

Z drugiej strony, przy istniejącym sprzężeniu zwrotnym, koła poruszają się tylko na tyle, aby przywrócić zawór (prawie) do pozycji neutralnej. Gdy kierownica jest obracana, koła poruszają się proporcjonalnie.

Należy zauważyć, że zawór sterujący reaguje na różnicę między wejściem z koła kierownicy a położeniem łącznika kierowniczego. Jest to podobne do sposobu, w jaki wzmacniacz operacyjny reaguje na wejściowy sygnał różnicowy. Pompa jest analogiczna do zasilania w układzie wzmacniacza operacyjnego. Ponadto, położenie cylindra wspomagającego jest analogiczne do sygnału wyjściowego wzmacniacza operacyjnego, a mechaniczne połączenie z powrotem do zaworu sterującego jest analogiczne do obwodu sprzężenia zwrotnego.

Systemy bezpośredniego sterowania adaptacyjnego (z ang. *Steer-by-wire systems*) są nowocześniejszą alternatywą dla mechaniczno-hydraulicznych układów kierowniczych i są intensywnie rozwijane. W tym przy-

padku mechaniczno/hydrauliczne elementy układu kierowniczego są zastępowane przez elektryczne czujniki, mikrokontrolery, oprogramowanie i silniki elektryczne. Podobnie jak w przypadku układu mechanicznego, w systemach bezpośredniego sterowania adaptacyjnego stosowane jest ujemne sprzężenie zwrotne. Rzeczywiste i pożądane pozycje kół pochodzą z czujników podłączonych do kół i do kierownicy. Oprogramowanie porównuje rzeczywistą pozycję koła z pozycją pożądaną i wykorzystuje różnicę do sterowania silnikami, które obracają koła. Nie ma kolumny kierownicy ani rzeczywistej drogi mechanicznej od koła kierownicy do kół pojazdu. Te nowe elektroniczne układy kierownicze mogą potencjalnie znacznie zmniejszyć masę i zwiększyć oszczędność paliwa w pojeździe. Jednak wiążą się to również z pewnymi nowymi problemami dotyczącymi bezpieczeństwa. W końcu utrata sterowności spowodowana błędem w oprogramowaniu może być bardzo poważna.

### 13.4. Projektowanie prostych wzmacniaczy

Można zaprojektować bardzo wiele ciekawych i użytecznych wzmacniaczy, stosując rezystancyjne sieci sprzężenia zwrotnego z wzmacniaczami operacyjnymi.

Projektowanie wzmacniacza z wykorzystaniem wzmacniaczy operacyjnych polega głównie na doborze odpowiedniej konfiguracji układu i wartości rezystorów sprzężenia zwrotnego.

Można zaprojektować bardzo wiele ciekawych i użytecznych wzmacniaczy, stosując rezystancyjne sieci sprzężenia zwrotnego z wzmacniaczami operacyjnymi. Na razie uważamy, że wzmacniacze operacyjne są idealne. Później rozważymy wpływ spowodowany nieidealnymi parametrami rzeczywistych wzmacniaczy operacyjnych. Często w praktyce wymagania dotyczące wydajności projektowanych układów nie są ekstremalne i projektowanie może być prowadzone przy założeniu idealnych wzmacniaczy operacyjnych.

Proces projektowania zilustrujemy za pomocą układów wzmacniaczy operacyjnych, które rozpatrywaliśmy w poprzednich podrozdziałach (w tym w ćwiczeniach). W przypadku tych układów projektowanie polega przede wszystkim na doborze odpowiedniej konfiguracji układu i wartości rezystorów sprzężenia zwrotnego.

#### Przykład 13.2. Projekt wzmacniacza nieodwracającego

Zaprojektuj wzmacniacz nieodwracający o wzmacnieniu napięciowym 10, wykorzystujący idealny wzmacniacz operacyjny. Amplitudy sygnałów wejściowych mieszczą się w zakresie od  $-1$  do  $+1$  V. W projekcie skorzystaj ze standardowych rezystorów o tolerancji 5 procent. (Lista standardowych wartości rezystorów o tolerancji 5 procent znajduje się w dodatku B).

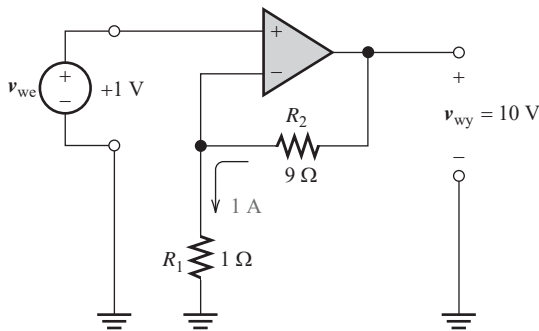
#### Rozwiązanie

Korzystamy z konfiguracji wzmacniacza nieodwracającego z rysunku 13.11. Wzmocnienie jest dane równaniem (13.21). Mamy więc

$$A_v = 10 = 1 + \frac{R_2}{R_1}.$$

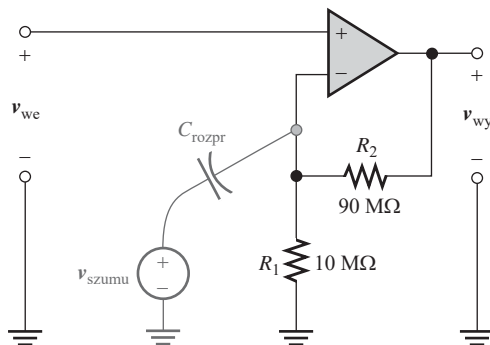
Teoretycznie każda wartość rezystora zapewni odpowiednie wzmocnienie, pod warunkiem, że  $R_2 = 9R_1$ . Jednak bardzo małe rezystancje nie są praktyczne, ponieważ prąd przez rezystory musi być dostarczany z wyjścia wzmacniacza operacyjnego, a ostatecznie z zasilacza. Na przykład, jeśli  $R_1 = 1 \Omega$  i  $R_2 = 9 \Omega$ , dla napięcia wyjściowego 10 V, to wzmacniacz operacyjny musi dostarczyć prąd o natężeniu 1 A. Ilustruje to rysunek 13.16. Większość wzmacniaczy operacyjnych w układach scalonych nie jest w stanie uzyskać tak dużego prądu wyjściowego, a nawet gdyby była, to obciążenie zasilacza byłoby nieuzasadnione. W omawianym układzie chcielibyśmy, aby  $R_1 + R_2$  były wystarczająco duże, aby prąd, który musi być do nich doprowadzony, był rozsądny. Generalnie, projektując układ zasilany z zasilacza podłączonego do linii napięcia przemiennego, prądy do kilku miliamperów są zwykle akceptowalne. (W urządzeniach zasilanych z baterii staralibyśmy się bardziej zmniejszyć prąd i uniknąć konieczności częstej wymiany baterii).

Jeśli rezystancje będą zbyt małe, wzmacniacz będzie musiał pracować z bardzo dużym prądem i będzie zużywał dużo mocy, co jest bardzo niepraktyczne.



**Rys. 13.16.** W przypadku zastosowania małych rezystancji wymagany jest zbyt duży prąd

Z drugiej strony, bardzo duże rezystancje, takie jak  $R_1 = 1 \text{ M}\Omega$  i  $R_2 = 9 \text{ M}\Omega$ , również stanowią problem. Tak duże rezystancje mają niestabilną wartość, szczególnie w wilgotnym środowisku. Później zobaczymy, że zbyt duże rezystancje mogą powodować problemy związane z niedoskonałością rzeczywistego wzmacniacza operacyjnego zwaną prądem polaryzacji. Ponadto obwody o wysokiej impedancji są podatne na przechwytywanie niepożądanych sygnałów z pobliskich obwodów poprzez rozproszone sprzężenie pojemnościowe. Ilustruje to rysunek 13.17.



**Rys. 13.17.** Jeśli używane są bardzo duże rezystancje, pojemność rozproszona może sprzęgać z układem niepożądane sygnały

Bardzo duża rezystancja może mieć niestabilną wartość i prowadzić do pasożytniczego sprzężenia z niepożądanymi sygnałami.

Ogólnie rzecz biorąc, wartości rezystancji pomiędzy około  $100\ \Omega$  a  $1\ \text{M}$  są odpowiednie do stosowania w układach ze wzmacniaczami operacyjnymi. Ponieważ zadanie wymaga zastosowania standardowych rezystorów o tolerancji 5 procent (patrz dodatek B), szukamy takiej pary rezystorów, aby stosunek  $R_2/R_1$  wynosił 9. Jedną z możliwości jest  $R_2 = 180\ \text{k}\Omega$  i  $R_1 = 20\ \text{k}\Omega$ . Jednak w wielu zastosowaniach okaże się, że para  $R_2 = 18\ \text{k}\Omega$  i  $R_1 = 2\ \text{k}\Omega$  będzie pracować równie dobrze. Oczywiście, jeśli używamy rezystorów o tolerancji 5 procent, możemy spodziewać się jednostkowych zmian w stosunku  $R_2/R_1$  o około 10 procent. Dzieje się tak dlatego, że wartość  $R_2$  może być o 5 procent niższa, podczas gdy wartość  $R_1$  jest o 5 procent wyższa, lub odwrotnie. Tak więc wzmacnienie wzmacniacza (które wynosi  $A_v = 1 + R_2/R_1$ ) może zmieniać się o około  $\pm 9$  procent.

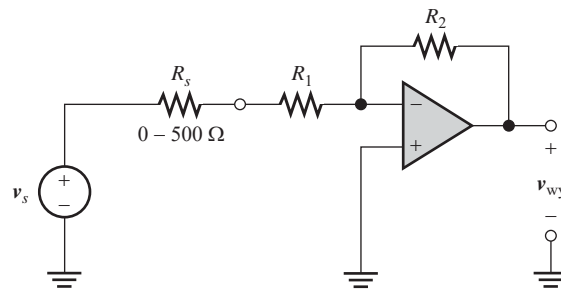
Jeśli potrzebna jest większa precyzja, można zastosować rezystory o 1-procentowej tolerancji. Inną możliwością jest regulowany rezystor, który ustawia wzmacnienie na żądaną wartość.

### Przykład 13.3. Projekt wzmacniacza

Przetwornik do pomiaru drgań młota kowalskiego ma impedancję wewnętrzną, która jest zawsze mniejsza od  $500\ \Omega$ , ale jest zmienna w czasie. Wymagany jest wzmacniacz, który wytwarza wzmocnioną wersję napięcia wewnętrznego źródła  $v_s$ . Wzmocnienie napięciowe powinno wynosić  $-10 \pm 5\%$ . Zaprojektuj odpowiedni wzmacniacz do tego układu pomiarowego.

### Rozwiązanie

Ponieważ określone jest wzmacnienie odwracające, decydujemy się na zastosowanie wzmacniacza odwracającego z rysunku 13.4. Proponowany wzmacniacz i źródło sygnału pokazane są na rysunku 13.18.



Rys. 13.18. Schemat układu do przykładu 13.3

Korzystając z ograniczenia węzła sumacyjnego oraz konwencjonalnej analizy obwodów, możemy pokazać, że

$$v_{wy} = -\frac{R_2}{R_1 + R_s} v_s.$$

Dlatego musimy tak dobrać wartości rezystancji, aby

$$\frac{R_2}{R_1 + R_s} = 10 \pm 5\%.$$

Ponieważ wartość  $R_s$  jest zmienna, musimy wybrać  $R_1$  znacznie większe niż maksymalna wartość  $R_s$ . To prowadzi nas do wyboru  $R_1 \cong 50 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{s\text{max}} = 500 \Omega$ . Wtedy gdy  $R_s$  waha się od zera do  $500 \Omega$ , suma  $R_1 + R_s$  zmienia się tylko o 1 procent). Aby uzyskać pożądane wzmocnienie, wymagamy, aby  $R_2 \cong 500 \text{ k}\Omega$ .

Ponieważ podana jest tolerancja wzmocnienia  $\pm 5\%$ , uciekamy się do zastosowania oporników o wartości 1%. Jest to konieczne, ponieważ zmiany wzmocnienia występują z powodu zmian rezystancji  $R_s$ , zmian  $R_1$  oraz zmian  $R_2$ . Jeśli każdy z nich powoduje zmianę wzmocnienia o  $\pm 1\%$ , wzmocnienie zmienia się o około  $\pm 3\%$ , co mieści się w dozwolonym zakresie.

Korzystając z tabeli wartości standardowych dla oporników 1-procentowych (patrz dodatek B), wybieramy  $R_1 = 49,9 \text{ k}\Omega$  i  $R_2 = 499 \text{ k}\Omega$ . Oprócz zapewnienia, że wzmocnienie nie zmienia się poza określonymi granicami, wartości te nie są na tyle małe, by występowały zbyt duże prądy, ani na tyle duże, by nadmierne sprzężanie niepożądanych sygnałów do układu stanowiło istotny problem.

Innym rozwiązaniem byłoby zastosowanie rezystorów o 5-procentowej tolerancji. Należałoby wybrać  $R_1 = 49,9 \text{ k}\Omega$  oraz  $R_2$  w postaci szeregowego połączenia rezystora o stałej wartości  $430 \text{ k}\Omega$  i rezystora regulowanego o wartości  $200 \text{ k}\Omega$ . Wtedy wzmocnienie mogłoby być ustawione początkowo na żadaną wartość. W trakcie pracy wystąpiłyby pewne wahania wzmocnienia spowodowane zmianą wartości  $R_s$  oraz zmianami innych wartości rezystorów w wyniku starzenia się, zmian temperatury, itd.

**Ćwiczenie 13.7.** Znajdź maksymalną i minimalną wartość wzmocnienia  $A_{vs} = v_{wy}/v_s$  dla obwodu zaprojektowanego w przykładzie 13.3. Nominalne wartości rezystorów wynoszą  $R_1 = 49,9 \text{ k}\Omega$  i  $R_2 = 499 \text{ k}\Omega$ . Przyjmij, że rezystory  $R_1$  i  $R_2$  odbiegają od swoich wartości nominalnych o  $\pm 1\%$ , a wartość  $R_s$  mieści się w zakresie od 0 do  $500 \Omega$ .

**Odpowiedź:** Graniczne wartości wzmocnienia wynoszą  $-9,71$  oraz  $-10,20$ .

### Projektowanie w warunkach wąskiej tolerancji

Przy projektowaniu wzmacniaczy o wąskich tolerancjach wzmocnienia (1 procent lub lepiej), konieczne jest zastosowanie regulowanych rezystorów. Można by się pokusić i skorzystać z tańszych rezystorów o tolerancji 5 procent zamiast rezystorów o tolerancji 1 procenta i użyć regulowanego rezystora do skompensowania większych różnic. Jednak nie jest to dobra praktyka, ponieważ rezystory o 5-procentowej tolerancji są zwykle mniej stabilne niż rezystory o 1-procentowej tolerancji. Ponadto, rezystory stałe są bardziej stabilne niż rezystory regulowane. Najlepszym podejściem z punktu widzenia długoterminowej precyzji jest użycie stałych rezystorów o 1-procentowej tolerancji i zaprojektowanie tylko tyle regulacji, aby przewyżczyć ewentualne zmiany wzmocnienia.

Często w projekcie łączymy różne typy układów ze wzmacniaczami operacyjnymi, by uzyskać pożądaną funkcję. Te zagadnienia są zilustrowane w następnym przykładzie.

#### Przykład 13.4. Projekt wzmacniacza sumującego sygnały

Dwa źródła sygnału mają napięcia oznaczone odpowiednio  $v_1(t)$  i  $v_2(t)$ . Wiadomo, że rezystancje wewnętrzne tych źródeł są zawsze mniejsze od  $1 \text{ k}\Omega$ , ale dokładne wartości nie są znane i prawdopodobnie będą się zmieniać w czasie. Zaprojektuj