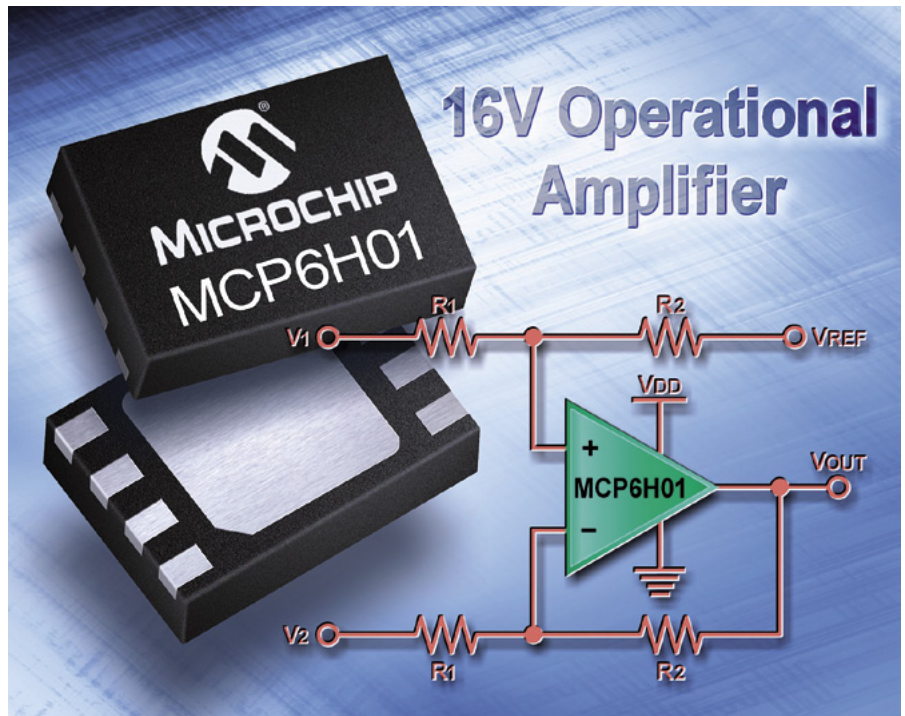


Precyzyjne pomiary prądu

Pomiar natężenia prądu płynącego w obwodzie to zadanie, z którym zetknął się niejedyn elektronik. W najprostszej aplikacji taki układ zabezpiecza obwody (najczęściej wyjściowe) przed przeciążeniem, sygnalizuje awarię obciążenia lub jego zasilania itp. W nieco trudniejszej do wykonania służy do monitorowania prądu płynącego przez uzwojenia silnika lub w innych obwodach prądu zmiennego. W artykule opisano praktyczne realizacje układów służących do pośredniego pomiaru natężenia prądu oraz omówiono ich zalety i wady.



Pomiar natężenia prądu jest w praktyce zawsze wykonywany metodą pośrednią. Czasami stosuje się np. czujniki Hall'a zakładane na przewodach lub przyklejane do ścieżki na płycie drukowanej, ale najczęściej w praktyce mierzy się prąd za pomocą pomiaru spadku napięcia na rezystorze o znanej rezystancji i włączonym szeregowo w obwód obciążenia. Znając ten spadek i korzystając z prawa Ohma jest łatwo obliczyć natężenie prądu przepływającego przez rezystor, a zgodnie z zasadą połączenia szeregowego – przez obciążenie.

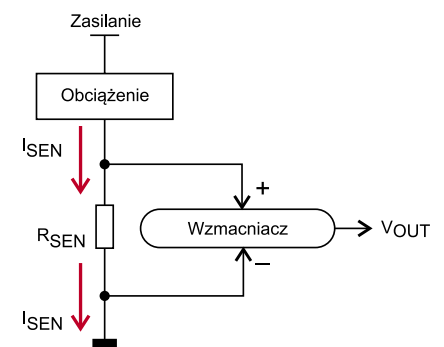
Wady i zalety stosowania rezystorów pomiarowych

Metoda pomiaru natężenia prądu za pomocą spadku napięcia ma szereg zalet, między innymi jest tania w implementacji i łatwa do zrozumienia, gdy natrafi się na problemy do rozwiązania, a jednocześnie pozwala na uzyskanie dobrej dokładności przy małym i średnim natężeniu mierzonego prądu. Co więcej, równie dobrze nadaje się do pomiaru prądu stałego, jak i zmiennego. Do wad tego typu rozwiązania należy zaliczyć dodatkową rezystancję, która jest wprowadzana szeregowo do mierzonego obwodu. Zwiększona rezystancja w obwodzie z ob-

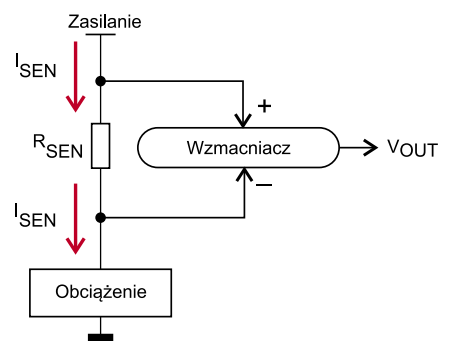
ciążeniem skutkuje wzrostem poboru mocy, który przekłada się też na wzrost ilości ciepła do rozproszenia. Przy dużym natężeniu mierzonego prądu wymaga to stosowania rezystorów o sporych wymiarach i specjalnych technik ich mocowania, tak aby umożliwić skuteczne odprowadzanie ciepła. Z tego powodu często inżynierowie szukają innych metod pomiarowych, nawet gdy natężenie prądu przekracza kilka amper.

Ilość traconego ciepła można zminimalizować stosując rezystory o małej rezystancji. Niestety, w wypadku przepływu prądu o małym natężeniu spadek napięcia na takich opornikach również będzie proporcjonalnie mały a przy tym może nie przekroczyć offsetu napięć wejść analogowych układów mierzających napięcie na oporniku, co skutecznie uniemożliwi pomiar (spadek napięcia zostanie przez ten offset „zamaskowany”). Problemem mogą być też duża częstotliwość mierzonego prądu. Do pomiaru takiego prądu trzeba stosować rezystory o bardzo małej indukcyjności. W przeciwnym wypadku wynik pomiaru będzie obciążony dużym błędem. Niezależnie od częstotliwości, stosując tę metodę trzeba też pamiętać o innych parametrach rezystorów, takich jak: tolerancja wykonania, stabilność temperaturowa,

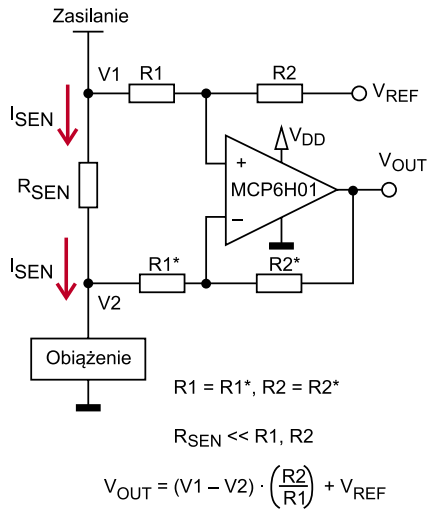
Dodatkowe informacje:
Materiał opracowano na podstawie materiałów dostarczonych przez firmę Microchip.



Rysunek 1.



Rysunek 2.



Rysunek 3.

wytrzymałość temperaturowa oraz moc znamionowa, która powinna być na tyle duża, by opornik wytrzymał krótkie przetężenia znacznie przekraczające wartości znamionowe.

Układy pomiarowe low-side i high-side

Pomiary natężenia prądu z użyciem rezystorów można podzielić na dwa rodzaje, w zależności od tego, gdzie w układzie włączono opornik pomiarowy. W pierwszym rezystor pomiarowy jest włączany pomiędzy obciążeniem a masą, jak pokazano na **rysunku 1**. Taką konfigurację nazywa się *low-side*. Ponieważ zazwyczaj spadek napięcia na tym rezystorze jest bardzo mały, to jest konieczne jego wzmocnienie np. za pomocą wzmacnia-

cza. W omawianej sytuacji włączenie takiego układu czujnika jest łatwe i tanie, gdyż zarówno wejście sygnału, jak i wyjście są odniesione do masy. Ponadto, nawet kiepski współczynnik CMRR (*Common Mode Rejection Ratio*) wzmacniacza nie jest problemem tj. sytuacja, gdy na wynik wzmocnienia różnicy sygnałów podanych na wejście istotnie wpływa offset tych napięć. Niestety, taka konfiguracja sprawia, że wynik pomiaru jest wrażliwy na wahaniami poziomu masy. Ponadto obciążenie „widzi” masę na nieco wyższym potencjale niż w rzeczywistości. Włączając w ten sposób element pomiarowy nie da się zmierzyć zwarcia w obciążeniu – nie zostanie ono w ogóle wykryte. Z powyższych względów omawianą metodę pomiarową stosuje się raczej rzadko i tylko wtedy, gdy potencjał masy jest stabilny, a wykrywanie zwarcń nie jest wymagane.

W drugim rodzaju rezystor jest włączany pomiędzy linię zasilania a obciążenie (**rysunek 2**). Taką konfigurację nazywa się *high-side*. Metoda ta pozwala na wyeliminowanie problemów związanych z niestabilnością potencjału masy. Jednocześnie obciążenie jest bezpośrednio dołączone do masy, więc jest możliwy pomiar prądu zwarcia. Niestety, to rozwiązanie ma też wady. Przede wszystkim, zastosowane elementy muszą być odporne na wysokie i dynamicznie zmieniające się napięcia. Istotny jest także fakt, że część wspólna potencjałów na wejściach wzmacniacza jest wysoka i szybko się zmienia. Aby pomiar tego typu był precyzyjny, zastosowane wzmacniacze muszą charakteryzować się dobrym parametrem CMRR, co podnosi ich cenę.

Pomiary w konfiguracji high-side

Pomimo wad i zalet obu przedstawionych rodzajów układów pomiarowych, częściej jest stosowana konfiguracja *high-side*. Decyzja o jej użyciu wynika przede wszystkim z ograniczeń konfiguracji *low-side*, której praktycznie nie da się stosować ani w urządzeniach przenośnych, ani w aplikacjach sterowania silnikami, ani w motoryzacji.

Na **rysunku 3** pokazano przykładowy schemat nieskomplikowanego układu pomiarowego w konfiguracji *high-side*. Składa się on z pojedynczego wzmacniacza różnicowego wykonanego w oparciu o wzmacniacz operacyjny MCP6H01 i cztery rezystory zewnętrzne. Wzmacnia on niewielki spadek napięcia na rezystorze pomiarowym, a wartość wzmocnienia wynosi $R2/R1$. Jednocześnie, układ jest mało wrażliwy na offset monitorowanych napięć. Współczynnik $CMRR_{DIFF}$ jest bowiem określony przede wszystkim przez tolerancje wartości rezystorów $R1, R2, R1^* \text{ i } R2^*$, a nie CMRR samego wzmacniacza operacyjnego. W wypadku, gdy stosunek $R2/R1=1$, użycie drogich rezystorów o tolerancji wykonania 0,1% w najgorszym przypadku prowadzi do uzyskania wartości $CMRR_{DIFF}$ na poziomie 54 dB. Dla tańszych rezystorów, o tolerancji równej 1%, w najgorszym przypadku $CMRR_{DIFF}$ przyjmie wartość tylko 34 dB. Należy też zaznaczyć, że wartość R_{SEN} powinna być znacznie mniejsza niż $R1$ i $R2$ oraz że od strony potencjałów V_1 i V_2 wejścia wzmacniacza nie są zrównoważone.

Dołączenie napięcia odniesienia V_{REF} pozwala na podniesienie napięcia wyjściowego wzmacniacza do pożądanego poziomu, ale trzeba też pamiętać, że aby było to możliwe, V_{REF} musi być podawane ze źródła o małej rezystancji wyjściowej, by nie pogarszać współczynnika $CMRR_{DIFF}$.

Napięcia V_1 i V_2 mogą też być przedstawione jako suma/różnica offsetu (napięcia wspólnego V_{CM}) i połowy napięcia różnicy:

$$V_1 = V_{CM} + V_{DM}/2$$

$$V_2 = V_{CM} - V_{DM}/2$$

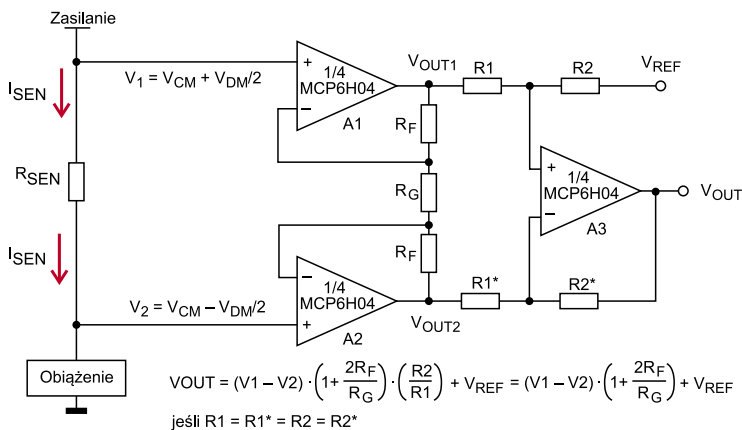
Wartość napięcia na wyjściu wynosi wtedy:

$$V_{OUT} = (V_1 - V_2) \times G + V_{REF} = V_{DM} \times G + V_{REF}$$

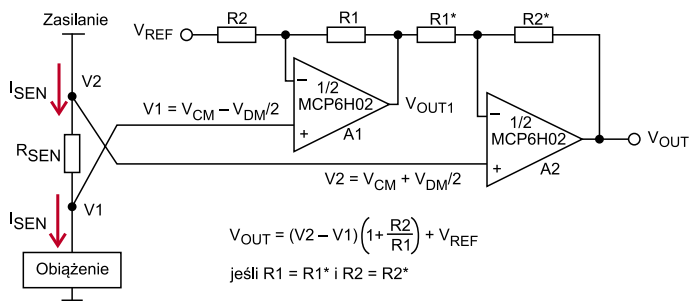
gdzie $G = R2/R1$.

Aby uniknąć sytuacji, w której V_{OUT} osiąga poziom napięcia szyn zasilających, trzeba się upewnić, że nie wykracza ono poza dopuszczalny zakres, tj. nie jest mniejsze niż V_{OL} ani większe niż V_{OH} . Zakres ten wynika z rezystancji rezystorów $R1, R2, R1^* \text{ i } R2^*$.

Podsumowując, zastosowanie pojedynczego wzmacniacza różnicowego pozwala uzyskać dobry współczynnik $CMRR_{DIFF}$ jest dosyć tanie i łatwe w implementacji, wymaga niewielkiego prądu zasilającego. Niestety, ma niezrównoważone wejścia, a zmiana współczynnika wzmocnienia wymaga zmiany rezystancji więcej niż jednego rezystora.



Rysunek 4.



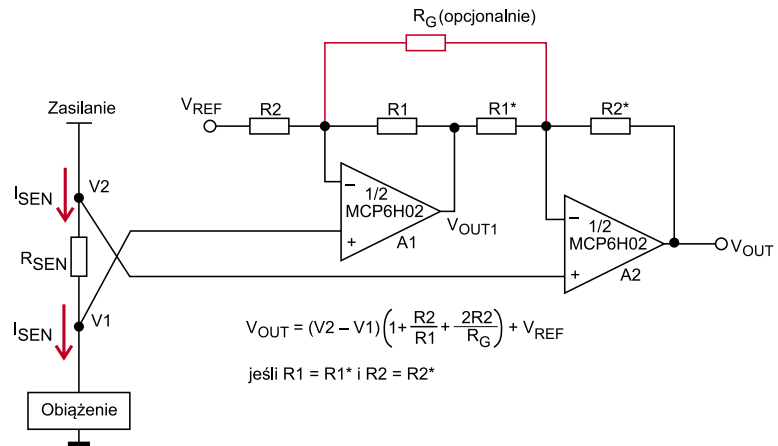
Rysunek 5.

<http://forum.ep.com.pl>

Na **rysunku 4** zaprezentowano schemat układu pomiarowego z trzema wzmacniaczami, który charakteryzuje się bardzo dobrym współczynnikiem CMRR i dużym wzmocnieniem dla sygnału różnicowego. Wzmocnienie odbywa się dwustopniowo. W pierwszym stopniu dwa wzmacniacze operacyjne A1 i A2 pracują jako bufor. Zapewniają dużą impedancję wejściową i równoważą wejścia. Ponadto rezystory R_F i R_G zwiększają wzmocnienie różnicowe buforów do wartości $G_{DM} = 1 + 2R_F/R_G$, podczas gdy wzmocnienie offsetu $G_{CM} = 1$. Znacząco zwiększa to współczynnik CMRR tej konfiguracji, który jest równy $20 \log(G_{DM}/G_{CM})$. Co więcej, wartość sumarycznego wzmocnienia tego układu pomiarowego może być łatwo zmieniana poprzez dobór wartości rezystora R_G , bez konieczności regulowania wartości oporów $R1$, $R2$, $R1^*$ i $R2^*$.

W drugim stopniu pracuje wzmacniacz różnicowy A3. W praktyce stosuje się rezystory o wartościach $R2 = R1$, a wartość CMRR całego układu zależy przede wszystkim od CMRR pierwszego etapu i precyzji doboru $R2/R1$ oraz $R2^*/R1^*$. Tolerancja oporników R_F i R_G nie wpływa na łączną wartość CMRR.

Omaiwana, 3-wzmacniaczowa konfiguracja cechuje się jednak pewnym łatwym do zauważenia problemem. Ograniczony jest bowiem zakres napięcia offsetu napięć wejściowych (V_{CM}). Wzmocnienie całego układu wynosi G_{DM} dla sygnału różnicowego i $G_{CM} = 1$ dla offsetu, ale wszystkie wartości: V_{OUT1} , V_{OUT2} i V_{OUT} nie mogą wykraczać poza V_{OL} i V_{OH} . W efekcie, jeśli G_{DM} ma dużą wartość, zakres V_{CM} jest silnie ograniczony. Ponadto, co oczywiste, zastosowanie aż trzech wzmacniaczy zwiększa koszt takiego układu oraz jego pobór mocy.



Rysunek 6.

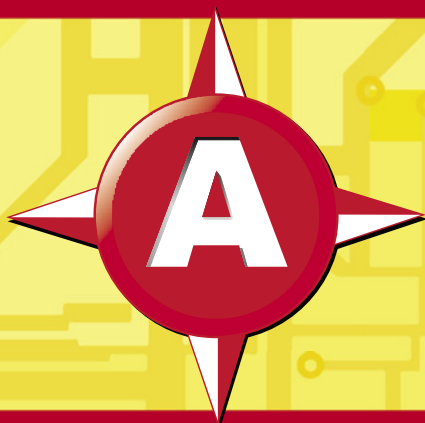
W celu ograniczenia poboru mocy i zmniejszenia kosztów układu można zastosować układ pomiarowy zbudowany z dwóch wzmacniaczy operacyjnych, jak pokazano na **rysunku 5**. Podobnie jak układ z trzema wzmacniaczami, charakteryzuje się on dużą, zrównoważoną rezystancją wejściową. Wartość CMRR jest określona głównie przez sumaryczne wzmocnienie oraz precyzję dopasowania $R2/R1$ i $R2^*/R1^*$. Wartości V_{OUT} i V_{OUT1} muszą zmieścić się w zakresie od V_{OL} do V_{OH} , co również powoduje ograniczenia na dopuszczalnych wartości V_{DM} i V_{CM} . W odróżnieniu od układu z trzema wzmacniaczami operacyjnymi, w omawianej konfiguracji zakres dopuszczalnych wartości V_{CM} będzie znacznie ograniczony w wypadku, gdy pracuje on z niedużym wzmocnieniem. Co więcej, ze względu na brak symetrii w ścieżce wzmocnienia offsetu napięć V_1 i V_2 , układ będzie wykazywał przesunięcie fazowe pomiędzy V_{OUT1} i V_1 , pogarszając współczynnik CMRR dla napięcia

przemienne. Wszelkie zmiany napięcia V_1 muszą bowiem zostać przeniesione najpierw przez wzmacniacz A1, zanim będą mogły być odejęte od V_2 przez wzmacniacz A2.

Na **rysunku 6** zmodyfikowany układ z rys. 5. Dodanie opornika R_G pomiędzy wejścia odwracające wzmacniaczy A1 i A2 pozwala w łatwy sposób zmieniać wzmocnienie takiego układu pomiarowego za pomocą zmiany wartości R_G . Stosunek $R2/R1$ jest zazwyczaj dobierany tak, aby uzyskać minimalne pożądane wzmocnienie. Ponadto, dodanie R_G sprawia, że można zmniejszyć wartości $R2$ i $R2^*$, jeśli będzie wymagane duże wzmocnienie. Układ z rys. 6 charakteryzuje się dużym współczynnikiem CMRR, dużą rezystancją wejściową, ma zrównoważone wejścia, jest tani oraz zużywa względnie niedużo mocy w porównaniu do układu z 3 wzmacniaczami. Niestety, ma ograniczony zakres dopuszczalnego offsetu napięć (V_{CM}) oraz słaby współczynnik CMRR dla napięć przemiennych.

Marcin Karbowiczek, EP

REKLAMA



www.automatykaonline.pl

POMAGAMY
WYNALAZCOM!