

**Bakalářská práce**



**České  
vysoké  
učení technické  
v Praze**

**F3**

**Fakulta elektrotechnická  
Katedra kybernetiky**

## **Multifunkční diagnostická logická sonda**

**Milan Jiříček**

**Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Fischer, CSc.**

**Studijní program: Otevřená informatika**

**Specializace: Základy umělé inteligence a počítačových věd  
2025**

assignment page 1

assignment page 2

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci vypracoval(a) samostatně a uvedl(a) všekere použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací a Rámcovými pravidly používání umělé inteligence na ČVUT pro studijní a pedagogické účely v Bc a NM studiu.

Prohlašuji, že jsem v průběhu příprav a psaní závěrečné práce použil nástroje umělé inteligence. Vygenerovaný obsah jsem ověřil. Stvrzuji, že jsem si vědom, že za obsah závěrečné práce plně zodpovídám.

v Praze, 13. 05. 2025

## Abstrakt

Tato práce představuje návrh a realizaci multifunkční diagnostické logické sondy pro výuku práce s logickými obvody a vestavnými systémy. Zařízení nahrazuje komerční laboratorní přístroje, které jsou složité a finančně náročné, a umožňuje studentům měřit základní veličiny (napětí, odpor, frekvenci), generovat pulzy a diagnostikovat komunikační rozhraní (UART, I2C, SPI, Neopixel). Sonda je realizována ve dvou variantách: verze na bázi STM32 a zjednodušená pro Raspberry Pi Pico. Lokální režim s RGB LED a tlačítkem slouží pro rychlou diagnostiku, zatímco terminálový režim s ANSI TUI poskytuje pokročilé funkce včetně ovládání a zobrazování hodnot skrze UART periferii. Návrh využívá STM HAL a Raspberry Pi Pico C SDK pro přenositelnost kódu a minimalizuje externí komponenty, aby studenti mohli sondu snadno sestavit na nepájivém kontaktním poli. Hlavním přínosem je urychlení identifikace chyb při praktických cvičeních, jako jsou odhalení vadné součástky nebo nesprávné zapojení periférií.

**Klíčová slova:** STM32, STM32G0, Raspberry Pi Pico, logická sonda, UART, I2C, SPI, vzdělávací nástroje, diagnostika chyb, C/C++, ANSI escape sekvence

## Abstract

This work presents the design and implementation of a multifunctional diagnostic logic probe for teaching logic circuit and embedded system applications. The device replaces complex and costly commercial laboratory instruments, enabling students to measure basic parameters (voltage, resistance, frequency), generate pulses, and diagnose communication interfaces (UART, I2C, SPI, Neopixel). The probe is implemented in two variants: an STM32-based version and a simplified version for Raspberry Pi Pico. A local mode with an RGB LED and button provides quick diagnostics, while a terminal mode with an ANSI-based text user interface (TUI) offers advanced functions, including control and data visualization via UART. The design leverages the STM32 HAL and Raspberry Pi C SDK for code portability and minimizes external components, allowing students to assemble the probe easily on a breadboard. The primary contribution lies in accelerating error identification during practical exercises, such as detecting faulty components or incorrect peripheral wiring.

**Keywords:** logic probe, STM32, STM32G0, Raspberry Pi Pico, error diagnostics, UART, I2C, SPI, embedded systems, educational tools, ANSI escape sequences

**Title translation:** Multifunctional Diagnostic Logic Probe

## Poděkování

*Rád bych tímto poděkoval panu doc. Ing. Janu Fischerovi, CSc., mému vedoucímu práce, za jeho cenné rady, odbornou pomoc a ochotu sdílet své znalosti. Děkuji mu také za věnovaný čas, podnětné připomínky a trpělivost, které mi poskytoval během celého procesu tvorby této práce.*

*Dále bych chtěl vyjádřit největší poděkování své rodině a mé přítelkyni za jejich neochvějnou podporu, povzbuzení v náročných momentech a pochopení, jež mi dávali najevo po celou dobu mého studia. Bez jejich lásky a motivace by tato práce nevznikla.*

*Nemohu opomenout ani své přátele, kteří mi po celou dobu studia pomáhali udržet optimismus, sdíleli se mnou radosti i starosti, a svou přítomností mi vytvářeli potřebný odstup od pracovního vypětí. Jejich přátelství a ochota být mi oporou v osobním životě významně přispěly k tomu, abych mohl tuto práci úspěšně dokončit.*

## 6 TODOs remaining

# Obsah

<b>1 Úvod .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Rozbor problematiky .....</b>	<b>2</b>
2.1 Motivace .....	2
2.2 Požadavky .....	3
2.3 Volba mikrokontrolerů pro realizaci sondy .....	3
2.3.1 MCU STM32G031 .....	3
2.3.2 Knihovna STM HAL .....	6
2.3.3 Raspberry Pi Pico .....	7
2.4 Měření veličin testovaného obvodu .....	8
2.4.1 Měření napětí a logických úrovní .....	8
2.4.2 Měření odporu .....	9
2.4.3 Měření frekvence .....	10
2.5 Analýza komunikačních rozhraní .....	11
2.5.1 UART .....	11
2.5.2 I2C Bus .....	12
2.5.3 SPI .....	13
2.5.4 Neopixel .....	14
<b>3 HW návrh logické sondy STM32 .....</b>	<b>17</b>
3.1 Sdílené vlastnosti mezi návrhy pouzder .....	17
3.2 SOP8 .....	18
3.3 TSSOP20 .....	19
<b>4 Návrh terminál režimu STM32 .....</b>	<b>21</b>
4.1 Princip oblužní smyčky .....	21
4.2 Grafické řešení TUI .....	22
4.2.1 Ansi sekvence .....	22
4.2.2 Nastavení periferie pro zobrazování TUI .....	23
4.2.3 Vykreslování stránek .....	24
4.2.4 Ovládání .....	25
4.2.5 Struktura TUI .....	27
4.3 Princip nastavení periferií .....	27
4.4 Implementace měření s ADC .....	27
4.4.1 Měření napětí a logických úrovní .....	27
4.4.2 Měření odporu .....	29
4.5 Implementace měření frekvence a odchyťávání pulzů .....	30
4.5.1 Měření frekvence hradlováním .....	30
4.5.2 Měření reciproční frekvence .....	31
4.5.3 Odchyťávání pulzů .....	33
4.6 Implementace generování pulzů .....	33
4.7 Implementace nastavování úrovní .....	34
4.8 Implementace diagnostiky posuvného registru .....	35
4.9 Implementace diagnostiky Neopixelu .....	35
4.10 Implementace diagnostiky UART .....	35



4.11 Implementace diagnostiky I2C .....	35
4.12 Implementace diagnostiky SPI .....	35
<b>5 Návrh lokálního režimu STM32 .....</b>	<b>36</b>
5.1 Logika nastavení režimů .....	36
5.2 Ovládání lokálního režimu .....	37
5.3 Funkce lokálního režimu .....	37
5.3.1 Funkce logické sondy .....	38
5.3.2 Funkce logických úrovní .....	38
5.3.3 Funkce pulzování .....	39
5.3.4 Funkce detekce pulzů .....	39
<b>6 Návrh omezené verze na RPI Pico .....</b>	<b>41</b>
<b>7 Závěr a zhodnocení .....</b>	<b>42</b>
<b>A Citace .....</b>	<b>43</b>
<b>B Dodatečné úryvky kódu .....</b>	<b>45</b>
<b>C Uživatelská příručka .....</b>	<b>54</b>

## Seznam obrázků

Obrázek 1	Blokový diagram AD převodníku [1]	4
Obrázek 2	Blokové schéma STM32G031 časovače [2]	5
Obrázek 3	STM32CubeMX HAL architektura [3]	7
Obrázek 4	Raspberry Pi Pico vývojová deska	7
Obrázek 5	Diagram způsobu sbírání vzorků z ADC	9
Obrázek 6	Schéma děliče napětí	10
Obrázek 7	Signál při měření metodou hradlování	10
Obrázek 8	Signál při měření reciproční frekvence	11
Obrázek 9	Způsob zpracování signálu UART bez parity	12
Obrázek 10	Zahájení a ukončení komunikace v I2C [4]	12
Obrázek 11	Logická jednička a logická nula v I2C [4]	12
Obrázek 12	Rámce I2C [4]	13
Obrázek 13	Diagram SPI komunikace s jedním slave zařízením	14
Obrázek 14	Diagram SPI komunikace s více slave zařízeními	14
Obrázek 15	Časový diagram SPI zobrazující úroveň a posun hodinového signálu [5]	14
Obrázek 16	Způsob zapojení RGB LED do série [6]	15
Obrázek 17	Diagram posílání dat pro zapojené WS2812D v sérii [6]	15
Obrázek 18	Zapojení regulátoru pro napájení STM32G030 [7]	17
Obrázek 19	STM32G030Jx SO8N Pinout [8]	18
Obrázek 20	Paměťový prostor Flash option bits [2]	18
Obrázek 21	Schéma zapojení STM32G030 v pouzdře SOP8	19
Obrázek 22	STM32G030Jx TSSOP20 Pinout [8]	20
Obrázek 23	Schéma zapojení STM32G030 v pouzdře TSSOP20	20
Obrázek 24	Diagram smyčky terminálového módu	21
Obrázek 25	Ukázka vykreslování statické a dynamické části stránky	25
Obrázek 26	TUI hlavní menu základních funkcí	27
Obrázek 27	TUI hlavní menu pokročilých funkcí	27
Obrázek 28	TUI měření napětí	29
Obrázek 29	TUI měření odporu	30
Obrázek 30	TUI měření frekvence	30
Obrázek 31	Signály při měření frekvence hradlováním	31
Obrázek 32	TUI odchyťování pulzů	33
Obrázek 33	TUI nastavování úrovní	34
Obrázek 34	Signály při měření frekvence hradlováním	35
Obrázek 35	Diagram nazpůsobu načítání režimů	36
Obrázek 36	Diagram způsobu reakce na vstupy uživatele v lokálním módu	37

## Seznam tabulek

Tabulka 1	Pořadí bitů pro nastavení barvy v WS2812 [6]	15
Tabulka 2	Časování logických úrovní pro zaslání bitů WS2812D [6]	16
Tabulka 3	Tabulka akcí ANSI sekvencí	23

## Seznam úryvků kódu

Úryvek kódu 1	Inicializace UART periferie .....	24
Úryvek kódu 2	Způsob odeslání stringu UART periferií .....	24
Úryvek kódu 3	Nastavení pozice kurzoru pomocí ANSI escape sekvencí .....	24
Úryvek kódu 4	Způsob odeslání stringu UART periferií .....	27
Úryvek kódu 5	Naměření vzorku z ADC (ukázka bez ošetření) .....	28
Úryvek kódu 6	Funkce pro výpočet veličin na základě recipročního měření .....	32
Úryvek kódu 7	Přerušení zavolané při zmáčknutí tlačítka .....	37
Úryvek kódu 8	Přerušení zavolané při uvolnění tlačítka .....	37
Úryvek kódu 9	Lokální režim pulzování ukázka obslužné smyčky .....	39
Úryvek kódu 10	Zachytávání pulzů v lokálním režimu .....	40
Úryvek kódu 11	Struktura globálních proměnných .....	45
Úryvek kódu 12	Funkce pro vykreslení barevného textu .....	46
Úryvek kódu 13	Ovládání sondy skrze symboly .....	47
Úryvek kódu 14	Ovládání menu .....	48
Úryvek kódu 15	Inicializace TIM3 jako časovač .....	49
Úryvek kódu 16	Využití HAL maker pro převod poměrových hodnot na napětí .....	50
Úryvek kódu 17	Způsob výpočtu odporu .....	50
Úryvek kódu 18	Inicializace TIM2 jako čítač hran .....	51
Úryvek kódu 19	Způsob zápisu jednoho bitu do posuvného registru .....	52
Úryvek kódu 20	Způsob detekce boučingu .....	52
Úryvek kódu 21	Inicializace pinů lokálního režimu pro stav logických úrovní .....	53

## Seznam zkratek

SOP	Small Outline Package
TSSOP	Thin Shrink Small Outline Package
PLL	Phase Locked Loop
POF	Point Of Failure
FPGA	Field-Programmable Gate Array
SRAM	Static Random Access Memory
ADC	Analog Digital Converter
MSPS	Milion Samples Per Second
DMA	Direct Access Memory
PWM	Pulse Width Modulation
HAL	Hardware Abstraction Library
GPIO	General Purpose Input/Output
I2C	Inter-Integrated Circuit
SPI	Serial Peripheral Interface
UART	Universal Asynchronous Reciever Transmitter
CMSIS	Cortex Microcontroller Software Interface Standard
NVIC	Nested Vectored Interrupt Controller
IOT	Internet Of Things
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
MSB	Most Significant Bit
LSB	Least Significant Bit
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
TUI	Terminal User Interface
GUI	Graphical User Interface
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
MCU	Microcontroller Unit
SWD	Serial Wire Debug
FOSS	Free Open Source Software
SSH	Secure Shell

## Kapitola 1

# Úvod

Výuka základů elektroniky vyžaduje nástroje, které studentům umožní experimentovat s realnými logickými obvody a prakticky ověřovat teoretické znalosti. Tradiční diagnostické přístroje, jako osciloskopy nebo logické analyzátory, jsou však pro začínající studenty složité, finančně náročné a nabízejí funkce nad rámec základních výukových potřeb. Během praktických cvičení se studenti často dostávají do situací, kdy například čítač pulzů s výstupem na 7-segmentový displej přestane fungovat, aniž je zřejmá příčina. Mohou váhat, zda chyba spočívá v softwaru (nesprávně naprogramovaném časovači), hardwaru (spálené LED, vadném senzoru) nebo třeba v prohození vodičů UART (Tx/Rx). Bez vhodného nástroje pak tráví hodiny hledáním závady, což demotivuje a zpomaluje výuku. Tento problém vede k potřebě vytvořit jednoduché, multifunkční a dostupné řešení, které by usnadnilo osvojení principů práce s logickými a komunikačními obvody.

Cílem této bakalářské práce je návrh a realizace multifunkční diagnostické logické sondy, která kombinuje funkce logického analyzátoru, generátoru signálů a testeru komunikačních rozhraní typické pro výuku (UART, I2C, SPI, Neopixel). Hlavní inovací řešení je integrace vzdělávacího aspektu do samotného návrhu zařízení - sonda je navržena ve dvou variantách: plnohodnotná verze založená na mikrokontroleru STM32 a omezená verze využívající Raspberry Pi Pico pro naplnění potřeby středních škol, které nejsou specializované na výuku elektroniky. Hlavní výhodou řešení je minimalizace externích komponent, které umožňují sestavení zařízení na nepájivém kontaktním poli studentem a integrace s PC terminálovou aplikací pro pokročilé funkce bez nutnosti instalace speciálních aplikací a ovladačů.

Klíčovými prvky návrhu jsou jednoduché ovládání (lokální režim s RGB LED a tlačítkem, terminálový režim ovládaný skrze terminálovou aplikaci), měření napětí, odporu, frekvence a střidy PWM signálů, generování pulsů a diagnostika komunikačních periférií. Důraz je kladen na open-source přístup, který umožní další rozšiřování a přizpůsobení vzdělávacím potřebám.

Text práce je strukturován do osmi kapitol. Po úvodu a rozboru problematiky následuje popis hardwarového návrhu sondy, implementace terminálového a lokálního režimu na základu STM32 a realizace omezené verze na Raspberry Pi Pico. Závěr shrnuje dosažené výsledky práce. Součástí práce jsou také přílohy s ukázkami kódu a uživatelská příručka.

## Kapitola 2

# Rozbor problematiky

### 2.1 Motivace

Během laboratorních cvičení zaměřených na logické obvody a vestavné systémy studenti navrhují digitální obvody a programují mikrokontroléry (MCU). Při vývoji však mohou narazit na situaci, kdy jejich řešení úlohy náhle přestane fungovat podle očekávání, aniž by byla zjevná příčina problému. Najít závadu může být velice časově náročné jak pro studenta, tak pro vyučujícího.

Při návrhu softwaru pro mikrokontroléry je klíčové průběžně ověřovat funkčnost pomocí pulsů. Studenti tak mohou například zjistit, zda je generován výstupní pulz požadované frekvence, zda obvod správně reaguje na vstupní impuls, nebo zda je signál přenášen přes daný vodič. Praktickým příkladem je vývoj čítače pulsů s výstupem na 7-segmentový displej – zde sonda umožňuje okamžitě validovat, zda software správně zpracovává vstupy a aktualizuje výstup. Studenti při sestavování obvodů také často čelí problémům jako nefunkční komponenty (spálené LED, vadné senzory) nebo chybám v zapojení – například prohození Tx/Rx vodičů UART, chybějící pull-up rezistory na I2C sběrnici, nebo nesoulad s referenčním schématem. Takové chyby vedou k časově náročnému hledání závad.

Standardní logická sonda je elektronické zařízení sloužící k diagnostice logických obvodů. Pomáhá určovat logické úrovně a detekovat pulsy. Je to jeden ze standardních nástrojů pro elektrotechniky pracující s FPGA, mikrokontrolery či logickými obvody. Výhoda logické sondy je cena pořízení a flexibilita použití. Logická sonda je jedním z prvních nástrojů, který dokáže najít základní problém v digitálním obvodu. Další běžné nástroje pro diagnostiku logických obvodů jsou osciloskop a logický analyzátor. Tyto nástroje jsou vhodné pro diagnostiku např. I2C sběrnice nebo SPI rozhraní, kdy uživatel může vidět konkrétní průběh signálu. Pro výukové účely však mají zásadní nevýhody: Pořizování analyzátorů a osciloskopů může být velice nákladné, jejich ovládání vyžaduje pokročilé znalosti, a student musí nejprve pochopit, jak s přístrojem zacházet. Navíc nabízejí spoustu funkcí, které jsou pro účely výuky nadbytečné a mohou začátečníky dezorientovat.

Multifunkční diagnostická logická sonda (dále jen sonda), která je navržena v rámci této bakalářské práce má za cíl, minimalizovat zmíněné problémy konvenčních diagnostických nástrojů a obecně zpřístupnit diagnostiku studentům, kteří jsou stále ve fázi učení. Sonda, která je vyvinuta, přináší levné řešení, které obsahuje potřebné funkce pro základní diagnostiku logických obvodů a snaží se studentovi zjednodušit celý proces hledání problému v řešení úlohy i bez hlubokých předchozích znalostí s používáním pokročilých diagnostických nástrojů.

Student si může tak osvojit metodiku debugování od základních kontrol napájení, přes odchytávání pulsů po analýzu komunikačních periférií. Možnost sestavení sondy na nepájivém kontaktním poli poskytuje flexibilitu vyučujícím vytvořit rychle multifunkční logickou sondu. Jelikož návrh bere zřetel na možnost realizace studentem, je při sestavování

vování použito minimální počet externích součástek. Tímto je možno dosáhnout úspory času na straně vyučujícího, kdy vyučující odkáže na použití sondy při hledání problému. Použití MCU typu STM32 a RP2040 umožňuje transparentnost, a možnost hlubšího pochopení fungování sondy z důvodu velkého množství manuálů a návodů na internetu.

## ■ 2.2 Požadavky

V rámci bakalářské práce bude navržena a realizována multifunkční diagnostická logická sonda (dále jen sonda) na platformě STM32. V návrhu sondy je potřeba zohlednit následující klíčové oblasti: jednoduchost ovládání i uživateli, kteří nemají zkušenosti s používáním pokročilých diagnostických nástrojů, rychlá realizovatelnost sondy na nepájivém kontaktním poli a praktičnost ve výuce. Aby nástroj nebylo komplikované sestavit, je nutné aby bylo využito co nejméně externích součástek. Tím je redukován čas sestavení a také je sníženo množství POF.

Firmware a hardware sondy jsou primárně navrženy pro mikrokontrolér STM32G030 v pouzdrech SOP8 a TSSOP20, které díky integrovaným perifériím (UART, GPIO, časovače) umožňují jednoduché sestavení i na nepájivém kontaktním poli. Sonda bude s omezenou verzí realizována i na Raspberry Pi Pico. Sonda bude vybavena tzv. „lokálním režimem“ a „terminálovým režimem“.

Lokální režim bude sloužit pro rychlou základní diagnostiku obvodů s indikací pomocí RGB LED a ovládání skrze jedno tlačítko. Bude fungovat bez nutnosti připojení zařízení k PC skrze UART-USB převodník. Tlačítkem bude uživatel přepínat módy, kanály a úrovně. Lokální režim bude mít následující vlastnosti: nastavení úrovně kanálů, odchytávání pulsů, prověření logické úrovně a generace pravidelných pulsů.

Terminálový režim bude poskytovat konkrétní měření veličin logického obvodu a diagnostiku sběrnic. Sonda bude v tomto režimu ovládána odesíláním symbolů za pomoci periférie UART skrze převodník UART-USB. Sonda takto poskytne uživatelské rozhraní, které se vygeneruje na straně mikrokontroleru a zobrazí skrze terminálovou aplikaci podporující tzn. ANSI sekvence<sup>1</sup>. Oproti ovládání prostřednictvím specializované aplikace vyvinuté namíru sondě, tento přístup zajišťuje přenositelnost napříč operačními systémy a nenutí uživatele instalovat další software, což je výhodné zejména na sdílených zařízeních, jako jsou fakultní počítače.

Sonda v tomto režimu bude nabízet funkce základní a pokročilé. Mezi základní funkce patří: detekce logických úrovní, detekce impulsů, určení jejich frekvence, nastavení logických úrovní, generace impulsů, měření napětí a měření odporu. Mezi pokročilé náleží diagnostika sběrnic UART, I2C, SPI a Neopixel. Sběrnice sonda bude pasivně poslouchat nebo aktivně vysílat. Získaná data budou zobrazována skrze terminálovou aplikaci.

## ■ 2.3 Volba mikrokontrolerů pro realizaci sondy

### ■ 2.3.1 MCU STM32G031

Pro návrh v této bakalářské práci byl zvolen mikrořadič STM32G031 od firmy STMicroelectronics [9]. Tento mikrořadič je vhodný pro aplikace s nízkou spotřebou. Je postavený na 32bitovém jádře ARM Cortex-M0+, které je energeticky efektivní a nabízí dostatečný výkon pro běžné vestavné aplikace. Obsahuje 64 KiB flash paměť a 8 KiB SRAM [2]. MCU

---

<sup>1</sup>Např. PuTTY, GTKTerm...





ční napětí může být proměnlivé, hlavně pokud systém využívá VDDA<sup>6</sup> jako referenci, která může být 2 V až 3.6 V a také může kolísat vlivem napájení nebo zatížení. Pro výpočet  $V_{REF+}$  se používá interní referenční napětí  $V_{REFINT}$  kalibrační data uložená během výroby mikrořadiče a naměřené hodnoty z ADC [2].

Vztah pro výpočet je následující:

$$V_{REF+} = \frac{V_{REFINT\_CAL} \times 3300}{V_{REFINT\_ADC\_DATA}} \quad (2)$$

kde:

- $V_{REFINT\_CAL}$  je kalibrační hodnota interního referenčního napětí, která je uložená ve flash paměti mikrořadiče během výroby. Tato hodnota představuje digitální hodnotu, kdy  $V_{REF+}$  je přesně 3.3 V. Hodnota se získává čtením z pevné adresy<sup>7</sup> [2], [11].
- 3300 je konstanta odpovídající referenčnímu napětí při kalibraci ve výrobě vyjádřená v milivoltech.
- $V_{REFINT\_ADC\_DATA}$  je aktuální naměřená hodnota na AD převodníku. Tato hodnota závisí na aktuálním napětí na napájení.

Po zjištění referenčního napětí dle Rovnice 2, lze získat na základě referenčního napětí, velikosti převodníku a hodnoty naměřené převodníkem, dle Rovnice 3. Rozlišení v případě tohoto zařízení bude 12 bitů. Počet bitů je podstatný pro určení, jaká hodnota je maximální, neboli referenční napětí.

$$V_{CH} = \frac{V_{CH\_ADC\_DATA}}{2^{\text{rozlišení}} - 1} \times V_{REF+} \quad (3)$$

kde:

- $V_{CH}$  je napětí naměřené na daném kanálu.
- $V_{CH\_ADC\_DATA}$  je digitální hodnota získaná z AD převodníku.
- rozlišení je počet bitů AD převodníku.
- $V_{REF+}$  je referenční hodnota napětí.

## ■ Časovače

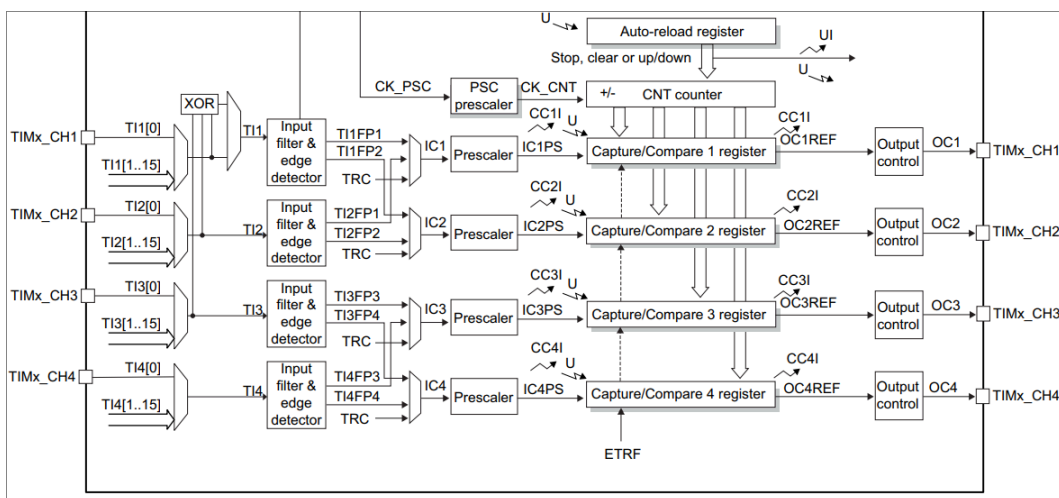
STM32G031 obsahuje několik časovačů (timeru), které se dají využít pro logickou sondu. Mikrořadič má zabudovaných několik základních a jeden pokročilý časovač. Základní časovače jsou 16 bitové a jsou vhodné pro měření doby či generování jednoduchých PWM signálů. Pokročilý časovač je na tomto mikrokontroleru 32bitový a poskytuje více kanálů. Tyto časovače také podporují nejen generování signálů na výstup, ale také zachytávání signálů a měření délky pulzů externího signálu. Pokročilý časovač nabízí řadu nastavení např. nastavování mezi normálním a inverzním výstupem PWM, generovat přerušování při dosažení specifické hodnoty časovače apod. [12].

Před spuštěním časovače je potřeba nastavit, jak často má časovač čítat. Frekvenci časovače nastavuje tzn. prescaler, neboli „předdělička“. Prescaler dělí s konstantou, která je zvolena, frekvenci hodin dané periferie. Pro případ STM32G0 je to 64 MHz. Frekvence časovače určuje, jak často časovač inkrementuje svou hodnotu za jednu sekundu [2].

$$F_{TIMx} = \frac{F_{clk}}{\text{Prescaler} + 1} \quad (4)$$

<sup>6</sup>VDDA je označení pro analogové napájecí napětí v mikrokontrolérech STM32.

<sup>7</sup>Např. u STM32G0 je adresa kalibrační hodnoty: 0x1FFF75AA



Obrázek 2: Blokové schéma STM32G031 časovače [2]

Velikost čítače časovače, zda je 16bitový nebo 32bitový<sup>8</sup>, souvisí s jeho tzv. periodou. Perioda určuje hodnotu, při jejímž dosažení se čítač automaticky resetuje na 0. Tuto hodnotu lze nastavit podle potřeby vývojáře. V kombinaci s prescalerem lze nastavit konkrétní časový interval, který je požadován. Časový interval lze vypočítat pomocí rovnice 5.

$$T = \frac{(\text{Prescaler} + 1) \times (\text{Perioda} + 1)}{F_{\text{clk}}} \quad (5)$$

### 2.3.2 Knihovna STM HAL

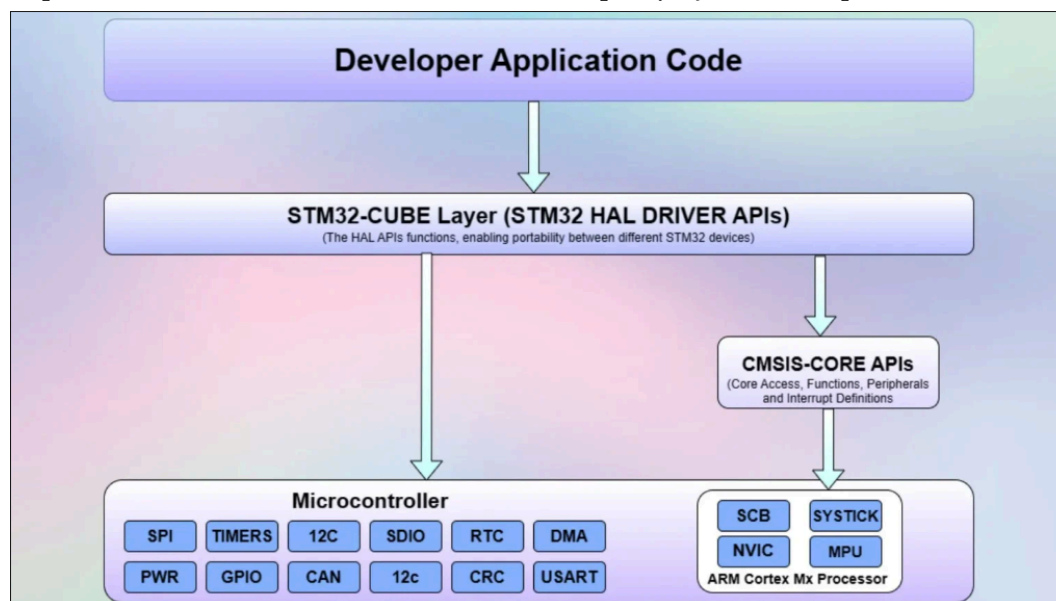
Hardware Abstraction Layer (HAL) od společnosti STMicroelectronics je knihovna určená pro mikrořadiče řady STM32, která slouží jako abstrakční vrstva mezi aplikací a hardwarem zařízení. Jejím hlavním cílem je zjednodušit vývojářům práci s periferiemi, jako jsou GPIO piny, komunikační rozhraní USART, SPI nebo I2C, a to bez nutnosti přímého zápisu do hardwarových registrů procesoru. HAL je součástí širšího ekosystému STM32Cube, který zahrnuje také nástroje pro konfiguraci mikrokontrolérů (např. STM32CubeMX) a generování kódu [13].

Mezi klíčové vlastnosti HAL je přenositelnost kódu. Protože různé modely MCU STM32 mohou mít odlišné mapování paměti nebo specifické hardwarové vlastnosti, HAL tyto rozdíly abstrahuje. Pokud vývojář potřebuje převést aplikaci na jiný čip z řady STM32, nemusí ručně upravovat adresy registrů a měnit logiku ovládání periferií, ale stačí využít nástroje na konfiguraci jako STM32CubeMX zatímco aplikační kód zůstává nezměněn. Tento přístup šetří čas a snižuje riziko chyb při portování projektů. Obrázek 3 znázorňuje diagram, který znázorňuje architekturu HAL [14].

Součástí HALu je tzv. CMSIS, což je sada standardizovaných rozhraní, které umožňují konfiguraci periferií, správu jádra, obsluhu přerušení a další [15]. CMSIS je rozdělen do modulárních komponent, kdy vývojář může využít pouze části, které potřebuje. Např. CMSIS-CORE, která poskytuje přístup k jádru Cortex-M a periferiím procesoru, obsahuje

<sup>8</sup>U 16 bitového časovače je maximální perioda 65535, zatímco u 32 bitového časovače je to 4294967295.

definice registrů, přístup k NVIC apod. [15]. Hlavní rozdíl mezi CMSIS a HAL<sup>9</sup> STMicroelectronics je ten, že CMSIS je poskytnuto přímo ARM a slouží pouze na ovládání Cortex M procesorů zatímco část od STMicroelectronics poskytuje abstrakci periférií.



Obrázek 3: STM32CubeMX HAL architektura [3]

### 2.3.3 Raspberry Pi Pico

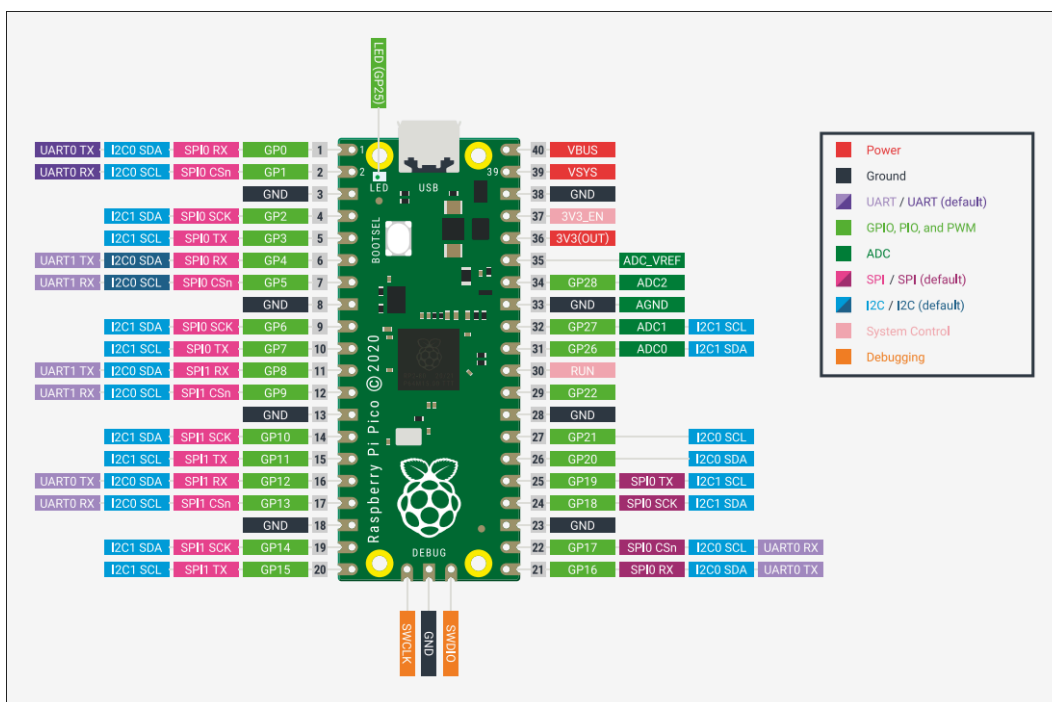
Pro omezenou verzi sondy byl zvolen mikrokontroler Raspberry Pi Pico. Tento kontroler obsahuje RP2040 s flash pamětí o velikosti 2 MiB, s celkem 40 piny [16]. RP2040 čip je navržen nadací Raspberry Pi Foundation a je postaven na Dual-core ARM cortex M0+, které dosahují frekvencí až 133 MHz, kterou je možné, stejně jako u STM32G031, měnit pomocí PLL [10], [16]. Tento mikrokontroler je poměrně populární mezi skupinou lidí, která tvoří projekty volnočasově zejména díky ceně, jednoduchého nahrávání programů do mikrokontroleru a komunitní podpoře.

Mikrokontrolér disponuje 26 GPIO piny s napětím 3,3 V (ne 5 V tolerantními), které podporují funkce jako pull-up/pull-down rezistory, hardwarová přerušování, PWM či komunikaci přes UART, SPI nebo I2C. Vestavěný 12-bitový ADC umožňuje měření napětí na třech analogových pinech s volitelnou referencí (interní 3,3 V nebo externí). Raspberry Pi Pico je navrženo tak, aby bylo možné jej napájet z USB nebo i z externích zdrojů jako baterie.

### PIO

Programmable Input/Output blok je unikátní funkcí MCU RP2040, která poskytuje implementaci vlastního rozhraní. RP2040 má tzv. 2 PIO bloky, kde každý blok se dá přirovnat k nezávislému malému procesoru, kde mohou běžet instrukce nezávisle na Cortex-M0+ jádře. Tyto bloky umožňují spravovat vstupy a výstupy pinů s velice přesným časováním nezávisle na zátěži CPU. Každý blok má 4 stavové automaty, které mohou nezávisle na sobě spouštět instrukce, které jsou uloženy ve sdílené instrukční paměti. Každý stavový

<sup>9</sup>STMicroelectronics do svého HALu zabaluje i CMSIS od ARM.



Obrázek 4: Raspberry Pi Pico vývojová deska

automat může manipulovat s GPIO a přenášet data do CPU a číst data poslané z CPU. PIO blok má speciální assembler, který obsahuje celkem 9 instrukcí (JMP, WAIT, SET atd.).

## 2.4 Měření veličin testovaného obvodu

### 2.4.1 Měření napětí a logických úrovní

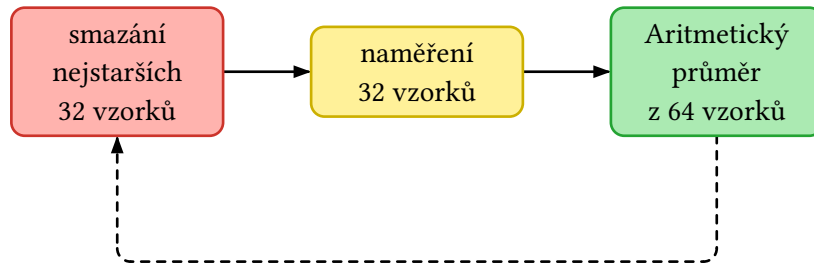
Pro měření napětí, jak již zmiňuje kapitola 2.3.1.1, je využíván AD převodník. Při měření napětí může docházet k šumu na vstupu kanálu a naměřená hodnota nemusí odpovídat realitě. Pro snížení vlivu šumu je použito tzn. sliding window. Do okna se uloží 32 vzorků měření do dvou bloků tj. 64 vzorků celkem. Každých 250 ms se provede průběžné měření 32 vzorků (vzorkovací frekvence  $\sim 128$  Hz). Nejstarší blok 32 vzorků je odstraněn a nahrazen novými daty.

$$V = \frac{\sum_{i=0}^{25} (V_{\text{staré } i}) + \sum_{i=0}^{25} (V_{\text{nové } j})}{26} \quad (6)$$

Tento přístup kombinuje stabilitu dlouhodobého průměru s reakcí na aktuální změny. Po aktualizaci okna, které probíhá každých 250 ms, se vypočítá aritmetický průměr z celého okna (64 vzorků), který reprezentuje výsledné napětí<sup>10</sup>. Počet vzorků byl zvolen v mocninách dvojky z důvodu, že dělení může probíhat jako bitový posun, jelikož dělení na MCU je pomalé a paměťově náročné. Měření s frekvencí vyšší než 100 Hz zajistí, že dojde k potlačení rušení 50 Hz, které se může na vstupu vyskytnout<sup>11</sup> [17].

<sup>10</sup>Jedná se o klouzavý průměr.

<sup>11</sup>Dojde k eliminaci aliasingu.



Obrázek 5: Diagram způsobu sbírání vzorků z ADC

Pro zjištění stavu logické úrovně, je nutné vědět nejvyšší možné napětí nízké logické úrovně a nejnižší možné napětí vysoké logické úrovně. Pro CMOS logiku, Rovnice 7 popisuje definici nejvyššího napětí nízké logické úrovně a Rovnice 8 definuje nejnižší napětí logické vysoké úrovně [18]. Po změření napětí na kanále pomocí sliding window bude zkontrolováno zda napětí odpovídá logické úrovni nebo je napětí v nedefinované oblasti neboli v oblasti:  $V_{ILmax} < V < V_{IHmin}$ . Napětí v této oblasti v reálném obvodu může vést k nepredikovatelnému chování, proto logická sonda toto napětí detekuje.

$$V_{ILmax} = 0.3 \times V_{dd} \quad (7)$$

$$V_{IHmin} = 0.7 \times V_{dd} \quad (8)$$

#### 2.4.2 Měření odporu

Pro měření neznámého odporu  $R_x$  je využit AD převodník (viz kapitola 2.3.1.1) v kombinaci s napěťovým děličem, jehož schéma je znázorněno na obrázku Obrázek 6. Rezistory  $R_{norm}$  (normálový rezistor) a  $R_x$  (měřený odpor) jsou zapojeny v sérii, čímž tvoří uzavřenou smyčku. Podle Kirchhoffova napěťového zákona platí, že součet úbytků napětí na obou rezistorech je roven napájecímu napětí [19], [20]:

$$V_{dd} = V_{R_{norm}} + V_{R_x} \quad (9)$$

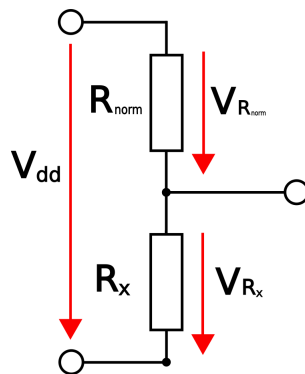
Pomocí pravidla pro napěťový dělič lze vztah mezi napětími a odpory vyjádřit jako:

$$V_{R_x} = V_{dd} \times \frac{R_x}{R_{norm} + R_x} \quad (10)$$

Za předpokladu, že  $R_{norm}$  a napájecí napětí  $V_{dd}$  jsou známé, a hodnota  $V_{R_x}$  je změřena ADC, lze neznámý odpor  $R_x$  vypočítat z upravené rovnice 10 [19]:

$$R_x = R_{norm} \times \frac{V_{R_x}}{V_{dd} - V_{R_x}} \quad (11)$$

V praxi probíhá měření neznámého odporu  $R_x$  následujícím způsobem: Uživatel sestaví napěťový dělič skládající se z normálového rezistoru  $R_{norm}$  (typicky 10 kΩ) a měřeného rezistoru  $R_x$ . Normálový rezistor je připojen mezi referenční napětí  $V_{dd}$  a vstup ADC (kanál 1), zatímco  $R_x$  je zapojen mezi tento vstup a zem (viz schéma Obrázek 6). Sonda následně změří napětí  $V_{dd}$  na kanálu 1 ADC a pomocí rovnice 11, vypočítá hodnotu neznámého odporu [19].



Obrázek 6: Schéma děliče napětí

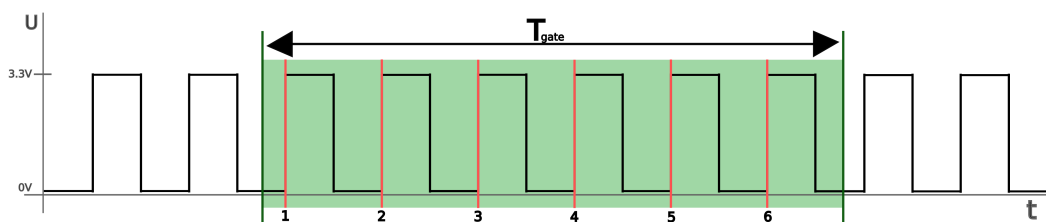
### 2.4.3 Měření frekvence

#### Metoda hradlování

Pro měření frekvencí v řádu KHz a MHz je využívána metoda hradlování. Tato metoda využívá čítače, který registruje počet náběžných nebo sestupných hran měřené frekvence  $N$ , za určitý čas  $T_{\text{gate}}$ . Čas, po který jsou počítány hrany se nazývá hradlovací (angl. gate time). Frekvence  $f_{\text{gate}}$  touto metodou je vypočítán pomocí rovnice 12. Délka hradlovacího času může mít vliv na výsledek a proto není vhodné volit jeden čas, pro všechny druhy frekvencí. Pokud bude zvolen čas příliš dlouhý, může to zpomalovat měření a také může nastat problém na straně omezenosti hardwaru, kdy při měření vysoké frekvence může dojít k přetečení čítače. V případě příliš krátkého času dojde k nepřesnosti měření a případě nízkých frekvencí nemusí dojít k zachycení správného počtu hran. Proto v případě sondy bude čas volitelný uživatelem.

$$f_{\text{gate}} = \frac{N}{T_{\text{gate}}} \quad (12)$$

Pro měření metodou hradlování je využit časovač v režimu čítání pulzů, a další časovač pro měření času hradlování, kde tyto dva časovače jsou mezi sebou synchronizovány aby nedocházelo k velké odchylce mezi časem zahájení resp. ukončení činnosti čítače a časovače hradlovacího času, případně odchylky může dojít k počítání hran, které nejsou v okně hradlovacího času. Časovač pro měření hradlovacího času je závislý na oscilátoru MCU, kde odchylka frekvence oscilátoru periferie může ovlivnit reálný čas měření a ve finále také výslednou frekvenci. Prakticky tato metoda neumožňuje změřit střidu PWM signálu, protože jsou počítány pouze pulzy.



Obrázek 7: Signál při měření metodou hradlování

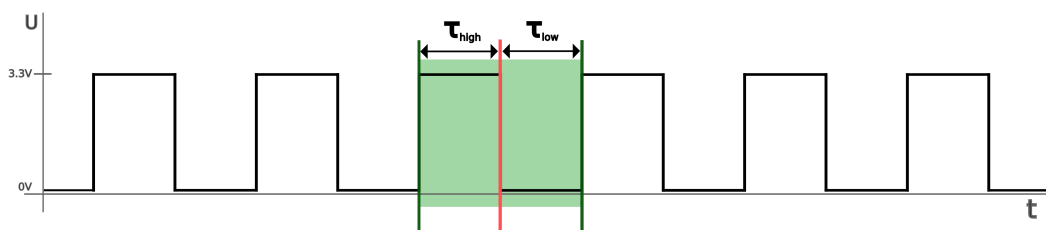
## ■ Reciproční frekvence

Reciproční frekvence vhodná pro měření nízkých frekvencí  $f_{\text{rec}}$  (typicky  $< 1 \text{ KHz}$ ). Na rozdíl od hradlování nepočítá hrany za pevný čas, ale měří periodu signálu  $T$ , ze které frekvenci dopočítá vztahem 13. Perioda je detekována pomocí náběžné/sestupné hrany, kdy se zahájí měření a měření je ukončeno při další náběžné/sestupné hraně. Během této doby se počítají pulsy interního oscilátoru MCU.

$$f_{\text{rec}} = \frac{1}{T} \quad (13)$$

Výhoda této metody je možnost výpočtu střidy PWM signálu. V případě, že místo měření celé periody, může být změřen čas od náběžné hrany k sestupné hraně a poté od sestupné k náběžné hraně. Tímto je možno získat šířku pulzu ve vysoké logické úrovni a šířku pulzu v nízké logické úrovni. Pomocí rovnice 14 je možné dopočítat střidu PWM.

$$D = \frac{\tau_{\text{high}}}{\tau_{\text{high}} + \tau_{\text{low}}} \quad (14)$$



Obrázek 8: Signál při měření reciproční frekvence

## ■ 2.5 Analýza komunikačních rozhraní

Kapitola 2.1 zmiňuje testování hardwarových částí obvodu. Analýza seriové komunikace je častá nutnost při hledání chyby v implementaci studenta či vývojáře nebo jako otestování funkčnosti součástky. Logická sonda poskytne prostředí pro pasivní poslouchání komunikace, které pomůže vývojáři nalézt chybu v programu nebo studentovi při realizaci školního projektu.

### ■ 2.5.1 UART

Universal Asynchronous Receiver Transmitter je rozhraní, kde data jsou odesílána bez společného hodinového signálu mezi odesílatelem a příjemcem. Místo toho je podstatný baudrate<sup>12</sup>, což určuje počet přenesených bitů za sekundu. UART podporuje nastavení různých protokolů komunikace jako například RS-232 a RS-485. UART také umí full duplex komunikaci [21], [22].

Data jsou přenášena v tzv. rámcích, které jsou strukturovány následovně: [22]

- **Start bit** - Každý rámec začíná start bitem, který určuje začátek rámce. Bit je vždy „0“.
- **Slovo dat** - Poté následuje 8 bitů dat<sup>13</sup>.
- **Paritní bity** - Paritní bity slouží k detekci chyby v přenosu. Parita nám dokáže pouze detekovat chybu rámce pouze v případech, kdy nevznikne chyb více<sup>14</sup>.

<sup>12</sup>Počet bitů přenesených za sekundu

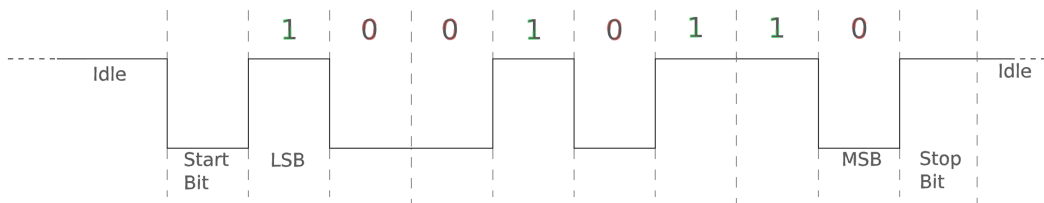
<sup>13</sup>Lze používat i 7 bitů nebo 9 bitů dat.

<sup>14</sup>Chyba z dat 1101 na 1000 nelze detekovat, protože lichá parita má paritní bit v obou případech 0.

- **Stop bit** - Stop bit<sup>15</sup> signalizuje konec přenosu rámce. Obvykle logická „1“.

Pokud rozhraní neodesílá žádné bity, na vodičích se nachází vysoká úroveň. Této vlastnosti bude využito později v návrhu logické sondy.

V logické sondě je UART využíván, ke komunikaci s PC a také logická sonda umí toto rozhraní pasivně sledovat i aktivně odesílat testovací sekvence Obrázek 9 ukazuje způsob zpracování signálů [23]. Testování tohoto rozhraní je potřeba pokud student či vývojář potřebuje najít chybu např. při implementaci seriové komunikace mezi dvěma mikrokontrolery, kde se právě často využívá UART.

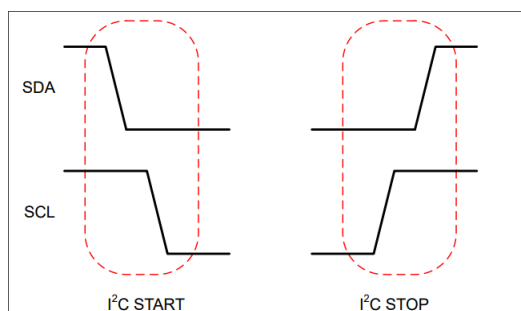


Obrázek 9: Způsob zpracování signálu UART bez parity

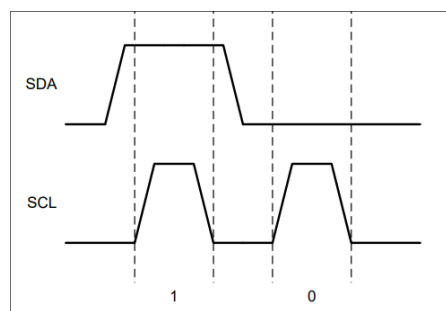
## 2.5.2 I2C Bus

**Inter-Integrated Circuit** je seriová komunikační sběrnice, který byl vytvořen Philips Semiconductor jako nízkorychlostní sběrnice pro propojení zařízení jako např. mikrokontrolery a procesory se senzory, periferiemi apod. Od roku 2006 implementace protokolu nevyžaduje licenci a proto se začal široce používat např. v IOT. Výhoda sběrnice je, že pro komunikaci potřebuje pouze dva vodiče, na které je možné připojit až 128 zařízení najednou, jelikož využívá systém adres [4].

SCL vodič, slouží jako hodinový signál a SDA vodič slouží jako datový vodič. Protokol rozlišuje zařízení typu master a slave. Master řídí hodinový signál a protože je I2C obousměrný half duplex protokol, tak master zahajuje a zastavuje komunikaci aby nedocházelo ke konfliktům. Oba vodiče mají otevřený kolektor, z důvodu, že je na lince připojeno více zařízení a vodiče jsou pull up rezistorem přivedeny na společný zdroj napětí, což znamená, v klidovém režimu, jsou na vodičích vysoké logické úrovně [4].



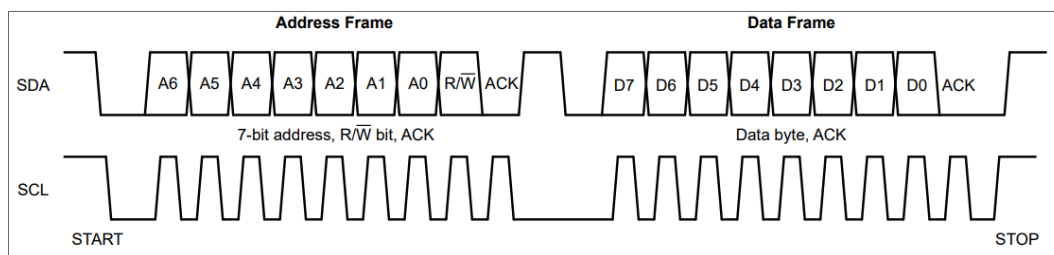
Obrázek 10: Zahájení a ukončení komunikace v I2C [4]



Obrázek 11: Logická jednička a logická nula v I2C [4]

<sup>15</sup>Stop bitů může být i několik





Obrázek 12: Rámce I2C [4]

Pro zahájení komunikace, master is zarezervuje sběrnici posláním I2C START. Nejprve master přivede vodič SDA do nízké logické úrovně a následně tam přivede i SCL. Tato sekvence indikuje, že se master zahajuje vysílání a všechny zařízení poslouchají. Pro ukončení je nejprve uvolněn SCL a až poté SDA. Tím je signalizováno, že komunikace je ukončena a jiný master může komunikovat.

Obrázek 11 ukazuje způsob odesílání jednotlivých bitů. Pro odeslání logické jedničky SDA uvolní vodič, aby byla přivedena přes pull up rezistor vysoká logická úroveň. Pro logickou nulu, vysíláč stáhne vodič do nízké úrovně. Příjimač zaznamená bit v momentě, kdy SCL zapulsuje.

Protokol rozděluje bity do rámců. Rámec má vždy 8 bitů. Nejprve pošle adresový rámec, který identifikuje, který slave má reagovat. Součástí rámce je také read-write bit. Pokud slave přečte adresový rámec a daná adresa mu nepatří, ignoruje komunikaci. V opačném případě odpoví ACK bitem, kdy nízká úroveň znamená potvrzení. Vysoká úroveň nastane, když slave nezareaguje a vodič zůstane v klidu, tzn. vysoká úroveň.

Po identifikaci se zahájí odesílání datových rámců, které se skládají z 8 bitů a jsou zakončeny ACK. Pokud byl read-write bit nastaven na read, master většinou zašle adresu z které chce číst a slave pošle obsah paměti. Při write, master zašle adresu na kterou chce zapisovat a následně data, které chce zapsat [4].

### 2.5.3 SPI

**Serial peripheral interface** je jeden z nejvíce využívaných rozhraní používaný mezi mikrokontrolery a periferiemi jako např. AD převodníky, SRAM, EEPROM apod. Rozhraní nemá definované jaké napětí se používají a ani velikosti rámců. Typicky se používá 8 bitů. Oproti UART a I2C vyniká rychlostí komunikace, která je v řádu MHz.

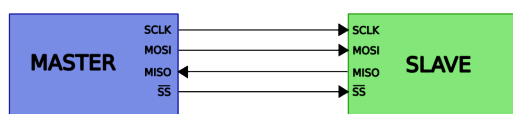
SPI má vždy jedno master zařízení a i několik podřízených slave zařízení. SPI je synchronní full duplex rozhraní, které má celkem 4 vodiče<sup>16</sup>. SCLK, což je hodinový signál, který určuje synchronizaci dat, MOSI, neboli vodič, kde probíhá komunikace od masteru ke slave, MISO, kde probíhá komunikace od slave k masteru a poté SS<sup>17</sup>, neboli slave select. Ten určuje, se kterým slave zařízením probíhá komunikace, každé zařízení má vlastní SS pin [24]. Obrázek 13 ukazuje způsob zapojení vodičů v případě jednoho slave zařízení. Pro zahájení komunikace nastaví logicky nízkou úroveň na SS<sup>18</sup>. Master zahájí generování hodinového signálu, podle kterého se synchronizuje komunikace. Jelikož je

<sup>16</sup>4 vodiče má v případě jednoho slave zařízení. S každým dalším slave zařízením musí být připojen další SS.

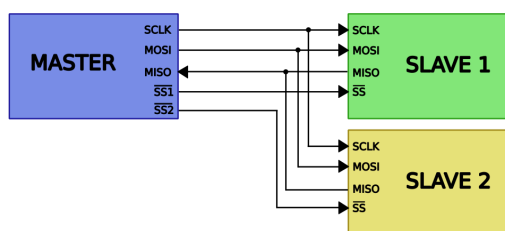
<sup>17</sup>Někdy také CS jako chip select.

<sup>18</sup>Jelikož se spíná vodič do log. 1, tak má značka SS nad sebou negaci.

komunikace full duplex, komunikace začne probíhat mezi master a slave oběma směry tzn. na vodičích MISO a MOSI. Po dokončení komunikace master ukončí vysílání hodinového signálu a nastaví SS na vysokou logickou úroveň. Obrázek 14 znázorňuje připojení více slave zařízení. V tomto případě master využívá více SS a podle přivedení nízké logické úrovně určuje směr komunikace [24].

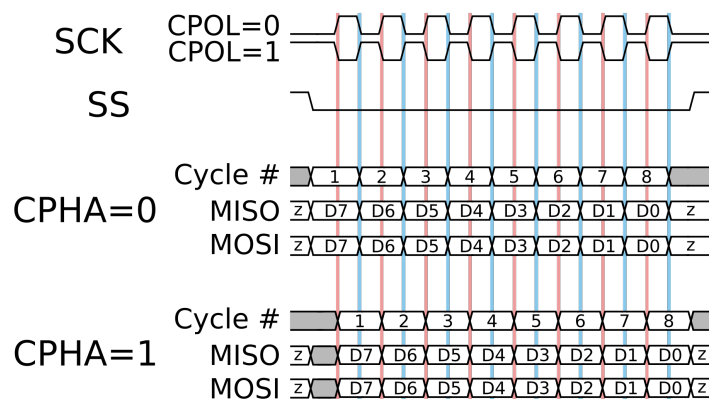


Obrázek 13: Diagram SPI komunikace s jedním slave zařízením



Obrázek 14: Diagram SPI komunikace s více slave zařízením

Zjištění logické 0 a 1 vychází z přečtení logické úrovně v momentě vzestupné nebo sestupné hraně hodinového signálu. Vztah mezi hodinovým signálem a daty tzn. CPOL bitem a CPHA bitem. CPOL bit určuje, jakou logickou úroveň má klidový stav hodinového signálu. Při log. 0 je klidová úroveň nízká a hodinový signál započne náběhovou hranou, při log. 1 naopak. CPHA určuje, jaká hrana má určovat logickou úroveň signálu, při log. 0 je čtena hodnota při první hraně signálu, při log. 1 je čtena hodnota při druhé hraně hodinového signálu<sup>19</sup>.

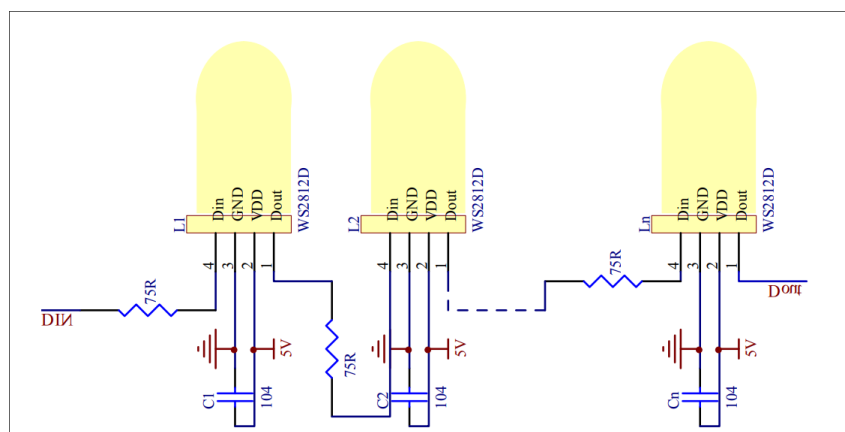


Obrázek 15: Časový diagram SPI zobrazující úroveň a posun hodinového signálu [5]

## 2.5.4 Neopixel

Neopixel je název pro kategorii adresovatelných RGB LED. Dioda má celkem 4 vodiče: ground, Vcc, DIIn a DOut. LED má vlastní řídicí obvod, který ovládá barvy diody na základě signálu z vodiče DIIn. Výhoda LED je možnost připojit diody do série, a jedním vodičem ovládat všechny LED v sérii [6]. Obrázek 16 znázorňuje zapojení více LED do série a schopnost ovládání jedním vodičem.

<sup>19</sup>Pokud bude CPOL bit = 0 a CPHA = 0, tak signál bude čten při náběžné hraně, při CPOL = 0 a CPHA = 1 bude čtena při sestupné hraně.



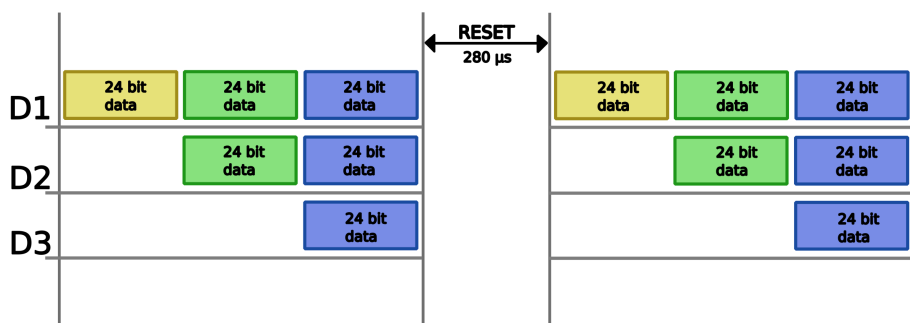
Obrázek 16: Způsob zapojení RGB LED do série [6]

Data do LED se zasílají ve formě 24 bitů, kdy každých 8 bitů reprezentuje jednu barevnou složku. Parametry pořadí složek, časování apod. se může lišit v závislosti na konkrétním verzi a provedení LED. V této práci je vycházeno z WS2812D. První bit složky je, v případě WS2812, MSB<sup>20</sup>.

R7	R6	R5	R4	R3	R2	R1	R0	G7	G6	G5	G4	G3	G2	G1	G0	B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Tabulka 1: Pořadí bitů pro nastavení barvy v WS2812 [6]

Neopixel nepracuje na sběrnici s časovým signálem, proto je nutné rozpoznávat logickou jedničku a nulu jiným způsobem. Na pin DIn je přivedena vysoká úroveň na určitou dobu, poté je na určitou dobu přivedena nízká úroveň. Kombinace těchto časů dává řídicímu obvodu v LED možnost rozpoznat, jaký bit byl poslán diodě. Pro ovládání  $n$  LED, na DIn první LED je zasláno  $n \times 24$  bitů. Dioda zpracuje prvních 24 bitů, a na Dout odešle  $(n - 1) \times 24$  bitů. Tento proces se opakuje pro každou LED v sérii a tím je dosaženo rozsvícení všech diod na požadovanou barvu. Aby řídicí obvod rozpoznal, které data má poslat dále a která jsou už nová iterace barev pro LED, je nutné dodržet tzn. RESET time, kdy po uplynutí tohoto času, řídicí obvod, už neposílá data dále, ale zpracuje je Tabulka 2 ukazuje časování pro WS2812D.



Obrázek 17: Diagram posílání dat pro zapojené WS2812D v sérii [6]

<sup>20</sup>Most significant bit

Bit	Typ času	t[ns]
0	vysoká úroveň napětí	220 ~ 380
0	nízká úroveň napětí	580 ~ 1000
1	vysoká úroveň napětí	580 ~ 1000
1	nízká úroveň napětí	580 ~ 1000
RESET	nízká úroveň napětí	> 280000

Tabulka 2: Časování logických úrovní pro zaslání bitů WS2812D [6]

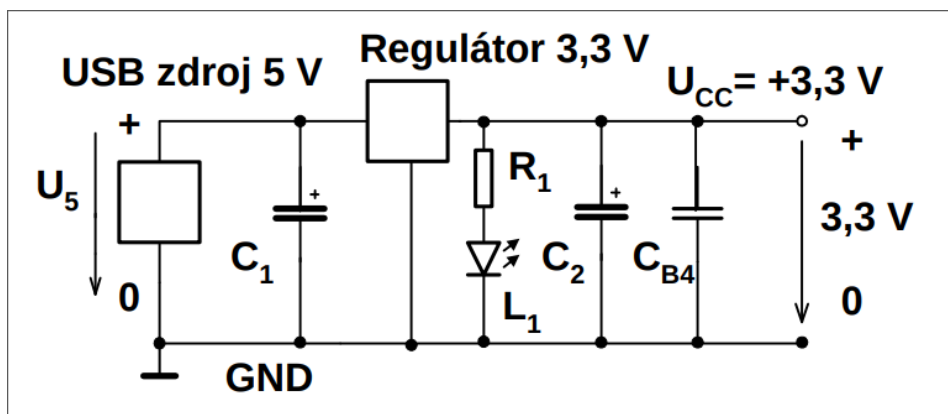
## Kapitola 3

# HW návrh logické sondy STM32

Návrhy obsahují, co nejméně komponent, aby student byl schopný zařízení jednoduše sestavit. Tzn. například pull up nebo pull down rezistory jsou řešeny interně na pinu. Logická sonda musí být ideálně co nejvíce kompatibilní mezi oběma pouzdry, tak aby byla zaručena přenositelnost a pravidla pro sestavení byla co nejvíce podobná.

### 3.1 Sdílené vlastnosti mezi návrhy pouzder

Sonda je napájena skrze UART/USB převodník. Jelikož USB pracuje s napětím 5 V ale STM32G030 vyžaduje napájecí napětí  $1.7 \sim 3.6$  V [2] je nutné napětí snížit. Proto byl použit lineární stabilizátor **HT7533**, který stabilizuje napětí na  $3.3 \pm 0.1$  V. Ke vstupu je připojen kondenzátor  $C_1$  k potlačení šumu o velikosti  $10 \mu\text{F}$ . K výstupu je připojen keramický kondenzátor<sup>21</sup>  $C_2$  k zajištění stability výstupu o velikosti také  $10 \mu\text{F}$  [25].



Obrázek 18: Zapojení regulátoru pro napájení STM32G030 [7]

Návrh zohledňuje implementaci lokálního režimu. Pro tuto implementaci je na pin PA13 zapojeno tlačítko pro interakci s uživatelem vůči zemi s interním pull up rezistorem na pinu. Připojení vůči zemi minimalizuje riziko zkratu chybným zapojením uživatelem.

Dále je připojena WS2812 RGB LED na PB6. Tento pin byl zvolen z důvodu přítomnosti kanálu časovače, který je využit pro posílání dat skrze PWM do LED. WS2812 dle datasheetu vyžaduje napětí  $3.7 \sim 5.3$  V [6]. Pokud by WS2812 byla napájena 5 V z USB převodníku, došlo by k problému s CMOS logikou, kdy vstupní vysoká logická úroveň je definována jako  $0.7 \times V_{dd}$ , což se rovná 3.5 V a STM32 pin při vysoké úrovni má  $V_{dd}$ , což je  $\sim 3.3$  V [2], [18]. Z toho důvodu je navzdory datasheetu LED připojena na napětí  $V_{dd}$  mikrokontroleru. Toto zapojení bylo otestováno a je plně funkční. Problém se kterým je možné se setkat je nesprávné svícení modré barvy z důvodu vysokého prahového napětí. Mezi katodu a anodu LED je umístěn blokovací kondenzátor o velikost  $100 \text{ nF}$ .

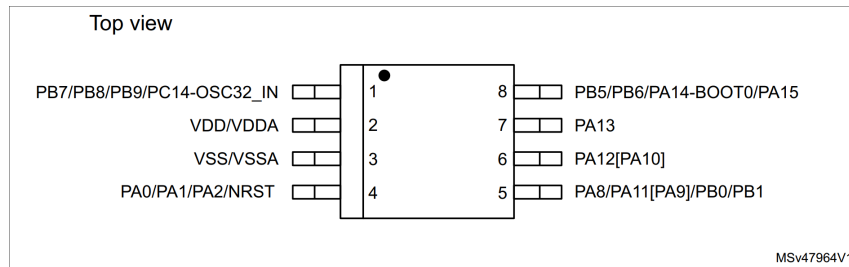
Obě pouzdra využívají pro komunikaci s PC periferii USART1. STM32 poskytuje možnost remapování pinů. Pro zjednodušení zapojení jsou piny PA12 a PA11 přemapované

<sup>21</sup>Keramický s důvodu, že LDO požadují nízké ESR

na PA10 a PA9. Tyto piny jsou použity jako Tx a Rx piny UART komunikace. Pro zajištění funkce lokálního režimu je na Rx pin přiveden pull down rezistor o velikosti 10 KΩ.

### 3.2 SOP8

Obrázek 21<sup>22</sup> ukazuje zapojení STM32G030 v pouzdře SOP8. Toto pouzdro po zapojení napájení, rozhraní UART má k dispozici pouze 4 piny. Po zapojení potřebných komponent pro lokální režim, které zmiňuje Kapitola 3.1, zůstávají piny 2. Z tohoto důvodu, na pouzdro SOP8, jsou implementovány pouze lokální režim a základní funkce terminálového režimu, jako měření napětí, frekvence a vysílání pulzů.



Obrázek 19: STM32G030Jx SO8N Pinout [8]

Jelikož je pouzdro malé, tak se na jednom fyzickém pinu nachází více periférií. Obrázek 19 ukazuje, že na pinu 4, kde se nachází PA0, má připojený i NRST. NRST požaduje aby pin byl neustále ve vysoké logické úrovni, což pro potřebu logické sondy je nepraktické protože takto není možné využít PA0. Funkce nresetu lze vypnout skrze tzv. **optional bits**. Kde na pozici NRST\_MODE je potřeba nastavit 2, aby NRST byl ignorován a PA0 bylo použitelné. Pomocí nastavení bude zajištěno, že NRST bude ignorován po dobu běhu programu, nicméně při bootu je nežádoucí, aby byl přiveden na logicky nízkou úroveň, protože stále MCU v této fázi ignoruje nastavení optional bitu.

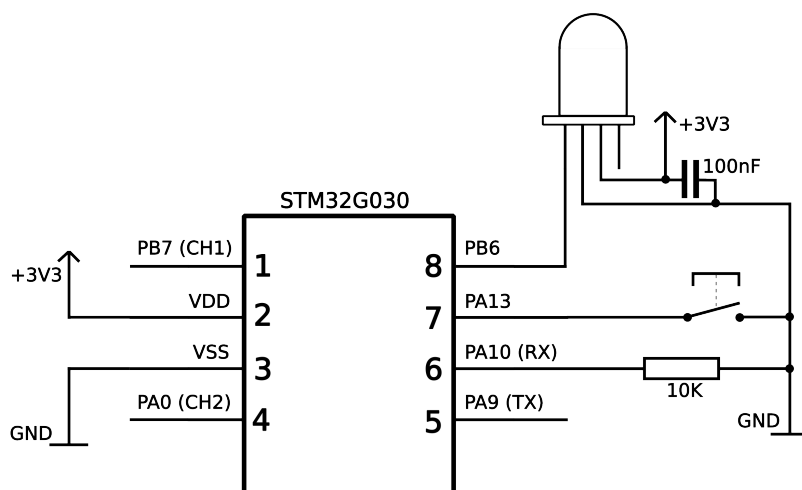
Address <sup>(1)</sup>	Corresponding option register (section)	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0					
0x1FFF7800	FLASH_OTPR (3.7.8)	Res.		IRHEN	NRST_MODE		nBOOT0	nBOOT1	nBOOT_SEL	Res.	RAM_PARITY_CHECK	DUAL_BANK	nSWAP_BANK	WWDG_SW	IWDG_STBY	IWDG_STOP	IWDG_SW	nRST_SHDW	nRST_STDBY	nRST_STOP	BORF_LEV		BORR_LEV		BOR_EN		RDP											
	Factory value	X	X	1	1	1	1	1	1	X	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0			

Obrázek 20: Paměťový prostor Flash option bits [2]

Další problém představuje pin 8, který obsahuje PA14-B00T0. Při startu MCU bootloader zkontroluje bit **FLASH\_ACR**, který určuje jestli je FLASH paměť prázdná. Pokud ano, MCU zapne a začne poslouchat periferie kvůli případnému stáhnutí firmwaru do FLASH paměti. Pokud FLASH prázdná není, program uložený v paměti se spustí. Pokud je na PA14-B00T0 ve vysoké logické úrovni, MCU se chová stejně, jako by paměť byla prázdná

<sup>22</sup>Schéma zapojení bylo zrealizováno pomocí nástroje *Autodesk Eagle* [26]. Komponenta Neopixel RGB LED byla použita jako externí knihovna [27].

[2]. Standartně se mikrokontroler nahrává a debuguje pomocí tzn. SWD<sup>23</sup>, nicméně při této konfiguraci je to nepraktické, protože, by to znamenalo připojit ST-LINK k mikrokontroleru, nahrát, odpojit a poté až udělat zapojení, které ilustruje Obrázek 21. Pro jednoduchost se firmware nahraje pomocí UART. V tomto případě je ale potřeba řídit, zda má být nahráván firmware nebo spuštěn program. Optional bit nB00T\_SEL určuje, zda má být toto řízeno pomocí bitů nB00T0 a nB00T1 nebo pomocí úrovně PA14-B00T0. V případě sondy, je potřeba druhá možnost, takže je nutné nastavit bit nB00T\_SEL na 0.



Obrázek 21: Schéma zapojení STM32G030 v pouzdře SOP8

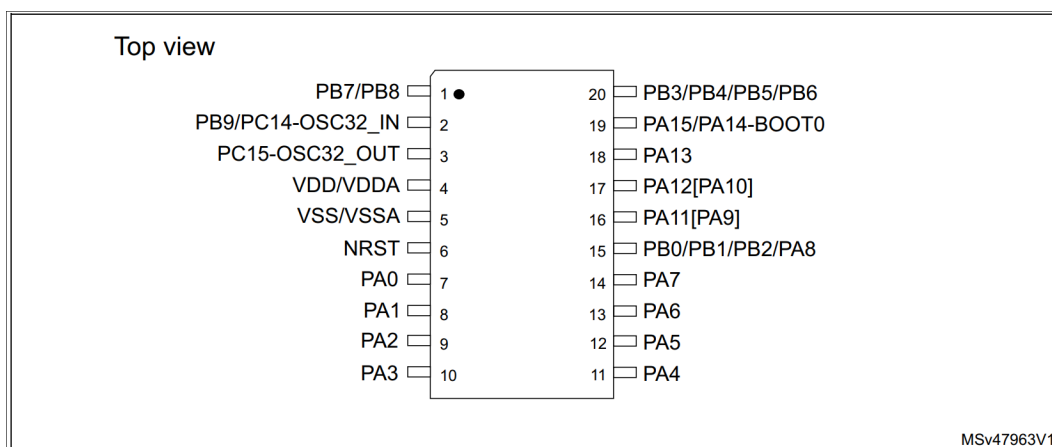
První z pinů k užívání je pin PB7. Tento pin slouží jako kanál AD převodníku pro měření napětí a pro měření odporu, pin je také využit pro hodinový signál pro posuvný registr. Na pinu PA0 se nachází AD převodníkový kanál. Pin také disponuje kanály TIM2 časovače. Pin je použit jako druhý kanál AD převodníku pro měření napětí, pro posuvný registr je pin využíván pro posouvání dat do posuvného registru, měření frekvence, odchyťování Neopixel dat, detekce pulsů a generování frekvence. Pin PB6 je použit pro odesílání dat do testované RGB LED.

### 3.3 TSSOP20

Pouzdro TSSOP20 nabízí oproti SOP8 výhodu většího počet pinů a tím pádem i jednodušší implementaci pokročilých funkcí. Pouzdro má celkem 20 pinů, což má za následek, že např. může být pin NRST (pin 6) oddělen od PA0 a má tak vlastní pin. Z tohoto důvodu při flashování MCU není potřeba myslet na nastavení optional bits pro NRST a může zůstat v základním nastavení. Nicméně pin PA14-B00T0 musí být nastaven stejným způsobem jako u SOP8, tzn. optional bit nB00T\_SEL je nutné nastavit na 0 aby bylo možné při startu MCU určit, zda má být nabootován program ve FLASH paměti, nebo má poslouchat periferie pro nahrání programu.

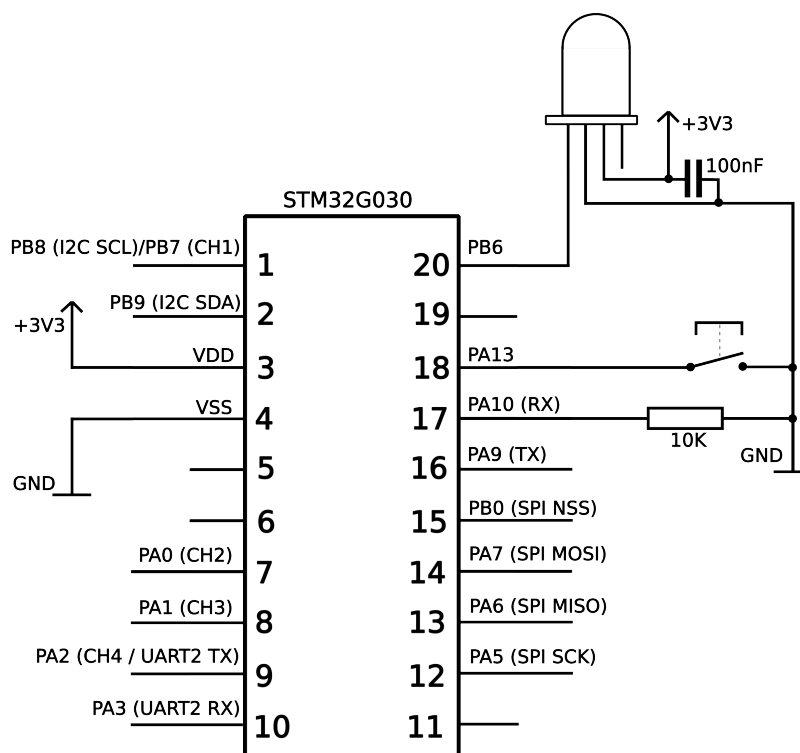
Pro zjednodušení sestavení sondy, je HW TSSOP20 návrh co nejvíce podobný návrhu SOP8. Piny PA11 a PA12 jsou přemapovány na PA9 a PA10. Na pin PA10 je připojen rezistor o velikosti 10 KΩ vůči zemi pro detekci komunikace s PC. Ze stejného důvodu byl zachován pin PB6 jako výstup pro WS2812D a PA13 pro tlačítko pro lokální režim. Obrázek 23

<sup>23</sup>Serial Wire Debug slouží pro jednodušší vývoj na mikrokontrolerech, je možné číst FLASH, RAM, nahrávat program, nastavovat option bity apod.



Obrázek 22: STM32G030Jx TSSOP20 Pinout [8]

ukazuje schéma zapojení s pouzdrém TSSOP20. Rozmístění pokročilých funkcí vychází z charakteristik jednotlivých pinů. Pin 1 (PB7) je využit stejně jako v pouzdře SOP8 jako první kanál ADC. Na pinu 1 (PB8) a 2 (PB9) se nachází I2C periferie a proto jsou využity pro sledování komunikace I2C sběrnice. Pin 7 (PA0) je k měření frekvence a napětí. Piny 9 (PA2) a 10 (PA3) mají USART periferii a proto jsou vhodní kandidáti na sledování UART komunikace. Piny 12 (PA5), 13 (PA6), 14 (PA7) a 15 (PB0) mají SPI rozhraní a proto jsou použity pro sledování SPI komunikace.  $V_{dd}$  je připojeno na výstup lineárního stabilizátoru z obrázku 18, který má na výstupu 3.3 V.



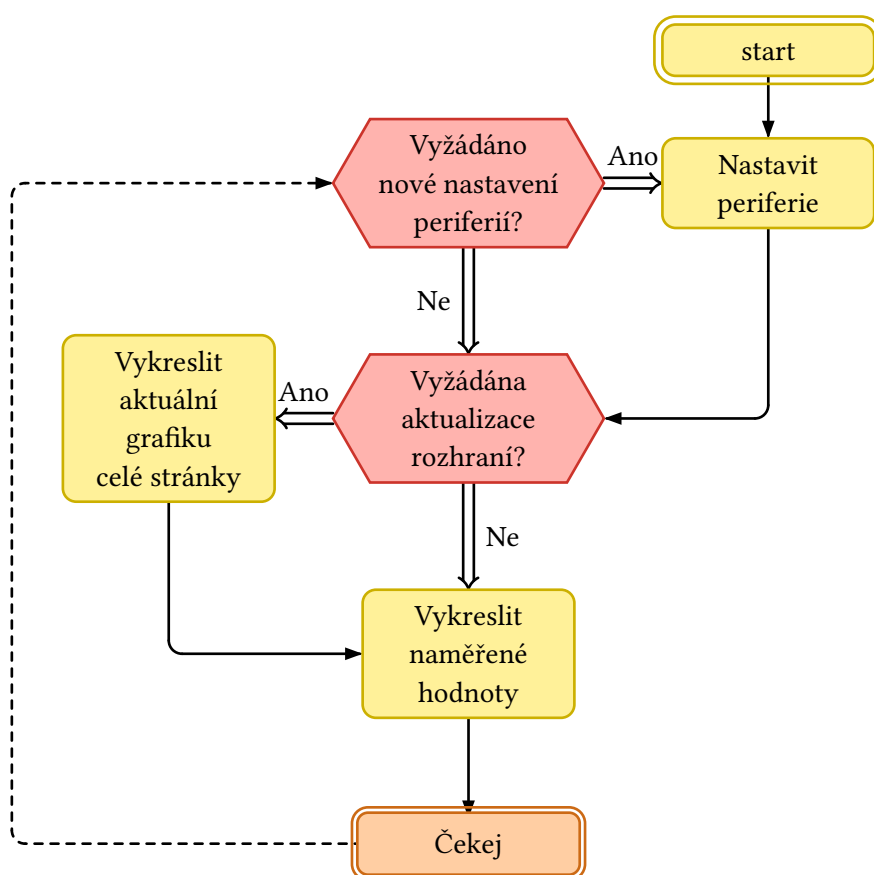
Obrázek 23: Schéma zapojení STM32G030 v pouzdře TSSOP20



# Návrh terminál režimu STM32

## 4.1 Princip oblužní smyčky

Terminálový režim využívá rozhraní UART, pro sériovou komunikaci s PC. Způsob vstoupení do terminálového režimu rozebírá kapitola 5.1. Základ terminálového režimu běží v nekonečné smyčce, která je na konci oddělena čekáním<sup>24</sup>. Smyčka slouží jako obsluha akcí, které jsou vyvolány, jak uživatelem prostřednictvím TUI, tak periferiemi, které momentálně běží. Obsluha při každé iteraci provede jednotlivé úkony, pokud příznaky v globální struktuře (Úryvek kódu 11) jsou nastaveny. Příznaky jsou běžně nastavovány skrze přerušení, například vyvolané uživatelem skrze odeslání symbolu seriovou komunikací. Obsluha v každé iteraci zkontroluje, zda příznak `need_frontend_update` vyžaduje vykreslit grafiku TUI (Kapitola 4.2), zda příznak `need_perif_update` vyžaduje změnit periferii (Kapitola 4.3), poté vykreslí data, které periferie získala a nakonec čeká na další smyčku. Sonda vykresluje data na základě `device_state` proměnné, která určuje, jakou funkci uživatel momentálně používá.



Obrázek 24: Diagram smyčky terminálového módu

<sup>24</sup>Toto čekání se mění na základě zvolené funkce.

Metoda periodické obsluhy nastavování periférií a vykreslování TUI, oproti okamžité reakci přímo v přerušení, má výhodu v tom, že nemůže dojít k překrytí činnosti mezi hlavní smyčkou a přerušeními. Např. pokud bude stránka periodicky vykreslována, a stisk tlačítka by vyvolal přerušení k překreslení programu, může se přerušit smyčka v momentě, kdy už k překreslení dochází. V tomto případě poté dojde k rozbití obrazu vykresleného na terminál. Obdobná věc hrozí při vypínání a zapínání periférií. Kdy průběh deinitializace periférie přerušen a nastane inicializace, může dojít k nepredikovatelnému chování. Metodou obsluhy jsou definovány posloupnosti úkonů, které se nemohou překrývat.

## ■ 4.2 Grafické řešení TUI

Kapitola 2.1 zmiňuje důraz na jednoduchou přístupnost ve výuce, což zahrnuje i jednoduché zobrazení informací, které uživatel potřebuje. Aby zprovoznění sondy bylo co nejvíce jednoduché, nebyla zvolena cesta ovládání skrze speciální aplikaci nebo speciální ovladač, ale byla zvolena cesta ovládání sondy skrze libovolnou terminálovou aplikaci podporující ANSI escape sekvence<sup>25</sup>. ANSI escape sekvence zajistí možnost grafického prostředí skrze terminál. Ke generaci rozhraní bude docházet na straně mikrokontroleru a posíláno UART periférií do PC. Tento způsob navíc zajistí nezávislost na operačním systému a je možné komunikovat se sondou na jakémkoliv populárním operačním systému.

### ■ 4.2.1 Ansi sekvence

ANSI escape kódy představují standardizovanou sadu řídicích sekvencí pro manipulaci s textovým rozhraním v terminálech podporujících ANSI/X3.64 standard. Tyto kódy umožňují dynamickou úpravu vizuálních vlastností textu (barva, styl), pozicování kurzoru a další efekty, čímž tvoří základ pro tvorbu pokročilých terminálových aplikací [28].

### ■ Syntaxe

Základní syntaxe escape sekvencí pro formátování textu je:

```
1 \033[<parametry><akce>
```

bash

- \033 (ASCII 27 v osmičkové soustavě) označuje začátek escape sekvence<sup>26</sup>
- [ je úvodní znak pro řídicí sekvence
- <parametry> jsou číselné kódy oddělené středníky
- <akce> je písmeno specifikující typ operace

### ■ Formátování textu

Pro změnu barvy a obecně textu je použito písmeno *m* jako akce. Nejčastější parametry s popisem vypisuje Tabulka 3.

<sup>25</sup>Například program PuTTY...

<sup>26</sup>Existují také \033 N nebo \033 \ apod. ale tyto se téměř nepoužívají.

Kód	Typ	Popis
30–37	Text · Základní	Černá, Červená, Zelená, Žlutá, Modrá, Purpurová, Tyrkysová, Bílá
90–97	Text · Světlé	Světlé varianty základních barev
40–47	Pozadí · Základní	Černé, Červené, Zelené... pozadí
100–107	Pozadí · Světlé	Světlé varianty pozadí
0	Efekt	Reset všech stylů
1	Efekt	Tučný text
4	Efekt	Podtržení
7	Efekt	Inverzní barvy

Tabulka 3: Tabulka akcí ANSI sekvencí

## ■ Manipulace s kurzorem

Sekvence také lze použít pro pohyb kurzoru, což je užitečné pro vizuál aplikace. Pro pohyb kurzoru na konkrétní pozici zajišťuje písmeno H a pro pohyb o relativní počet symbolů slouží písmena A jako nahoru, B jako dolů, C jako doprava a D jako doleva na pozici akce [29].

```
1 \033[<row>;<col>H // Pohyb na konkrétní pozici
2 \033[<posun><směr> // Posune kurzor o danou pozici
3 \033[10;15H // Posune kurzor na pozici 10. řádku a 15 sloupce
4 \033[10B // Posune kurzor o 10 řádků dolů
```

## ■ Mazání obsahu

ANSI escape kódy umožňují kromě formátování textu také dynamické mazání obsahu obrazovky nebo řádků, což je klíčové pro aktualizaci TUI. Tyto sekvence se využívají např. pro překreslování statických prvků nebo odstranění přebytečného textu [29]. .

```
1 \033[2J // Smazání celého displeje
2 \033[0K // Smazání textu od pozice kurzoru do konce řádku
3 \033[1K // Smazání textu od pozice kurzoru do začátku řádku
4 \033[2K // Smazání celého řádku
5 \033[2KProgress: 75% // Smazání řádku a vypsání nového textu
```

## ■ 4.2.2 Nastavení periferie pro zobrazování TUI

Pro komunikaci s PC je využito periferie USART1, která se nachází na pinech PA11 a PA12 respektive PA9 a PA10. Periferii je možné inicializovat pomocí programu STM32CubeMX, který po nastavení parametrů vygeneruje příslušné inicializační a deinicializační funkce. Pro komunikaci byl zvolen baudrate 115200 a 8 bitové slovo s jedním stop bitem bez parity,

```

1  static void MX_USART1_UART_Init(void) {
2      huart1.Instance = USART1;
3      huart1.Init.BaudRate = 115200;
4      huart1.Init.WordLength = UART_WORDLENGTH_8B; // velikost dat
5      huart1.Init.StopBits = UART_STOPBITS_1; // počet stop bitů
6      huart1.Init.Parity = UART_PARITY_NONE; // bez parity
7      huart1.Init.Mode = UART_MODE_TX_RX; // Zapnut full duplex
8      huart1.Init.HwFlowCtl = UART_HWCONTROL_NONE;
9      huart1.Init.OverSampling = UART_OVERSAMPLING_16;
10     huart1.Init.OneBitSampling = UART_ONE_BIT_SAMPLE_DISABLE;
11     huart1.Init.ClockPrescaler = UART_PRESCALER_DIV1;
12     huart1.AdvancedInit.AdvFeatureInit = UART_ADVFEATURE_NO_INIT;
13     if (HAL_UART_Init(&huart1) != HAL_OK) {
14         Error_Handler();
15     }
16 }

```

Úryvek kódu 1: Inicializace UART periferie

což například u programu PuTTY je základní nastavení, takže není nutné aby uživatel něco dalšího nastavoval.

#### 4.2.3 Vykreslování stránek

Stránky jsou grafická reprezentace zvolené funkce. Tyto stránky vykreslují ovládací prvky, data získané periferiemi či varovné zprávy. Každá stránka je vykreslována skrze USART1 periferii skrze jednoduchou funkci (Úryvek kódu 2), která pošle string skrze periferii o dané velikosti. Na této funkci poté staví další funkce, které dokážou sestavovat větší celky. Funkce z úryvku kódu 3 nastavuje, dle pravidel zmíněných výše, kurzor na příslušné souřadnice. Ve funkci se také nachází kontrola, zda se kurzor nachází v rámci rozměrů stránky, které jsou fixně nastavené na  $80 \times 24$ . Tyto rozměry jsou v terminálové aplikaci ohraničeny ASCII symboly. Pro vykreslení textu je využita funkce z úryvku kódu 12, kde k danému textovému řetězci jsou před odesláním přidány ANSI sekvence pro podbarvení pozadí, textu a nebo ztučnění symbolů. Aplikace těchto všech funkcí lze vidět na

Každá stránka má tzv. statickou část, která se po celou dobu nemění. Statická část je vždy vykreslena na začátku vstupu stránky a poté je vždy vykreslena oblužní smyčkou v momentě, kdy příznak `need_frontend_update` je nastaven. V případě nastavení příznaku oblužní smyčka odešle ANSI sekvenci `\033[2J`, která smaže celou stránku a poté vykreslí stránku odpovídající aktuálně zvolené funkci. Příznak lze taky manuálně nastavit odeslá-

```

1  void ansi_send_string(const char* str) {
2      HAL_UART_Transmit(USART1, (uint8_t*)str, strlen(str),
3      HAL_MAX_DELAY);
3  }

```

Úryvek kódu 2: Způsob odeslání stringu UART periferií

```

1 void ansi_set_cursor(const uint8_t row, const uint8_t col) {
2     if (row > TERMINAL_HEIGHT || col > TERMINAL_WIDTH) {
3         Error_Handler();
4         return;
5     }
6
7     char result[CURSOR_BUFF_SIZE];
8     size_t ret = snprintf(result, CURSOR_BUFF_SIZE, "\033[%u;%uH",
9                             row, col);
10
11     if (ret >= sizeof(result)) {
12         Error_Handler();
13     }
14     ansi_send_string(result);
15 }

```

Úryvek kódu 3: Nastavení pozice kurzoru pomocí ANSI escape sekvencí

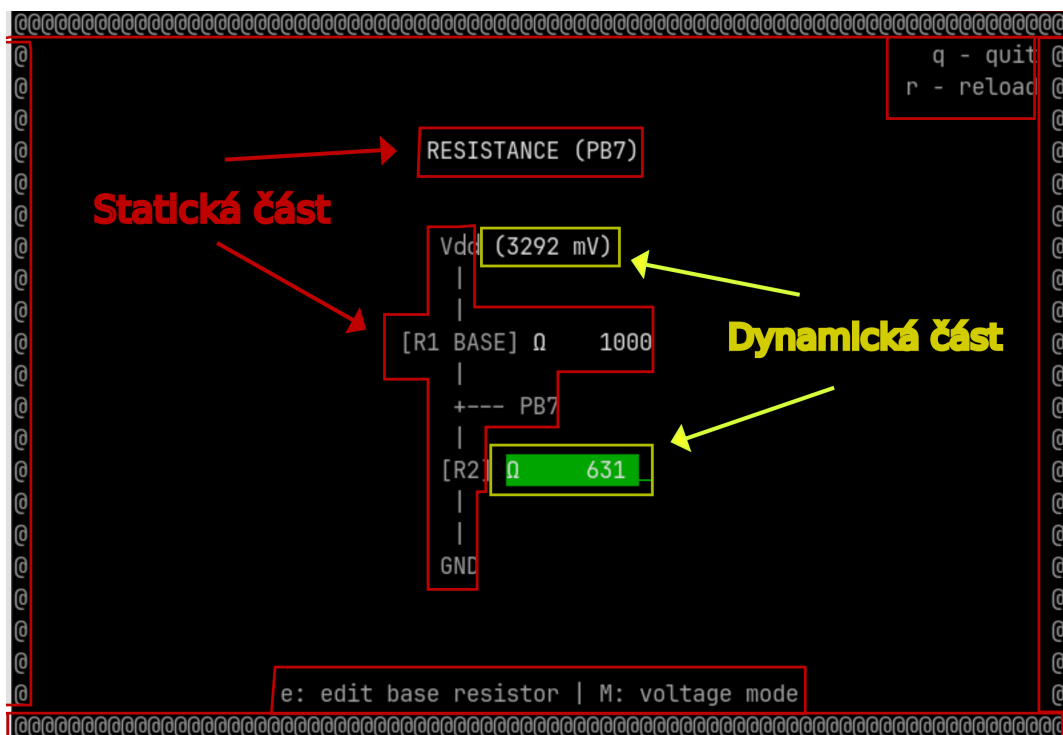
ním symbolu R, který je užitečný v případě, kdy se například vlivem špatného kontaktu vodiče mohou generovat náhodné symboly. Pokud by statická část vykreslovala periodicky, může nastat ke zbytečnému odesílání velkého množství dat skrze UART a to může spomalovat vykreslování. Také může dojít k rychlému blikání kurzoru v terminálové aplikaci, což je nežádoucí.

Tzv. dynamická část stránky se vykresluje každý cyklus obložné smyčky. Do dynamické části spadá vykreslování varovných zpráv, naměřených hodnot a nebo výstupy z periférií. Hodnoty jsou vždy vykresleny s definovaným počtem číslic. Např. napětí ve voltech je vykresleno jako `printf("%4d")`, což vykreslí 4 číslice čísla a pokud má číslo méně než 4 číslice, je jsou pozice nahrazeny mezerou. Při generování upozornění, je řádek, na kterém se text vykresluje, smazán ANSI sekvencí `\033[2K` a v případě potřeby je vykreslen nový text. Na obrázku 25 je znázorněno na příkladu stránky pro měření odporu, že je ASCII ART zapojení, popisky a ohraničení vykresleno staticky a hodnoty, které jsou naměřeny jsou vykreslovány dynamicky.

#### 4.2.4 Ovládání

Ovládat sondu lze pomocí symbolů, odesílané na rozhraní UART skrze terminálovou aplikaci. Na straně MCU jsou symboly přijímány na periférii UART, která při obdržení symbolu vyvolá přerušení. Pro implementaci zpracování symbolu je použit callback `HAL_UART_RxCpltCallback`, který je zavolán při vyvolání přerušení. Callback přečte symbol, který byl přijmut a zkontroluje, zda to není symbol, který je obecný pro všechny stránky<sup>27</sup>. V případě jiných symbolů je nahlédnuto do globální proměnné `current_page` (viz. Úryvek kódu 11), která uchovává informaci, na které stránce se momentálně uživatel nachází a v závislosti na tom, je zvolena funkce pro provedení akce na základě přijatého symbolu. Po provedení příslušné akce je opět zapnuto přerušení pro přijetí znaku na UART periférii (viz. Úryvek kódu 4). Způsob přepínání ovládání v závislosti na stránce ukazuje

<sup>27</sup> Obecně je to symbol R, který slouží znovu vykreslení.



Obrázek 25: Ukázka vykreslování statické a dynamické části stránky

úryvek kódu 13. Způsob převedení symbolu na akci na dané stránce ukazuje příklad ovládání hlavního menu v úryvku 14. V tomto úryvku lze vidět, že pomocí přepínače je ovládání nezávislé na tom, zda uživatel posílá velká nebo malá písmena. Samotný callback nevykresluje stránku nicméně pouze nastavuje příznak `need_frontend_update` aby v dalším obslužném cyklu byla stránka vykreslena.

```

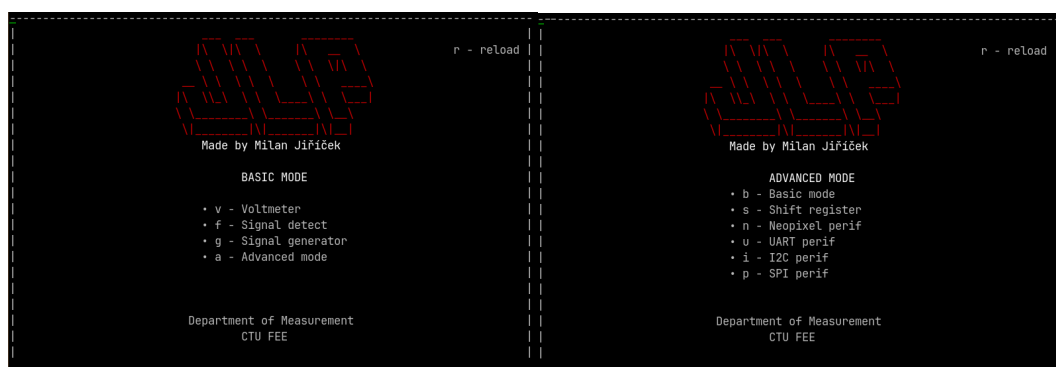
1 void HAL_UART_RxCpltCallback(UART_HandleTypeDef* huart) {
2     if (huart->Instance == UART_INST) {
3         if (global_var.received_char == 'r' ||
4             global_var.received_char == 'R') { // reload
5             ansi_clear_terminal();
6             ansi_render_current_page();
7             global_var.booted = true;
8         } else {
9             get_current_control();
10        }
11
12        HAL_UART_Receive_IT(&UART, &global_var.received_char, 1);
13    }
14 }

```

Úryvek kódu 4: Způsob odeslání stringu UART periferií

#### 4.2.5 Struktura TUI

Po připojení sondy je uživatel přivítán stránkou hlavního menu (obrázek 26). Tato stránka je hlavní rozbočka mezi funkcemi. Po stisknutí příslušné klávesy u funkce, je uživatel přesměrovaný na konkrétní stránku s funkcí. Hlavní menu je rozbočka pro tzv. základní módy, které jsou k dispozici, jak na SOP8 tak na TSSOP20. Při stisku písmene A, se uživatel v případě pouzdra TSSOP20 dostane do pokročilých funkcí, kde se nachází monitorování periférií. Univerzálně platí, že symbolem Q se uživatel dostane vždy to tohoto menu, ze kterého poté může zvolit jinou funkci.



Obrázek 26: TUI hlavní menu základních funkcí

Obrázek 27: TUI hlavní menu pokročilých funkcí

#### 4.3 Princip nastavení periférií

Jelikož pouzdra SOP8 a TSSOP20 mají malý počet výstupů, není možné mít aktivované všechny periférie najednou. Další důvod je například využití časovače TIM2, který je jako jediný 32 bitový a je nutný k více funkcím. Jeden z příkladů je využití časovače TIM2 na PA0, ke čtení frekvence a zároveň využití TIM2 na generování pulzů. Další příklad je kolize periférie USART2 a kanálu PB7, kde je potřeba jiné nastavení pinů.

Sonda obsahuje velké množství nastavení periférií a je velice snadné, ztratit přehled, která periférie je, a která není inicializovaná. Pro vyhnutí se tomuto problému během vývoje bylo zvoleno řešení, kdy při každém přepnutí funkce uživatelem jsou všechny periférie uvedeny do základního stavu a poté podle zvolené funkce jsou nastaveny pouze konkrétní periférie nutné pro danou funkci. Tento způsob minimalizuje výskyt nedefinovaných chování, které během vývoje mohou nastat. Inicializace a deinicializace periférií se řeší během obslužní smyčky, která při nastaveném příznaku `need_perif_update`, nastaví všechny periférie do původního stavu a následně dle zvolené funkce uživatelem je nastavena periférie. Nastavení příznaku je provedeno v případě, že sonda potřebuje po uběhnutém čase změnit nastavení, nebo pokud uživatel pomocí vstupu z UARTu vyvolá žádost o přepnutí funkce.

#### 4.4 Implementace měření s ADC

##### 4.4.1 Měření napětí a logických úrovní

Napětí je měřeno pomocí AD převodníku na dvou kanálech v případě SOP8 a na třech v případě TSSOP20 (+ kanál s referenčním napětím). Uživatel skrze TUI může vypnout či

zapnout měření na určitém kanále. Jak bylo zmíněno v kapitole 2.4, ADC průběžně měří 32 vzorků za 250 ms (128 Hz). Každé měření kanálu je nastaveno na 160 cyklů, což je maximální přesnost měření.

K časování měření je využito časovače TIM3, který po uplynutí času vyvolá přerušení a je naměřena hodnota ADC. Časovač má nastavenou předděličku na  $64000 - 1$ , což nastaví frekvenci časovače z 64 MHz na 1 KHz (neboli časovač inkrementuje hodnotu každou 1 ms). Jelikož ADC běží na frekvenci 32 MHz a změření jednoho kanálu trvá 160 cyklů, změření jednoho kanálu trvá  $\sim 5 \mu\text{s}$ . Protože frekvence měření je 128 Hz, můžeme tuto hodnotu zanedbat a nastavit periodu časovače na  $7 - 1$ .

Při přetečení časovače je vyvoláno přerušení, které zavolá callback z ukázky kódu 5. Funkce zastaví časovač, a sekvenčně začne měřit poměrnou hodnotu mezi napětím na kanálu a  $V_{\text{dd}}$ . Po dokončení konverze je tato hodnota uložena do dynamicky alokovaného pole `voltage_measures` o velikosti  $64 \times$  počet aktivních kanálů<sup>28</sup>. Toto pole se chová cyklicky, tzn. při překročení počtu prvků se začne plnit od začátku. Po změření všech kanálů je resetován a nastartován časovač.

```

1  void adc_measure_callback(adc_vars_t* adc_perif) {
2      HAL_TIM_Base_Stop_IT(adc_perif->timer);
3
4      HAL_ADC_Start(adc_perif->hadc);
5      for (uint8_t i = 0; i < adc_perif->n_active_channels; ++i) {
6          HAL_ADC_PollForConversion(adc_perif->hadc, ADC_DELAY);
7          adc_perif->voltage_measures[adc_perif->measures_index++] =
            HAL_ADC_GetValue(adc_perif->hadc);
8          if (adc_perif->measures_index >=
9              adc_perif->n_active_channels * CHANNEL_NUM_SAMPLES) {
10             adc_perif->measures_index = 0;
11         }
12     }
13
14     HAL_ADC_Stop(adc_perif->hadc);
15     __HAL_TIM_SET_COUNTER(adc_perif->timer, 0);
16     HAL_TIM_Base_Start_IT(adc_perif->timer);
17 }

```

Úryvek kódu 5: Naměření vzorku z ADC (ukázka bez ošetření)

Každých 250 ms obslužní smyčka vezme naměřené vzorky z `voltage_measures` a udělá aritmetický průměr každého kanálu. Po provedení průměru je z poměrné hodnoty vypočítáno referenční napětí a napětí každého kanálu. K výpočtům napětí je, na základě vztahů z kapitoly 2.3.1.1, využito makro z HAL knihovny (Úryvek kódu 16). Toto napětí je poté zobrazeno dynamicky na stránce. U každého kanálu je také vyhodnocené zda naměřená hodnota napětí odpovídá log. „1“, log. „0“ nebo se napětí nachází v nedefinované oblasti<sup>29</sup>.

<sup>28</sup>ADC při nastavení více kanálů sekvenčně prochází všechny kanály dokola.

<sup>29</sup>Podrobnosti je možné najít v manuálu použití.





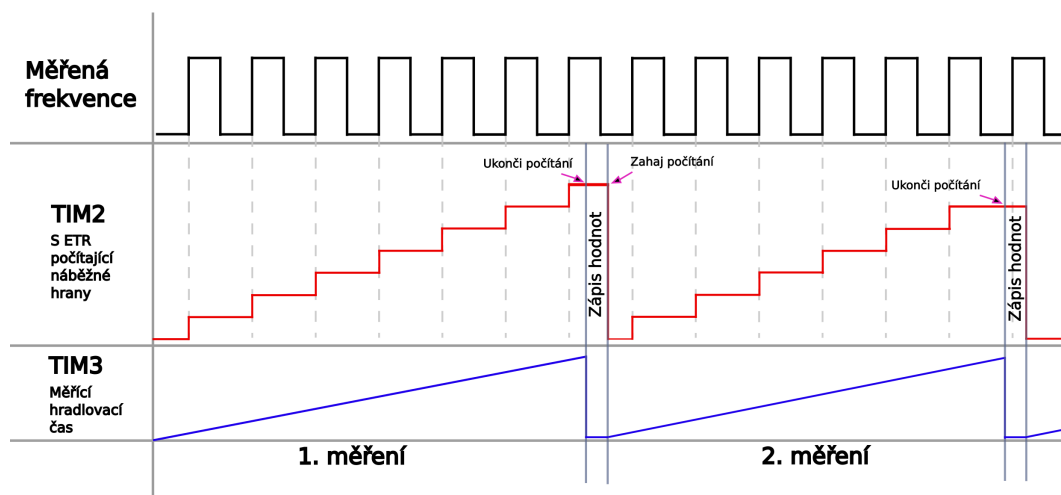


Při vysokých frekvencích může nastat problém, kdy bude záležet i na rozdílu mezi zapnutím TIM2 a TIM3. Tyto dva časovače za normálních okolností musí být zahájeny sekvenčně a to vede k tomu, že buď bude nepatrně delší hradlovací čas a bude napočítáno více pulsů než by mělo. Design časovačů nicméně poskytuje řešení, kdy časovač může vyvolávat trigger a jiný časovač může na tyto trigger reagovat. V případě sondy byl TIM3 nastaven jako master timer, který při spuštění vyvolá trigger. TIM3 byl nastaven jako slave timer. Slave timer čeká, až dostane trigger a v momentě, kdy trigger dostane, začne počítat. Toto nastavení je ukázáno v úryvku kódu 15 a 18.

Po změření pulsů se provede výpočet frekvence. Zde nastává problém, pro získání frekvence je nutné dělit počet pulzů, hradlovým časem. Nicméně pro MCU je operace dělení poměrně drahá. Jelikož všechny hradlovací časy (kromě 1000 ms), jsou pod 1 sekundu, dojde k dělení desetinným číslem. Toto desetinné číslo je ale možné převést na zlomek a po úpravě vznikne vztah, ve kterém eliminujeme dělení. Rovnice 15 demonstruje příklad na 500 ms.

$$f_{\text{gate}} = \frac{N}{T_{\text{gate}}} = \frac{N}{0.5} = \frac{N}{\frac{1}{2}} = \frac{N}{1} \times \frac{2}{1} = 2N \quad (15)$$

Měření touto metodou bylo otestováno měření nižších desítek MHz a naměřená odchylka od původní hodnoty byla  $\sim 0.16\%$ . Což pravděpodobně bude způsobeno tím, že sonda nevyužívá externího krystalu ale interního oscilačního obvodu [2], tak může být lehká odchylka od reference. Při vyšších frekvencích zde můžou hrát roli i režie implementovaná pro časovače.



Obrázek 31: Signály při měření frekvence hradlováním

#### 4.5.2 Měření reciproční frekvence

Při měření pomocí reciproční frekvence je využito časovače TIM2. Časovač má nastaveny celkově 2 kanály do módu input capture. Input capture kanálu, který při hraně na vstupu uloží aktuální hodnotu časovače do registru a následně metodou DMA do paměti. Důvod inicializace dvou kanálů místo jednoho je ten, že každý kanál sice monitoruje stejný pin, ale jeden reaguje na náběžnou a druhá na sestupnou. Kanál sice umí detekovat obě najednou, nicméně pro funkci měření je nutné rozpoznat, která hrana je náběžná a

která je sestupná. U frekvence je vždy změřena náběžná hrana, poté sestupná hrana a poté opět náběžná. Důvod proč jsou měřena i sestupná hrana je určení střídy v případě PWM signálu. Pokud je naměřena tato posloupnost, je možné vypočítat reciproční frekvenci, střídu a šířku pulzů.

```
1 void detector_compute_freq_measures(sig_detector_t* detector) {
2     uint32_t* edge_times = detector->edge_times;
3
4     // Získání rozdílu mezi hranami
5     uint32_t high_delta =
6         edge_times[DET_EDGE2_FALL] - edge_times[DET_EDGE1_RISE];
7
8     uint32_t low_delta =
9         edge_times[DET_EDGE3_RISE] - edge_times[DET_EDGE2_FALL];
10
11     // Výpočet času pulzu
12     detector->widths[DET_LOW_WIDTH] = (low_delta) /
13         PROCESSOR_FREQ_IN_MHZ;
14     detector->widths[DET_HIGH_WIDTH] = (high_delta) /
15         PROCESSOR_FREQ_IN_MHZ;
16
17     uint64_t period =
18         (detector->widths[DET_LOW_WIDTH] + detector->
19             widths[DET_HIGH_WIDTH]);
20
21     // ochrana před dělením nulou
22     if (period > 0) {
23         detector->rec_frequency = 1000000 / period; // v ms
24         detector->pwm_duty =
25             ((uint64_t)detector->widths[DET_HIGH_WIDTH] * 100) /
26             period;
27     } else {
28         detector->rec_frequency = 0;
29         detector->pwm_duty = 0;
30     }
31 }
```

Úryvek kódu 6: Funkce pro výpočet veličin na základě recipročního měření

### 4.5.3 Odchytávání pulzů



Obrázek 32: TUI odchytávání pulzů

Odchytávání pulzů je podfunkce na stránce měření frekvence. Při detekci náběžné nebo sestupné hrany (dle nastavení uživatele) je nastaven příznak, který je následně vykreslen na terminál. Uživatel tento příznak poté může smazat. K detekci pulzů je využito nastavení periférií jako při recipročním měření frekvence. Časovač, který je na vstupu nastaven jako input capture ukládá do registru hodnotu a je vyvoláno přerušení. Během přerušení je zavolána funkce, která zkontroluje, zda je to odpovídající hrana a pokud ano, je nastaven příznak. K odchytávání pulzů by mohlo být využito EXTI callbacku, nicméně to by znamenalo jiné nastavení periférií a zkomplikování sondy z hlediska vývoje.

### 4.6 Implementace generování pulzů

Generování pulzů **TODO: dodelat**

## ■ 4.7 Implementace nastavování úrovní

[illegible]

Obrázek 33: TUI nastavování úrovní

Nastavování logických úrovní funguje celkem na 4 kanálech, které je možné skrze uživatelské rozhraní vypnout nebo zapnout dle potřeby. Každý pin je inicializován skrze STM32 HAL strukturu `GPIO_InitTypeDef`, kde je nastaven `GPIO_MODE_OUTPUT_PP`. Tento mód nastaví push pull na pin a lze ho tak ovládat skrze stisk tlačítka. Obrázek 33 ukazuje vizualizaci stránky pro funkci nastavování úrovní.

## ■ 4.8 Implementace diagnostiky posuvného registru

[illegible]

Obrázek 34: Signály při měření frekvence hradlováním

Funkce diagnostiky posuvného registru nabízí možnost nastavení jednotlivých bitů a následné odesílání dat do registru. Pro naplnění dat do posuvného registru je PA7 připojen na jako hodinový signál registru a PA0 jako datový pin do posuvného registru. Sonda umí posílat všech 8 bitů najednou a nebo je možné posílat bity postupně manuálně. Doba odesílání jednoho bitu je 200 ms. Tento čas nabízí možnost vizuální kontroly diagnostikovaného obvodu během odesílání. Úryvek kódu 19 ukazuje způsob odeslání jednoho bitu do posuvného registru. Funkce nabízí i kompatibilitu s posuvnými registry SNx4HC595, která na základě signálu RCLK převede data z registru na paralelní výstupy [30].

## ■ 4.9 Implementace diagnostiky Neopixelu

**TODO: dopsat**

#### ■ 4.10 Implementace diagnostiky UART

**TODO: dopsat**

## ■ 4.11 Implementace diagnostiky I2C

**TODO: dopsat**

## ■ 4.12 Implementace diagnostiky SPI

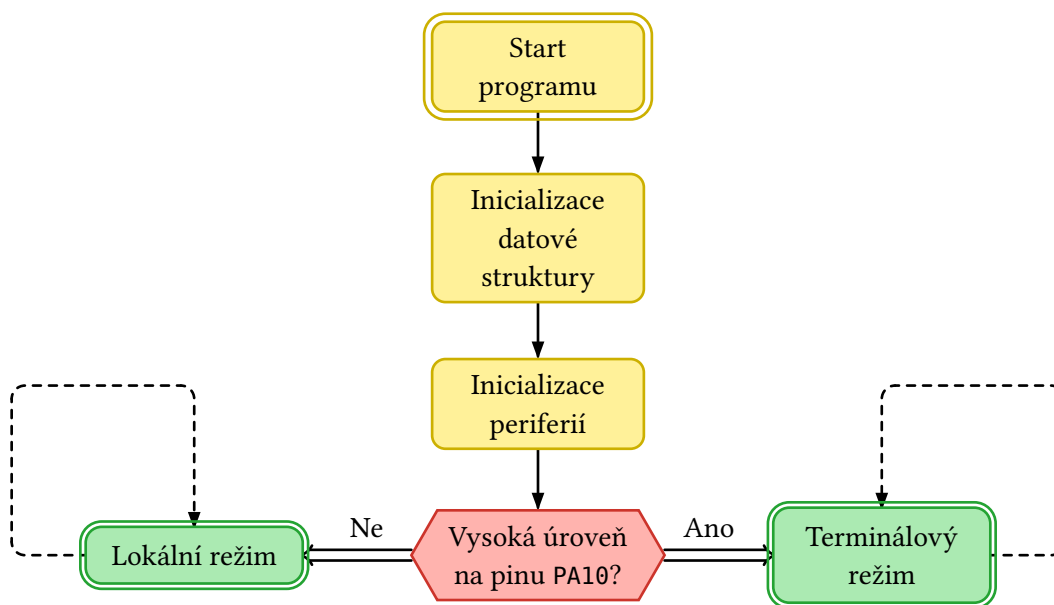
**TODO: dopsat**

# Návrh lokálního režimu STM32

## 5.1 Logika nastavení režimů

Při připojení MCU k napájení, dojde k bootování a pokud na pinu PA14-B00T0 je nízká logická úroveň, MCU načte program uložený ve FLASH paměti, který poté spustí. Při spuštění firmwaru sondy, proběhne inicializace globalních struktur, které jsou nezbytné pro chod celé sondy. Globální struktura poskytuje potřebná data různým periferiím, které například periferie využívají při přerušeních. Po inicializaci struktury, která je deklarována v úryvku kódu 11, dojde k inicializaci všech potřebných periferií, které dále jsou rozebrány v kapitole 4.3.

Po inicializaci periferií, sonda zkontroluje stav pinu PA10 na kterém se nachází **Rx** USART1 periferie. Jak bylo zmíněno v kapitole 2.5.1, pokud jsou dvě zařízení propojeny a neprobíhá žádná komunikace, tak se na vodičích od Tx do Rx nachází logicky vysoká úroveň. Takto sonda dokáže určit, zda je sonda připojena UART/USB převodníkem k PC, nebo je sonda pouze napájena např. skrze jiné MCU. Obrázek 21 a Obrázek 23 má v zapojení, na pinu PA10, rezistor o velikosti  $10\text{ K}\Omega$ , který při nepřipojeném vodiči uzemní Rx. Obrázek 35 prezentuje způsob inicializace. Po zvolení režimu, zařízení přejde do různého nastavení, které jsou nutné pro fungování režimu. Opětovné nastavení režimu opět dojde při dalším bootu sondy, protože jednotlivé režimy běží v nekonečném cyklu dokud je zařízení napájeno.

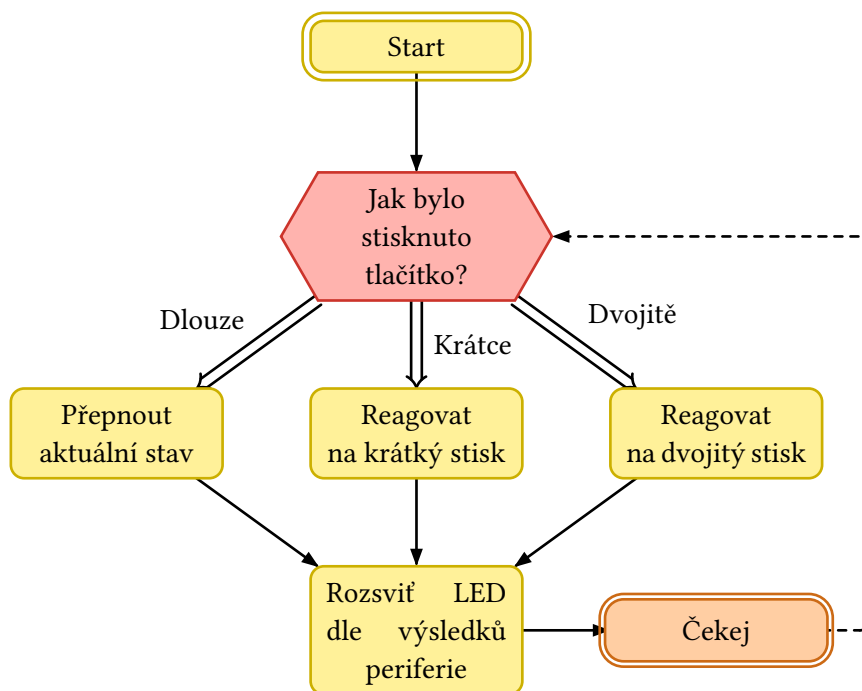


Obrázek 35: Diagram nazpůsobu načítání režimů



## ■ 5.2 Ovládání lokálního režimu

Jak kapitola 2.2 zmiňuje, lokální mód je provozní režim, v němž zařízení nekomunikuje s externím počítačem a veškerá interakce s uživatelem probíhá výhradně prostřednictvím tlačítka a RGB LED diody. Tento režim je vhodný pro prvotní rychlou diagnostiku logického obvodu. Režim se ovládá skrze tlačítka a informace jsou zobrazovány prostřednictvím RGB LED WS2812. Lokální režim běží ve smyčce, kdy se periodicky kontrolují změny a uživatelské vstupy. Způsob zobrazování barev na WS2812 je popsán v kapitole 4.9.



Obrázek 36: Diagram způsobu reakce na vstupy uživatele v lokálním módu

Při zmáčknutí tlačítka dojde k přerušení a je zavolána funkce z úryvku kódu 7, kde je zaznamenán čas zmáčknutí. Po uvolnění tlačítka dojde k přerušení náběžné hrany, a je zavolána funkce z úryvku kódu 8, kde je zaznamenán čas uvolnění a následně funkce `extern_button_check_press`, z úryvku kódu 20, porovná časy s referencí a určí, o který stisk se jedná. Funkce nastaví příznak v globální struktuře a v hlavní smyčce se poté provede příslušná akce. Tato metoda dokáže eliminovat nechtěné kmity tlačítka při stisku a uvolnění, kdy MCU zaznamenává velký počet hran v krátký moment (bouncing tlačítka).

Zařízení skrze tlačítko rozpozná tři interakce: *krátký stisk* slouží k přepínání logických úrovních na určitém kanálu, *dvojitý stisk* umožňuje cyklické přepínání mezi měřicími kanály, zatímco *dlouhý stisk* (nad 500 ms) zahájí změnu stavu. Při stisku tlačítka je signalizováno změnou barvy LED na 1 sekundu, kde barva určuje k jaké změně došlo. Tyto barvy jsou definovány v uživatelském manuálu přiložený k této práci.

## ■ 5.3 Funkce lokálního režimu

Lokální režim má celkově 4 různé stavy, pro rychlou diagnostiku logického obvodu. Tyto funkce vychází ze standartních schopností komerčních logických sond. Stavy jsou přepínány dlouhým stiskem.

```

1 void HAL_GPIO_EXTI_Falling_Callback(uint16_t GPIO_Pin) {
2     // Pokud došlo k přerušení na pinu tlačítka
3     if (GPIO_Pin == global_var.button_data->pin) {
4         button_data_t* button_data = global_var.button_data;
5         // zaznamenej čas, pokud tlačítko ještě nebylo stisknuto
6         if (!button_data->is_pressed) {
7             button_data->rise_edge_time = HAL_GetTick();
8             button_data->is_pressed = true;
9         }
10    }
11 }

```

Úryvek kódu 7: Přerušení zavolané při zmáčknutí tlačítka

```

1 void HAL_GPIO_EXTI_Rising_Callback(uint16_t GPIO_Pin) {
2     // Pokud došlo k přerušení na pinu tlačítka
3     if (GPIO_Pin == global_var.button_data->pin) {
4         button_data_t* button_data = global_var.button_data;
5
6         if (button_data->is_pressed) {
7             // zaznamenej čas puštění tlačítka a zkontroluj
8             // délku stisknutí
9             button_data->fall_edge_time = HAL_GetTick();
10            extern_button_check_press(button_data);
11            button_data->is_pressed = false;
12        }
13    }
14 }

```

Úryvek kódu 8: Přerušení zavolané při uvolnění tlačítka

### 5.3.1 Funkce logické sondy

Při zapnutí zařízení se vždy nastaví stav **logické sondy**. Tento stav čte na příslušném kanálu periodicky, jaká logická úroveň je naměřena AD převodníkem. Jsou využity piny PB7 a PA0. Logickou úroveň je možné číst také jako logickou úroveň na GPIO, nicméně to neumožňuje rozlišit stav, kdy logická úroveň je v neurčité oblasti. Pomocí měření napětí na pinu lze zjistit zda napětí odpovídá CMOS logice či nikoliv. Pokud na pinu se nachází vysoká úroveň, LED se rozsvítí zeleně, v případě nízké úrovně se rozsvítí červená a pokud je napětí v neurčité oblasti, LED nesvítí. Tlačítkem poté lze přepínat mezi jednotlivými kanály. Tento stav vychází z terminálové funkce pro měření napětí a následné zjištění logiky. Tento stav je vhodný pro rychlé zjištění úrovně na vodiči při diagnostice obvodu.

### 5.3.2 Funkce logických úrovní

Funkce logických úrovní je stav, který po stisku tlačítka změní logickou úroveň na opačnou, tzn. pin je nastaven jako push-pull a pokud je na pinu nízká úroveň, změní

se na vysokou a naopak. Tato úroveň lze nezávisle měnit na pinech PB7 a PA0. RGB led poté barvou reprezentuje, v jakém stavu je pin nastaven. Při vstoupení do tohoto stavu uživatelem, jsou piny inicializovány funkcí z úryvku kódu 21. Tento stav je vhodný pro diagnostiku obvodu čítače, nebo klopných obvodů.

### 5.3.3 Funkce pulzování

Funkce pulzování je stav, kdy po stisku tlačítka je zapnuto na pinu PA0 signál o frekvenci 1 Hz. Při zapnutí signálu na výstupu se rozsvítí RGB LED, aby si uživatel byl vědom aktivace. Po opětovném stisku tlačítka je vysílání signálu vypnuto. Takto nízká frekvence poskytuje možnost debugovat obvod, kde se například nachází posuvné registry nebo čítače. Uživatel například může vyzkoušet čítač, který zobrazuje čísla na sedmisegmentovém displeji a kontrolovat, zda se číslice mění korektně. Při vyšších frekvencích by toto znamenalo problém pro uživatele.

```
1 void local_mode_pulse(void) {  
2     if (global_var.signal_generator->local_pulsing) {  
3         HAL_GPIO_TogglePin(GPIOA, GPIO_PIN_0);  
4     } else {  
5         HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_0, GPIO_PIN_RESET);  
6         neopixel_send_color(global_var.visual_output, NEOPIXEL_NONE);  
7     }  
8 }
```

Úryvek kódu 9: Lokální režim pulzování ukázka obslužné smyčky

### 5.3.4 Funkce detekce pulzů

Detekce pulzu je stav, kdy je sledován pin PA0 a detekována náběžná nebo sestupná hrana (detekce náběžné nebo sestupné hrany lze nastavit pomocí tlačítka). Pokud sonda detekuje hranu, rozsvítí RGB LED na 1 sekundu. Tento stav je vhodný pro detekci rychlého pulzu bez nutnosti použití osciloskopu. Sonda totiž detekuje velice krátkou hranu, ale uživatel ví, že pulz v obvodu byl, protože LED tento signál prodloužila.

Detekce funguje za pomoci časovače TIM2, který má nastavený kanál na režim input capture. Tento režim při detekci hrany, uloží stav časovače do registru a je vyvoláno přerušení. Přerušení poté nastaví pomocný příznak, který bude zpracován při dalším cyklu smyčky. Obslužná smyčka poté rozsvítí LED. Důvod zvolení časovače místo přerušení EXTI, které vyvolá přerušení při hraně na vstupu, je ten, že tato metoda vychází z měření frekvencí v terminálovém režimu a tento způsob šetří paměťové zdroje, které jsou na tomto MCU velice omezené.

```

1  void HAL_TIM_IC_CaptureCallback(TIM_HandleTypeDef* htim) {
2      if (htim->Instance != TIM2) {
3          return;
4      }
5
6      _Bool is_channel_1 = htim->Channel == HAL_TIM_ACTIVE_CHANNEL_1;
7      _Bool is_channel_2 = htim->Channel == HAL_TIM_ACTIVE_CHANNEL_2;
8      _Bool is_rise_edge_mode =
9          global_var.detector->mode == DETECTOR_MODE_RISE_EDGE
10     _Bool is_rise_edge_mode =
11         global_var.detector->mode == DETECTOR_MODE_FALL_EDGE;
12
13     if ((is_channel_1 && is_rise_edge_mode) ||
14         (is_channel_2 && is_fall_edge_mode)) {
15         detector->one_pulse_found = true;
16     }
17 }

```

Úryvek kódu 10: Zachytávání pulzů v lokálním režimu

## Kapitola 6

# Návrh omezené verze na RPI Pico

Návrh omezené verze na Raspberry Pi Pico **TODO: dopsat**

**Kapitola 7**

# **Závěr a zhodnocení**

- [1] STMicroelectronics, „STM32G0-ADC: Product training“. [Online]. Dostupné z: [https://www.st.com/resource/en/product\\_training/STM32G0-Analog-ADC-ADC.pdf](https://www.st.com/resource/en/product_training/STM32G0-Analog-ADC-ADC.pdf)
- [2] STMicroelectronics, „STM32G0x1 Reference manual“. [Online]. Dostupné z: [https://www.st.com/resource/en/reference\\_manual/rm0444-stm32g0x1-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0444-stm32g0x1-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf)
- [3] M. Hasan, „Understanding STM32 HAL Library Fundamentals“. [Online]. Dostupné z: <https://embeddedthere.com/understanding-stm32-hal-library-fundamentals/>
- [4] Joseph Wu - TI, „A Basic Guide to I2C“. [Online]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/sbaa565/sbaa565.pdf>
- [5] W. Commons, „File:SPI timing diagram msbfirst.svg — Wikimedia Commons, the free media repository“. [Online]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:SPI\\_timing\\_diagram\\_msbfirst.svg&oldid=719502258](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:SPI_timing_diagram_msbfirst.svg&oldid=719502258)
- [6] Worldsemi, „WS2812D-F5-1261 Intelligent control LED integrated lightsource“. [Online]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/bd6b355a8705d46515a8ada0d153187b/WS2812D-F5-L.pdf>
- [7] doc. Ing. Jan Fischer, CSc., „ETC22 Přednáška 2“. [Online]. Dostupné z: [https://embedded.fel.cvut.cz/sites/default/files/kurzy/ETC22/Prednasky\\_ETC22\\_E/ETC22E\\_2\\_pr\\_2024\\_10\\_7\\_G030\\_Osciloskop.pdf](https://embedded.fel.cvut.cz/sites/default/files/kurzy/ETC22/Prednasky_ETC22_E/ETC22E_2_pr_2024_10_7_G030_Osciloskop.pdf)
- [8] STMicroelectronics, „STM32G030x6/x8“. [Online]. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/2882477.pdf>
- [9] STMicroelectronics, „STM32G0 Series“. [Online]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32g0-series.html>
- [10] NI, „What is a phase-locked loop (PLL)?“. [Online]. Dostupné z: <https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA00Z000000P9T3SAK&l=cs-CZ>
- [11] iter, „Calibrating STM32 ADC (VREFINT)“. [Online]. Dostupné z: <https://stackoverflow.com/questions/58328342/calibrating-stm32-adc-vrefint>
- [12] M. Dudka, „STM32 Timery“. [Online]. Dostupné z: [http://www.elektromys.eu/clanky/stm\\_timer1/clanek.html](http://www.elektromys.eu/clanky/stm_timer1/clanek.html)
- [13] STMicroelectronics, „STM32CubeMX“. [Online]. Dostupné z: [https://www.st.com/content/st\\_com/en/stm32cubemx.html](https://www.st.com/content/st_com/en/stm32cubemx.html)
- [14] M. Hasan, „Understanding STM32 HAL Library Fundamentals“. [Online]. Dostupné z: <https://embeddedthere.com/understanding-stm32-hal-library-fundamentals/>
- [15] A. Limited, „What is CMSIS?“. [Online]. Dostupné z: <https://www.keil.arm.com/cmsis>
- [16] T. R. Foundation, [Online]. Dostupné z: <https://datasheets.raspberrypi.com/pico/pico-datasheet.pdf>
- [17] H. Nazeran, „Reducing Power Line Interference in Digitised Electromyogram Recordings by Spectrum Interpolation“, *Medical and Biological Engineering and Computing*, 2004.
- [18] All About Circuits, „Logic Signal Voltage Levels“. [Online]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/digital/chpt-3/logic-signal-voltage-levels/>
- [19] R. Nave, [Online]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/voldiv.html>
- [20] G. A. Center, [Online]. Dostupné z: <https://germanna.edu/sites/default/files/2022-03/Ohms%20and%20Kirchoffs%20Laws.pdf>
- [21] G. Wright, „Definition USART (universal synchronous/asynchronous receiver/transmitter)“. [Online]. Dostupné z: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/USART-Universal-Synchronous-Asynchronous-Receiver-Transmitter>
- [22] U. Wisconsin–Madison, „Uart Basics“. [Online]. Dostupné z: <https://ece353.engr.wisc.edu/serial-interfaces/uart-basics/>
- [23] V. H. Adams, „Universal Asynchronous Receiver Transmitter“. [Online]. Dostupné z: <https://vanhunteradams.com/Protocols/UART/UART.html>
- [24] PIYU DHAKER ANALOG DEVICES, „INTRODUCTION TO SPI INTERFACE“. [Online]. Dostupné z: <https://www.analog.com/EN/RESOURCES/ANALOG-DIALOGUE/ARTICLES/INTRODUCTION-TO-SPI-INTERFACE.HTML>

- [25] HOLTEK, „HT75XX-1 100mA Low Power LDO". [Online]. Dostupné z: [https://img.gme.cz/files/eshop\\_data/eshop\\_data/3/330-201/dsh.330-201.1.pdf](https://img.gme.cz/files/eshop_data/eshop_data/3/330-201/dsh.330-201.1.pdf)
- [26] Autodesk, „Eagle". [Online]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/eagle/overview>
- [27] Albert van Dalen, „addressable LED rings NeoPixel WS2812B-2020". [Online]. Dostupné z: <https://github.com/avandalen/Eagle-library-addressable-LED-rings>
- [28] [Online]. Dostupné z: <https://enxstandards.web.illinois.edu/standard/ansi-x3-4/>
- [29] fnky, „ANSI Escape Sequences". [Online]. Dostupné z: <https://gist.github.com/fnky/458719343aabd01cfb17a3a4f7296797>
- [30] T. Instruments, „SNX4HC595 8-bit shift registers with 3-state output ". [Online]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74hc595.pdf>



## Dodatečné úryvky kódu

```
1  typedef struct { C
2      _Bool booted; // true pokud uživatel připojil seriovou komunikací
3      dev_setup_t device_setup; // Lokální/Terminálový mód
4      dev_state_t device_state; // měřicí mód (napětí, odpor atd.)
5      local_state_t local_state; // lokální režim měřicí mód
6      local_substate_t local_substate; // lokální režim měřený kanál
7      unsigned char received_char; // Znak jako vstup
8      _Bool need_frontend_update; // příznak aktualizace TUI
9      _Bool need_perif_update; // příznak nastavení periférií
10     ansi_page_type_t current_page; // aktuální frontend stránka
11
12     // struktury pro základní měření
13     adc_vars_t* adc_vars;
14     sig_detector_t* signal_detector;
15     sig_generator_t* signal_generator;
16
17     // struktury pro vstupy/výstupy uživatele
18     visual_output_t* visual_output;
19     button_data_t* button_data;
20
21     // struktury pro pokročilé funkce
22     neopixel_measure_t* adv_neopixel_measure;
23     shift_register_t* adv_shift_register;
24     uart_perif_t* uart_perif;
25     i2c_perif_t* i2c_perif;
26     spi_perif_t* spi_perif;
27 } global_vars_t;
```

Úryvek kódu 11: Struktura globálních proměnných

```

1 void ansi_send_text(const char* str,
2                     const ansi_text_config_t* text_conf) {
3     char buffer[TEXT_SEND_BUFF_SIZE];
4     // offset stringu pro přidávání textu
5     size_t offset = 0;
6     // Při nastavení barvy přidej ansi sekvenci pro zbarvení
7     if (strlen(text_conf->bg_color) != 0) {
8         offset += snprintf(buffer + offset, sizeof(buffer) - offset,
9                             "%s",
10                             text_conf->bg_color);
11     }
12     // Při nastavení barvy přidej ansi sekvenci pro zbarvení
13     if (strlen(text_conf->color) != 0) {
14         offset += snprintf(buffer + offset, sizeof(buffer) - offset,
15                             "%s",
16                             text_conf->color);
17     }
18     // Nastav text tučně
19     if (text_conf->bold) {
20         offset +=
21             snprintf(buffer + offset, sizeof(buffer) - offset, "%s",
22                     BOLD_TEXT);
23     }
24     offset += snprintf(buffer + offset, sizeof(buffer) - offset,
25                         "%s", str);
26     // Kontrola velikosti bufferu
27     if (offset >= sizeof(buffer)) {
28         PrintError("Buffer overflow in text");
29         return;
30     }
31     ansi_send_string(buffer);
32     // Escapování všech nastavení na konci stringu
33     ansi_clear_format();
34 }

```

Úryvek kódu 12: Funkce pro vykreslení barevného textu

```

1 void get_current_control(void) {
2     char received_char = global_var.received_char;
3     switch (global_var.current_page) {
4         case ANSI_PAGE_MAIN:
5             control_main_page();
6             break;
7         case ANSI_PAGE_MAIN_ADVANCED:
8             control_advanced_main_page();
9             break;
10        case ANSI_PAGE_VOLTAGE_MEASURE:
11            control_voltage_page(received_char);
12            break;
13        case ANSI_PAGE_FREQUENCY_READER:
14            control_frequency_reader_page(received_char,
15            global_var.signal_detector);
16            break;
17        case ANSI_PAGE_IMPULSE_GENERATOR:
18            control_impulse_generator_page(received_char);
19            break;
20        case ANSI_PAGE_LEVELS:
21            control_levels_page(received_char);
22            break;
23        case ANSI_PAGE_NEOPIXEL_MEASURE:
24            control_neopixel_measure_page(received_char);
25            break;
26        case ANSI_PAGE_SHIFT_REGISTER:
27            control_shift_register_page(received_char);
28            break;
29        case ANSI_PAGE_UART:
30            control_uart_page(received_char);
31            break;
32        case ANSI_PAGE_I2C:
33            control_i2c_page(received_char);
34            break;
35        case ANSI_PAGE_SPI:
36            control_spi_page(received_char);
37            break;
38        default:
39            control_main_page();
40    }
41 }

```

Úryvek kódu 13: Ovládání sondy skrze symboly

```

1  void control_main_page(void) {
2  switch (global_var.received_char) {
3      case 'v':
4      case 'V':
5          ansi_set_current_page(ANSI_PAGE_VOLTAGE_MEASURE);
6          dev_mode_change_mode(DEV_STATE_VOLTMETER);
7          break;
8      case 'f':
9      case 'F':
10         ansi_set_current_page(ANSI_PAGE_FREQUENCY_READER);
11         dev_mode_change_mode(DEV_STATE_FREQUENCY_READ);
12         break;
13     case 'g':
14     case 'G':
15         ansi_set_current_page(ANSI_PAGE_IMPULSE_GENERATOR);
16         dev_mode_change_mode(DEV_STATE_PULSE_GEN);
17         break;
18     case 'l':
19     case 'L':
20         if (NOT_SOP) {
21             ansi_set_current_page(ANSI_PAGE_LEVELS);
22             dev_mode_change_mode(DEV_STATE_LEVEL);
23         }
24         break;
25     case 'a':
26     case 'A':
27         if (NOT_SOP) {
28             ansi_set_current_page(ANSI_PAGE_MAIN_ADVANCED);
29             dev_mode_change_mode(DEV_STATE_NONE);
30         }
31         break;
32     }
33 }

```

Úryvek kódu 14: Ovládání menu

```

1  static void MX_TIM3_Init(void) {
2      TIM_ClockConfigTypeDef sClockSourceConfig = {0};
3      TIM_MasterConfigTypeDef sMasterConfig = {0};
4
5      htim3.Instance = TIM3;
6      htim3.Init.Prescaler = 64000 - 1;
7      htim3.Init.CounterMode = TIM_COUNTERMODE_UP;
8      htim3.Init.Period = 1000 - 1; // základní nastavení které bude
          změněno
9      htim3.Init.ClockDivision = TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
10     htim3.Init.AutoReloadPreload = TIM_AUTORELOAD_PRELOAD_ENABLE;
11     if (HAL_TIM_Base_Init(&htim3) != HAL_OK) {
12         Error_Handler();
13     }
14     sClockSourceConfig.ClockSource = TIM_CLOCKSOURCE_INTERNAL;
15     if (HAL_TIM_ConfigClockSource(&htim3, &sClockSourceConfig) !=
        HAL_OK) {
16         Error_Handler();
17     }
18     if (HAL_TIM_OnePulse_Init(&htim3, TIM_OPMODE_SINGLE) != HAL_OK) {
19         Error_Handler(); // Časovač se sám zastaví po přetečení
20     }
21     sMasterConfig.MasterOutputTrigger = TIM_TRGO_ENABLE; // trigger
        pro slave časovač
22     sMasterConfig.MasterSlaveMode = TIM_MASTERSLAVEMODE_DISABLE;
23     if (HAL_TIMEx_MasterConfigSynchronization(&htim3,
        &sMasterConfig) !=
24         HAL_OK) {
25         Error_Handler();
26     }
27 }

```

Úryvek kódu 15: Inicializace TIM3 jako časovač

```

1  uint32_t adc_get_voltage(const uint32_t v_ref,
2                          const uint32_t measure) {
3      return __HAL_ADC_CALC_DATA_TO_VOLTAGE(v_ref, measure,
4                                             ADC_RESOLUTION_12B);
5  }
6
7  uint32_t adc_get_v_ref( const uint32_t raw_voltage_value) {
8      return __HAL_ADC_CALC_VREFANALOG_VOLTAGE(raw_voltage_value,
9                                                ADC_RESOLUTION_12B);
10 }

```

Úryvek kódu 16: Využití HAL maker pro převod poměrových hodnot na napětí

```

1  uint32_t ref_voltage = adc_get_v_ref(adc_ch->avg_voltage[0]);
2  uint32_t measured_voltage = adc_get_voltage(ref_voltage,
3                                              adc_ch->avg_voltage[1]);
4  uint32_t resistance = (adc_ch->base_resistor * measured_voltage)
5                      / (ref_voltage - measured_voltage);

```

Úryvek kódu 17: Způsob výpočtu odporu

```

1  void timer_setup_slave_freq(void) {
2      TIM_ClockConfigTypeDef sClockSourceConfig = {0};
3      TIM_SlaveConfigTypeDef sSlaveConfig = {0};
4      TIM_MasterConfigTypeDef sMasterConfig = {0};
5
6      slave_tim->Instance = TIM2;
7      slave_tim->Init.Prescaler = 0; // nastaven na maximum
8      slave_tim->Init.CounterMode = TIM_COUNTERMODE_UP;
9      slave_tim->Init.Period = 4294967295;
10     slave_tim->Init.ClockDivision = TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
11     slave_tim->Init.AutoReloadPreload =
        TIM_AUTORELOAD_PRELOAD_DISABLE;
12     if (HAL_TIM_Base_Init(slave_tim) != HAL_OK) {
13         Error_Handler();
14     }
15     // inicializace externího clocku
16     sClockSourceConfig.ClockSource = TIM_CLOCKSOURCE_ETRMODE2;
17     sClockSourceConfig.ClockPolarity = TIM_CLOCKPOLARITY_NONINVERTED;
18     sClockSourceConfig.ClockPrescaler = TIM_CLOCKPRESCALER_DIV1;
19     sClockSourceConfig.ClockFilter = 0;
20     if (HAL_TIM_ConfigClockSource(slave_tim, &sClockSourceConfig) !=
        HAL_OK) {
21         Error_Handler();
22     }
23
24     // nastavení závislosti spuštění na TIM3
25     sSlaveConfig.SlaveMode = TIM_SLAVEMODE_TRIGGER;
26     sSlaveConfig.InputTrigger = TIM_TS_ITR2;
27     if (HAL_TIM_SlaveConfigSynchro(slave_tim, &sSlaveConfig) !=
        HAL_OK) {
28         Error_Handler();
29     }
30     sMasterConfig.MasterOutputTrigger = TIM_TRGO_RESET;
31     sMasterConfig.MasterSlaveMode = TIM_MASTERSLAVEMODE_DISABLE;
32     if (HAL_TIMEx_MasterConfigSynchronization(slave_tim,
        &sMasterConfig) !=
33         HAL_OK) {
34         Error_Handler();
35     }
36 }

```

Úryvek kódu 18: Inicializace TIM2 jako čítač hran

```

1 void shift_register_send_one_signal(shift_register_t* shift_register,
2                                     const uint8_t index) {
3     if (shift_register->bits[index]) {
4         HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_0, GPIO_PIN_SET);
5     } else {
6         HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_0, GPIO_PIN_RESET);
7     }
8     HAL_Delay(SHIFT_REGISTER_LATCH);
9     HAL_GPIO_TogglePin(GPIOB, GPIO_PIN_7);
10    HAL_Delay(SHIFT_REGISTER_LATCH);
11    HAL_GPIO_TogglePin(GPIOB, GPIO_PIN_7);
12    HAL_Delay(SHIFT_REGISTER_LATCH);
13 }

```

Úryvek kódu 19: Způsob zápisu jednoho bitu do posuvného registru

```

1 void extern_button_check_press(button_data_t* data) {
2     uint32_t time = data->fall_edge_time - data->rise_edge_time;
3
4     // identifikace typu stisknutí
5     if (time > SHORT_PRESS_TIME && time < LONG_PRESS_TIME) {
6         data->short_press = true;
7         data->long_press = false;
8         uint32_t curr_time = HAL_GetTick();
9
10        // detekce druhého krátkého stisknutí
11        if (curr_time - data->last_short_button_time <
12            DOUBLE_PRESS_TIME &&
13            !data->double_press) {
14            data->double_press = true;
15            data->short_press = false;
16        } else {
17            data->last_short_button_time = curr_time;
18        }
19    } else if (time > LONG_PRESS_TIME && !data->long_press) {
20        data->long_press = true;
21        data->short_press = false;
22        data->double_press = false;
23    }
24 }

```

Úryvek kódu 20: Způsob detekce boucingu



```

1  void gpio_init_push_pull(void) {
2      gpio_deinit_pins();
3
4      GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStruct = {0};
5      GPIO_InitStruct.Pin = GPIO_PIN_0;
6      GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
7      GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
8      GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
9      HAL_GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStruct);
10
11     GPIO_InitStruct.Pin = GPIO_PIN_7;
12     HAL_GPIO_Init(GPIOB, &GPIO_InitStruct);
13     GPIO_InitStruct.Pin = GPIO_PIN_1;
14     HAL_GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStruct);
15
16     HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_0, GPIO_PIN_RESET);
17     HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, GPIO_PIN_1, GPIO_PIN_RESET);
18     HAL_GPIO_WritePin(GPIOB, GPIO_PIN_7, GPIO_PIN_RESET);
19 }

```

Úryvek kódu 21: Inicializace pinů lokálního režimu pro stav logických úrovní

**Příloha C**

# **Uživatelská příručka**