

Wzmacniacze pomiarowe w medycynie

TEMAT
NUMERU

Badanie ludzkiego ciała z użyciem nowoczesnych urządzeń diagnostycznych zwykle wymaga zamiany sygnałów elektrycznych pochodzących z ludzkiego ciała lub podłączonych do niego czujników na postać cyfrową. W związku z tym na każdej ścieżce sygnałów konieczne jest zastosowanie co najmniej dwóch bloków: wzmacniacza i filtru. Filtrowanie często realizowane jest przez program, ponieważ cyfrowa obróbka sygnału wiąże się z koniecznością użycia przetwornika A/C, od którego już tylko krok do realizacji wygodnego, cyfrowego filtru. Nie da się jednak wystarczająco dobrze próbować sygnałów o napięciu rzędu kilkunastu miliwoltów i dlatego nieodzownym elementem każdego toru pomiarowego jest specjalny wzmacniacz pomiarowy.

Wzmacniacz pomiarowy jest odmianą wzmacniacza różnicowego. Charakteryzuje się dużym wzmocnieniem sygnału różnicowego oraz tłumieniem składowej współbieżnej pojawiającej się jednocześnie na obu jego wejściach. Głównym zadaniem takiego wzmacniacza w torze wstępnej obróbki sygnału jest wyłonienie sygnału użytkowego z tła i wzmocnienie go. Nie jest to zadanie łatwe, ponieważ ludzkie ciało zarówno generuje własne sygnały, jak i odbiera je z otoczenia. Dodatkowym problemem mogą być składowe napięcia wprowadzane przez przetworniki i elektrody.

Zwykle wzmacniacz pomiarowy dołączony do ciała pacjenta mierzy niewielkie napięcie różnicowe o amplitudzie kilku miliwoltów lub mniejszej, występujące na tle dużego napięcia współbieżnego, będącego źródłem zakłóceń i szumów. Dotyczy to zarówno sygnałów otrzymywanych z przetworników, jak i impulsów bioelektrycznych, pochodzących wprost z ciała pacjenta. Doskonałym przykładem może być biosygnal użytkowy elektrokardiografu (aparatu EKG), którego budowa kojarzy się niewprawnym elektronikom tylko ze wzmocnieniem sygnałów elektrycznych pochodzących z ciała pacjenta. Niestety, praktyczna realizacja takiego układu wcale nie jest aż tak trywialna.

Sygnal mierzony przez EKG ma amplitudę rzędu 1 mV i widmo częstotliwości od 0,05 Hz do 10 Hz. Elektrody chlorowo-srebrne stosowane do pobierania sygnału z ciała pacjenta wytwarzają napięcie stałe o wartości około 500 mV. Dlatego sygnał docierający do wejścia elektrokardiografu to składowa zmienna o amplitudzie 1 mV nałożona na składową stałą o napięciu 500 mV.

A ponadto na ciele pacjenta indukuje się sygnał zakłóceń sieciowych o amplitudzie kilku woltów.

W cyfrowym aparacie EKG, w celu dalszej obróbki, sygnał ten podawany jest na wejście przetwornika A/C. Dzięki zastosowaniu wejściowego wzmacniacza pomiarowego można wyeliminować bezużyteczną składową stałą oraz wyodrębnić mały (1 mV) użyteczny sygnał różnicowy tłumiąc wielki (kilka V) wspólny sygnał zakłóceń. Po wzmocnieniu sygnału użytkowego można zastosować tańszy przetwornik A/C o względnie małej rozdzielczości.

Właściwości wzmacniacza pomiarowego

Często wzmacniaczami pomiarowymi nieśluszenie nazywane są dowolne bloki wzmacniające w strukturze układu pomiarowego. Nic bardziej mylącego. Nie każdy wzmacniacz stosowany w sprzęcie medycznym i pomiarowym jest wzmacniaczem pomiarowym. To odnosi się również do zastosowań wzmacniaczy pomiarowych. Są to układy ogólnego przeznaczenia, które nie są dedykowane wyłącznie do użycia w urządzeniach pomiarowych. Nazwa ta nie wymusza też technologii realizacji układu. Może on być zarówno pojedynczym układem scalonym (jak chyba rozumie to większość konstruktorów), jak i urządzeniem zbudowanym w technologii dyskretniej, przeznaczonym do instalacji przemysłowych. Podstawowe zadania stawiane przed dowolną realizacją są jednak zawsze takie same.

Wzmacniaczem pomiarowym nazywany jest blok objęty pętlą sprzężenia zwrotnego, mający symetryczne wejście różnicowe oraz niesymetryczne wyjście, wzmacniający różnicę pomiędzy sygnałami wejściowymi i jednocześnie

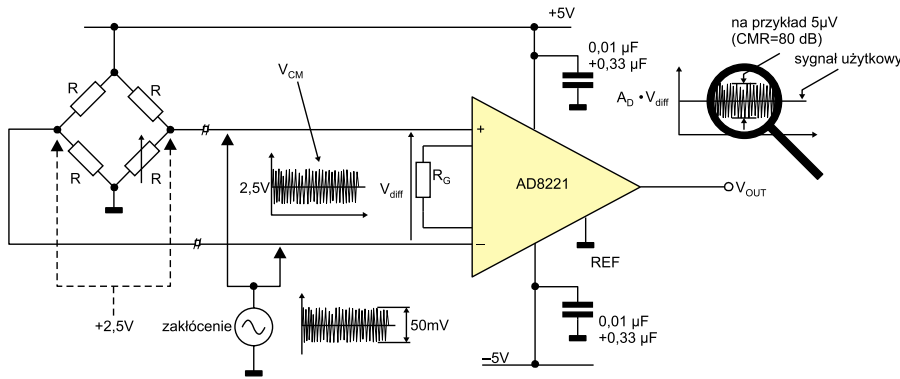
odrzucający sygnały wspólne (współbieżne) dla obu wejść, o czym wspominaliśmy na początku tego artykułu. W ten sposób realizowana jest bardzo ważna funkcja selekcji wejściowego sygnału użytkowego o zwykle niewielkiej amplitudzie. Wartości impedancji obu wejść są zwykle precyzyjnie równoważone i osiągają wartości rzędu $10^9 \Omega$ lub większe. Impedancja wyjściowa jest zwykle bardzo mała i waha się w pobliżu kilku milionów przy niskich częstotliwościach sygnału wyjściowego.

W przeciwieństwie do wzmacniaczy operacyjnych, w których aplikacjach zwykle wzmocnienie ustalane jest za pomocą zewnętrznych rezystorów, włączanych pomiędzy wejście a wyjście, we wzmacniaczach pomiarowych rezystory ustalające wzmocnienie są elementami jego struktury, niepodłączonymi bezpośrednio do wejść czy wyjścia. Tym samym, wzmocnienie typowego wzmacniacza pomiarowego jest ustalane na etapie produkcji, a jego regulacja (o ile w ogóle możliwa) odbywa się poprzez zwieranie odpowiednich wyprowadzeń układu scalonego lub zastosowanie dodatkowego, zewnętrznego rezystora, włączanego w taki sposób, że jest on odizolowany od wejść i wyjścia.

Układy scalone wzmacniaczy pomiarowych zbudowane są z klasycznych wzmacniaczy operacyjnych, jednak w odróżnieniu od nich w większości zastosowań nie wymagają zewnętrznej kompensacji wpływu wejściowego napięcia i prądu niezrównoważenia. Oczywiście, można taką kompensację wykonać, jednak jest to zwykle postępowanie opcjonalne, niewymagane dla typowych zastosowań, gdyż symetria wejść scalonego wzmacniacza bipolarnego osiągana na drodze trymowania za pomocą promienia lasera pozwala na uzyskanie wejściowego napięcia niezrównoważenia na poziomie $25 \mu\text{V}$, dryftu temperaturowego około $0,3 \mu\text{V}$ oraz wejściowego prądu polaryzacji (będącego podstawowym źródłem prądu niezrównoważenia) o wartości około 0,4 nA. We wzmacniaczach unipolarnych te wartości mogą być nawet o trzy rzędy wielkości mniejsze!

Tłumienie i wzmocnienie sygnału wspólnego

Na rys. 1 przedstawiono schemat typowej aplikacji wzmacniacza pomiarowego. Nie ma ona wiele wspólnego z urządzeniami medycznymi, lecz pozwoli na łatwiejsze zrozumienie sposobu, w który działa wzmacniacz pomiarowy.



Rys. 1. Ilustracja aplikacji wzmacniacza pomiarowego. Napięcie V_{diff} jest sumą napięć polaryzacji mostka i zakłóceń

Na wejścia wzmacniacza podawane jest napięcie z przekątnej mostka (napięcie różnicowe oznaczono jako V_{diff}) wraz ze składową stałą oraz napięciem zakłóceń o amplitudzie 50 mV, dodającym się w tej samej fazie do obu sygnałów. Napięcie zakłócające może być np. indukowane w kablach połączeniowych przez zewnętrzne źródła zaburzeń. Rezystor R_G ustala wzmacnienie różnicowe A_D . Na wyjściu otrzymuje się sygnał będący wynikiem wzmacnienia sygnału różnicowego $V_{OUT} = A_D \cdot V_{diff}$ oraz niecałkowicie stłumiony w rzeczywistych warunkach sygnał zakłócający (patrz lupka na rys. 1). W tym przykładzie jego amplituda wynosi 5 μ V.

Jak wynika ze schematu na rys. 1, sygnały współbieżne mogą być napięciami stałymi (jak wspomniane wcześniej napięcie elektrod lub napięcie polaryzacji mostka z rys. 1) lub zmiennymi. Z punktu widzenia aplikacji są to zaburzenia, stąd istnieje potrzeba ich wy tłumienia. Jeśli rozpatrywać ciało ludzkie jako źródło sygnału, to tłumione muszą być nie tylko sygnały wolnozmiennne, ale również inne, odbierane przez tę swego rodzaju antenę. Będzie to dotyczyć przede wszystkim sygnału indukowanego przez sieć energetyczną oraz jego częstotliwości harmonicznych.

W sytuacji idealnej wzmacniacz pomiarowy wzmacnia tylko różnicę, odrzucając całą

resztę. Jednak w praktyce takie układy charakteryzują się pewnym skończonym współczynnikiem tłumienia napięć wspólnych podawanym w dB. W danych katalogowych jest on oznaczany literami CMRR (*Common-Mode Rejection Ratio*) i definiowany jako:

$$CMRR = 20 \cdot \log \frac{A_D \cdot V_{CM}}{V_{OUT}}$$

gdzie:

- A_D : wzmacnienie różnicowe,
- V_{CM} : napięcie wspólne doprowadzone do obu wejść różnicowych,
- V_{OUT} : napięcie wyjściowe pojawiające się w odpowiedzi na podanie napięcia wspólnego V_{CM} .

Parametr CMRR podawany jest odrębnie dla napięć stałych ($CMRR_{DC}$) oraz zmiennych ($CMRR_{AC}$). Oba są bardzo ważne i mogą decydować o praktycznych aplikacjach danego układu. CMRR jest najlepszy dla sygnałów wolnozmiennnych i ulega pogorszeniu wraz ze wzrostem częstotliwości. W nowoczesnych wzmacniaczach pomiarowych dobrej jakości CMRR wynosi około 70 dB przy wzmacnieniu równym 1 oraz przekracza 100 dB dla większych jego wartości. Na rys. 2 pokazano zależność parametru CMRR od częstotliwości dla wzmacniacza pomiarowego AD623 przy różnych wartościach wzmacnienia. Łatwo zauważyć, że krzywa praktycznie nie zmienia

R E K L A M A

TMS320

www.contrans.pl/piccolo - kliknij!



Piccolo

mikrokontrolery sygnałowe od Texas Instruments

Najmniejsze procesory sygnałowe + pamięć Flash!

TMS320F28035

- 32-bitowy rdzeń CPU C28x
- mnożnik sprzętowy 32x32 bity
- Control Law Accelerator
- 60MHz, 128 kb Flash, 20kB RAM
- generator PWM z rozdzielczością 150ps
- 12-bitowy ADC, 4Msps

- GENERATORY PRĄDU
- STEROWANIE SILNIKÓW
- URZĄDZENIA AGD

Tanie narzędzia z Code Composer Studio 32kB w zestawie!



ControlSTICK

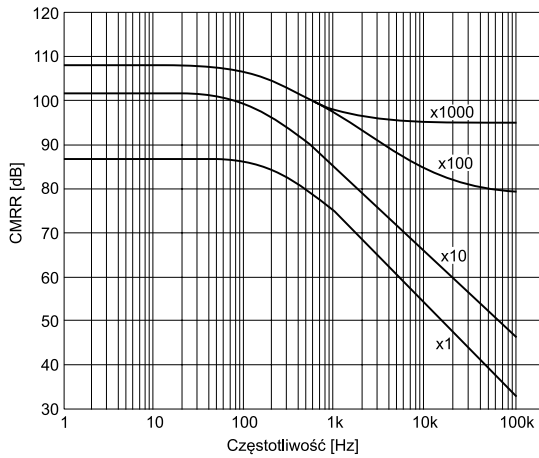
- emulator JTAG XDS 100 (USB)
- procesor TMS320F28027
- Code Composer Studio 32 kB

TMS320F2803x		
C28x 32-bit CPU 60MHz 32x32-bit Multiplier Control Law Accelerator	Memory 64 - 128 kB Flash 20 kB RAM Boot ROM	Power & Clocking Dual OSC 10MHz 3.3V Supply (On-chip 1.9V) Power On Reset Brownout Reset
Debug Real Time JTAG		
Peripheral Bus		
Serial Interfaces SPI x2 CAN LIN	Peripherals SCI I2C Analog Comparators up to 3x	Timer Modules ePWM x 12 (5x HR PWM) QEP eCAP



CONTRANS TI Sp. z o.o.

ul. Polanowicka 66, 51-180 WROCLAW,
tel. 071/325-26-21...24, fax 071/325-44-39,
e-mail: texas@contrans.pl http://www.contrans.pl



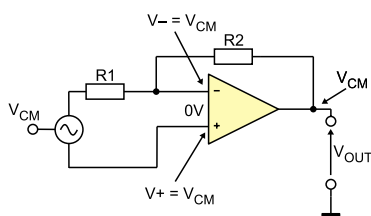
Rys. 2. Zależność parametru CMRR od częstotliwości przy typowych wartościach wzmocnienia różnicowego A_v

się w zakresie 0...100 Hz, jednak w zakresie 100 Hz...1 kHz spadek wynosi aż 20 dB (10×).

Innym bardzo ważnym parametrem wzmacniacza pomiarowego jest *wzmocnienie sygnału wspólnego* oznaczane w katalogach jako A_{CM} . Jest to współczynnik zmiany napięcia wyjściowego na skutek zmiany wspólnego napięcia wejściowego. Na przykład przyłożenie do obu wejść wzmacniacza o parametrze A_{CM} wynoszącym -60 dB (1/1000) napięcia 10 V wywoła w odpowiedzi zmianę napięcia wyjściowego o 10 mV.

Oprócz wymienionych wyżej parametrów wzmacniacz pomiarowy charakteryzowany jest również przez wiele innych. Parametry te są podawane przez producentów w katalogach, jednak bardzo trudno czasami odnieść się do nich obiektywnie, ponieważ niektórzy mogą stosować pewne chwyt marketingowe, aby pokazać swoją przewagę nad konkurencją. Trzeba zwrócić uwagę, że w wielu przypadkach wysoka wartość jednego parametru zaniża wartość innego. Tak jest również w klasycznych wzmacniaczach operacyjnych, których pasmo przeniesienia zmienia się wraz ze wzmocnieniem. Niektóre wzmacniacze pomiarowe reklamowane są jako mające pasmo przeniesienia 700 kHz i CMRR równy 120 dB. Czy tak jest w rzeczywistości?

Przypomnijmy, że wartość CMRR (rys. 2) zależy od wzmocnienia. Wiele wzmacniaczy pomiarowych ma wysoki współczynnik CMRR przy wzmocnieniu napięciowym równym np. 60 dB (1000×). Jednocześnie pasmo przy takim wzmocnieniu jest najwęższe i np.



Rys. 3. Wzmacniacz operacyjny pracujący jako odwracający z wejściami spolaryzowanymi napięciem wspólnym

z deklarowanych 700 kHz zwięża się do 20 kHz. Z drugiej strony, wzmacniacz ma pasmo 700 kHz przy wzmocnieniu napięciowym 20 dB (10×), przy którym CMRR wynosi 85 dB.

Wzmacniacz operacyjny a pomiarowy

Parametr CMRR nie charakteryzuje wyłącznie wzmacniacza pomiarowego. Każdy rodzaj wzmacniacza mającego wejścia różnicowe, tj. wzmacniacze operacyjne, różnicowe i pomiarowe, charakteryzuje się pewnym parametrem CMR. Wzmacniacze pomiarowe i różnicowe są jednak projektowane w taki sposób, aby napięcie wspólne nie pojawiało się na wyjściu. Inaczej jest w typowym wzmacniaczu odwracającym lub nieodwracającym, zbudowanym na bazie klasycznego wzmacniacza operacyjnego.

Na rys. 3 widać wzmacniacz operacyjny pracujący jako odwracający, do którego wejść doprowadzono napięcie wspólne. W związku z tym, że rezystor w pętli sprzężenia zwrotnego jest włączony pomiędzy wejście a punkt sumowania się sygnałów wejściowego i wyjściowego, na wejściu odwracającym wymuszane jest takie samo napięcie jak na wejściu nieodwracającym. Pomimo że wzmacniacz operacyjny ma swój charakterystyczny parametr CMRR, to jego układ pracy powoduje, że napięcie wspólne przenieszone jest na wyjście wzdłuż wzmacniacza. W praktyce, sygnał użytkowy jest wzmacniany dzięki zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego, natomiast wspólny jest przenoszony ze wzmocnieniem równym jedności.

Wzmacniacze pomiarowe a medycyna

Na rys. 4 pokazano schemat aplikacyjny układu służącego do monitorowania trzech przebiegów EKG będących różnicą potencjałów pomiędzy parami punktów A, B, C.

Układ pomiarowy składa się z czterech elektrod pomiarowych oznaczonych literami A, B, C i elektrody odniesienia F. Na wejściach przyrządu zastosowano trzy wzmacniacze buforowe, trzy wzmacniacze pomiarowe (W1, W2, W3) oraz układ wytwarzający sygnał odniesienia (W4). Użycie wejściowych wzmacniaczy buforowych jest opcjonalne.

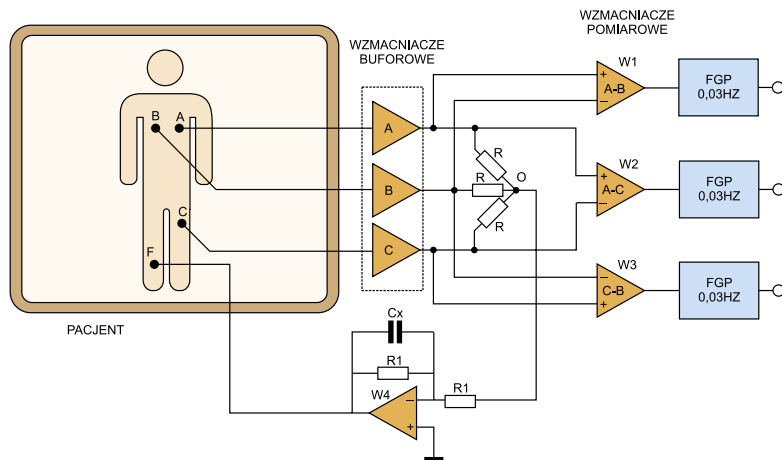
Sensory zbierające potencjał z ciała pacjenta zwykle mają wysoką rezystancję wewnętrzną i dlatego układ powinien mieć wysoką impedancję wejściową, niski wejściowy prąd niezrównoważenia oraz małe szumy. Często pomiędzy pacjentem a torem pomiarowym dla ochrony przed porażeniem stosuje się wzmacniacze z optoizolacją.

Trzy sygnały wejściowe są sumowane we wspólnym punkcie O, dając sygnał odniesienia. Sygnał ten doprowadzany jest przez integrator (W4) do prawej nogi pacjenta. Zadaniem integratora jest takie sterowanie potencjałem w punkcie F, aby suma napięć z punktów A, B, C była równa w punkcie O zero.

Wzmacniacze pomiarowe W1, W2, W3 wzmacniają sygnały EKG, jednocześnie eliminując zakłócenia. W celu wyeliminowania mogącej pojawić się na wyjściach wzmacniaczy składowej stałej stosuje się filtry górnoprzepustowe o dolnej częstotliwości granicznej 0,03 Hz. Przebiegi EKG z wyjść filtrów mogą być podane do rejestratorów graficznych lub przetworników A/C w celu ich dalszego przetwarzania lub rejestracji.

Współczesna medycyna bardzo polega na elektronice i uzyskiwanym w ten sposób możliwościom diagnostyki czy leczenia. Teraz wkraczamy w dziedzinę nanotechnologii, która według futurystów zrewolucjonizuje sposób leczenia. Dziś trudno sobie wyobrazić układ diagnostyczny bez wzmacniacza pomiarowego. Są w nie wyposażone aparaty do EKG, EEG, wagi elektroniczne, mierniki ciśnienia, temperatury, siły i inne. Jest to ogniwo pośredniczące pomiędzy organizmem człowieka a maszyną diagnostyczną i zapewne długo jeszcze, pod taką czy inną postacią, nim pozostanie.

Jacek Bogusz, EP
jacek.bogusz@ep.com.pl



Rys. 4. Przykład urządzenia do pomiarów sygnałów elektrokardiograficznych