

Tomasz HEILIG

Łączenie czujników wysokorezystancyjnych z układami elektronicznymi

Streszczenie

Celem niniejszego artykułu jest przybliżenie studentom kierunku wychowanie techniczne tematyki związanej ze wzmacniaczami operacyjnymi, a w szczególności wzmacniaczami pomiarowymi. Informacje zawarte w artykule mogą znaleźć zastosowanie w trakcie przygotowania i realizacji ćwiczenia laboratoryjnego „Wzmacniacze operacyjne”. Omówiono stosowane w elektronice rodzaje konfiguracji obwodów wejściowych oraz układy wzmacniaczy operacyjnych. W artykule przedstawiono przykładowe rozwiązanie konstrukcyjne wzmacniacza pomiarowego z uwzględnieniem zagadnień ochrony przeciwzaktłóceniowej.

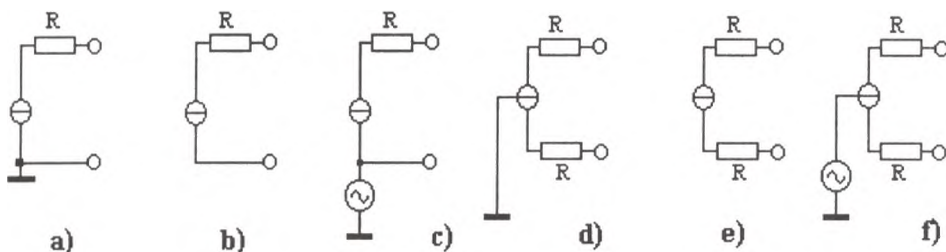
Słowa kluczowe: wzmacniacz operacyjny, wzmacniacz pomiarowy, czujnik wysokorezystancyjny

WSTĘP

Współczesna fizyka stawia bardzo wysokie wymagania przyrządom pomiarowym. Dążenie do miniaturyzacji przyrządów oraz rosnące wymagania, dotyczące dokładności pomiarów, przysparzają wiele trudności. Z dużą dokładnością i bez większych problemów potrafimy zmierzyć napięcie. Pozostałe wielkości elektryczne i nieelektryczne należy poddać konwersji, aby sygnałem wyjściowym czujnika było napięcie lub częstotliwość. Możliwe jest to dzięki czujnikom, których większość ma dużą i bardzo dużą rezystancję wyjściową dochodzącą do $R=10^{12} \Omega$. Istnieje duża różnorodność czujników, ale rodzajów konfiguracji obwodów wyjściowych jest niewiele. Niezbędne jest odpowiednie dopasowanie obwodu wyjściowego czujnika do wejścia aparatury pomiarowej. Celem niniejszego artykułu jest przybliżenie studentom

kierunku wychowanie techniczne tematyki związanej ze wzmacniaczami operacyjnymi, a w szczególności wzmacniaczami pomiarowymi. Informacje zawarte w artykule mogą być przydatne zarówno w czasie przygotowania, jak i realizacji ćwiczenia laboratoryjnego „Wzmacniacze operacyjne”.

1. OBWODY CZUJNIKÓW



Rys. 1. Możliwe konfiguracje czujników

Rysunek 1 przedstawia kilka obwodów czujników [1]. Każdy z nich zawiera źródło prądu i rezystancję źródła. W niektórych dodatkowo występuje źródło napięcia. Typowy układ to czujnik uziemiony niesymetryczny (rys. 1a). Gdy czujnik nie jest uziemiony z żadnej strony, to jest to niesymetryczny czujnik swobodny (rys. 1b). Układ ten jest wrażliwy na zakłócenia pochodzące od zewnętrznych pól małej częstotliwości, pól wielkiej częstotliwości lub sieci energetycznej. Innym rozwiązaniem układu jest niesymetryczny czujnik swobodny odsunięty od masy (rys. 1c). Jeżeli sygnał z czujnika skierowany jest do aparatury pomiarowej przez dwie jednakowe rezystancje, to czujnik taki nazywany jest symetrycznym. W tym przypadku dysponujemy również czujnikiem uziemionym, swobodnym oraz odsuniętym od masy, (rysunki 1d, 1e, 1f) [1]. Sygnał wychodzący z czujnika o dużej rezystancji posiada bardzo małą amplitudę. Konieczne jest wzmocnienie i oddzielenie sygnału od szumu.

Do budowy układów wzmacniających używane są wzmacniacze operacyjne, wykonane w technologii BIMOS lub BIFET.

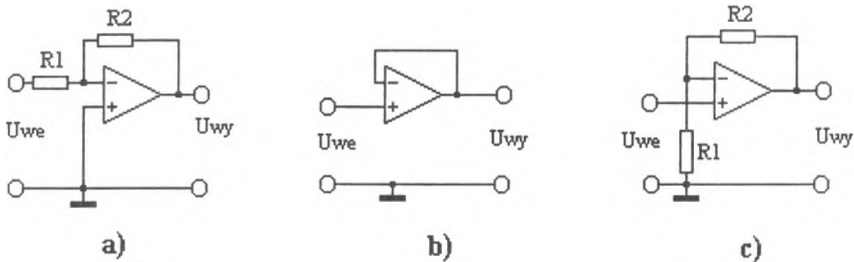
- BIMOS są to układy scalone, w których zastosowano tranzystory bipolarne oraz na wejściu tranzystory typu MOS (Metal-Oxide-Semiconductor).

- BIFET, to technologia wykonania układów scalonych, które posiadają wejściowe tranzystory typu FET lub JFET (Junction-Field-Effect-Transistor) i tranzystory bipolarne.

Obydwie technologie umożliwiają wytworzenie układów scalonych, które charakteryzują się bardzo dużą impedancją wejściową, małymi szumami własnymi i względnie małym pasmem przenoszonych częstotliwości.

2. WZMACNIACZ OPERACYJNY W UKŁADACH POMIAROWYCH

Konfiguracje wzmacniaczy pomiarowych można sprowadzić do dwóch podstawowych układów, a mianowicie wzmacniacza niesymetrycznego (I) i wzmacniacza różnicowego (II). Wzmacniacz niesymetryczny odwracający, pokazany na rysunku 2a, posiada wzmocnienie $k_u = -(R_2/R_1)$ i rezystancję wejściową $R_i = R_1$. Impedancja wyjściowa, jak we wszystkich wzmacniaczach operacyjnych, przybiera małe wartości.



Rys. 2. Podstawowe konfiguracje pracy wzmacniacza operacyjnego

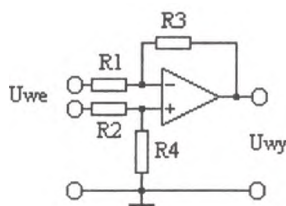
Wtórnik napięcia, przedstawiony na rysunku 2b, posiada bardzo dużą impedancję wejściową i małą impedancję wyjściową, duże wzmocnienie prądowe oraz brak wzmocnienia napięciowego, które wynosi $k_u = 1$.

Ostatni z tej grupy, to wzmacniacz niesymetryczny nie odwracający fazy sygnału wejściowego. Posiada podobne wartości impedancji wejściowej i wyjściowej, jak wtórnik napięcia, lecz wzmocnienie napięciowe wyznacza zależność $k_u = (R_1 + R_2)/R_1$ (patrz schemat na rysunku 2c).

Wzmacniacz symetryczny różnicowy o dwóch symetrycznych wejściach i niskoomowym wyjściu znalazł szczególne miejsce wśród wzmacniaczy pomiarowych. Jest najczęściej stosowanym wzmacniaczem, co wynika z jego bezspornych zalet. Jedną z nich jest możliwość wzmocnienia bardzo małego sygnału różnicowego na tle dużego sygnału sumacyjnego. Jest to wzmacniacz, w którym sygnał z czujnika doprowadzony jest do obydwu wejść. Połączenie takie umożliwia zmniejszenie wpływu zakłóceń do osiągalnego minimum. We wzmacniaczu niesymetrycznym, sygnał zakłócający wchodzący do wejścia wzmacniacza jest traktowany na równi z sygnałem mierzonym. We wzmacniaczu różnicowym, sygnał zakłócający pojawia się na obu wej-

ściach jednocześnie. Jedno z wejść, oznaczone (-) czyli odwracające fazę sygnału wejściowego, umożliwi wzmocnienie napięcia sygnału z jednoczesnym jego przesunięciem w fazie o 180° . Sygnał dostarczony do wejścia nieodwracającego, oznaczonego (+), zostanie wzmocniony i pozostanie w fazie z sygnałem wejściowym. Efektem poprawnej pracy wzmacniacza będzie wzmocnienie sygnału różnicowego oraz eliminacja zakłóceń na wyjściu układu. Wynika to z sumowania identycznych sygnałów, lecz przesuniętych w fazie o 180° . W jakim stopniu sygnał współbieżny zostanie stłumiony, zależy od wartości współczynnika tłumienia sygnału sumacyjnego CMRR¹. Sygnał współbieżny nazywany jest również sygnałem synfazowym.

Istnieją dwie podstawowe konfiguracje wzmacniacza różnicowego. Pierwsza z nich to widoczny na rysunku 3 wzmacniacz różnicowy napięć stałych. Wartości rezystancji rezystorów wejściowych R1, R2 oraz rezystorów sprzężenia zwrotnego R3, R4 powinny być parami równe.

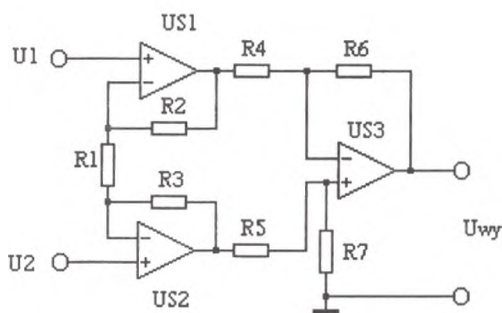


Rys. 3. Wzmacniacz różnicowy typ I

Wzmocnienie układu wynosi $k_u = R3/R1$. Wymagana jest duża dokładność wartości rezystancji rezystorów, której tolerancja powinna mieścić się w zakresie (0.1-0.5)%. Brak symetrii wartości rezystancji rezystorów i wynikające z tego nawet minimalne niedopasowanie obniża w znaczącym stopniu wartość współczynnika CMRR. Można tego uniknąć, stosując w zamian za rezystor R4 potencjometr wieloobrotowy. Po zwarceniu obu wejść i podłączeniu do nich sygnału, należy ustawić potencjometrem minimalną wartość sygnału wyjściowego. Wzmacniacz różnicowy nie jest pozbawiony wad. Należą do nich stosunkowo niewielkie wzmocnienie maksymalne i niezbyt duża impedancja wejściowa. O jej wartości decydują rezystancje rezystorów R1 i R2.

Drugą konfiguracją jest wzmacniacz pomiarowy nazywany także wzmacniaczem aparaturowym. Jest to również wzmacniacz różnicowy, lecz o bardzo dużej impedancji wejściowej. Rysunek 4 przedstawia podstawowy układ wzmacniacza pomiarowego.

¹ CMRR – Common Mode Rejection Ratio – współczynnik tłumienia sygnału synfazowego.



Rys. 4. Wzmacniacz pomiarowy typ II [2]

Warunkiem poprawnego działania układu jest zachowanie symetrii wartości rezystorów. Stąd równość rezystancji $R2=R3$, $R4=R5$, $R6=R7$. Wzmocnienie takiego układu można wyznaczyć z równania:

$$U_{wy} = \left(1 + \frac{R2 + R3}{R1}\right) \left(\frac{R6}{R4}\right) (U2 - U1)$$

Z podanej zależności wynika, że jednym ze sposobów regulacji wzmocnienia jest odpowiedni dobór rezystancji rezystora R1. Należy podkreślić fakt, iż napięcie wyjściowe jest proporcjonalne do różnicowego napięcia wejściowego i nie zależy od napięcia sumacyjnego. Podobnie jak w przypadku wzmacniacza różnicowego napięć stałych, można zapewnić optymalizację współczynnika CMRR. Należy zastąpić rezystor R1 szeregowym połączeniem rezystora stałego i potencjometru. Regulując wzmocnienie układu zmianami R1 nie należy dopuszczać do przesterowania wzmacniacza. Dzieje się tak, gdy rezystor R1 ma zbyt małą rezystancję. Wzmacniacz pomiarowy może być zbudowany z oddzielnych wzmacniaczy operacyjnych. Obydwa wzmacniacze wejściowe powinny być identyczne. Dobrym rozwiązaniem jest wykonanie konstrukcji z dwóch sekcji podwójnego lub poczwórnego wzmacniacza operacyjnego. Gdy struktura układu scalonego zawiera cztery identyczne wzmacniacze, można ją wykorzystać do konstrukcji wzmacniacza pomiarowego, którego schemat pokazano w końcowej części artykułu na rysunku 5.

W przypadku występowania bardzo dużych napięć sumacyjnych, stosowane są wzmacniacze izolacyjne. Są to wzmacniacze operacyjne z rozdzielonymi galwanicznie obwodami wejściowym i wyjściowym. Izolację obwodów, której impedancja osiąga wartość $R=10^{15} \Omega$, można uzyskać przez zastosowanie sprzężenia optycznego. Sygnał wejściowy moduluje luminancję diody LED. Światło emitowane przez diodę LED kierowane jest na fototranzystor

i zamieniane na sygnał elektryczny. W celu uzyskania odpowiedniej liniowości charakterystyki przejściowej wzmacniacza izolacyjnego, stosowane są dodatkowe układy kompensujące nieliniowość diody LED i detektora. Jest to powód, dla którego większość wzmacniaczy izolacyjnych wykonana jest techniką hybrydową. Wzmacniacze tego typu znajdują zastosowanie w medycznych przyrządach pomiarowych, przykładem może być elektrokardiograf.

3. OCHRONA PRZED ZAKŁÓCENIAMI

Bardzo duża impedancja wejściowa wzmacniacza pomiarowego i wynikający stąd bardzo mały prąd polaryzacji wejścia powodują, że wzmacniacz jest bardzo czuły na zakłócenia. Jeżeli wzmacniacz jest połączony z czujnikiem za pomocą przewodów, sygnały indukowane w przewodach są jednakowe. Jako sygnały synfazowe są silnie tłumione przez wzmacniacz. W przypadku wystąpienia niesymetrii układu, sygnał zakłócający nie jest tłumiony całkowicie. W tej sytuacji celowe jest ekranowanie przewodów i wzmacniacza oraz stosowanie osłon ochronnych. Wzmacniacz powinien znajdować się w metalowej osłonie, wykonanej z blachy stalowej. Zewnętrzny ekran przewodu należy połączyć z osłoną. Wpływ zakłóceń jest minimalny, gdy wyjście wtórnik napięciowego zostanie połączone z ekranem wewnętrznym. W tym układzie wtórnik napięcia jest buforem napięcia sumacyjnego.

Dodatkową ochronę przed zakłóceniami można osiągnąć, stosując przewodzący pierścień wokół końcówek wejściowych. Należy go połączyć z punktem o małej impedancji, ale posiadającym potencjał wejścia wzmacniacza. Jest to możliwe, gdy stosowany jest wzmacniacz niesymetryczny. Stosując pierścień wokół wejścia wzmacniacza, należy zachować ostrożność. Wykonanie pierścienia osłonowego w symetrycznym wzmacniaczu różnicowym i połączenie go z ekranami przewodów może w znacznym stopniu zakłócić pracę układu.

4. DOPASOWANIE UKŁADÓW

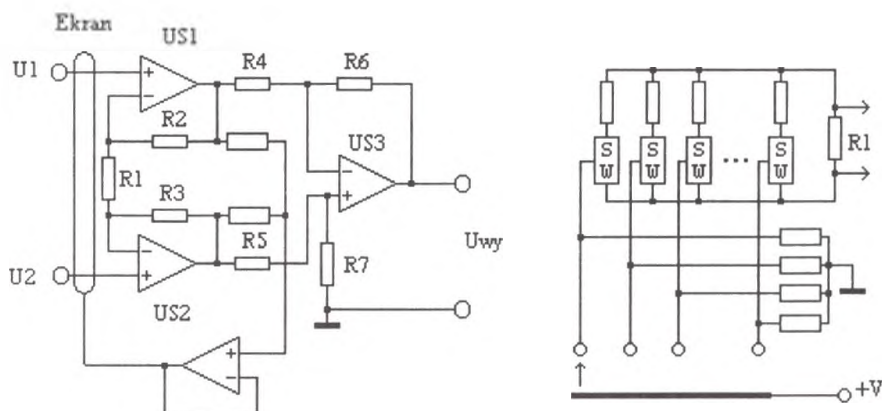
Różne formy czujników i różne typy wzmacniaczy nie mogą być łączone dowolnie. Przedstawione dane mogą pomóc przy wyborze optymalnej kombinacji. Poniższa tabela obrazuje możliwe połączenia i wskazuje, które z nich są poprawne.

| Typ wejścia wzmacniacza | Konfiguracja układu czujnika (rysunek 1) | | | | | |
|-------------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|
| | a | b | c | d | e | f |
| I | nie | tak | nie | nie | tak | nie |
| II | nie | tak | nie | tak | tak | nie |

Słowa „tak” i „nie” oznaczają, które z kombinacji są zalecane lub nie. „Nie” w pewnych przypadkach oznacza dyskwalifikację połączenia, w innych nie jest zalecane.

5. PRZYKŁADOWE ROZWIĄZANIE KONSTRUKCJI WZMACNIACZA POMIAROWEGO

Powyższe rozważania posłużyły do przeprowadzenia analizy i zaprojektowania wzmacniacza pomiarowego.



Rys. 5. Wzmacniacz pomiarowy z elektroniczną regulacją wzmocnienia

Jego zadaniem jest wzmocnienie napięcia stałego, otrzymanego z wysokorezystancyjnego czujnika promieniowania γ . Pewne problemy konstrukcyjne stwarza duży zakres zmian rezystancji czujnika. Waha się ona w zakresie $R=(10^6 - 10^{12})\Omega$. Dodatkową trudnością jest niskie napięcie zasilające układ mostkowy, w którym znajduje się czujnik. Warunki te limitują rozwiązanie układu. Jest nim czujnik niesymetryczny odsunięty od ziemi i wzmacniacz typu II. W celu zminimalizowania wpływu zakłóceń powstających na długich przewodach połączeniowych, zastosowano bufor napięcia sumacyjnego. Połączony

jest on z ekranem przewodu łączącego czujnik z wejściem wzmacniacza. Duży zakres zmian rezystancji czujnika wymaga regulacji wzmocnienia. W tym celu zastosowano kaskadę rezystorów, które przełączane są przełącznikami elektronicznymi. Rozwiązanie to umożliwia automatyzację regulacji wzmocnienia przyrządu pomiarowego. W przypadku, gdy wymagana jest wysoka stabilność temperaturowa wzmocnienia, należy zastosować miniaturowe przekaźniki ze złożonymi kontaktami. Przełączniki elektroniczne wykonane w oparciu o tranzystory polowe posiadają niewielką rezystancję przejścia, ale bardzo silnie zależną od temperatury. Do budowy wzmacniacza może być wykorzystany poczwórny wzmacniacz operacyjny typu MAX 418 firmy MAXIM [3].

Podstawowe parametry układu MAX 418:

- | | |
|--|---|
| 1. Wejściowy prąd polaryzacji | $I_{IB} < 0.1 \text{ pA}$ |
| 2. Wzmocnienie napięciowe | $A_{VD} = 1000\text{V/mV} = 120\text{dB}$ |
| 3. Pasma przenoszenia | $\Delta f = 8\text{kHz}$ |
| 4. Wejściowe napięcie niezrównoważenia | $V_{IO} = 4\text{mV (max)}$ |
| 5. Stabilność wzmocnienia | $G_s = 1\text{V/V}$ |
| 6. Napięcie zasilania | $V_s = \pm(2,5-10)\text{V}$ |
| 7. Pobór prądu przez jeden wzmacniacz | $I_s = 1\mu\text{A}$ |
| 8. Prąd wyjściowy | $I_o = 200\mu\text{A}$ |

Dobrym rozwiązaniem jest zastosowanie do budowy przyrządu gotowego wzmacniacza pomiarowego. Kilka firm elektronicznych proponuje w swojej ofercie specjalizowane układy scalone.

Przykładem mogą być wzmacniacze pomiarowe:

- OPA128, INA 104, 3630 (Burr-Brown)
- AD 549, AD 612, AD 614 (Analog Devices)
- LH 0036 (National Semiconductor)

lub wzmacniacze izolacyjne:

- ISO 100 (Burr-Brown)
- AD 293, AD 294.

WNIOSKI

Obecnie produkowane wzmacniacze operacyjne są wysoko wyspecjalizowanymi układami elektronicznymi. Można wśród nich znaleźć wzmacniacze, które są zasilane napięciem symetrycznym – co jest standardem, ale jakże kłopotliwym. Produkowane są także wzmacniacze, które pracują poprawnie przy zasilaniu napięciem niesymetrycznym. Istnieją wśród nich wzmacniacze o bardzo małym prądzie polaryzacji wejścia, bardzo małym

napięciu niezrównoważenia, wyjątkowo małym dryfcie temperaturowym i czasowym. Jedne przeznaczone są do pracy w układach akustycznych, inne w wizyjnych, jeszcze inne w technice pomiarowej lub cyfrowej. Szczególną grupę stanowią wzmacniacze operacyjne stosowane w technice pomiarowej. Posiadają najwyższe parametry i, podobnie jak w samochodowych wyścigach Formuły 1, parametry te w krótkim czasie stają się własnością układów powszechnego zastosowania.

Nazwa wzmacniacz operacyjny pochodzi od pierwotnego zastosowania, w którym układ wykonywał operacje matematyczne. Obecnie pozostała nazwa, lecz całkowicie zmienione zostało przeznaczenie, zastosowanie i funkcje tych układów. Pomimo wszystko jedna cecha łączy je nadal – jest nią uniwersalność i wynikająca z niej różnorodność zastosowań.

LITERATURA

- [1] Carr J.J.: *Podsystem analogowy*. „Elektronik Elektor” 3/1994.
- [2] Soclof S.: *Zastosowania analogowych układów scalonych*. WKŁ, Warszawa 1991.
- [3] MAXIM.: *New releases data book*. Volume I I I, 1995.