

**Projekt stanowiska pomiarowego podstawowych wielkości
fizycznych wykorzystywanych w systemach HVAC**
w oparciu o zestaw STM32F746G-Discovery z wyświetlaczem TFT

Paweł Bałbatun

19 listopada 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

0.1	Wstęp	2
0.2	Stan wiedzy i rozwiązania pokrewne	2
0.3	Wymagania	2
0.3.1	Funkcjonalne	2
0.3.2	Niefunkcjonalne	2
0.4	Projekt części sprzętowej	3
0.4.1	Wymagania sprzętowe — przegląd	3
0.4.2	Moduł zasilania	3
0.4.3	Tor wyjściowy 0–10 V: przetwornik DAC + wzmacniacze operacyjne	3
0.4.4	Tor wejściowy 0–10 V: interfejs pomiarowy	4
0.5	Firmware	5
0.5.1	Wybór środowiska uruchomieniowego	5
0.6	Walidacja	7
0.6.1	Metodyka	7
0.6.2	Wyniki	7
0.6.3	Dyskusja	7

0.1. 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.

0.2. 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.

0.3. Wymagania

0.3.1. Funkcjonalne

- Pomiar napięć wejściowych w zakresie 0 V do 10 V z rozdzielcością $\leq 10 \text{ mV}$.
- Generacja sygnału wyjściowego 0 V do 10 V obciążalność $\geq 5 \text{ mA}$.
- GUI na TFT: wizualizacja trendów, konfiguracja kanałów.

0.3.2. Niefunkcjonalne

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

0.4. Projekt części sprzętowej

0.4.1. Wymagania sprzętowe — przegląd

Projektowana płytka stanowi jedną, spójną platformę do pomiaru i generacji sygnałów 0–10 V w aplikacjach HVAC[2], współpracującą z zestawem uruchomieniowym wyposażonym w m.in. MCU STM32F7 i panel TFT[7, 8]. 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 antialiasingowa) 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.

0.4.2. 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 × 2,1 mm), za którym znajduje się polimerowy bezpiecznik samoresetujący **F1** (PTTC 1,1 A/30 V) pełniący rolę zabezpieczenia nadprądowego. Dodatkowo tranzystor **Q1** (PMOS *IRLML9301*) realizuje ochronę przed odwrotną polaryzacją zasilania[4]; rezystory **R5/R4** służą do wysterowania tranzystora.

Równolegle do toru wejściowego umieszczono diodę TVS **D3** (SMBJ33A) tłumiącą przepięcia[6] 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 µH) oraz kondensatory **C15** (100 µF/63 V), **C26** (100 nF), **C27** (47 µF) i **C16** (1 µF) 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 rodziną *LM2596S*[5]. Układ **U1** (*LM2596S-5*) generuje linię +5 V; w jego torze znajdują się: dławik **L2** (33 µH), dioda Schottky'ego **D1** (SK56) oraz kondensatory wejściowe **C2** (100 µF/63 V) i **C1** (470 nF) oraz wyjściowe **C4/C3**. Analogicznie **U2** (*LM2596S-3,3*) dostarcza +3,3 V z użyciem dławika **L1** (68 µH), 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 → filtracja wstępna → konwersja +5 V/+3,3 V → dystrybucja i sygnalizacja*, co przekłada się na stabilną pracę układu w warunkach typowych dla instalacji HVAC.

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

Tor wyjściowy generujący sygnały 0–10 V oparto na ośmiokanałowym przetworniku cyfrowo-analogowym **U3** (*DAC7568IAPW*)[3] współpracującym z dwoma czterokanałowymi wzmacniaczami operacyjnymi **U5** i **U6** (*TLV9304xPW*)[9]. 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 GND (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[3].

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

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

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

Skalowanie sygnału do zakresów 0–10 V 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: rezistor do masy (**RG1/RG2/.../RG8**, 10 k Ω) oraz rezistor w pętli sprzężenia (**RF1/RF2/.../RF8**, 30 k Ω). Wzmocnienie napięciowe pojedynczego toru wynosi więc

$$A_v = 1 + \frac{R_F}{R_G} = 1 + \frac{30 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} = 4, \quad (2)$$

co przy referencji DAC rzędu 2,5 V pozwala uzyskać zakres 0–10 V na wyjściu wzmacniacza. Dodatkowe kondensatory (**C19, C20, ..., C23**, 1 μ F) 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.

0.4.4. Tor wejściowy 0–10 V: interfejs pomiarowy

Tor wejściowy odpowiada za obłuzenie czujników przemysłowych (pasywnych i aktywnych) i bezpieczne doprowadzenie sygnałów 0–10 V do przetwornicy A/C **ADS8688**[1]. Sygnał cyfrowy *SPI* następnie jest doprowadzany na *GPI/O* mikrokontrolera.

Wejście pseudo-różnicowe i powroty sygnałowe Linia SIG każdego złącza jest prowadzona bezpośrednio do odpowiedniego pinu wejścia przetwornika (AIN_xP), natomiast odpowiadający jej pin SG trafia do przypisanego ujemnego wejścia odniesienia kanału (AIN_xGND). Taka topologia kompensuje spadki i przesłuchy na przewodzie powrotnym oraz poprawia odporność na zakłócenia, co jest kluczowe przy dłuższych odcinkach okablowania. W torze nie stosuje się zewnętrznych dzielników ani filtrów antialiasingowych — skalowanie i zabezpieczenie wejść realizuje wewnętrzny front-end ADC (rezystorowa sieć wejściowa, przełączane zakresy).

Ekranowanie i separacja mas Piny SHIELD wszystkich wejść są połączone do wspólnego ekranu wylanego pod ścieżkami sygnału i dociążonego względem masy przez tłumik RC: rezistor **R2** = 1 MΩ równolegle z kondensatorem **C11** = 10 nF (GNDA → GND). Zapewnia to upływ ładunków statycznych i tłumienie składowych o wysokiej częstotliwości, a jednocześnie ogranicza prądy pętli masy i chroni ekran przed "brudną"masą cyfrową.

Zasilanie i interfejs cyfrowy ADC Część analogowa układu zasilana jest z +5 V (filtracja **C9** 1 μF blisko pinów zasilania), a część cyfrowa z +3,3 V (filtracja **C10** 10 μF). Linia RST/PD jest podciągana przez rezistor ~10 kΩ do +3,3 V i może być sterowana z MCU. Komunikacja odbywa się po SPI: SDO, SDI, SCLK, CS.

Odniesienie napięciowe Wykorzystano wewnętrzną referencję przetwornika: wprowadzenia REFCAP/REFIO/REFGND są odsprzęgnięte kondensatorami klasy X7R (**C11X7R** 1 μF pomiędzy REFCAP i REFGND oraz **C12, C13** po 1 μF przy REFIO), zgodnie z zaleceniami producenta dla uzyskania niskoszumowego, stabilnego odniesienia[1].

Zasilanie czujników w polu Na pin +V każdego złącza doprowadzono +24 V z magistrali instalacyjnej — umożliwia to zasilanie zewnętrznych przetworników/wyjścia 0–10 V bez dodatkowych przewodów. Linie +24 V nie są wprowadzane do ADC; pełnią wyłącznie funkcję zasilającą urządzenia polowe.

Podsumowanie ścieżki sygnału Złącze (*SIG, SG, SHIELD, +24 V*) → *wejście pseudo-różnicowe AIN_xP/AIN_xGND* → *wewnętrzny front-end i multiplekser ADC* → *konwersja SAR z referencją wewnętrzną* → *interfejs SPI*. Rozwiązywanie minimalizuje liczbę elementów analogowych na płytce, a jednocześnie zwiększa odporność EMC dzięki osobnym powrotom SG dla każdego kanału oraz kontrolowanemu połączeniu ekranów z masą przez $R \parallel C$.

0.5. Firmware

Opis i rozważania metod budowy oprogramowania i samego firmware-u mikrokontrolera odpowiedzialnego za kompletną logikę rozwiązania projektu.

0.5.1. Wybór środowiska uruchomieniowego

Projekt wymaga równoległego i deterministycznego wykonywania kilku zadań: odświeżania interfejsu HMI na TFT, akwizycji i filtracji pomiarów, generacji sygnałów 0–10 V (SPI do DAC) oraz obsługi komunikacji i diagnostyki. Z tych powodów wybrano **Zephyr RTOS** z wbudowaną integracją **LVGL** jako główne środowisko uruchomieniowe.

Dlaczego Zephyr + LVGL?

- **Deterministyczny kernel i prosty model współprzebieżności** Wątki o priorytetach, workqueue, przerwania i timery wysokiej rozdzielczości umożliwiają wydzielenie zadań: wątku interfejsu, wątku przetwarzania oraz wątku komunikacji ze sprzętem. Tryb *tickless* ogranicza narzut czasowy, a jednocześnie pozwala utrzymać stałe okresy odświeżania UI.
- **Spójny ekosystem sterowników i konfiguracji** Standardowe API (SPI, I²C, ADC, DAC / PWM, GPIO, DMA) oraz konfiguracja sprzętu przez DeviceTree i Kconfig redukują ilość kodu klejącego do minimum. Dla mikrokontrolerów STM32 dostępne są gotowe warstwy abstrakcji oraz integracja

z biblioteką HAL, co znacząco przyspiesza uruchomienie peryferiów (np. SPI dla zewnętrznych przetwornic).

- **Prosta integracja z LVGL** Zephyr dostarcza oficjalny subsystem LVGL (obsługa zegara tick, wątku renderującego, pamięci i sterowników wyświetlaczy/wejścia). Konfiguracja odbywa się parami Kconfig+DeviceTree (bufory, flush callback, wejście dotykowe), dzięki czemu UI działa stabilnie bez ręcznego sklejania sterowników.
- **Narzędzia deweloperskie** Jednolity system budowania (CMake+west), logger, konsola shell, persistent settings (NVS), systemy plików (FAT/LittleFS), testy (twister) oraz bogate przykłady ułatwiają utrzymanie i automatyzację.
- **Skalowalność i przyszła rozbudowa.** W razie potrzeby dostępne są stosey sieciowe (Ethernet, BLE, IP) i bootloader MCUBoot.
- **Licencja i wsparcie.** Zephyr (Apache-2.0) i LVGL (MIT) mają dojrzałe, permisywne licencje oraz aktywne społeczności, co sprzyja długoterminowemu utrzymaniu.

Porównanie z podejściem bare–metal

- **Koszt wytwarzania i ryzyko** W bare–metal należałoby samodzielnie zaimplementować harmonogram zadań, synchronizację, wieloźródłowe timery, kolejki zdarzeń oraz integrację z DMA i przewaniem. To zwiększa złożoność, czas prac i ryzyko błędów w sytuacjach granicznych (priorytety przerwań, zakleszczenia, jitter czasów odświeżania).
- **Utrzymywalność** Każda zmiana sprzętu lub peryferiów wymaga przeróbek w wielu miejscach. Brak standaryzowanego DeviceTree/Kconfig utrudnia przenoszenie konfiguracji i automatyzację budowania.

Porównanie z FreeRTOS i innymi RTOS.

- **Zakres projektu** FreeRTOS dostarcza głównie kernel; większość elementów ekosystemu (sterowniki, pliki, logowanie, sieć, integracja z LVGL) trzeba dobierać i łączyć samodzielnie. W Zephyrze te klocki są spójne i utrzymywane w jednym repozytorium z jednolitym API.
- **Konfiguracja i portowalność** Zephyrowe DeviceTree i Kconfig zapewniają powtarzaną konfigurację sprzętu i budowy na różnych płytach. W FreeRTOS typowo używa się mieszanki plików board support i skryptów producenta, co zwiększa różnice między platformami.
- **Integracja LVGL** Zarówno FreeRTOS, jak i Zephyr mogą uruchomić LVGL, ale w FreeRTOS wymaga to ręcznego spięcia *tick*, zadań, sterowników wyświetlacza i wejść. W Zephyrze LVGL jest pierwszoplanowym komponentem z gotowymi opcjami Kconfig i przykładowymi driverami. Co znacząco ułatwia opanowanie narzędzia i implementacje rozwiązania.
- **Utrzymanie i testy** Zephyr oferuje ustandaryzowane narzędzia CI/testów (twister), west do zarządzania modułami i bogaty katalog przykładów, w tym z integracją LVGL.

Konkluzja. Z perspektywy wymagań projektu (stabilne odświeżanie UI, deterministyczna akwizycja i generacja sygnałów, szybkie uruchomienie peryferiów, łatwa rozbudowa) wybór **Zephyr RTOS + LVGL** minimalizuje ilość kodu specyficznego dla sprzętu, skraca czas integracji i zmniejsza ryzyko błędów czasowych. W porównaniu z bare-metal oraz z kernelami pokroju FreeRTOS, Zephyr dostarcza pełniejszy, spójny ekosystem, który lepiej wspiera zarówno bieżące wymagania, jak i przyszłe rozszerzenia projektu.

0.6. Walidacja

0.6.1. Metodyka

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

0.6.2. Wyniki

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

0.6.3. Dyskusja

Ograniczenia, dryft temperaturowy, histereza, propozycje ulepszeń.

[2]

BIBLIOGRAFIA

- [1] *ADS8688 12-Bit, 500-kSPS, 8-Channel Data Acquisition System*. Zewnętrzny ADC U7. Texas Instruments. 2021. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads8688.pdf> (cyt. na s. 4, 5).
- [2] *Application Guidelines for 0–10 V Control Interfaces in HVAC*. ASHRAE. 2019 (cyt. na s. 3, 7).
- [3] *DAC7568 12-Bit, Octal, Buffered Voltage Output DAC*. Zewnętrzny DAC U3. Texas Instruments. 2017. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac7568.pdf> (cyt. na s. 3, 4).
- [4] *IRLML9301 Logic Level N-Channel MOSFET*. Element Q1 sterujący wyjściami. Infineon Technologies. 2016. URL: <https://www.infineon.com/dgdl/irlml9301.pdf?fileId=5546d462533600a401535668d5c2263c> (cyt. na s. 3).
- [5] *LM2596 SIMPLE SWITCHER 3-A Step-Down Voltage Regulator*. Regulatory zasilania U1 (5 V) i U2 (3.3 V). Texas Instruments. 2020. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf> (cyt. na s. 3).
- [6] *SMBJ Series Transient Voltage Suppressor Diodes*. Ochrona przepięciowa D3 (33 V). Littelfuse. 2018. URL: https://www.littelfuse.com/~/media/electronics/datasheets/tvs_diode_smbj_series/littelfuse_tvs_diode_smbj_datasheet.pdf (cyt. na s. 3).
- [7] *STM32F746xG Datasheet*. MCU zastosowany na płytce STM32F746G-Discovery. STMicroelectronics. 2023. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f746ng.html> (cyt. na s. 3).
- [8] STMicroelectronics. *32F746GDISCOVERY — Discovery kit with STM32F746NG MCU*. 2025. URL: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/32f746gdiscovery.html> (term. wiz. 10.10.2025) (cyt. na s. 3).
- [9] *TLVx9304 Low-Noise, Rail-to-Rail Output Operational Amplifiers*. Bufor analogowy U5, U6. Texas Instruments. 2023. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv9304.pdf> (cyt. na s. 3).