

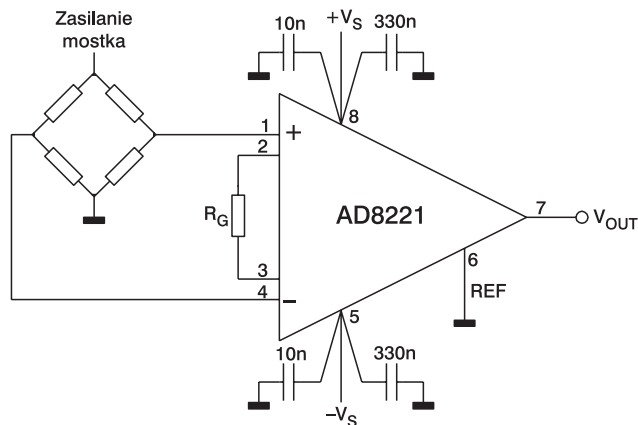
Pojęcie wzmacniacz pomiarowy (ang. *instrumentation amplifier, in-amp*) stanowi czasami źródło nieporozumień. Nie wszystkie wzmacniacze stosowane w sprzęcie pomiarowym są wzmacniaczami pomiarowymi i z całą pewnością zastosowanie wzmacniaczy pomiarowych nie ogranicza się do sprzętu pomiarowego. Wykorzystanie wzmacniaczy pomiarowych jest bardzo szerokie, począwszy od sterowania silników, poprzez aplikacje zbierania danych, aż do zastosowań w przemyśle motoryzacyjnym. Zadaniem tego przewodnika jest wyjaśnienie podstawowych spraw związanych ze wzmacniaczami pomiarowymi: czym są, jaka jest ich zasada pracy oraz jak i gdzie ich używać. Ponadto przedstawiono tu kilka różnych kategorii wzmacniaczy pomiarowych.

1.1. Wzmacniacz pomiarowy a wzmacniacz operacyjny: różnice

Wzmacniacz pomiarowy jest układem z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego, symetrycznym (różnicowym) wejściem i niesymetrycznym (względem końcówki odniesienia) wyjściem. Najczęściej impedancje obu końcówek wejściowych są jednakowe i mają duże wartości, typowo $10^9 \Omega$ lub więcej. Wejściowy prąd polaryzacji powinien być mały, typowo 1...50 nA. Impedancja wyjściowa jest, podobnie jak we wzmacniaczu operacyjnym, bardzo mała, zwykle tylko kilka dziesiątek miliomów w zakresie małych częstotliwości.

Przeciwie niż we wzmacniaczu operacyjnym, w którym wzmocnienie z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego zależy od rezystorów zewnętrznych podłączonych do wejścia odwracającego i wyjścia, we wzmacniaczu pomiarowym stosuje się wewnętrzną sieć rezystorów sprzężenia zwrotnego odizolowaną od końcówek wejściowych. Sygnał wejściowy podłącza się do dwóch wejść różnicowych, a wzmocnienie jest ustalone albo wewnętrznie, albo przez użytkownika (za pomocą dedykowanych wyprowadzeń) wewnętrznym lub zewnętrznym rezystorem, który także jest odizolowany od wejść sygnałowych.

Na **rysunku 1.1** przedstawiono przedwzmacniacz współpracujący z mostkiem pomiarowym, co jest typowym zastosowaniem wzmacniacza pomiarowego. Pod

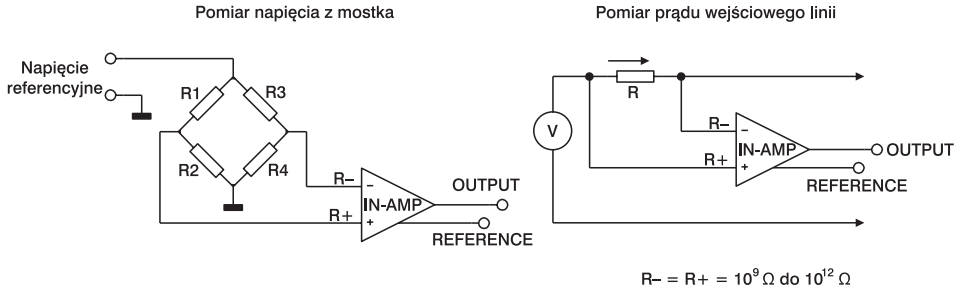


Rys. 1.1. Mostek pomiarowy z układem AD8221

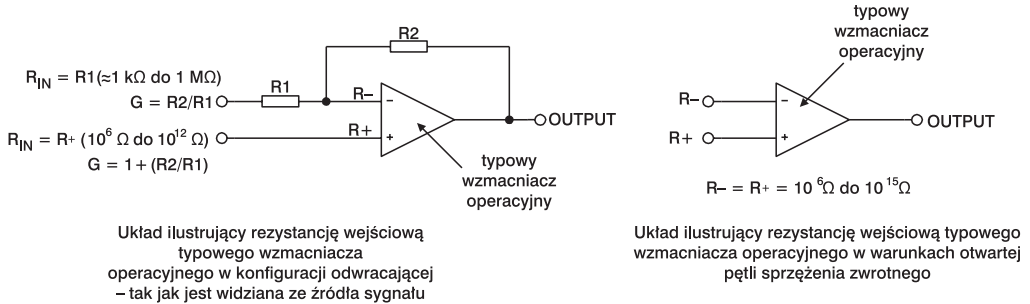
Wejściowe charakterystyki wzmacniacza pomiarowego

Duże i jednakowe rezystancje wejściowe wzmacniacza pomiarowego czynią go idealnym układem do pomiaru małych napięć i prądów – bez obciążania źródła sygnału

Rezystancja wejściowa obu wejść typowego wzmacniacza pomiarowego jest bardzo duża i jednakowa. Prąd wejściowy jest tak mały, że $I_B \cdot R$ stanowi pomijalne napięcie błędne



Wejściowe charakterystyki wzmacniacza operacyjnego



Rys. 1.2. Porównanie charakterystyk wejściowych wzmacniacza operacyjnego i wzmacniacza pomiarowego

wpływem wielkości mierzonej, wartości rezystorów mostka ulegają zmianie, co powoduje wytrącenie mostka z równowagi i zmianę napięcia różnicowego na przekątnej mostka. To wyjściowe napięcie różnicowe mostka stanowi sygnał mierzony, bezpośrednio podłączony do wejść wzmacniacza pomiarowego. Należy zaznaczyć, że na obu wejściach wzmacniacza pomiarowego znajduje się dodatkowo pewien poziom napięcia stałego. Ten stały poziom napięcia jest na obu wejściach taki sam i nosi nazwę *napięcia sumacyjnego*. Podstawową własnością wzmacniacza pomiarowego jest tłumienie tego stałego napięcia sumacyjnego (i wszystkich sygnałów wspólnych obu wejść), a wzmacnianie jedynie *sygnału różnicowego*, czyli różnicy napięć obu wejść.

Przeciwnie, jeżeli do tego zastosowania byłby użyty standardowy układ ze wzmacniaczem operacyjnym, to wzmocnieniu uległby zarówno napięciowy sygnał mierzony, jak i składowa stała, szumy i zakłócenia i dowolne inne napięcia sumacyjne. W efekcie sygnał zostałby „przykryty” przez składową stałą i zakłócenia. Właśnie dlatego nawet najlepszy wzmacniacz operacyjny jest dość kiepski do pomiaru słabych sygnałów różnicowych. Na **rysunku 1.2** pokazano różnice charakterystyk wejściowych wzmacniacza pomiarowego i operacyjnego.

1.1.1. Wzmocnienie sygnału różnicowego i tłumienie sygnału sumacyjnego

Wzmacniacz pomiarowy jest urządzeniem, które wzmacnia różnicę dwóch wejściowych sygnałów napięciowych i jednocześnie tłumi dowolne sygnały wspólne dla obu wejść. Wzmacniacz pomiarowy pozwala zatem spełnić bardzo ważną funkcję wyodrębniania małych sygnałów pochodzących z przetworników pomiarowych lub innych źródeł.

Tłumienie sygnału sumacyjnego (CMR – *Common-Mode Rejection*) jest zdolnością do eliminowania dowolnych sygnałów wspólnych (takich samych potencjałów obu wejść) i w połączeniu ze zdolnością do wzmacniania sygnałów różnicowych (różnicy napięć pomiędzy wejściami) stanowi najbardziej istotną cechę wzmacniacza pomiarowego. Zarówno zdolność do tłumienia sygnałów sumacyjnych stałoprądowych, jak i zmiennoprądowych są istotnymi parametrami wzmacniacza pomiarowego. Dowolny nowoczesny wzmacniacz pomiarowy przyzwoitej jakości jest w stanie zredukować stałoprądowe, sumacyjne napięcie błędu (czyli dowolne napięcie stałe występujące jednocześnie na obu wejściach) o 80...120 dB.

Niedostateczna wartość tłumienia CMR przebiegów zmiennych może wszakże spowodować zmienny w czasie błąd, który często zależy znacznie od częstotliwości i jest przez to trudny do wyeliminowania z wyjścia wzmacniacza pomiarowego. Na szczęście większość nowoczesnych monolitycznych scalonych wzmacniaczy pomiarowych cechuje się doskonałym tłumieniem sygnałów sumacyjnych zarówno stało-, jak i zmiennoprądowych.

Ze współczynnikiem tłumienia sygnału sumacyjnego jest powiązane wzmocnienie sumacyjne (A_{CM}), czyli stosunek zmiany napięcia wyjściowego do zmiany wejściowego napięcia sumacyjnego. Jest to wypadkowe wzmocnienie (lub tłumienie) z wejścia do wyjścia dla sygnałów wspólnych dla obu wejść. Na przykład napięcie wyjściowe wzmacniacza pomiarowego o wzmocnieniu sumacyjnym równym 1/1000, do którego wejść przyłożono napięcie sumacyjne wynoszące 10 V, zmienia się o 10 mV. Wzmocnienie różnicowe lub normalne (A_D) to wzmocnienie z wejścia do wyjścia dla napięć różnicowych, czyli przyłożonych pomiędzy dwa wejścia. Współczynnik tłumienia sygnału sumacyjnego (CMRR – *Common-Mode Rejection Ratio*) jest po prostu stosunkiem wzmocnienia różnicowego A_D i wzmocnienia sumacyjnego. Należy zwrócić uwagę, że w idealnym wzmacniaczu pomiarowym CMRR wzrasta proporcjonalnie do wzmocnienia.

Tłumienie sygnału sumacyjnego jest zwykle specyfikowane dla pełnego zakresu zmian napięcia sumacyjnego (CMV – *Common Mode Voltage*), przy określonej częstotliwości i dla określonego niezrównoważenia impedancji źródła (np. niezrównoważenie źródła 1 k Ω , dla 60 Hz).

Matematycznie, tłumienie sygnałów sumacyjnych może być określone jako

$$CMRR = A_D \frac{V_{CM}}{V_{OUT}}$$

gdzie:

A_D jest wzmocnieniem różnicowym wzmacniacza;

V_{CM} jest napięciem sumacyjnym występującym na wejściach wzmacniacza;

V_{OUT} jest napięciem wyjściowym wywołanym przyłożeniem do wejść wzmacniacza napięcia sumacyjnego.

Określenie CMR jest logarytmicznym wyrażeniem współczynnika tłumienia sygnału sumacyjnego (CMRR). A zatem $CMR = 20 \log_{10} CMRR$.

Aby wzmacniacz pomiarowy był skuteczny, musi być zdolny do wzmacniania sygnałów mikrowoltowych i jednoczesnego tłumienia napięcia sumacyjnego na wejściach. Szczególnie ważne jest, by wzmacniacz pomiarowy był zdolny do tłumienia sygnałów sumacyjnych w pełnym zakresie rozważanych częstotliwości. To oznacza, że CMR wzmacniacza pomiarowego musi mieć bardzo dużą wartość dla podstawowej częstotliwości pracy i jej harmonicznym.

Techniki redukcji błędów związanych z sygnałami leżącymi poza pasmem zainteresowania, które mogą pojawiać się na wyjściu w postaci składowej stałej, są opisane w części tego poradnika poświęconej zakłóceniom o częstotliwościach radiowych (RFI).

Przy wzmacnieniu równym jedności, stałoprądowa wartość CMR wynosi typowo od 70 dB do ponad 100 dB, przy czym CMR zwykle ulega poprawie przy większych wzmacnieniach. Prawdą jest, że wzmacniacze operacyjne pracujące jako układy odejmujące również cechują się dużą wartością CMR, jednakże w takich przypadkach (w celu osiągnięcia odpowiedniej wartości CMRR) użytkownik musi stosować dobrze sparowane rezystory zewnętrzne. Z drugiej strony monolityczne wzmacniacze pomiarowe wyposażone w sieć dostrojonych rezystorów są dużo łatwiejsze do stosowania.

1.1.2. CMR: wzmacniacz operacyjny kontra wzmacniacz pomiarowy

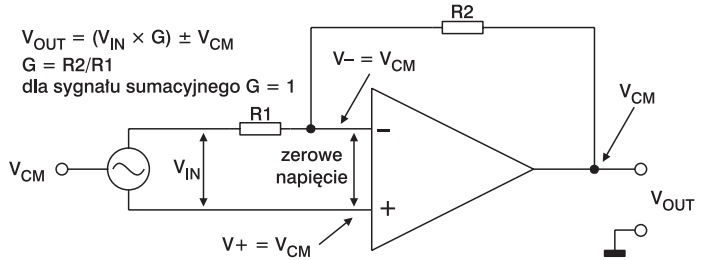
Wzmacniacz operacyjny, wzmacniacz pomiarowy, wzmacniacz różnicowy – wszystkie te układy zapewniają tłumienie sygnału sumacyjnego. Jednakże wzmacniacze pomiarowe i wzmacniacze różnicowe są projektowane żeby tłumić sygnały sumacyjne tak, by nie pojawiały się one na wyjściu wzmacniacza. W przeciwieństwie do tego, wzmacniacz operacyjny pracujący w typowej konfiguracji odwracającej lub nieodwracającej przetwarza sygnały sumacyjne tak, że przedostają się one na wyjście, zwykle nie ulegając tłumieniu.

Na **rysunku 1.3 a** widzimy wzmacniacz operacyjny sterowany ze źródła sygnału występującego na tle napięcia sumacyjnego. Zewnętrzny układ sprzężenia zwrotnego pomiędzy wyjściem i węzłem sumacyjnym działa tak, by napięcie na wejściu „-” było takie samo jak na wejściu „+”. W idealnym przypadku napięcie pomiędzy wejściami wzmacniacza operacyjnego jest równe zeru. W wyniku tego, by utrzymać zerową różnicę napięć pomiędzy wejściami, napięcie na wyjściu wzmacniacza operacyjnego **musi** być równe V_{CM} .

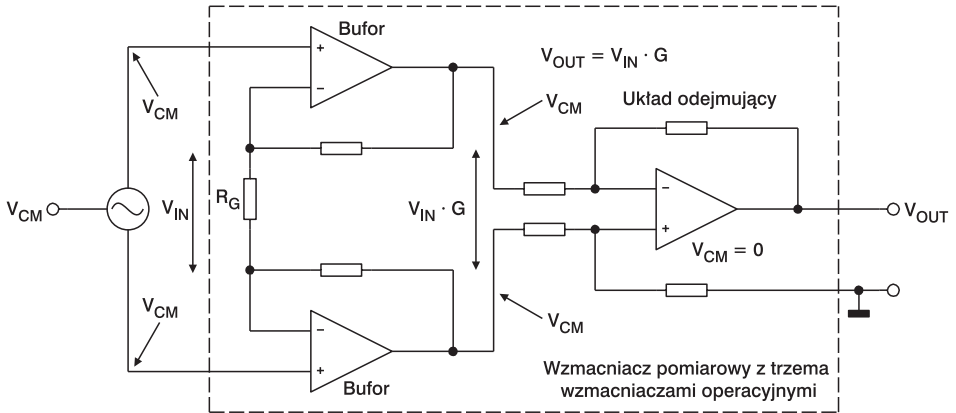
Mimo więc tego, że wzmacniacz operacyjny cechuje się tłumieniem sygnału sumacyjnego, napięcie sumacyjne jest przenoszone na wyjście wraz z sygnałem. W praktyce wzmacnienie sygnału jest równe wzmacnieniu wzmacniacza z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego, a wzmacnienie napięcia sumacyjnego jest równe jedności. Ta różnica wzmacnień zapewnia pewną redukcję napięcia sumacyjnego wyrażonego w procentach napięcia sygnału. Jednakże napięcie sumacyjne nadal występuje na wyjściu i jego obecność zmniejsza dostępny zakres zmian napięcia wyjściowego.

a)

W typowych układach pracy wzmacniacza operacyjnego, odwracającym i nieodwracającym, na wyjściu wzmacniacza pojawia się zarówno napięcie sygnału, jak i składowej sumacyjnej



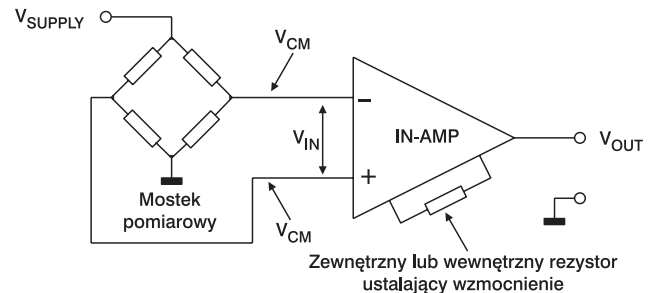
b)



W układzie wzmacniacza pomiarowego buforzy wejściowe wzmacniają napięcie sygnału, a napięcie składowej sumacyjnej przenoszą ze wzmacnieniem jednostkowym. Składowa sumacyjna jest następnie tłumiona w sekcji wyjściowej ze wzmacniaczem odejmującym

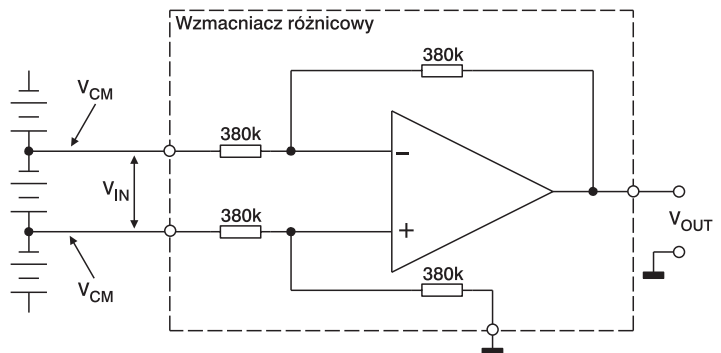
c)

Wzmacniacz pomiarowy współpracujący z mostkiem pomiarowym. W tym układzie stałe napięcie sumacyjne może stanowić znaczną część napięcia zasilającego



d)

Wzmacniacz różnicowy jest szczególnie przydatny w zastosowaniach takich, jak pomiar napięcia celi akumulatora, gdzie stałe (lub zmienne) napięcie sumacyjne może przewyższać napięcie zasilania



Rys. 1.3. Możliwe konfiguracje wzmacniaczy pomiarowych

Z wielu powodów występowanie jakiegokolwiek napięcia sumacyjnego (stałoprądowego lub zmiennoprądowego) na wyjściu wzmacniacza operacyjnego jest wysoce niepożądane.

Rysunek 1.3 b obrazuje wzmacniacz pomiarowy zbudowany z 3 wzmacniaczy operacyjnych pracujący w tych samych warunkach. Na uwagę zasługuje fakt, że podobnie jak w przypadku układu z jednym wzmacniaczem operacyjnym, bufor wejściowy wzmacniacza pomiarowego przenoszą sygnał sumacyjny z jednostkowym wzmocnieniem. Ale ten sygnał jest wzmacniany przez oba bufor. Sygnały wyjściowe buforów są podawane na wejście sekcji odejmującej wzmacniaczy pomiarowych. Ten układ wzmacnia sygnał różnicowy (typowo z niewielkim lub jednostkowym wzmocnieniem), podczas gdy sygnał sumacyjny jest tłumiony (typowo w stosunku 10000:1 lub bardziej). Porównując ze sobą te dwa układy, można stwierdzić, że oba dostarczają wzmocnienia sygnału (i zapewniają buforowanie), ale dzięki sekcji odejmującej wzmacniacz pomiarowy tłumí napięcie sumacyjne.

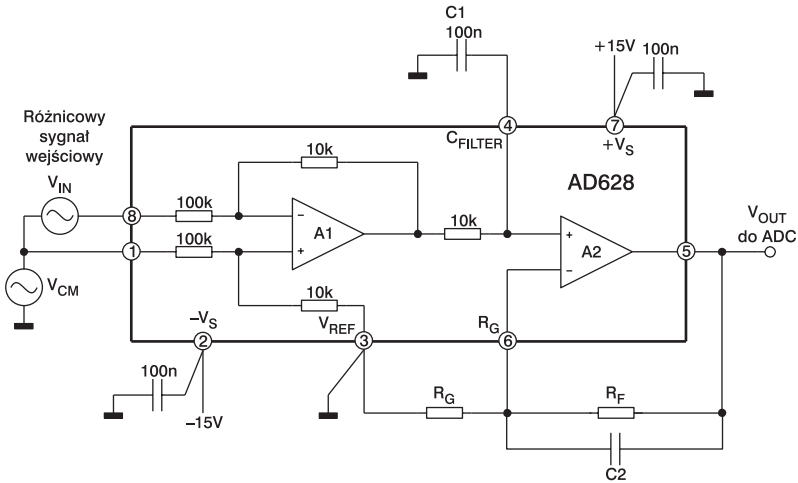
Na **rysunku 1.3 c** przedstawiono wzmacniacz pomiarowy współpracujący z mostkiem. Wzmacniacz pomiarowy skutecznie tłumí stałe napięcie sumacyjne występujące na wyjściu mostka, jednocześnie wzmacniając bardzo słaby sygnał napięciowy mostka. Ponadto wiele nowoczesnych wzmacniaczy pomiarowych zapewnia tłumienie sygnału sumacyjnego osiągające 80 dB, co pozwala zasilac mostek z niedrogiego, niestabilizowanego źródła napięcia stałego. W przeciwieństwie do tego, wzmacniacz pomiarowy zbudowany samodzielnie ze wzmacniaczy operacyjnych i rezystorów 0,1% pozwala typowo osiągnąć tylko 48 dB CMR, a to wymusza zasilanie mostka stałym napięciem stabilizowanym.

Na **rysunku 1.3 d** jest zamieszczony wzmacniacz różnicowy (odejmujący) zastosowany do monitorowania napięcia indywidualnego ogniwa stanowiącego część baterii. W tym przypadku stałe napięcie sumacyjne łatwo może przewyższyć napięcie zasilania wzmacniacza. Niektóre monolityczne wzmacniacze różnicowe, jak np. AD629, mogą pracować z napięciami sumacyjnymi osiągającymi ± 270 V.

1.2. Wzmacniacze różnicowe

Na **rysunku 1.4** jest pokazany schemat blokowy wzmacniacza różnicowego. Ten typ układów scalonych to wzmacniacz pomiarowy specjalnego przeznaczenia składający się ze wzmacniacza odejmującego, po którym następuje bufor wyjściowy czasami będący również stopniem wzmacniającym. Cztery rezystory zastosowane w układzie odejmującym są zwykle wewnętrznymi elementami układu scalonego i są w związku z tym bardzo dobrze sparowane, gwarantując tym samym dużą wartość CMR.

Wiele wzmacniaczy różnicowych jest zaprojektowanych do zastosowań, w których napięcie sumacyjne i napięcie sygnału mogą z łatwością przekroczyć napięcie zasilania. Te wzmacniacze różnicowe typowo zawierają rezystory wejściowe o bardzo dużej wartości służące do stłumienia zarówno sygnału, jak i napięcia sumacyjnego.



Rys. 1.4. Scalony wzmacniacz różnicowy

1.3. Gdzie stosuje się wzmacniacze pomiarowe i wzmacniacze różnicowe?

1.3.1. Zbieranie danych

Podstawowym zastosowaniem wzmacniaczy pomiarowych jest wzmacnianie sygnałów z przetworników o niskich poziomach sygnałów wyjściowych występujących na tle szumów i zakłóceń. Wzmacnianie sygnałów z przetworników ciśnienia lub temperatury stanowi typową aplikację wzmacniaczy pomiarowych. Współpraca z układami mostkowymi jest typowa dla pomiarów ciśnienia lub ciężaru wykonywanych za pomocą ogni obciążnikowych oraz pomiaru temperatury czujnikami oporowymi (RTD – *Resistance Temperature Detector*).

1.3.2. Sprzęt medyczny

Wzmacniacze pomiarowe są szeroko stosowane w sprzęcie medycznym, takim jak monitory EKG i EEG, monitory ciśnienia krwi i defibrylatory.

1.3.3. Elektroniczne układy pomiarowo-kontrolne

Wzmacniacze różnicowe mogą być stosowane do monitorowania napięć i prądów w układach alarmujących o przekroczeniu poziomów nominalnych. Wzmacniacze różnicowe są często stosowane w tych aplikacjach dzięki swoim zdolnościom tłumienia dużych napięć sumacyjnych.

1.3.4. Aplikacje sterowane programowo

Wzmacniacze pomiarowe mogą współpracować z programowanymi rezystorami, dzięki czemu stwarza się możliwość sterowania systemu elektronicznego za pomocą programu.

1.3.5. Aplikacje audio

Ze względu na silne tłumienie sygnałów sumacyjnych, wzmacniacze pomiarowe są często wykorzystywane w zastosowaniach audio (np. jako przedwzmacniacze

mikrofonowe), gdzie służą do wydobycia słabych sygnałów występujących na tle szumów i zakłóceń oraz do minimalizowania zakłóceń związanych z pętlami masy. Tabela 6.4 zawiera układy specjalizowane oferowane przez Analog Devices.

1.3.6. Kondycjonowanie szybkich sygnałów

Ponieważ szybkość i dokładność nowoczesnych systemów zbierania danych wizyjnych znacznie się poprawiła, więc występuje rosnąca potrzeba dostępu do wzmacniaczy pomiarowych o szerokim paśmie, zwłaszcza do zastosowań w sprzęcie wykorzystującym przetworniki CCD, gdzie wymagana jest korekcja nierównoważenia i buforowanie wejść. W tej dziedzinie dla uzyskania korekcji nierównoważenia obrazu CCD często stosuje się techniki podwójnie skorelowanego próbkowania. Dwa wzmacniacze próbkująco-pamiętające monitorują piksel i poziom odniesienia, a skorygowany stałoprądowo sygnał wyjściowy uzyskuje się, podłączając ich wyjścia do wejść wzmacniacza pomiarowego.

1.3.7. Aplikacje wideo

Szybkie wzmacniacze pomiarowe mogą być stosowane w wielu systemach w.cz. wideo i kablowych do wzmacniania i przetwarzania sygnałów dużej częstotliwości.

1.3.8. Zastosowania w układach sterowania mocą

Wzmacniacze pomiarowe mogą być także używane do monitorowania silników (do monitorowania i sterowania szybkości, momentu obrotowego itd.) poprzez pomiar napięć, prądów i zależności fazowych w silnikach prądu zmiennego 3-fazowych. Wzmacniacze różnicowe są wykorzystywane w aplikacjach, w których sygnały wejściowe przekraczają napięcia zasilające.

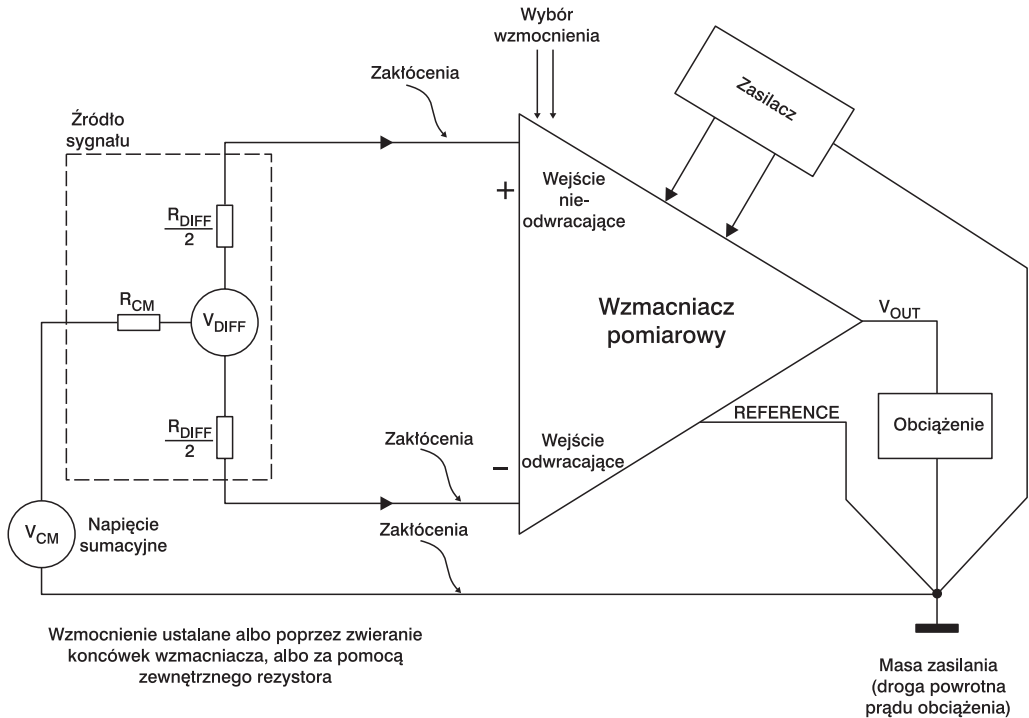
1.4. Wzmacniacze pomiarowe: widok z zewnątrz

Funkcjonalny schemat blokowy wzmacniacza pomiarowego jest pokazany na **rysunku 1.5**.

Ponieważ idealny wzmacniacz pomiarowy wzmacnia tylko różnicę napięć pomiędzy wejściami, więc jakiegokolwiek sygnały sumacyjne (jednakowe potencjały obu wejść), takie jak zakłócenia lub spadki napięć na przewodach masy, są tłumione przez stopień wejściowy i nie ulegają wzmocnieniu.

Wzmocnienie różnicowe jest ustalane za pomocą rezystorów zewnętrznych lub wewnętrznych. Rezystory wewnętrzne są najdokładniejsze i zapewniają najniższy dryft wzmocnienia przy zmianach temperatury.

Typowym sposobem ustalania wzmocnienia jest stosowanie pojedynczego rezystora zewnętrznego, który współpracuje z dwoma rezystorami wewnętrznymi. Użytkownik może obliczyć wartość tego rezystora dla uzyskania określonego wzmocnienia, posługując się równaniem podawanym w danych katalogowych wzmacniacza pomiarowego. Takie rozwiązanie pozwala ustalić dowolną wartość wzmocnienia w bardzo dużym zakresie. Jednakże rzadko się zdarza, że można znaleźć zewnętrzny rezystor o wartości dokładnie wyliczonej dla żądanego wzmocnienia, a ponadto jego temperatura zawsze nieco różni się od temperatury rezystorów wewnętrznych. Te



Rys. 1.5. Sygnały wejściowe: różnicowy i sumacyjny

występujące w praktyce ograniczenia mają dodatkowy wkład w błąd wzmocnienia i dryft wzmocnienia.

Czasami stosuje się rozwiązanie z dwoma rezystorami zewnętrznymi. Ogólnie biorąc, taki układ 2-rezystorowy ma mniejszy dryft niż układ z jednym rezystorem, ponieważ wzmocnienie jest ustalone stosunkiem tych dwóch rezystancji, a te rezystory mogą być wykonane jako jeden układ scalony dla dobrego sparowania rezystancji i ich współczynników temperaturowych (TC – *temperature coefficient*). W przypadku pojedynczego rezystora zewnętrznego zawsze wystąpi różnica współczynników temperaturowych z rezystorami znajdującymi się w układzie scalonym wzmacniacza.

Wyjście wzmacniacza pomiarowego często jest wyposażone w oddzielną końcówkę odniesienia, co pozwala, obok innych zastosowań, sterować ze wzmacniacza pomiarowego obciążeniami znajdującymi się w oddaleniu.

Na rysunku 1.5 punkty odniesienia dla wejść i wyjścia są podłączone do tego samego potencjału, w tym przypadku masy zasilania. To połączenie masy w gwiazdę jest bardzo skutecznym sposobem minimalizowania pętli mas w układzie, jednakże pewne resztkowe sumacyjne prądy masy nadal pozostają. Te prądy, płynące przez R_{CM} , wytwarzają sumacyjne napięcie błędne V_{CM} . Wzmacniacz pomiarowy, dzięki dużemu tłumieniu sygnałów sumacyjnych, wzmacnia sygnały różnicowe, jednocześnie eliminując V_{CM} i wszystkie inne zakłócenia sumacyjne.

Wzmacniacz pomiarowy musi być naturalnie zasilany. Podobnie jak w przypadku wzmacniaczy operacyjnych energia jest zwykle dostarczana z podwójnego źródła napięcia o wartościach z wyspecyfikowanego zakresu. Alternatywnie można stosować

wzmacniacze pomiarowe przewidziane do zasilania pojedynczym napięciem (*rail-to-rail*, napięcie wyjściowe może się zmieniać w pełnym zakresie napięcia zasilania).

Wzmacniacz pomiarowy można zbudować z jednego lub więcej wzmacniaczy operacyjnych, można także korzystać z gotowych konstrukcji monolitycznych. Obie te metody mają swoje zalety i wady.

Generalnie, dyskretne (złożone ze wzmacniaczy operacyjnych) wzmacniacze pomiarowe dają elastyczność konstrukcyjną przy niskim koszcie, zapewniając czasami własności niemożliwe do uzyskania w konstrukcji monolitycznej, np. bardzo szerokie pasmo częstotliwości. Z kolei układy monolityczne stanowią funkcjonalną jedność, mają w pełni wyspecyfikowane charakterystyki i są zwykle po fabrycznym trymowaniu, często osiągając większą precyzję w zakresie prądu stałego niż ich odpowiedniki dyskretne. Monolityczne wzmacniacze pomiarowe są także o wiele mniejsze, tańsze i łatwiejsze do zastosowania.

1.5. Dodatkowe własności definiujące wzmacniacz pomiarowy wysokiej klasy

Wzmacniacz pomiarowy, oprócz dużego współczynnika tłumienia sygnału sumacyjnego, musi się jeszcze cechować własnościami podanymi niżej.

1.5.1. Wysoka wartość CMR dla prądu zmiennego (nie tylko dla stałego)

Wartość CMR powinna być duża, co najmniej w paśmie częstotliwości, które wymagają tłumienia. W zakres ten wchodzi częstotliwość sieci energetycznej i jej drugiej harmonicznej.

1.5.2. Małe napięcie niezrównoważenia i jego dryft

Podobnie jak wzmacniacz operacyjny, również wzmacniacz pomiarowy musi mieć małe napięcie niezrównoważenia. Ponieważ wzmacniacz pomiarowy składa się z dwóch niezależnych sekcji, stopnia wejściowego i wzmacniacza wyjściowego, więc całkowite wyjściowe niezrównoważenie równa się sumie: wzmocnienie razy wejściowe niezrównoważenie plus niezrównoważenie wzmacniacza wyjściowego (będącego częścią wzmacniacza pomiarowego). Typowe wartości wejściowego i wyjściowego dryftu niezrównoważenia wynoszą odpowiednio $1 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ i $10 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Mimo że początkowe napięcie niezrównoważenia można wyzerować za pomocą zewnętrznej regulacji, to dryft napięcia niezrównoważenia nie może być wyzerowany. Podobnie jak napięcie niezrównoważenia, również dryft niezrównoważenia ma dwie składowe, za które odpowiadają sekcje wejściowa i wyjściowa wzmacniacza pomiarowego, każda dokładając swój udział do całkowitego błędu. W miarę zwiększania wzmocnienia, dryft niezrównoważenia stopnia wejściowego staje się dominującym źródłem błędu niezrównoważenia.

1.5.3. Jednakowe impedancje wejściowe o dużej wartości

Impedancje widziane z końcówek wejść odwracającego i nieodwracającego muszą być duże i jednakowe. Wysoka impedancja jest konieczna, by uniknąć obciążania źródła sygnału, co między innymi może obniżać napięcie sygnału wejściowego.

Typowe wartości impedancji wejściowych wynoszą $10^9 \dots 10^{12} \Omega$. Wzmacniacze różnicowe takie jak AD629 mają mniejsze impedancje wejściowe, ale za to są bardzo skuteczne w przypadku obecności składowych sumacyjnych napięcia.

1.5.4. Małe błędy wejściowych prądów polaryzacji i niezrównoważenia

Podobnie jak w przypadku wzmacniacza operacyjnego, również wzmacniacz pomiarowy charakteryzuje się prądami polaryzacji wpływającymi do lub wypływającymi z końcówek wejściowych. W przypadku wzmacniaczy pomiarowych bipolarnych są to prądy bazy, w przypadku wzmacniaczy FET prądy upływu bramki. Ten prąd polaryzacji, płynąc przez niejednakowe impedancje źródła sygnału, tworzy błąd niezrównoważenia. Należy podkreślić, że jeżeli impedancja źródła staje się nieskończona, jak np. jest w przypadku sprzężenia zmiennoprądowego (za pomocą kondensatora), bez rezystancyjnego połączenia z masą zasilania, to wejściowe napięcie sumacyjne będzie narastać aż do nasycenia wzmacniacza. By zapobiec tej sytuacji, zwykle między każde wejście i masę włącza się rezystor o dużej wartości. Typowo, iloczyn prądu polaryzacji i wartości tego rezystora powinien być mniejszy od 10 mV (rozdz. 5). Błędy wejściowego prądu niezrównoważenia są zdefiniowane jako różnica pomiędzy prądami polaryzacji każdego wejścia. Typowe wartości prądów polaryzacji w przypadku wzmacniacza pomiarowego bipolarnego wynoszą 1...50 nA, a w przypadku wzmacniacza FET 1...50 pA w temperaturze pokojowej.

1.5.5. Małe szumy

Ze względu na konieczność pracy z napięciami wejściowymi o bardzo małych poziomach, wzmacniacz pomiarowy nie może dodawać własnych szumów do szumów zawartych w sygnale. Od wzmacniacza pomiarowego oczekuje się minimalnego poziomu szumów wejściowych rzędu $10 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ przy częstotliwości 1 kHz w odniesieniu do wejścia (dla wzmocnienia > 100). Wzmacniacze pomiarowe o minimalnym poborze mocy są optymalizowane dla uzyskania najmniejszego możliwego prądu stopnia wejściowego i w związku z tym mają zwykle wyższy poziom szumów niż ich odpowiedniki o większym prądzie.

1.5.6. Małe nieliniowości

Wejściowe niezrównoważenie i błędy wzmocnienia mogą być korygowane za pomocą zewnętrznego dostrojenia, ale nieliniowość jest nieodłącznym czynnikiem ograniczającym jakość układu i nie może być usunięta poprzez żadne regulacje zewnętrzne. O małą nieliniowość musi zadbać producent układu w trakcie jego projektowania. Nieliniowość jest zwykle podawana w procentach pełnego zakresu, podczas gdy producent mierzy błąd wzmacniacza pomiarowego na krańcach zakresu napięciowego i w zerze. Typowa wartość błędu nieliniowości wynosi 0,01% w dobrej jakości wzmacniaczach pomiarowych; w niektórych układach osiąga się poziom 0,0001%.

1.5.7. Proste nastawianie wzmocnienia

Nastawianie wzmocnienia powinno być łatwe. Typowym sposobem jest stosowanie jednego rezystora zewnętrznego, ale jego obecność wpływa na dokładność ukła-

du i dryft wzmocnienia w funkcji temperatury. Wzmacniacze pomiarowe takie jak AD621 umożliwiają wybór wewnętrznie zaprogramowanych wzmocnień poprzez odpowiednie połączenie końcówek; takie rozwiązanie cechuje się bardzo małym współczynnikiem temperaturowym (TC) wzmocnienia.

1.5.8. Odpowiednie pasmo

Wzmacniacz pomiarowy musi mieć pasmo częstotliwości odpowiednie do konkretnego zastosowania. Ponieważ typowa wartość pola wzmocnienia (częstotliwości, dla której wzmocnienie spada do jedności) wynosi 500 kHz...4 MHz, więc łatwo jest uzyskać dobre parametry częstotliwościowe przy małych wzmocnieniach, ale dla dużych wzmocnień pasmo wzmacniacza może stanowić problem. Wzmacniacze pomiarowe o małym poborze mocy mają zwykle węższe pasmo niż standardowe wzmacniacze pomiarowe. Jest tak, ponieważ stopnie wejściowe układów o małym poborze mocy pracują z dużo mniejszymi poziomami prądów.

1.5.9. Konwersja sygnału symetrycznego (różnicowego) na niesymetryczny

Konwersja sygnału różnicowego na niesymetryczny jest naturalnie integralną funkcją wykonywaną przez wzmacniacz pomiarowy: Różnicowe napięcie wejściowe jest wzmacniane i buforowane, a na wyjściu pojawia się napięcie niesymetryczne. Istnieje wiele rozmaitych aplikacji wzmacniacza pomiarowego, w których wymagane jest wzmocnienie napięcia różnicowego nałożonego na znacznie większe napięcie sumacyjne. Źródłem tego napięcia sumacyjnego mogą być zakłócenia lub przesunięcie poziomu przetwornika ADC albo oba te czynniki jednocześnie. Zastosowanie wzmacniacza operacyjnego w miejsce wzmacniacza pomiarowego spowoduje, że zarówno napięcie sumacyjne, jak i sygnał zostaną jednakowo wzmocnione. Wielką zaletą wzmacniacza pomiarowego jest to, że selektywnie wzmacnia sygnał (różnicowy), tłumiąc jednocześnie napięcie sumacyjne.

1.5.10. Zakres zmian napięcia *rail-to-rail* na wejściu i wyjściu

Nowoczesne wzmacniacze pomiarowe często muszą pracować w warunkach zasilania pojedynczym napięciem 5 V lub mniejszym. W wielu takich zastosowaniach często stosuje się przetworniki, w których zakres napięcia wejściowego wynosi *rail-to-rail*. Określenie *rail-to-rail* oznacza, że maksymalny zakres zmian napięcia na wejściu lub wyjściu jest zasadniczo równy napięciu zasilania. Faktycznie, zakres zmian napięcia na wejściu może czasami przekraczać nieznacznie napięcie zasilania, natomiast zakres zmian napięcia wyjściowego często kończy się w pasie o szerokości 100 mV od masy lub napięcia zasilającego. Zaleca się dokładnie zwracać uwagę na dane katalogowe.

1.5.11. Pobór mocy a pasmo, szybkość i szумы

Zgodnie z ogólną zasadą, im większy jest prąd polaryzacji sekcji wejściowej wzmacniacza pomiarowego, tym większe jego pasmo i szybkość, a mniejsze szумы. Niestety większy prąd oznacza większą moc strat i większe wydzielanie ciepła. Sprzęt zasilany z baterii wymaga stosowania przyrządów o małym poborze mocy, a gęsto upakowane płytki drukowane muszą być zdolne do rozproszenia całkowi-

tego ciepła generowanego przez wszystkie elementy aktywne. Grzejący się układ powoduje także zwiększanie dryftu niezrównoważenia i inne błędy zależne od temperatury. Konstruktorzy często muszą stosować kompromisy i kosztem pogorszenia pewnych parametrów dążyć do utrzymania mocy strat i dryftu na akceptowalnym poziomie.