

Moduł pomiaru prądu high-side dla 24 V

Hubert Kucharczyk

11.11.2025

1 Założenia projektowe

Moduł zaprojektowałem jako układ do pomiaru prądu szyny 24 V w zakresie do kilkudziesięciu amperów. Sygnał wyjściowy ma postać 0–3,3 V, gotową do bezpośredniego wprowadzenia na wejście przetwornika ADC i dalszą obróbkę w logice sterującej.

Przyjąłem następujące założenia:

- pomiar prądu w torze mocy 24 V, typowo do 50 A,
- wyjście analogowe 0–3,3 V liniowo proporcjonalne do prądu,
- architektura relatywnie prosta i kosztowo efektywna,
- rezygnacja z drogich elementów zabezpieczających w torze głównym (np. bezpieczników mocy), aby zachować niski koszt modułu,
- możliwość zastosowania w środowisku zbliżonym do łazika mobilnego: rozproszony system, wiele modułów, wymaganie na stabilną masę odniesienia.

2 Wybór topologii high-side

Jako metodę pomiaru przyjąłem topologię **high-side** z rezystorem bocznikowym w linii dodatniej oraz dedykowanym wzmacniaczem prądowym INA282. To świadomy wybór względem alternatyw low-side i czujników Halla.

Kluczowe argumenty za high-side

- **Brak podnoszenia masy:**
 - w systemie łazikowym wiele modułów i czujników odnosi się do wspólnego potencjału 0 V,
 - bocznik low-side wprowadza zależny od prądu spadek na masie, co rozjeżdża punkty odniesienia, komplikuje pomiary niskonapięciowe i zwiększa ryzyko problemów EMC.
- **Detekcja zwarcia i awarii:**
 - pomiar po stronie high-side pozwala mi obserwować *cały* prąd wychodzący z szyny,
 - mogę wykryć zwarcia do masy tuż za złączem, co jest kluczowe dla monitorowania krytycznych obciążeń.
- **Spójne odniesienie GND:**
 - masa pojazdu pozostaje niezakłócona przez elementy mocy wstawione w tor GND,
 - ułatwia mi to integrację z innymi modułami i systemami diagnostycznymi.
- **Tryby awarii przyjazne systemowi:**

- przerwa rezystora pomiarowego w topologii high-side skutkuje odcięciem zasilania obciążenia (zachowanie zbliżone do fail-safe),
- w przypadku low-side przerwa powoduje *floating ground*, co prowadzi do nieprzewidywalnych stanów napięciowych.

Dlaczego nie low-side

Ze stosowania topologii low-side świadomie zrezygnowałem, mimo jej prostszej implementacji:

- wprowadza zmienny spadek napięcia na masie przy prądach rzędu dziesiątek amperów,
- generuje zakłócenia na GND widoczne dla całej elektroniki sterującej,
- utrudnia jednoznaczną diagnostykę połączeń masy w rozproszonej instalacji.

Dlaczego nie czujniki Halla

Rozważałem również zastosowanie czujników Halla, jednak ostatecznie je odrzuciłem, ponieważ:

- w środowisku łazika obecne są silne i zmienne pola magnetyczne (silniki, napędy, elementy indukcyjne), co zwiększa podatność na błędy,
- typowe układy Halla oferują mniejszą precyzję i większy dryft temperaturowy niż dobrej klasy bocznik + wzmacniacz,
- dla interesujących zakresów prądowych rozwiązania Halla są mniej kompaktowe i mniej korzystne kosztowo.

Wniosek topologiczny

Zdecydowałem się więc na topologię:

high-side shunt + dedykowany current sense amplifier,

która zapewnia spójność odniesienia masy, umożliwia detekcję krytycznych stanów i pozwala na prostą integrację z resztą systemu.

3 Struktura układu i dobór elementów

U1 – 1x INA282AIDR

- wzmacniacz pomiaru prądu high-side z ustalonym wzmocnieniem $\frac{V_{out}}{V_{in}} = 50 \text{ V/V}$,
- poprawna praca przy $V_{CC} \approx 3,3 \text{ V}$,
- niski offset umożliwia mi dobrą rozdzielczość przy małych prądach,
- REF1 i REF2 zwarte do GND zapewniają jednokierunkowy zakres pomiarowy (0 A odpowiada 0 V na wyjściu),
- przy rezystorze $R_s = 1 \text{ m}\Omega$ otrzymuję $V_{OUT} = 0,05I \text{ [V]}$, co dla 50 A daje 2,5 V i pozostawia zapas względem 3,3 V.

Rs – 1x LRMAP3920C-R001FT

- rezystor bocznikowy 1 m Ω , obudowa 3920, wykonanie 4-terminalowe, moc 5 W,
- niska rezystancja minimalizuje straty mocy w torze,
- odseparowane wyprowadzenia prądowe i pomiarowe (Kelvin) zapewniają precyzyjny pomiar spadku napięcia i bardzo dobrą współpracę z INA282.

R1, R2, Cdiff – 2x TNPW060310R0BEEA, 1x C1608C0G1H103J080AA

- R1 i R2 (10 Ω , 0,1%) umieszczam w szeregach wejściowych INA282,
- wraz z Cdiff (10 nF, C0G) tworzą symetryczny filtr dolnoprzepustowy, który tłumi szum przełączający i EMI z szyny mocy,
- ograniczają prądy udarowe na wejściach wzmacniacza przy ESD i stanach awaryjnych,
- technologia thin-film (R1, R2) oraz stabilny dielektryk C0G (Cdiff) minimalizują dodatkowe błędy i dryft parametrów filtru.

R3, C3 – 1x TNPW060310R0FEEA, 1x C0805C103J5RAC7210

- R3 (10 Ω) włączam szeregowo z wyjściem INA282, C3 (10 nF) dołączam do GND, tworząc filtr RC,
- filtr ten ogranicza szum i chroni przed impulsami prądowymi pochodzącymi od wejścia ADC,
- 10 Ω jest wystarczające do uformowania filtru i ograniczenia prądu, bez istotnego pogorszenia dynamiki,
- 10 nF zapewnia pasmo rzędu kilku-kilkudziesięciu kHz, co stanowi kompromis między responsywnością a filtrowaniem.

C1, C2 – 1x 0603B104K500CT, 1x CL21B105KBFNFNE

- C1 (100 nF / 50 V) montuję możliwie blisko pinu Vcc INA282 jako lokalne odsprężanie wysokich częstotliwości,
- C2 (1 μ F / 50 V) uzupełnia C1 dla niższych częstotliwości i zapewnia lokalny zapas ładunku,
- razem stabilizują zasilanie wzmacniacza i poprawiają dokładność pomiaru.

D1 – 1x SMAJ33A

- diodę TVS 33 V umieszczam przy wejściu złącza J1,
- chroni ona tor pomiarowy przed przepięciami i stanami przejściowymi na magistrali 24 V,
- dzięki takiemu położeniu impuls jest ograniczany zanim dotrze do rezystora Rs i wzmacniacza U1.

J1, J2 – 2x 76A 1x2 Header

- złącza mocy pełnią rolę wejścia i wyjścia modułu,
- dobrałem je pod duży prąd ciągły i pewne połączenie mechaniczne,
- umożliwiają bezpośrednie włączenie modułu w tor szyny 24 V.

J3 – 1x XHP-3 1x3

- złącze interfejsu sygnałowego,
- doprowadzam nim zasilanie do U1 (Vcc, GND) oraz wyprowadzam sygnał Out do ADC,
- opieram się na popularnym standardzie używanym w aplikacjach mobilnych i automotive.

4 Podsumowanie

Zaprojektowany przeze mnie moduł:

- jest elektrycznie prosty i kosztowo efektywny,
- wykorzystuje topologię high-side shunt + INA282, nie zaburzając odniesienia masy systemu,
- zapewnia odporność na zakłócenia i stany przejściowe w torze 24 V,
- generuje liniowy, łatwo skalowalny sygnał 0–3,3 V,
- pozostaje przewidywalnym rozwiązaniem do pomiaru prądu w rozważanej aplikacji łazikowej.

Źródła

- Analog Devices, *AN-105: Current Sense Circuit Collection – Making Sense of Current*, dostęp online: analog.com.
- Allegro MicroSystems, *Non-Intrusive Hall-Effect Current Sensing Techniques for Power Electronics*, dostęp online: allegromicro.com.