie wprowadza przesunięć czy zniekształceń), ale także w spoczynku pobiera bardzo mały prąd. Od dnia dzisiejszego taki wtórnik będziesz stosował bardzo często.



Rys. 11.

A teraz pytanie kontrolne. Co zmieni dodanie rezystora między wyjście a wejście ujemne według rysunku 12a? A jakie właściwości będzie miał układ z rysunku 12b?



Rys. 12.

Zastanów się samodzielnie

Odpowiedź znajdziesz na końcu artykułu.

Wzmacniacz nieodwracający

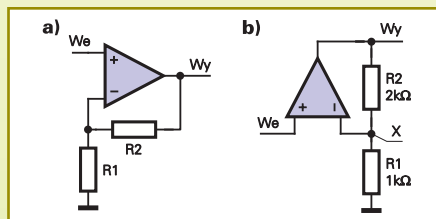
Zakładamy teraz, że wzmacnienie napięciowe wzmacniacza operacyjnego jest nieskończenie wielkie, rezystancja wejściowa nieskończenie wielka (nie płyną

żadne prądy wejściowe), a rezystancja wyjściowa jest zerowa.

Rysunek 13a pokazuje jeden z podstawowych układów pracy - tak zwany wzmacniacz nieodwracający. Aby zrozumieć jego właściwości, wystarczy rozumieć działanie dzielnika składającego się z dwóch rezystorów. Dlatego dla ułatwienia warto narysować ten układ w postaci jak na rysunku 13b i na początek rozważyć przyjął "okrągłe" wartości rezystancji (1kΩ, 2kΩ).

Przypuśćmy, że na wejście (nieodwracające) podano napięcie równe +1V. Wzrost napięcia na wejściu "+" spowoduje natychmiastowy wzrost napięcia na wyjściu. To oczywiście spowoduje także wzrost napięcia w punkcie X. Co bardzo ważne, napięcie wyjściowe nie wzrośnie aż do nasycenia. O ile wzrośnie? Już sam sposób wykonania rysunku 13b sugeruje odpowiedź. Wzrośnie dokładnie tyle, by napięcie w punkcie X było praktycznie równe napięciu wejściowemu. Chyba już wiesz, dlaczego?

Prąd popłynie z wyjścia przez rezystory dzielnika R2, R1. Na wyjściu ustali się takie napięcie, by w punkcie X napięcie było równe napięciu Uwe (wirtualne zwarcie).

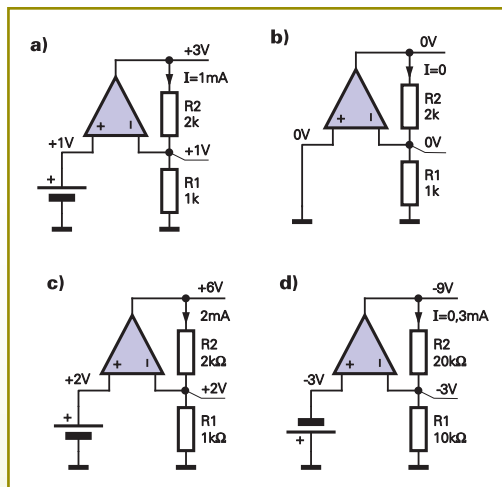


Rys. 13.

Korzystając z rysunku 13b bez trudu obliczysz, jakie będzie napięcie wyjściowe, przy podaniu na wejście kolejno napięć 0V, +2V oraz -3V. Wartości napięć pokazują rysunki 14a...14d. Wychodzi na to, że układ ma wzmacnienie napięciowe równe 3.

Zauważyłeś, że o wzmacnieniu decyduje stosunek podziału dzielnika R2, R1, a ściślej wzmacnienie jest odwrotnością tłumienia dzielnika R2, R1.

Oczywiście nasze wzmacniacze z rysunków 13, 14 wzmacniają zarówno napięcia stałe, jak i zmienne (podobnie jak wtórnik z rysunku 9). I jeszcze jeden drobiazg - rysunek 14d pokazuje przy okazji, że o wartości wzmacnienia decyduje sto-



Rys. 14.

sunek rezystancji R2, R1, a nie ich wartość bezwzględna.

Proste i oczywiste!

Jeśli chcesz się bawić we wzory i zakładając, że wzmacnienie napięciowe wzmacniacza operacyjnego jest nieskończenie wielkie, rezystancja wejściowa nieskończenie wielka (nie płyną żadne prądy wejściowe), zapiszesz:

$$U_{we} = U_x$$

Dzielnik R1, R2 dzieli napięcie następująco:

$$U_x = [R1 / (R1 + R2)] U_{wy}$$

stąd wzmacnienie (gain) wzmacniacza nieodwracającego

$$G = U_{wy} / U_{we} = U_{wy} / U_x = (R1 + R2) / R1$$

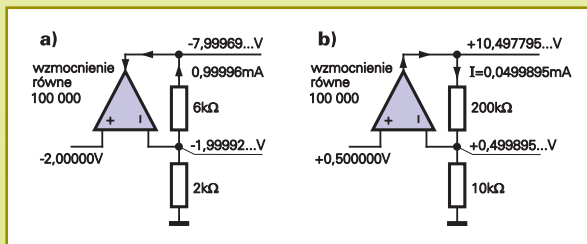
lub jak częściej zapisujemy:

$$G = 1 + (R2 / R1)$$

Zapamiętaj ten wzór - przyda ci się niejednokrotnie!

Analizując napięcia na rysunku 14 założyliśmy milcząco, że wzmacnienie jest nieskończenie duże. Ściślej biorąc, należałoby uwzględnić skończoną wartość wzmacnienia. Dwa przykłady masz na rysunku 15. Spróbuj je przeanalizować - jak widzisz, rzeczywiste wartości napięć wyjściowych są nieco niższe, niż wynika z podanego właśnie wzoru, ale sam widzisz, że różnice są pomijalnie małe. Zresztą już się przekonałeś, że czym większe wzmacnienie wzmacniacza operacyjnego, tym odchyłka mniejsza.

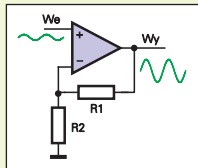
A teraz w ramach samodzielnych ćwiczeń zastanów się, jakie będą napięcia



Rys. 15.

w układzie z rysunku 13b, gdy przy zasilaniu $\pm 15V$ podasz na wejście napięcie równe $+10V$? Odpowiedź znajdziesz na końcu tego artykułu.

Co musisz wiedzieć o wzmacniaczu nieodwracającym?

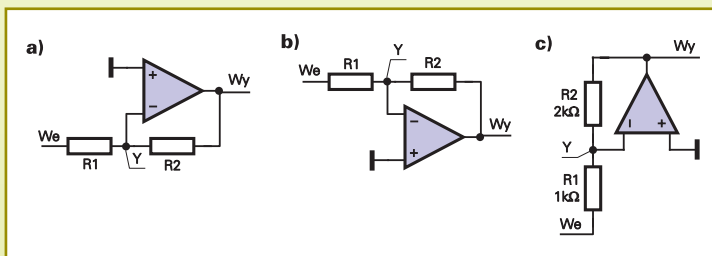


- napięcie na wejściu "ujemnym" wzmacniacza operacyjnego jest równe napięciu wejściowemu (wirtualne zwarcie)

- ma bardzo dużą rezystancję wejściową
- wzmacnienie wynosi $G=1+(R2/R1)$
- napięcie na wejściu "ujemnym" wzmacniacza operacyjnego jest równe napięciu wejściowemu (wirtualne zwarcie)

Wzmacniacz odwracający

Teraz bierzemy na warsztat układ z rysunku 16a. Możemy go przedstawić w częściej spotykanej postaci z rysunku 16b, ale dla ułatwienia narysujemy go w postaci z rysunku 16c i podajemy na wejście (tym razem wejściem jest końcówka rezystora) napięcie równe $-1V$. Możemy sobie wyobrazić, że w króciutkim ułamku sekundy napięcie na wejściu "ujemnym" znacznie wzrosło. Jeśli napięcie na wejściu odwracającym wzrosło, napięcie wyjściowe zmniejszyło się w stronę wartości ujemnych. Czy wyjście się nasyci? Nie, bo momentalnie wytworzy się stan równowagi. Napięcia i prąd będą takie, jak pokazano na rysunku 17a.



Rys. 16.

Można też do sprawy podejść inaczej. Już sposób wykonania rysunku 16c podpowiada, że napięcie w punkcie X musi być zawsze równe zero. Rzeczywiście, przy liniowej pracy układu tak będzie. Prąd nie może "zginąć po drodze". Na wyjściu musi się więc ustalić takie napięcie, by różnica napięć między końcówkami wejściowymi była praktycznie równa

zeru (wirtualna masa). Sam sprawdź, czy wszystko pa-suje.

Teraz przeanalizuj jeszcze sytuację z rysunku 17b, gdy na wejście tego wzmacniacza podajemy napięcie ujemne równe $+2V$, a ja dla ułatwienia narysowałem schemat inaczej i zmieniłem wartości rezystorów R2, R1, zachowując ten sam stosunek. Znow o wartości napięcia wyjściowego decyduje stosunek rezystorów R2 i R1. Czym większa wartość R2 w stosunku do R1, tym większe musi być napięcie wyjściowe w stosunku do wejściowego, by utrzymać w punkcie Y napięcie równe zero (wirtualna masa).

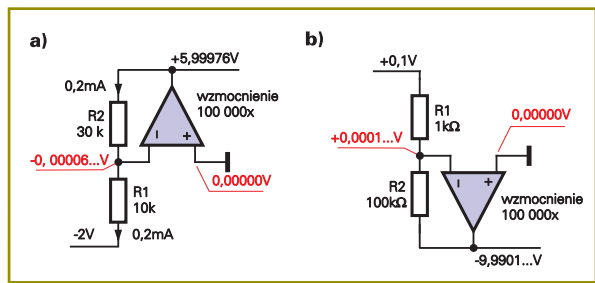
Tym razem wzmacnienie wynosi $G = -R2 / R1$

Znak minus wskazuje, że biegunowość napięcia wyjściowego jest odwrotna niż napięcia wejściowego, inaczej mówiąc: wzmacniacz odwraca fazę przebiegu. Stąd jego nazwa - wzmacniacz odwracający. Oczywiście, także i ten wzmacniacz wzmacnia zarówno napięcia stałe jak i zmienne. Zwróć uwagę, że tym razem wypadkowe wzmacnienie może być mniejsze od jedności, czyli zamiast wzmacniacza otrzymamy tłumik (gdy $R2 < R1$).

Aby nie wprowadzać zamieszania, możemy pominąć znak minus i zapisać $G = R2 / R1$ dodając, że układ odwraca biegunowość (fazę), co na przykład w układach audio nie ma większego znaczenia. Podobnie jak we wzmacniaczu nieodwracającym, wzmacnienie nie zależy od wartości rezystorów, tylko od ich stosunku.

Rysunki 18a, 18b pokazują poziomy napięć przy uwzględnieniu skończonego wzmacnienia wzmacniacza operacyjnego.

Uwaga! Rysunki 17, 18 pokazują jeszcze jedną bardzo ważną cechę tego układu - w przeciwieństwie do poprzednio omawianego wzmacniacza, tym razem w obwodzie wejściowym płynie prąd. Ten prąd przepływa przez źródło sygnału, a właściwie pochodzi z źródła sygnału. Inaczej mówiąc, wzmac-

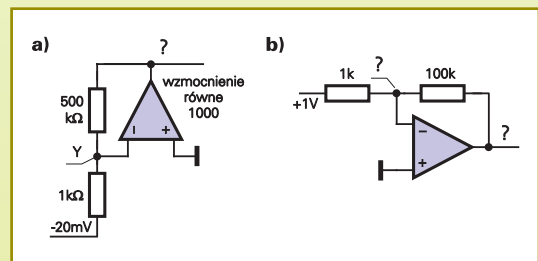


Rys. 18.

niacz odwracający obciąża źródło sygnału. Jeśli tak, to oporność wejściowa tego wzmacniacza nie jest już tak duża jak we wzmacniaczu nieodwracającym. Pamiętaj o wirtualnym zwarcie (wirtualnej masie w punkcie Y) od razu powiemy, że oporność wejściowa wzmacniacza odwracającego jest równa R1. Zapamiętaj to! Na pierwszy rzut oka jest to duża wada tego wzmacniacza. W praktyce okazuje się, że wcale nie jest tak źle i różne odmiany wzmacniacza odwracającego są stosowane bardzo często, nawet częściej niż wzmacniacz nieodwracający.

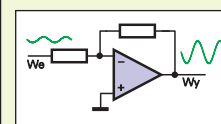
Może zaproponujesz, by dla zwiększenia oporności wejściowej zwiększyć wartości R1 i R2 nawet do kilkadziesiątu megaomów? Czasem jest to możliwe, czasem nie. Sprawa wyjaśni się później (domyślasz się, że na przeszkodzie stoją prądy polaryzacji wejść, ale nie tylko). W każdym razie wzmacniacz odwracający i jego pochodne są powszechnie stosowane. Dlatego dobrze zapoznaj się z tym układem. Przy analizie wszelkich podobnych zawsze pamiętaj, że gdy wejście "dodatnie" jest połączone z masą, to w czasie liniowej pracy na wejściu "ujemnym" na-

możemy pominąć znak minus i zapisać $G = R2 / R1$ dodając, że układ odwraca biegunowo-



Rys. 19.

Co musisz wiedzieć o wzmacniaczu odwracającym?



- rezystancja wejściowa jest równa R1
- wzmacnienie wynosi $G=R2/R1$

- i może być mniejsze od jedności
- wzmacniacz odwraca biegunowość (fazę) napięcia
- napięcie na wejściu "ujemnym" wzmacniacza operacyjnego jest równe zero (wirtualna masa)

Rys. 17.

pięcie też jest praktycznie równe zeru (wirtualna masa). Wtedy prąd wejściowy płynie ze źródła do tej wirtualnej (pozornej) masy, i ponieważ nie może zginąć po drodze, a przez końcówki wejściowe prąd nie płynie, więc musi dalej płynąć do wyjścia wzmacniacza operacyjnego.

A teraz w ramach ćwiczeń oszacuj samodzielnie, jakie będzie napięcie wyjściowe wzmacniacza z **rysunku 19a**, zakładając, że wzmacnienie wzmacniacza operacyjnego wynosi tylko 1000. A jakie będą napięcia w układzie z **rysunku 19b** przy zasilaniu ukła-

du napięciem $\pm 10V$? Odpowiedź znajdziesz na końcu tego artykułu.

I tyle wprowadzenia teoretycznego - wystarczy Ci na początek. Możesz już zacząć eksperymenty.

Piotr Górecki

Wyjaśnienie 1

Dodanie rezystora według rysunku 12a nie powinno niczego zmienić, bo przez rezystor nie płynie żaden prąd, czyli napięcie na obu końcówkach rezystora jest jednakowe. Wtórnik będzie normalnie pracował.

Natomiast układ z rysunku 12b jest zupełnie nieprzydatny w praktyce. Będzie się on "zatrzaskiwał", czyli wpadał w jeden ze stanów nasycenia i trudno go będzie wyprowadzić z tego stanu.

Wyjaśnienie 2

Podanie na wejście układu z rysunku 13b napięcia $+10V$ spowoduje nasycenie wyjścia, czyli pojawienie się tam napięcia wynoszącego mniej więcej $+14V$ ($+12...14,7V$ zależnie od typu wzmacniacza). Tym samym napięcie

w punkcie X wyniesie $4...4,9V$, a więc napięcie różnicowe będzie wynosić ponad $5V$. Tak duże różnicowe napięcie nic niestety nie pomoże, bo wyjście będzie w stanie nasycenia. Oczywiście wzmacniacz nie ulegnie uszkodzeniu.

Wyjaśnienie 3

Dokładna analiza sytuacji z rysunku 19a wymaga rozwiązania układu prostych równań. Ale można też podejść do problemu inaczej. Teoretycznie wzmacnienie powinno być równe stosunkowi $R2$ do $R1$, czyli powinno wynosić 500. Gdyby tak było, napięcie wyjściowe wyniosłoby $+10V$. Na podstawie poprzednich rysunków można przypuszczać, że napięcie to będzie mniejsze. Ze względu na stosunkowo małe wzmacnienie wzmacniacza operacyjnego (1000) tym

razem odchyłka od spodziewanej wartości będzie nieporównanie większa - napięcie wyjściowe wyniesie tylko $+6,662225...V$. Niecałe 7V zamiast spodziewanych dziesięciu! Jeśli nie wierzysz - sprawdź! Napięcie w punkcie Y wyniesie $-6,662225...mV$.

Przykład ten pokazuje, że wzmacnienie samego wzmacniacza operacyjnego powinno być zdecydowanie większe niż wzmacnienie wyznaczone przez dzielnik rezystorowy. Tylko wtedy błąd będzie pomijalnie mały (błąd pomijalnie mały to w tym wypadku błąd mniejszy niż 0,5%).

Wzmacniacz operacyjny w układzie z rysunku 19b wejdzie w nasycenie i napięcie wyjściowe będzie bliskie ujemnemu napięciu zasilania (około $9V$). Napięcie na wejściu odwracającym będzie wynosić około $+0,9V$.