

Moduł pomiaru prądu high-side dla 24 V

Hubert Kucharczyk

11.11.2025

1 Założenia projektowe

Projektowany moduł służy do pomiaru prądu szyny zasilającej 24 V w zakresie do kilkudziesięciu amperów. Sygnał wyjściowy ma postać napięcia 0–3,3 V, gotowego do bezpośredniego wprowadzenia na wejście przetwornika ADC i dalszą obróbkę w logice sterującej.

Przyjęte 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 przyjęto topografię **high-side** z rezystorem bocznikowym w linii dodatniej oraz dedykowanym wzmacniaczem prądowym INA282. Jest to wybór świadomy 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 rozjeźdża punkty odniesienia, komplikuje pomiary niskonapięciowe i zwiększa ryzyko problemów EMC.
- **Detekcja zwarć i awarii:**
 - pomiar po stronie high-side pozwala obserwować *cały* prąd wychodzący z szyny,
 - możliwa jest detekcja zwarć do masy tuż za złączem, co jest kluczowe dla monitorowania krytycznych obciążzeń.
- **Spójne odniesienie GND:**
 - masa pojazdu pozostaje niezakłócona przez elementy mocy wstawione w tor GND,
 - uproszczona integracja 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

Z topologii low-side świadomie zrezygnowano, mimo 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

Rozważano również zastosowanie czujników Halla. Ostatecznie z nich zrezygnowano, 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

Zastosowano więc topografię:

high-side shunt + dedykowany current sense amplifier,

która zapewnia spójność odniesienia masy, możliwość detekcji krytycznych stanów oraz prostą integrację z resztą systemu.

3 Struktura układu i dobór elementów

U1 – 1x INA282AIDR

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

Rs – 1x LRMAP3920C-R001FT

- rezystor bocznikowy $1\text{ m}\Omega$, obudowa 3920, wykonanie 4-terminalowe, moc 5 W,
- niska rezystancja minimalizuje straty mocy,
- odseparowane wyprowadzenia prądowe i pomiarowe (Kelvin) zapewniają precyzyjny pomiar spadku napięcia i dobrą współpracę z INA282.

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

- R1 i R2: $10\text{ }\Omega$, 0,1% – w szeregach wejściowych INA282,
- wraz z Cdiff (10 nF , C0G) tworzą symetryczny filtr dolnoprzepustowy, który tłumii szum przełączający i EMI z szyny mocy,
- ograniczają prądy udarowe na wejściach wzmacniacza przy ESD i stanach awaryjnych,
- technologia thin-film (R1, R2) i stabilny dielektryk C0G (Cdiff) minimalizują dodatkowe błędy i dryft parametrów filtra.

R3, C3 – 1x TNPW060310R0FEEA, 1x C0805C103J5RAC7210

- R3 ($10\text{ }\Omega$) w szereg z wyjściem INA282, C3 (10 nF) do GND: prosty filtr RC na wyjściu,
- filtr ogranicza szum i chroni przed impulsami prądowymi pochodzącyimi od wejścia ADC,
- $10\text{ }\Omega$ jest wystarczające do uformowania filtra i ograniczenia prądu, bez istotnego pogorszenia dynamiki,
- 10 nF zapewnia pasmo rzędu kilku–kilkudziesięciu kHz, co stanowi kompromis między reponsywnością a filtrowaniem.

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

- C1: $100\text{ nF} / 50\text{ V}$, montowany możliwie blisko pinu Vcc INA282, odpowiada za lokalne odsprzeganie wysokich częstotliwości,
- C2: $1\text{ }\mu\text{F} / 50\text{ V}$, uzupełnia C1 dla niższych częstotliwości i zapewnia lokalny zapas ładunku,
- razem stabilizują zasilanie wzmacniacza, co bezpośrednio wpływa na dokładność pomiaru.

D1 – 1x SMAJ33A

- dioda TVS 33 V wpięta przy wejściu złącza J1,
- chroni tor pomiarowy przed przepięciami i stanami przejściowymi na magistrali 24 V,
- jej lokalizacja sprawia, że impuls jest ograniczany zanim dotrze do rezystora Rs i wzmacniacza U1.

J1, J2 – 2x 76A 1x2 Header

- złącza mocy wejścia i wyjścia modułu,
- dobrane pod duży prąd ciągły i pewne połączenie mechaniczne,
- umożliwiają włączenie modułu bezpośrednio w tor szyny 24 V.

J3 – 1x XHP-3 1x3

- złącze interfejsu sygnałowego,
- doprowadza zasilanie do U1 (Vcc, GND) oraz wyprowadza sygnał Out do ADC,
- bazuje na popularnym standardzie wykorzystywanym w aplikacjach mobilnych i automotive.

4 Podsumowanie

Zaprojektowany 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,
- jest przewidywalny i dobrze nadaje się jako element systemu pomiaru prądu w rozważanej aplikacji łazikowej.