

Projekt stanowiska pomiarowego podstawowych wielkości fizycznych wykorzystywanych w systemach HVAC

w oparciu o zestaw STM32F746G-Discovery z wyświetlaczem TFT

Imię Nazwisko

21 października 2025

Streszczenie

Praca przedstawia projekt oraz weryfikację stanowiska pomiarowego dla wybranych wielkości fizycznych typowych w systemach HVAC (temperatura, wilgotność, ciśnienie, przepływ oraz sygnały sterujące 0 V–10 V). Rozwiązanie bazuje na zestawie uruchomieniowym STM32F746G-Discovery z wyświetlaczem TFT oraz na dedykowanej karcie pomiarowo-wyjściowej 0 V–10 V zaprojektowanej w KiCad. Oprogramowanie wykonano w środowisku Zephyr RTOS z wykorzystaniem sterowników peryferiów i biblioteki LVGL do obsługi interfejsu graficznego. Przedstawiono wymagania funkcjonalne, projekt części analogowej (tory wejściowe z ochroną i skalowaniem, tor wyjściowy 0 V–10 V), architekturę oprogramowania (wątki RTOS, kolejki, sterowniki), a także wyniki walidacji dokładności i powtarzalności pomiarów na podstawie wzorców i porównania z przyrządami referencyjnymi.

Spis treści

1	Wstęp	2
2	Stan wiedzy i rozwiązania pokrewne	2
3	Wymagania	2
3.1	Funkcjonalne	2
3.2	Niefunkcjonalne	2
4	Projekt części sprzętowej	2
4.1	Wymagania sprzętowe — przegląd	2
4.2	Moduł zasilania	3
4.3	Tor wyjściowy 0–10 V: przetwornik DAC + wzmacniacze operacyjne	3
5	Oprogramowanie (Zephyr RTOS)	4
5.1	Architektura	4
5.2	Sterowniki	4
5.3	GUI	4
5.4	Testy	4

6	Walidacja	5
6.1	Metodyka	5
6.2	Wyniki	5
6.3	Dyskusja	5

1 Wstęp

Celem pracy jest zaprojektowanie i weryfikacja stanowiska pomiarowego dla podstawowych wielkości fizycznych spotykanych w HVAC oraz interfejsu sterującego 0 V–10 V, z wykorzystaniem zestawu STM32F746G-Discovery (STM32F746NG, Cortex-M7) i dedykowanego modułu pomiarowego PCB. Motywacją jest potrzeba ekonomicznego, dydaktycznego stanowiska do testów i demonstracji algorytmów sterowania.

Omówiono kontekst przemysłowy sygnałów 0 V–10 V, przegląd czujników oraz wymagania co do dokładności i izolacji torów.

2 Stan wiedzy i rozwiązania pokrewne

Krótki przegląd: interfejsy analogowe w HVAC (0–10 V, 4–20 mA), standardy i zalecenia, dostępne moduły komercyjne oraz przykłady platform STM32 z wyświetlaczem TFT.

3 Wymagania

3.1 Funkcjonalne

- Pomiar napięć wejściowych w zakresie 0 V do 10 V z rozdzielczością ≤ 10 mV.
- Generacja sygnału wyjściowego 0 V do 10 V obciążalność ≥ 5 mA.
- GUI na TFT: wizualizacja trendów, konfiguracja kanałów.

3.2 Niefunkcjonalne

EMC, bezpieczeństwo, ESD, kalibracja (offset/gain), testowalność.

4 Projekt części sprzętowej

4.1 Wymagania sprzętowe — przegląd

Projektowana płytką stanowi jedną, spójną platformę do pomiaru i generacji sygnałów 0–10 V w aplikacjach HVAC, współpracującą z zestawem uruchomieniowym wyposażonym w m.in. MCU STM32F7 i panel TFT. Od strony zasilania przewidziano wejście instalacyjne DC z podstawowym torem ochronnym (odwrotna polaryzacja, przepięcia, wstępna filtracja), następnie podział zasilania na osobne gałęzie dla części cyfrowej, analogowej i elementów interfejsowych. Taki układ zmniejsza wpływ zakłóceń na pomiary i stabilizuje pracę torów. Interfejs do świata zewnętrznego obejmuje wejścia 0–10 V przygotowane do bezpiecznego próbkowania przez ADC (buforowanie i prosta filtracja antyaliasingowa) oraz wyjścia 0–10 V realizowane przez DAC i wzmacniacze operacyjne. Warstwa analogowa jest topologicznie

oddzielona od cyfrowej (kontrolowane powroty prądowe, wydzielone obszary masy, filtry na przejściach między domenami), co ogranicza przesłuchy i dryft.

4.2 Moduł zasilania

Układ zasilania płytki został zaprojektowany tak, aby bezpiecznie przyjąć instalacyjne napięcie stałe (do ok. 24 V) i rozdzielić je na dwie stabilne linie: +5 V oraz +3,3 V. Na wejściu zastosowano gniazdo **J1** (DC jack $5,5 \times 2,1$ mm), za którym znajduje się polimerowy bezpiecznik samoresetujący **F1** (PPTC 1,1 A/30 V) pełniący rolę zabezpieczenia nadprądowego. Dodatkowo tranzystor **Q1** (PMOS *IRLML9301*) realizuje ochronę przed odwrotną polaryzacją zasilania; rezystory **R5/R4** służą doysterowania tranzystora.

Równolegle do toru wejściowego umieszczono diodę TVS **D3** (SMBJ33A) tłumiącą przepięcia oraz diodę **D4** (SOD323) do szybkiego klampowania krótkich impulsów. Włącznik **SW1** odcina cały moduł zasilania, a wskaźnik **D5** z rezystorem **R14** sygnalizuje obecność napięcia.

Za sekcją ochronną znajduje się wstępna filtracja: dławik **L3** (33 μ H) oraz kondensatory **C15** (100 μ F/63 V), **C26** (100 nF), **C27** (47 μ F) i **C16** (1 μ F) ograniczają wahania napięcia i szpilki prądowe ładujące przetwornice. Dodatkowy koralik ferrytowy **FB1** poprawia tłumienie zakłóceń o wyższych częstotliwościach.

Konwersję napięcia realizują dwie niezależne przetwornice buck z rodziny *LM2596S*. Układ **U1** (*LM2596S-5*) generuje linię +5 V; w jego torze znajdują się: dławik **L2** (33 μ H), dioda Schottky’ego **D1** (SK56) oraz kondensatory wejściowe **C2** (100 μ F/63 V) i **C1** (470 nF) oraz wyjściowe **C4/C3**. Analogicznie **U2** (*LM2596S-3,3*) dostarcza +3,3 V z użyciem dławika **L1** (68 μ H), diody **D2** (SK56) oraz zestawu kondensatorów **C5**, **C6** po stronie wejściowej i **C7**, **C8** po stronie wyjściowej. Dobór elementów został wykonany w zgodności z zaleceniami producenta przetwornic. Wspólny punkt masy prowadzony jest od strony wejściowej, a rozdział linii +5 V i +3,3 V pozwala zasilać oddzielnie część cyfrową, analogową i interfejsową, co ogranicza przesłuchy i wrażliwość torów pomiarowych.

Stan szyn wyjściowych jest sygnalizowany diodami LED: **D7** (+5 V) z rezystorem **R16** oraz **D6** (+3,3 V) z rezystorem **R15**. Na schemacie umieszczono również znaczniki PWR_FLAG, ułatwiające kontrolę ciągów zasilania w narzędziu CADe. Całość tworzy spójny, tor: *wejście i zabezpieczenia* \rightarrow *filtracja wstępna* \rightarrow *konwersja +5 V/+3,3 V* \rightarrow *dystrybucja i sygnalizacja*, co przekłada się na stabilną pracę układu w warunkach typowych dla instalacji HVAC.

4.3 Tor wyjściowy 0–10 V: przetwornik DAC + wzmacniacze operacyjne

Tor wyjściowy generujący sygnały 0–10 V oparto na ośmiokanałowym przetworniku cyfrowo–analogowym **U3** (*DAC7568IAPW*) współpracującym z dwoma czterokanałowymi wzmacniaczami operacyjnymi **U5** i **U6** (*TLV9304xPW*). DAC zasilany jest z linii +3,3 V, a komunikację z STM32 discovery realizuje przez interfejs SPI wykluczając przewód DOUT/MISO. Wyprowadzenie VREFIN/VREFOUT służy do ustalenia napięcia referencyjnego, a wszystkie masy części analogowej prowadzone są do GNDA (GND ale po prostej filtracji dla czystego sygnału wyjściowego). Kondensator **C17** (150 nF) umieszczono możliwie blisko zgodnie z zaleceniami producenta przy używaniu wewnętrznego napięcia referencyjnego (TUTAJ CYTAT NOTY KATALOGOWEJ GAMONIU).

Każdy z ośmiu kanałów **VOUTA–VOUTH** jest dalej kształtowany przez prosty filtr dolnoprzepustowy RC na wejściu wzmacniacza: rezystor szeregowy (**R8**, **R9**, **R11–R13**, **R6**, **R7**, **R10**, 3,3 kΩ) oraz kondensator do masy (**C18**, **C21–C25**, 1 μF). Wyznacza to częstotliwość odcięcia rzędu

$$f_c \approx \frac{1}{2\pi RC} \approx \frac{1}{2\pi \cdot 3,3 \text{ k}\Omega \cdot 1 \text{ }\mu\text{F}} \approx 48 \text{ Hz},$$

co skutecznie powinno tłumić szum i poszarpanie przebiegu pochodzące z aktualizacji DAC, a jednocześnie jest wystarczająco szybkie dla aplikacji HVAC.

Wzmacniacze **U5A–U5D** oraz **U6A–U6D** pracują w konfiguracji nieodwracającej i są zasilane bezpośrednio z linii +24 V, co zapewnia odpowiedni zapas napięciowy dla wyjść 0–10 V. Dla każdego kanału zastosowano identyczną sieć sprzężenia zwrotnego: rezystor do masy (**RG1/RG2/.../RG8**, 10 kΩ) oraz rezystor w pętli sprzężenia (**RF1/RF2/.../RF8**, 30 kΩ). Wzmocnienie napięciowe pojedynczego toru wynosi więc

$$A_v = 1 + \frac{R_F}{R_G} = 1 + \frac{30 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} = 4,$$

co przy referencji DAC rzędu 2,5 V pozwala uzyskać zakres 0–10 V na wyjściu wzmacniacza. Dodatkowe kondensatory (**C19**, **C20**, ..., **C23**, 1 μF) pełnią funkcję lokalnej filtracji i wraz z impedancją obciążenia wygładzają sygnał na wyjściu, ograniczając szybkie skoki prądu podczas przełączeń.

Wyjścia poszczególnych wzmacniaczy są wyprowadzone na uniwersalne złącza **J6–J13**. Każde złącze udostępnia linię sygnałową 0–10 V, odniesienie **SG** (*signal ground*) oraz pin **SHIELD** przeznaczony do ekranowania przewodów.

Cały tor wyjściowy ma zatem strukturę:

*STM32 → DAC → filtr RC → wzmacniacz nieodwracający **x4** → złącze sygnałowe z ekranem.*

5 Oprogramowanie (Zephyr RTOS)

5.1 Architektura

Wątki: akwizycja pomiarów, filtracja, GUI (LVGL), sterowanie wyjściem 0–10 V. IPC: kolejki, semaforey.

5.2 Sterowniki

Konfiguracja ADC/DAC/I2C/SPI w Zephyr (DeviceTree), obsługa dotyku i TFT, logowanie.

5.3 GUI

Ekran: podgląd kanałów, konfiguracja zakresów, kalibracja dwu-punktowa.

5.4 Testy

Testy jednostkowe (zassert), pomiary jitteru i latencji, profilowanie czasu CPU.

6 Walidacja

6.1 Metodyka

Źródła wzorcowe (kalibrator napięcia), obciążenie dla wyjścia 0–10 V, środowisko testowe.

6.2 Wyniki

Tabele dokładności, histogram odchyień, niepewność typu A/B, budżet niepewności.

6.3 Dyskusja

Ograniczenia, dryft temperaturowy, histereza, propozycje ulepszeń.
[1]

Bibliografia

- [1] *Application Guidelines for 0–10 V Control Interfaces in HVAC*. ASHRAE. 2019 (cyt. na s. 5).