

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

Abstrakt

Výuka základů elektroniky vyžaduje nástroje, které studentům umožní experimentovat s realnými obvody a pochopit principy jejich fungování. Tradiční konvenční nástroje postrádají flexibilitu pro výukové účely a mohou být příliš komplikované pro osobu, která teprve objevuje vlastnosti elektronických obvodů. Tato práce reaguje na tuto potřebu návrhem multifunkční logické sondy, která kombinuje funkce logického analyzátoru, generátoru signálů a testeru komunikačních rozhraní. Její klíčovou výhodou je možnost jednoduchého sestavení s využitím dostupných mikrořadičů, což ji předurčuje pro využití ve výuce.

Sonda existuje ve dvou variantách: plnohodnotné na bázi STM32 a omezené na bázi Raspberry Pi Pico. V základním režimu poskytuje detekci logických úrovní, měření frekvence, generaci impulsů a měření napětí. Rozšířená verze poskytuje diagnostiku známých seriových rozhraní (UART, I2C, SPI, Neopixel). Integrace s PC terminálem umožňuje používání pokročilých funkcí, zatímco lokální režim slouží pro rychlou analýzu bez nutnosti PC.

Hardwarový návrh je optimalizován pro minimalizaci externích komponent s důrazem na využití interních periférií mikrořadičů, což umožňuje sestavení zařízení na nepájivém kontaktním poli. Součástí práce je firmware, dokumentace a návody pro studenty, které pokrývají sestavení sondy i příklady jejího využití. Výsledkem je open-source řešení, které lze dále rozšiřovat a přizpůsobovat specifickým vzdělávacím potřebám.

Klíčová slova: STM32, Raspberry Pi Pico, logická sonda,

Abstract

Teaching the fundamentals of electronics requires tools that allow students to experiment with real circuits and understand their principles of operation. Traditional conventional tools lack flexibility for teaching purposes and may be too complicated for a person who is just discovering the properties of electronic circuits. This work addresses this need by designing a multifunctional logic probe that combines the functions of a logic analyzer, signal generator, and communication interface tester. Its key advantage is the possibility to be assembled simply using available microcontrollers, which makes it suitable for use in teaching.

The probe exists in two variants: a full-featured STM32-based and a limited Raspberry Pi Pico-based. In basic mode, it provides logic level detection, frequency measurement, pulse generation and voltage measurement. The extended version provides diagnostics of known serial interfaces (UART, I2C, SPI, Neopixel). Integration with a PC terminal allows the use of advanced functions, while local mode is used for fast analysis without the need for a PC.

The hardware design is optimized to minimize external components with an emphasis on the use of internal microcontroller peripherals, allowing the device to be assembled on a non-soldering contact array. The thesis includes firmware, documentation and student tutorials that cover the probe build and examples of its use. The result is an open-source solution that can be further extended and adapted to specific educational needs.

Keywords: STM32, Raspberry Pi Pico, logic probe, measurement tools, ...

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.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci vypracoval(a) samostatně a uvedl(a) vše, které 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, 11. 05. 2025

7 TODOs remaining

Obsah

| | |
|-------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 Úvod | 1 |
| 2 Rozbor problematiky | 2 |
| 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 |
| 2.4 Měření veličin testovaného obvodu | 7 |
| 2.4.1 Měření napětí a logických úrovní | 7 |
| 2.4.2 Měření odporu | 8 |
| 2.4.3 Měření frekvence | 9 |
| 2.5 Analýza komunikačních rozhraní | 10 |
| 2.5.1 UART | 10 |
| 2.5.2 I2C Bus | 11 |
| 2.5.3 SPI | 12 |
| 2.5.4 Neopixel | 13 |
| 3 HW návrh logické sondy STM32 | 16 |
| 3.1 Sdílené vlastnosti mezi návrhy pouzder | 16 |
| 3.2 SOP8 | 17 |
| 3.3 TSSOP20 | 18 |
| 4 Návrh terminál režimu STM32 | 20 |
| 4.1 Princip oblužní smyčky | 20 |
| 4.2 Grafické řešení TUI | 21 |
| 4.2.1 Ansi sekvence | 21 |
| 4.2.2 Nastavení periferie pro zobrazování TUI | 22 |
| 4.2.3 Vykreslování stránek | 23 |
| 4.2.4 Ovládání | 24 |
| 4.3 Princip nastavení periferií | 26 |
| 4.4 Implementace měření s ADC | 26 |
| 4.4.1 Měření napětí a logických úrovní | 26 |
| 4.4.2 Měření odporu | 27 |
| 4.5 Implementace měření frekvence a odchyťávání pulsů | 28 |
| 4.6 Implementace generování pulsů | 28 |
| 5 Návrh lokálního režimu STM32 | 29 |
| 5.1 Logika nastavení režimů | 29 |
| 5.2 Ovládání lokálního režimu | 30 |
| 5.3 Možné stavy lokálního režimu | 30 |
| 5.3.1 Stav logické sondy | 30 |
| 5.3.2 Stav detekce pulzů | 31 |
| 6 Realizace logické sondy | 33 |
| 6.1 Odchyťání pulzů a frekvence | 33 |
| 6.2 Generování pulzů | 36 |

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| 7 Závěr a zhodnocení | 38 |
| A Citace | 39 |
| B Dodatečné úryvky kódu | 41 |

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 | Diagram způsobu sbírání vzorků z ADC | 8 |
| Obrázek 5 | Schéma děliče napětí | 9 |
| Obrázek 6 | Signál při měření metodou hradlování | 9 |
| Obrázek 7 | Signál při měření reciproční frekvence | 10 |
| Obrázek 8 | Způsob zpracování signálu UART bez parity | 11 |
| Obrázek 9 | Zahájení a ukončení komunikace v I2C [4] | 11 |
| Obrázek 10 | Logická jednička a logická nula v I2C [4] | 11 |
| Obrázek 11 | Rámce I2C [4] | 12 |
| Obrázek 12 | Diagram SPI komunikace s jedním slave zařízením | 13 |
| Obrázek 13 | Diagram SPI komunikace s více slave zařízeními | 13 |
| Obrázek 14 | Časový diagram SPI zobrazující úroveň a posun hodinového signálu [5] | 13 |
| Obrázek 15 | Způsob zapojení RGB LED do série [6] | 14 |
| Obrázek 16 | Diagram posílání dat pro zapojené WS2812D v sérii [6] | 14 |
| Obrázek 17 | Zapojení regulátoru pro napájení STM32G030 [7] | 16 |
| Obrázek 18 | STM32G030Jx SO8N Pinout [8] | 17 |
| Obrázek 19 | Paměťový prostor Flash option bits [2] | 17 |
| Obrázek 20 | Schéma zapojení STM32G030 v pouzdře SOP8 | 18 |
| Obrázek 21 | STM32G030Jx TSSOP20 Pinout [8] | 19 |
| Obrázek 22 | Schéma zapojení STM32G030 v pouzdře TSSOP20 | 19 |
| Obrázek 23 | Diagram smyčky terminálového módu | 20 |
| Obrázek 24 | Ukázka vykreslování statické a dynamické části stránky | 24 |
| Obrázek 25 | TUI měření napětí | 27 |
| Obrázek 26 | TUI měření odporu | 28 |
| Obrázek 27 | Diagram nazpůsobu načítání režimů | 29 |
| Obrázek 28 | Stránka pro měření frekvence a PWM | 34 |
| Obrázek 29 | Stránka pro hledání pulzů | 35 |
| Obrázek 30 | Stránka pro generování signálu | 37 |

Seznam tabulek

| | | |
|-----------|--------------------------------------------------------|----|
| Tabulka 1 | Pořadí bitů pro nastavení barvy v WS2812 [6] | 14 |
| Tabulka 2 | Časování logických úrovní pro zaslání bitů WS2812D [6] | 15 |
| Tabulka 3 | Tabulka akcí ANSI sekvencí | 22 |

Seznam úryvků kódu

| | | |
|---------------|------------------------------------------------------|----|
| Úryvek kódu 1 | Inicializace UART periferie | 23 |
| Úryvek kódu 2 | Způsob odeslání stringu UART periferií | 23 |
| Úryvek kódu 3 | Nastavení pozice kurzoru pomocí ANSI escape sekvencí | 23 |
| Úryvek kódu 4 | Způsob odeslání stringu UART periferií | 26 |
| Úryvek kódu 5 | Naměření vzorku z ADC (ukázka bez ošetření) | 26 |
| Úryvek kódu 6 | Způsob výpočtu odporu | 27 |

| | | |
|----------------|----------------------------------------------------------------|----|
| Úryvek kódu 7 | Přerušení zavolané při zmáčknutí tlačítka | 30 |
| Úryvek kódu 8 | Přerušení zavolané při uvolnění tlačítka | 30 |
| Úryvek kódu 9 | Struktura globálních proměnných | 41 |
| Úryvek kódu 10 | Funkce pro vykreslení barevného textu | 42 |
| Úryvek kódu 11 | Ovládání sondy skrze symboly | 43 |
| Úryvek kódu 12 | Ovládání menu | 44 |
| Úryvek kódu 13 | Využití HAL maker pro převod poměrových hodnot na napětí | 45 |
| Úryvek kódu 14 | Struktura globálních proměnných | 45 |

Seznam zkratek

| | |
|--------|-----------------------------------------------------|
| SOP | Small Outline Package |
| TSSOP | Thin Shrink Small Outline Package |
| 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

TODO: ROZPRACOVÁNO, PŘEDELAT Vzdělávání v oblasti elektrotechniky a elektroniky vyžaduje nejen hluboké teoretické znalosti, ale také praktické dovednosti a umění si poradit s naskytnutým problémem. Pro řešení nejrůznějších překážek při navrhování elektronických obvodů je podstatné vědět, jak používat specializované nástroje, které umožňují chybu odhalit. Nástroje jsou také důležité ve školách, kde student může pomocí praktických příkladů zjistit teoretické zákonitosti. Nástroje studentům pomáhají pochopit chování a vlastnosti elektronických obvodů v reálném světě. Jedním z těchto nástrojů je logická sonda, zařízení používané k analýze digitálních signálů a diagnostice obvodů. Aby nástroj přispěl ke vzdělávání, je žádoucí aby takové zařízení bylo intuitivní, multifunkční a přizpůsobené náležitostí laboratorní výuky.

Tato bakalářská práce se zaměřuje na návrh a realizaci logické sondy, která bude navržena a optimalizována pro využití ve výuce středoškolských oborů či ve výuce vysokoškolských oborů. Cílem je vytvořit zařízení, které umožní méně zkušeným studentům provádět klíčové diagnostické úkony, jako například, nastavování úrovní signálů, odchytávání signálů, měření frekvence, měření napětí, generování signálů a další. Sonda bude navržena s důrazem na jednoduché ovládání a to prostřednictvím UART, aby byla snadno použitelná i pro studenty, kteří se s elektronikou setkávají poprvé.

V této práci budou představeny požadavky na zařízení a realizace této logické sondy.

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 sekvence¹. 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]. Pro

¹Např. PuTTY, GTKTerm...

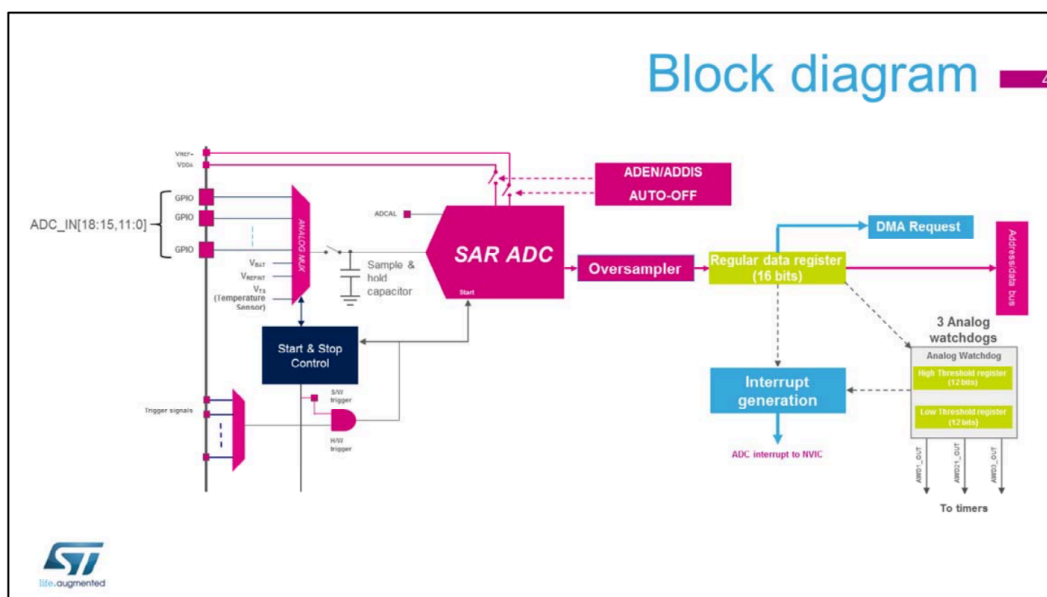
řadu G031 jsou typické kompaktní rozměry ať už vývojové Nucleo desky, tak typové pouzdra jako například **TSSOP20** nebo **SOP8**, což poskytuje snadnou integraci do kompaktního hardwarového návrhu [8]. Obě zmíněná pouzdra jsou použita pro implementaci logické sondy, o které pojednává kapitola 3.

■ Analogo-digitální převodník

Mikrokontrolér STM32G031 je vybaven analogo-digitálním převodníkem², který obsahuje 8 analogových kanálů o rozlišení 12 bitů. Maximální vzorkovací frekvence převodníku je 2 MSPS. Při měření kanálů se postupuje sekvenčně, která je určena pomocí tzv. ranků³. Při požadavku o měření převodník nejprve změří první nastavený kanál, při dalším požadavku druhý a až změří všechny, tak pokračuje opět od počátku. Aby během měření bylo dosaženo maximální přesnosti, převodník podporuje tzv. oversampling⁴. Převodník obsahuje **accumulation data register**, který přičítá každé měření a poté pomocí data shifteru vydělí počtem cyklu, kde počet cyklů je vždy mocnina dvojky z důvodu složitého dělení na MCU [1]. Tato metoda zamezuje rušení na kanálu.

$$\text{měření} = \frac{1}{2^m} \times \sum_{n=0}^{n=N-1} \text{Konverze}(t_n) \quad (1)$$

AD převodník, po dokončení měření vzorků, vrací hodnotu, která není napětí. Tato hodnota je poměrná hodnota vůči napájecímu napětí vyjádřena 12 bitově⁵. Pro převedení hodnoty převodníku na napětí je nutné znát referenční napětí systému ($V_{\text{REF}+}$). Referenční napětí může být proměnlivé, hlavně pokud systém využívá VDDA⁶ jako referenci, která může být 2 V až 3.6 V a také může kolísat vlivem napájení nebo zatížení. Pro výpočet



Obrázek 1: Blokový diagram AD převodníku [1]

²Neboli ADC

³Rank určuje v jakém pořadí je kanál změřen.

⁴Proběhne více měření a následně jsou výsledky např. zprůměrovány aby byla zajištěna větší přesnost.

⁵Např. hodnota 4095 značí, že naměřené napětí je stejně velké jako napájecí napětí.

⁶VDDA je označení pro analogové napájecí napětí v mikrokontrolérech STM32.

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 uložena 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 adresy⁷ [2], [10].
- 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. [11].

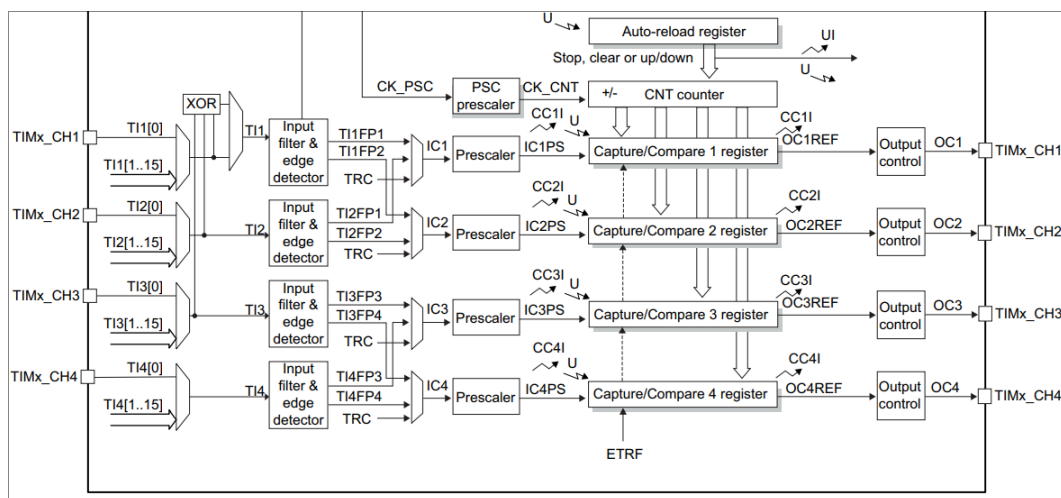
Před spuštěním časovače je potřeba nastavit, jak často má časovač čítat. Frekvenci časovače nastavuje tzn. prescaler, neboli „předdělička“. Prescaler dělí s konstantou, která je zvolena, frekvenci hodin dané periferie. Pro případ STM32G0 je to 64 MHz. Frekvence časovače určuje, jak často časovač inkrementuje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

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

Velikost čítače časovače, zda je 16bitový nebo 32bitový⁸, souvisí s jeho tzv. periodou. Perioda určuje hodnotu, při jejímž dosažení se čítač automaticky resetuje na 0. Tuto

⁷Např. u STM32G0 je adresa kalibrační hodnoty: 0x1FFF75AA

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



Obrázek 2: Blokové schéma STM32G031 časovače [2]

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.

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

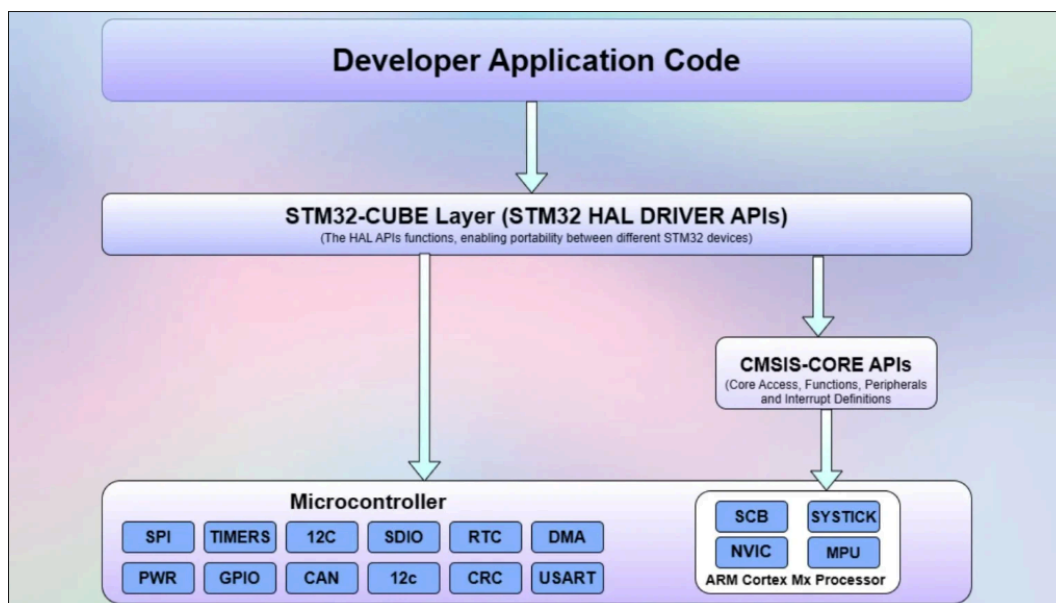
2.3.2 Knihovna STM HAL

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 [12].

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 [13].

Součástí HALu je tzv. CMSIS, což je sada standardizovaných rozhraní, které umožňují konfiguraci periferií, správu jádra, obsluhu přerušení a další [14]. 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 definice registrů, přístup k NVIC apod. [14]. Hlavní rozdíl mezi CMSIS a HALu⁹ STMicroelectronics je ten, že CMSIS je poskytnuto přímo ARM a slouží pouze na ovládání Cortex M procesorů zatímco část od STMicroelectronics poskytuje abstrakci periferií.

⁹STMicroelectronics do svého HALu zabaluje i CMSIS od ARM.



Obrázek 3: STM32CubeMX HAL architektura [3]

■ 2.4 Měření veličin testovaného obvodu

■ 2.4.1 Měření napětí a logických úrovní

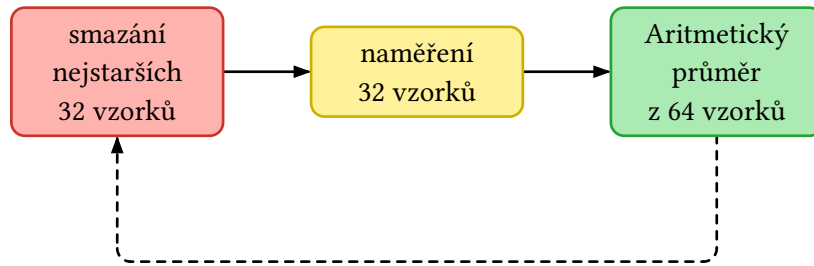
Pro měření napětí, jak již zmiňuje kapitola 2.3.1.1, je využíván AD převodník. Při měření napětí může docházet k šumu na vstupu kanálu a naměřená hodnota nemusí odpovídat realitě. Pro snížení vlivu šumu je použito tzn. sliding window. Do okna se uloží 32 vzorků měření do dvou bloků tj. 64 vzorků celkem.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

$$V = \frac{\sum_{i=0}^{2^5} (V_{\text{staré } i}) + \sum_{i=0}^{2^5} (V_{\text{nové } j})}{2^6} \quad (6)$$

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 napětí¹⁰. 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 vyskytnout¹¹ [15].

¹⁰Jedná se o klouzavý průměr.

¹¹Dojde k eliminaci aliasingu.



Obrázek 4: 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 [16]. 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 5. 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 [17], [18]:

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

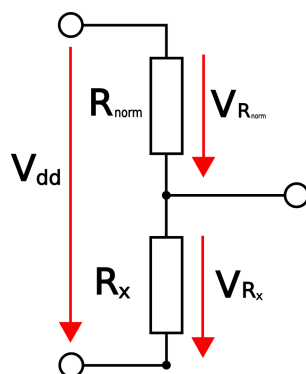
Pomocí pravidla pro napěťový dělič lze vztah mezi napětími a odpory vyjádřit jako:

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

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 [17]:

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

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 5). Sonda následně změří napětí V_{dd} na kanálu 1 ADC a pomocí rovnice 11, vypočítá hodnotu neznámého odporu [17].



Obrázek 5: Schéma děliče napětí

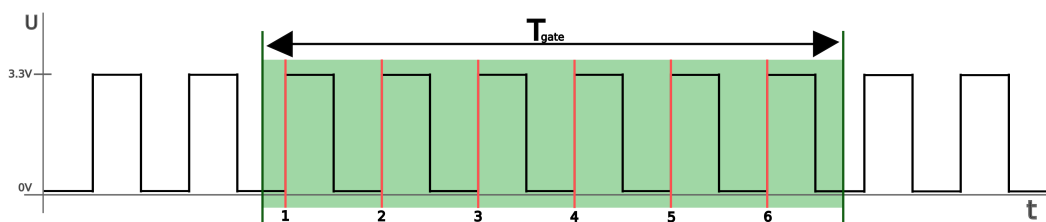
2.4.3 Měření frekvence

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_{gate} . Čas, po který jsou počítány hrany se nazývá hradlovací (angl. gate time). Frekvence f_{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 6: Signál při měření metodou hradlování

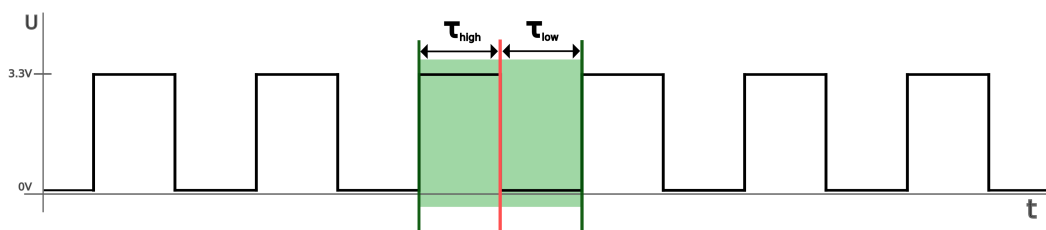
■ Reciproční frekvence

Reciproční frekvence vhodná pro měření nízkých frekvencí f_{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 7: 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 baudrate¹², 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 [19], [20].

Data jsou přenášena v tzv. rámcích, které jsou strukturovány následovně: [20]

- **Start bit** - Každý rámec začíná start bitem, který určuje začátek rámce. Bit je vždy „0“.
- **Slovo dat** - Poté následuje 8 bitů dat¹³.
- **Paritní bity** - Paritní bity slouží k detekci chyby v přenosu. Parita nám dokáže pouze detekovat chybu rámce pouze v případech, kdy nevznikne chyb více¹⁴.

¹²Počet bitů přenesených za sekundu

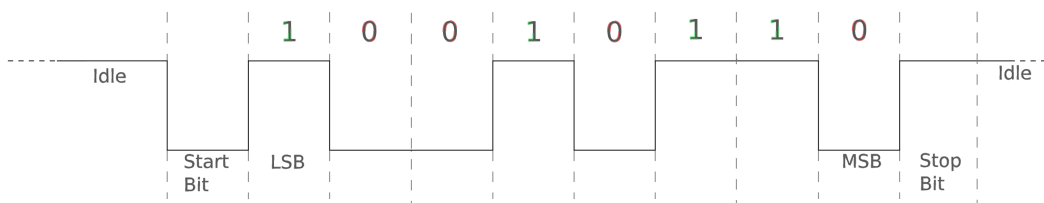
¹³Lze používat i 7 bitů nebo 9 bitů dat.

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

- **Stop bit** - Stop bit¹⁵ 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 8 ukazuje způsob zpracování signálů [21]. 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.

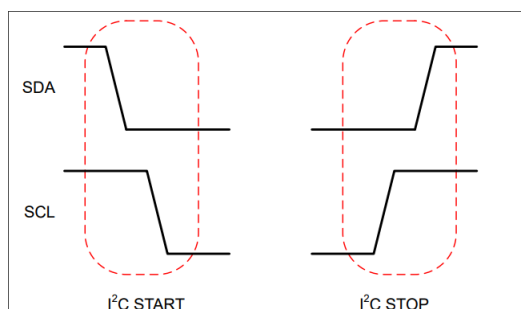


Obrázek 8: Způsob zpracování signálu UART bez parity

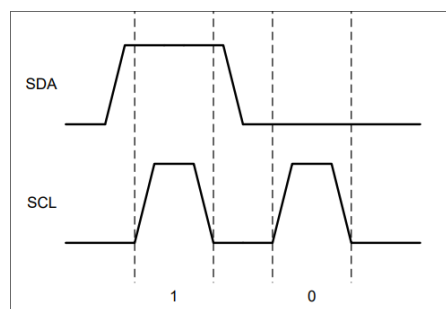
2.5.2 I2C Bus

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].

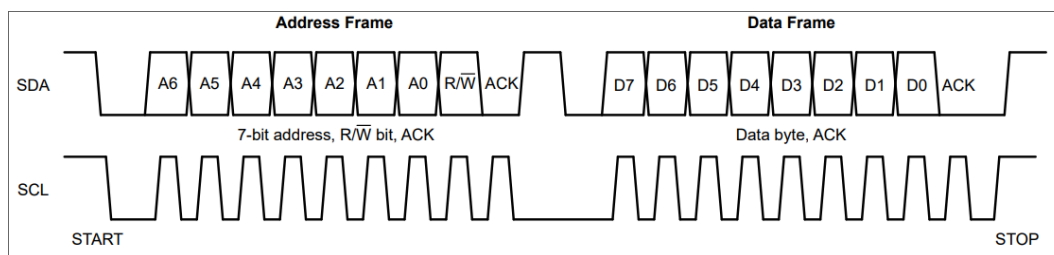


Obrázek 9: Zahájení a ukončení komunikace v I2C [4]



Obrázek 10: Logická jednička a logická nula v I2C [4]

¹⁵Stop bitů může být i několik



Obrázek 11: 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 10 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.

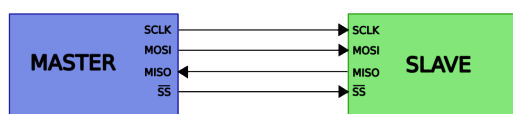
SPI má vždy jedno master zařízení a i několik podřízených slave zařízení. SPI je synchronní full duplex rozhraní, které má celkem 4 vodiče¹⁶. SCLK, což je hodinový signál, který určuje synchronizaci dat, MOSI, neboli vodič, kde probíhá komunikace od masteru ke slave, MISO, kde probíhá komunikace od slave k masteru a poté SS¹⁷, neboli slave select. Ten určuje, se kterým slave zařízením probíhá komunikace, každé zařízení má vlastní SS pin [22]. Obrázek 12 ukazuje způsob zapojení vodičů v případě jednoho slave zařízení. Pro zahájení komunikace nastaví logicky nízkou úroveň na SS¹⁸. Master zahájí generování hodinového signálu, podle kterého se synchronizuje komunikace. Jelikož je

¹⁶4 vodiče má v případě jednoho slave zařízení. S každým dalším slave zařízením musí být připojen další SS.

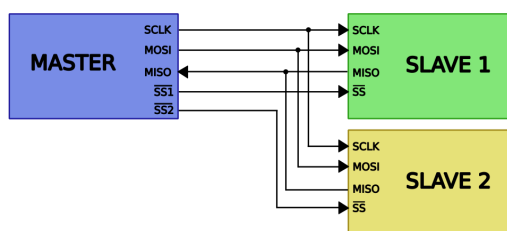
¹⁷Někdy také CS jako chip select.

¹⁸Jelikož 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 13 znázorňuje připojení více slave zařízení. V tomto případě master využívá více SS a podle přivedení nízké logické úrovně určuje směr komunikace [22].

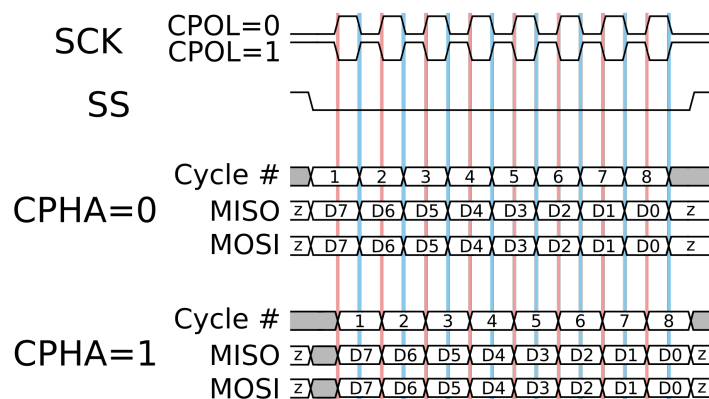


Obrázek 12: Diagram SPI komunikace s jedním slave zařízením



Obrázek 13: 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 signálu¹⁹.

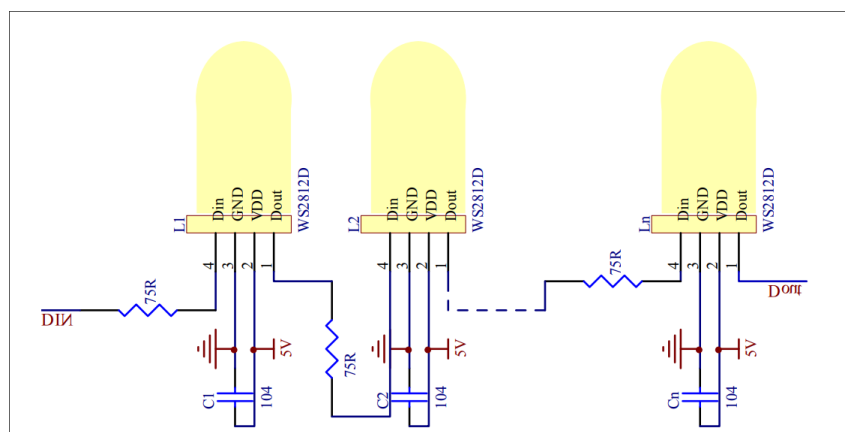


Obrázek 14: Časový diagram SPI zobrazující úroveň a posun hodinového signálu [5]

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 15 znázorňuje zapojení více LED do série a schopnost ovládání jedním vodičem.

¹⁹Pokud 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.



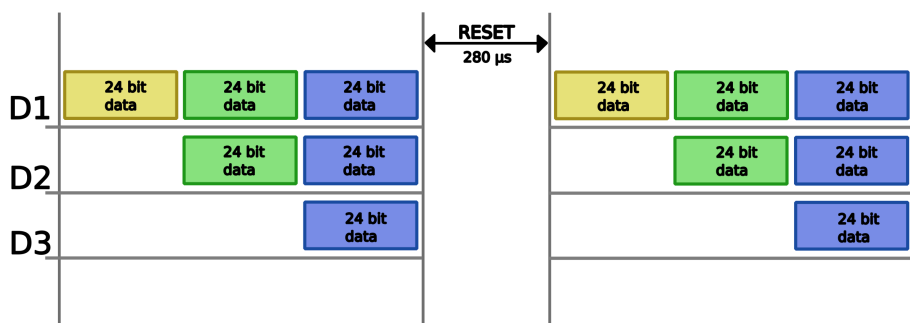
Obrázek 15: Způsob zapojení RGB LED do série [6]

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, MSB²⁰.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 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 16: Diagram posílání dat pro zapojené WS2812D v sérii [6]

²⁰Most 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]

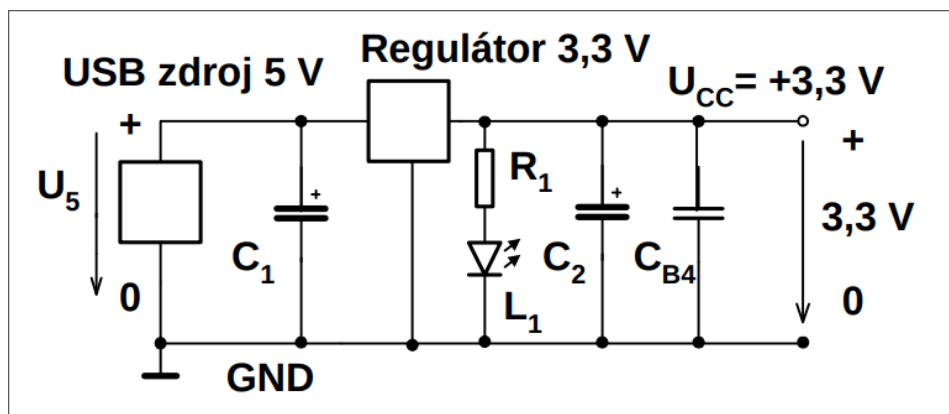
Kapitola 3

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 ± 0.1 V. Ke vstupu je připojen kondenzátor C1 k potlačení šumu o velikosti 10 μ F. K výstupu je připojen keramický kondenzátor²¹ C2 k zajištění stability výstupu o velikosti také 10 μ F [23].



Obrázek 17: 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 ~ 3.3 V [2], [16]. 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 nF.

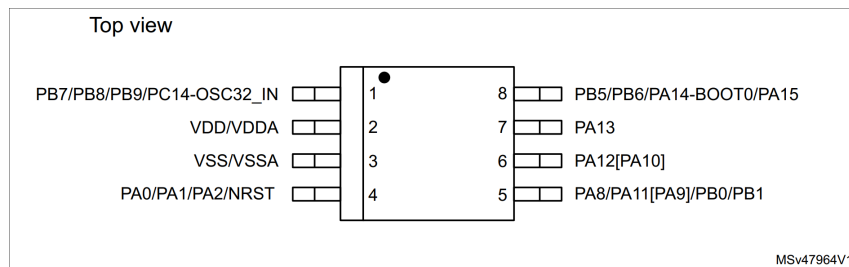
Obě pouzdra využívají pro komunikaci s PC periferii USART1. STM32 poskytuje možnost remapování pinů. Pro zjednodušení zapojení jsou piny PA12 a PA11 přemapované

²¹Keramický 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 20²² 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 18: STM32G030Jx SO8N Pinout [8]

Jelikož je pouzdro malé, tak se na jednom fyzickém pinu nachází více periférií. Obrázek 18 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.

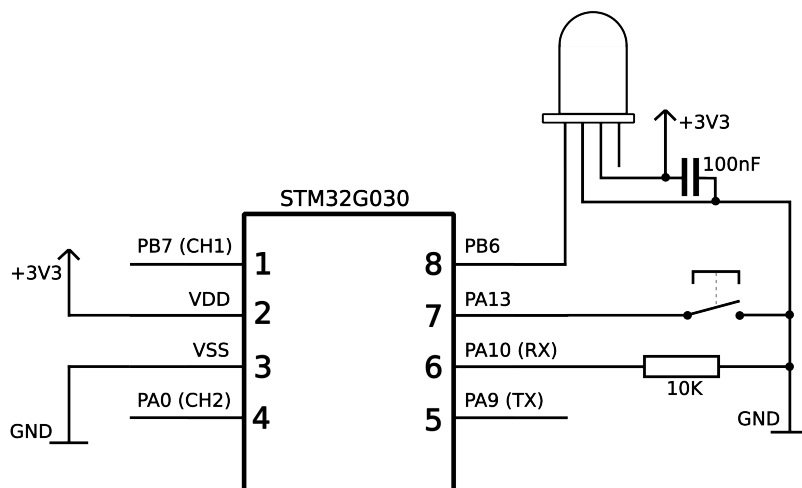
| Address ⁽¹⁾ | Corresponding option register (section) | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | | | | | | | |
|------------------------|-----------------------------------------|-----|----|-------|-----------|----|--------|--------|-----------|-----|------------------|-----------|------------|---------|-----------|-----------|---------|-----------|------------|-----------|----------|----|----------|---|--------|---|-----|---|---|---|---|---|---|---|--|--|--|--|--|--|
| 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 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | | | | | | |

Obrázek 19: 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

²²Schéma zapojení bylo zrealizováno pomocí nástroje *Autodesk Eagle* [24]. Komponenta Neopixel RGB LED byla použita jako externí knihovna [25].

[2]. Standartně se mikrokontroler nahrává a debuguje pomocí tzn. SWD²³, 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 20. 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 20: Schéma zapojení STM32G030 v pouzdře SOP8

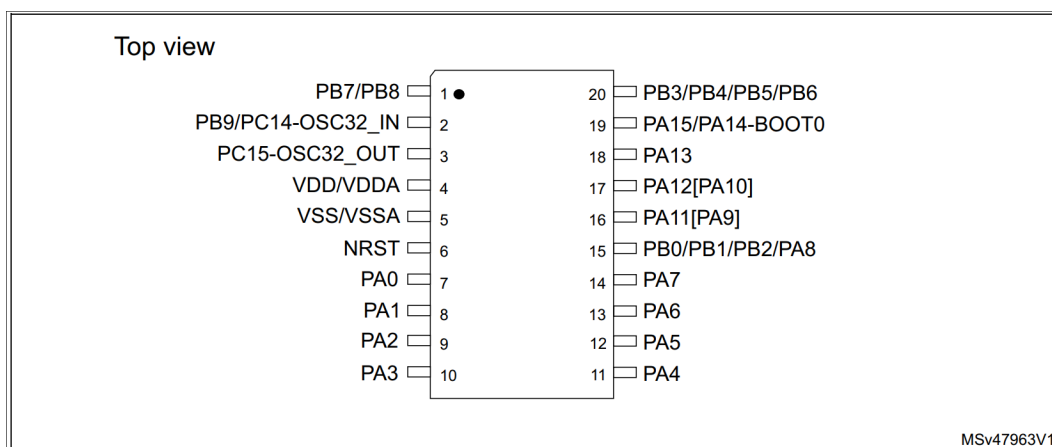
První z pinů k užívání je pin PB7. Tento pin slouží jako kanál AD převodníku pro měření napětí a pro měření odporu, pin je také využit pro hodinový signál pro posuvný registr. Na pinu PA0 se nachází AD převodníkový kanál. Pin také disponuje kanály TIM2 časovače. Pin je použit jako druhý kanál AD převodníku 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.

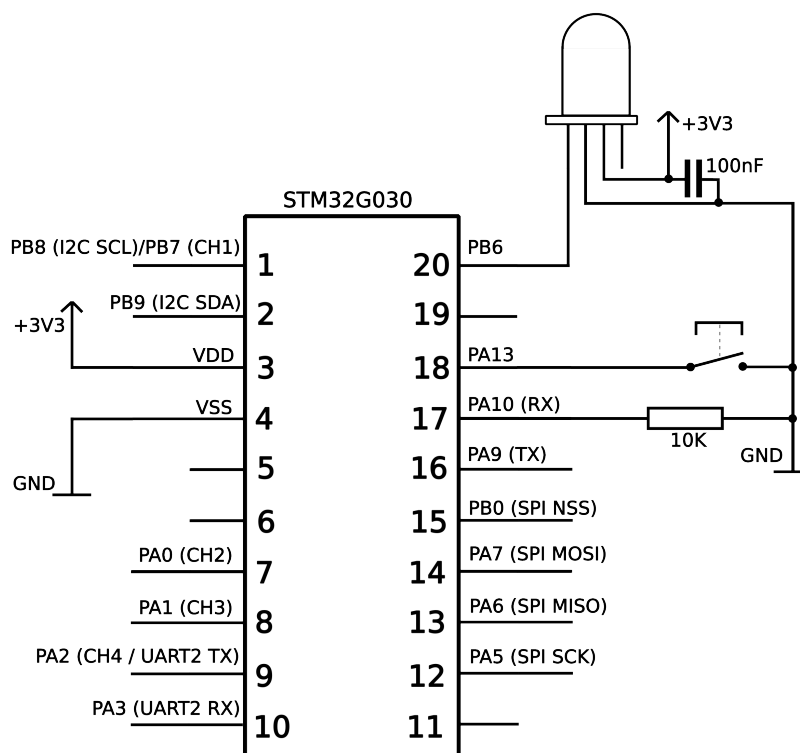
Pro zjednodušení sestavení sondy, je HW TSSOP20 návrh co nejvíce podobný návrhu SOP8. Piny PA11 a PA12 jsou přemapovány na PA9 a PA10. Na pin PA10 je připojen rezistor o velikosti 10 KΩ vůči zemi pro detekci komunikace s PC. Ze stejného důvodu byl zachován pin PB6 jako výstup pro WS2812D a PA13 pro tlačítko pro lokální režim. Obrázek 22

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



Obrázek 21: STM32G030Jx TSSOP20 Pinout [8]

ukazuje schéma zapojení s pouzdrem 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 17, který má na výstupu 3.3 V.

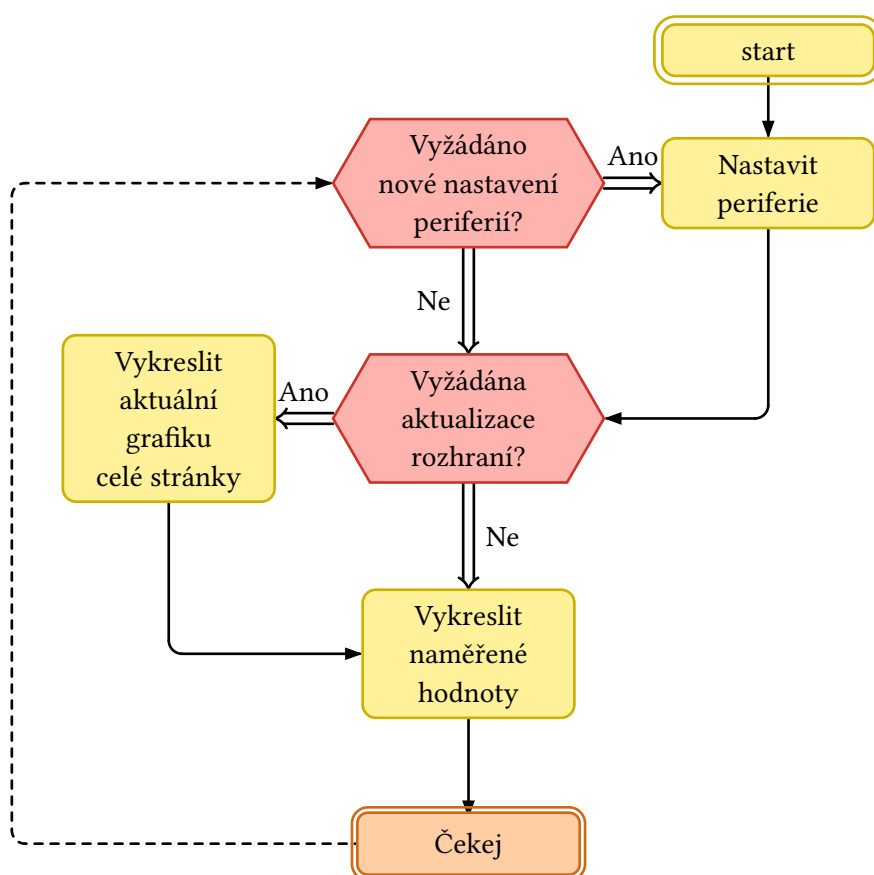


Obrázek 22: Schéma zapojení STM32G030 v pouzdře TSSOP20

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 čekáním²⁴. 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 9) 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 23: Diagram smyčky terminálového módu

²⁴Toto 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 sekvence²⁵. 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 [26].

■ Syntaxe

Základní syntaxe escape sekvencí pro formátování textu je:

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

bash

- \033 (ASCII 27 v osmičkové soustavě) označuje začátek escape sekvence²⁶
- [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.

²⁵Například program PuTTY...

²⁶Existují 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 [27].

```
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 [27]. .

```
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 80×24 . Tyto rozměry jsou v terminálové aplikaci ohraničeny ASCII symboly. Pro vykreslení textu je využita funkce z úryvku kódu 10, 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

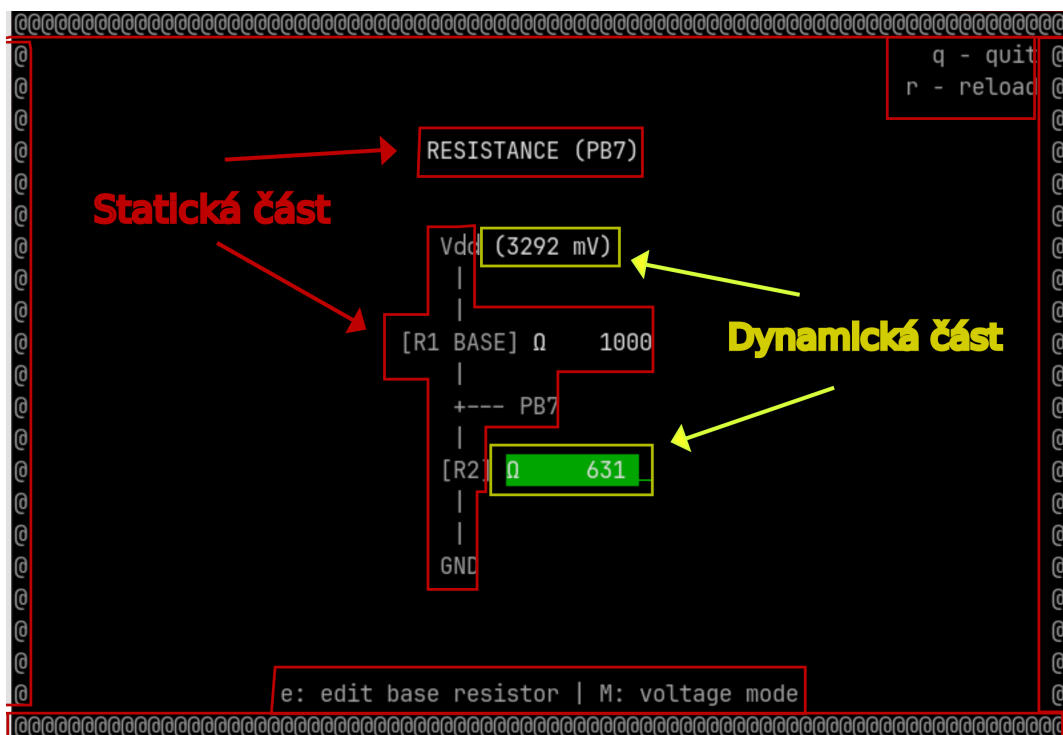
ním symbolu R, který je užitečný v případě, kdy se například vlivem špatného kontaktu vodiče mohou generovat náhodné symboly. Pokud by statická část vykreslovala periodicky, může nastat ke zbytečnému odesílání velkého množství dat skrze UART a to může spomalovat vykreslování. Také může dojít k rychlému 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 24 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 stránky²⁷. V případě jiných symbolů je nahlédnuto do globální proměnné `current_page` (viz. Úryvek kódu 9), 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

²⁷ Obecně je to symbol R, který slouží znovu vykreslení.



Obrázek 24: Ukázka vykreslování statické a dynamické části stránky

úryvek kódu 11. Způsob převedení symbolu na akci na dané stránce ukazuje příklad ovládání hlavního menu v úryvku 12. 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

■ 4.3 Princip nastavení periferií

■ 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 $64 - 1$, což nastaví frekvenci časovače z 64 MHz na 1 Mhz (neboli časovač inkrementuje hodnotu každou $1 \mu s$). Jelikož ADC běží na frekvenci 32 MHz a změření jednoho kanálu trvá 160 cyklů, změření jednoho kanálu trvá $\sim 5 \mu s$. Protože frekvence měření je 128 Hz, můžeme tuto hodnotu zanedbat a nastavit periodu časovače na $7000 - 1$.

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_{dd} . Po dokončení konverze je tato hodnota uložena do dynamicky alokovaného pole `voltage_measures` o velikosti $64 \times$ počet aktivních kanálů²⁸. 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)

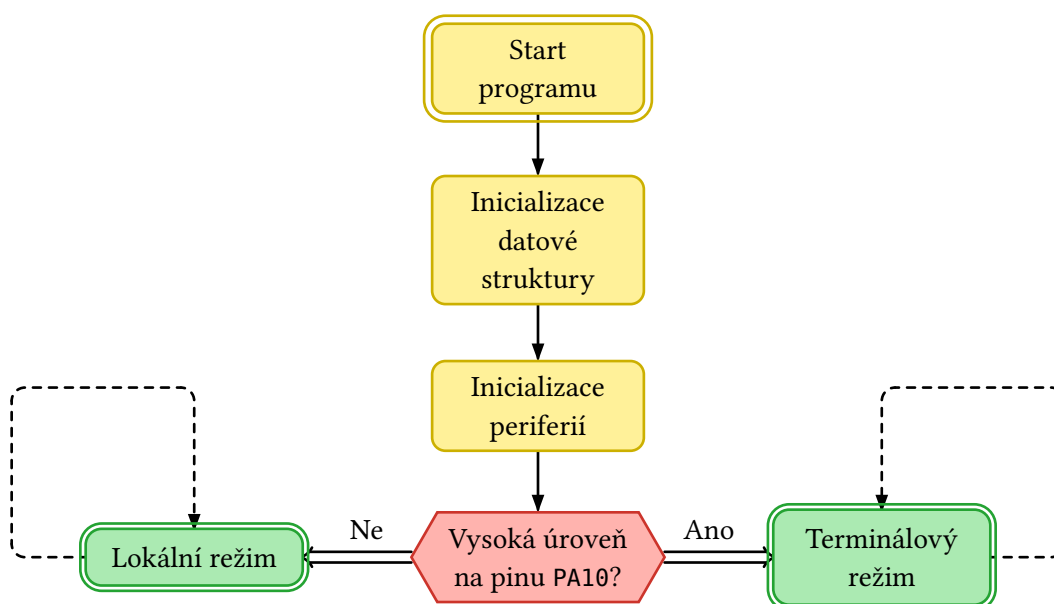
²⁸ADC při nastavení více kanálů sekvenčně prochází všechny kanály dokola.

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 9, dojde k inicializaci všech potřebných periferií, které dále budou rozebrány v **TODO: add kapitulu**.

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 20 a Obrázek 22 má v zapojení, na pinu PA10, rezistor o velikosti $10\text{ K}\Omega$, který při nepřipojeném vodiči uzemní Rx. Obrázek 27 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 27: 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 tlačítko 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 bude popsán v **TODO: dodat kapitolu**.

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 14, 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 úrovní 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. Stavby logické sondy jsou celkově čtyři.

■ 5.3 Možné stavy lokálního režimu

TODO: dopsat tuto kapitolu

■ 5.3.1 Stav 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. 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

```
1 void HAL_GPIO_EXTI_Falling_Callback(uint16_t GPIO_Pin) { C
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

zeleně, v případě nízké úrovně se rozsvítí červená a pokud je napětí v neurčité oblasti, LED nesvítí. Tlačítkem poté lze přepínat mezi jednotlivými kanály.

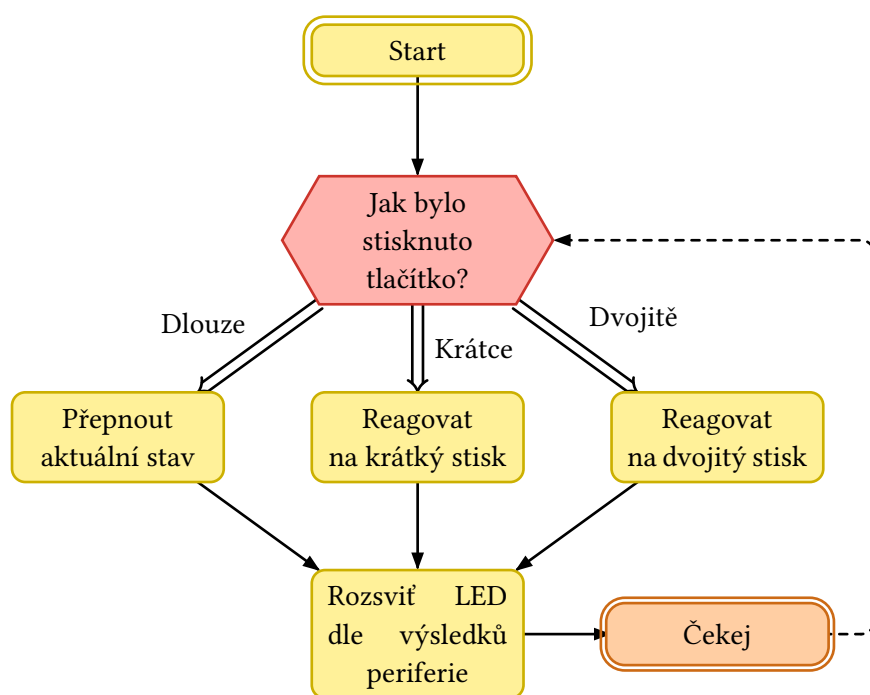
■ Stav logických úrovní

Další stav, který se po dlouhém stisku nastaví je **nastavování logických úrovní**. Stav při 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 všech kanálech, který má řadič v návrhu k dispozici.

■ 5.3.2 Stav detekce pulzů

Detekování pulzů probíhá za pomoci input capture kanálu časovače. Při detekci hrany, je stav časovače uložen do registru a je vyvoláno přerušení. Přerušení poté nastaví pomocný flag, který bude zpracován při dalším cyklu smyčky. Smyčka poté na 1 sekundu rozsvítí LED jako detekci náběhové resp. sestupné hrany.

Lokální mód běží ve smyčce, kde se periodicky kontrolují změny a uživatelské vstupy. Důvod pro zvolení této metody je ten, že takto je zaručeno, že se vždy splní úkony ve správném pořadí. V **TODO: neco neco** je vysvětlen důvod podrobněji. Při začátku každého cyklu proběhne kontrola, zda uživatel dlouze podržel tlačítko. Pokud ano, přepne se stav. Poté program zkontroluje, zda bylo tlačítko zmáčknuto krátkou dobu, pokud ano, reaguje na tento úkon uživatele v závislosti na aktuálním stavu, stejně jako u dvojstisku. Je důležité podotknout, že stav tlačítka je vždy pouze jeden a nikdy se tlačítko nenachází ve více stavech zároveň. Následně po kontrole vstupní periferie proběhne kontrola hodnot a flagů aby smyčka zobrazila výstupní periferií informaci uživateli. Např. pokud je stav nastavení pulzů a flag, který symbolizuje nalezenou hranu, rozsvítí smyčka LED příslušné barvy. Po dokončení úkonů smyčka čeká určitou dobu, než zopakuje celý cyklus znovu. Doba se mění v závislosti na zvoleném stavu, tzn. detekce pulzů probíhá rychleji, než nastavování logických úrovní.



Realizace logické sondy

TODO: REVIZE

6.1 Odchytání pulzů a frekvence

Pro měření frekvence hraje stěžejní roli časovač. Jak bylo zmíněno v Kapitola 2.3.1.2, časovače umí tzv. input capture. Input capture poskytuje možnost měření časových parametrů vstupního signálu, jako například perioda nebo šířka signálu. Časovač inkrementuje hodnotu o dané frekvenci a v momentě kdy na vstupu je objeví náběžná nebo sestupná hrana, dojde k přerušení a aktuální hodnota čítače se uloží do speciálního registru [11].

Pro přesné zjištění frekvence musí být kladen důraz na režii. Při odběru dat by nesměl procesor provádět jakoukoliv. Toto se dá realizovat pomocí DMA podobně

K zjištění frekvence je použita tzv. metoda hradlování. Metoda hradlování využívá periodu vzorkování, která je využita pro spočítání finální frekvence. Rovnice 15 uvádí způsob, jak spočítat frekvenci pomocí metody hradlování. Frekvence lze spočítat jako polovinu napočítaných pulzů za časový úsek³⁰. K tomuto účelu je použit 32 bitový časovač, aby bylo možné měřit, co největší frekvence.

$$F = \frac{\frac{N}{2}}{T} \quad (15)$$

Pro měření časového úseku je využit druhý časovač. Tento časovač je nastaven předděličkou tak, aby hodnotu inkrementoval za 1 ms. Uživatel poté pomocí TUI nastavuje periodu na požadovaný úsek.

```
1 signal_detector.frequency =  
    (signal_detector.pulse_count / 2) /  
2 (signal_detector.sample_times[signal_detector.sample_time_index] /  
    1000);
```

Po spuštění časovač začne inkrementovat hodnotu a v momentě, kdy časovač přeteče tzn. dosáhne poslední hodnoty periody, časovač vyvolá přerušení. Při přerušení se zastaví časovač pro čítání pulzů a spočítají se potřebné hodnoty.

Logická sonda dle Rovnice 15 vypočítá frekvenci. Důvod, proč logická sonda počítá oba pulzy a ne pouze nástupnou nebo sestupnou hranu je ten, že při detekci obou hran dokáž sonda spočítat, jak široké pulzy jsou. Tuto skutečnost je možné využít například pro počítání Duty u PWM signálů.

Níže je možné vidět logiku, která počítá šířku pulzu pro vysokou úroveň. Pokud je čas sestupu signálu větší než vzestupu, není potřeba nic přepočítávat. Pokud čas sestupu je

³⁰Z důvodu, že časovač v tomto případě měří náběžný i sestupný pulz, je vždy počet pulzů v periodě signálu dvojnásobný, proto je zapotřebí počítat pouze s polovinou.

nižší než čas vzestupu, znamená to, že časovač přetekl a je nutné od 0xFFFFFFFF odečíst čas vzestupu. Nakonec sonda přepočítá hodnotu časovače na čas, tzn. vynásobí konstantou, aby byl vzat potaz na frekvenci procesoru.

```
1 uint32_t rise_pulse_ticks;
2 if (sig_high_end > sig_high_start) {
3     rise_pulse_ticks = sig_high_end - sig_high_start;
4 } else if (sig_high_end < sig_high_start) {
5     rise_pulse_ticks = (0xFFFFFFFF - sig_high_start) + sig_high_end;
6 } else {
7     rise_pulse_ticks = 0;
8 }
9 float high_width = (rise_pulse_ticks * CONST_FREQ) / 1000;
```

Duty time je poté spočítaný jako poměr času vysokého signálu a nízkého signálu uvedený v procentech.

Kromě frekvence, umí sonda odchyťávat pulzy, jak nízké, tak vysoké. Mezi módy je možné přepínat klávesou. Pro zachytávání signálu je časovač opět nastaven v režimu input capture. Časovač je spuštěn a nyní není využito DMA, ale časovač vyvolává přerušování, pokud dojde k zachycení signálu, toto přerušování zkontroluje, zda hrana signálu je nástupná nebo sestupná. Poté rozhodne podle módu uživatele, kterou hranu má ignorovat a kterou má detekovat.



Obrázek 28: Stránka pro měření frekvence a PWM

6.2 Generování pulzů

Při generování pulzu má uživatel možnost nastavit konkrétní délku pulzu prostřednictvím TUI. Nastavená délka určuje, jak dlouho bude pulz trvat. Po nastavení délky může uživatel stisknout příslušnou klávesu, která spustí proces generování pulzu.

Časovač v tomto případě má nastaven prescaler tak, aby se jednoduše počítal čas v periodě. Poté, co je nastavený časovač, spustí se. Po přetečení časovače se vyvolá přerušení, které značí, že časovač odměřil příslušnou dobu. Přerušení následně časovač zastaví.

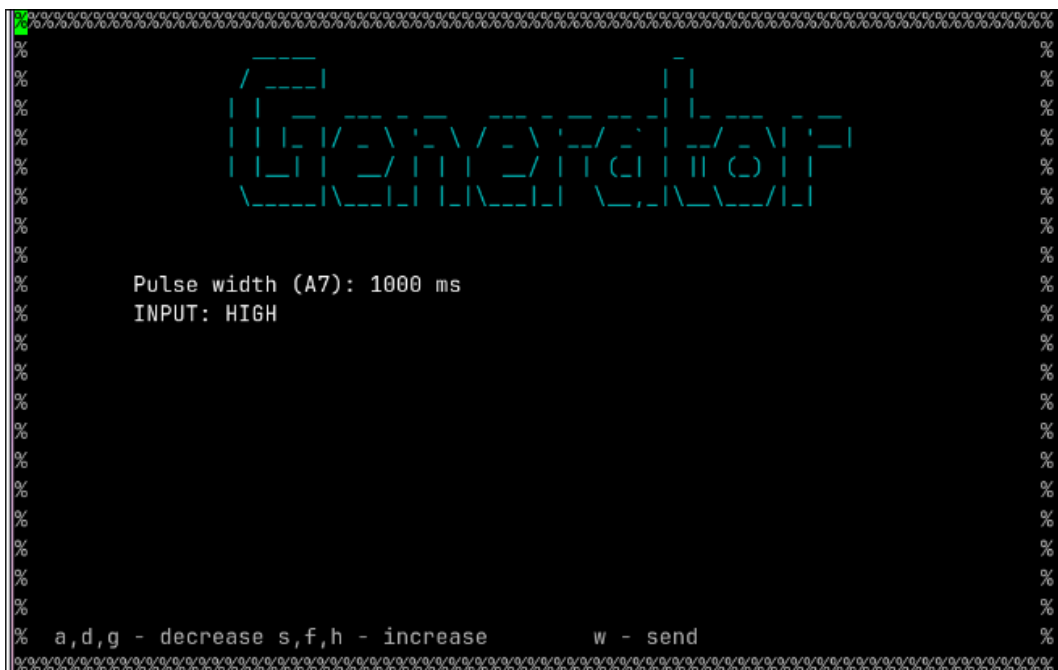
Sonda umožňuje generovat pulzy dvou typů. První možností je generace nízké úrovně signálu během trvání vysoké úrovně. Druhou možností je naopak generace vysoké úrovně signálu během nízké úrovně. Uživatel si tedy může zvolit, kterou úroveň chce jako výchozí stav.

Díky těmto režimům je možné i nastavit úroveň, které uživatel nemusí nutně používat jako generování pulzů, ale jako přepínání úrovní dle potřeby. **TODO: ještě se na to kouknout znovu a upravit to neaktuální**

```
1 static void MX_TIM16_Init(void) {
2     htim16.Instance = TIM16;
3     htim16.Init.Prescaler = 63999; // předdělička
4     htim16.Init.CounterMode = TIM_COUNTERMODE_UP;
5     htim16.Init.Period = 999; // výchozí hodnota periody
6     htim16.Init.ClockDivision = TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
7     htim16.Init.RepetitionCounter = 0;
8     htim16.Init.AutoReloadPreload = TIM_AUTORELOAD_PRELOAD_DISABLE;
9     if (HAL_TIM_Base_Init(&htim16) != HAL_OK) {
10         Error_Handler();
11     }
12     HAL_TIM_Base_Start_IT(&htim16);
13     sig_gen_init(&signal_generator);
14 }
```

Obrázek 30 ukazuje, jak vypadá prozatimní zhotovení rozhraní pro ovládání generátoru pulzů. Pomocí kláves uvedené v nápovědě je možné měnit šířku pulzu a nebo měnit, jaký mód použít.

```
1 void sig_gen_toggle_pulse(sig_gen_t* generator, const _Bool con) {
2     generator->start = false;
3
4     // nastavení periody, která byla nastavena uživatelem
5     __HAL_TIM_SET_AUTORELOAD(&htim16, generator->period - 1);
6 }
```

Obrázek 30: Stránka pro generování signálu

```

7      if (con && generator->con) {
8          HAL_TIM_Base_Stop_IT(&htim16);
9          generator->con = false;
10     } else {
11         generator->con = con;
12         HAL_TIM_Base_Start_IT(&htim16);
13     }
14 }

```

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
- [2] STMicroelectronics, „STM32G0x1 Reference manual“. [Online]. Dostupné z: 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
- [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
- [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] iter, „Calibrating STM32 ADC (VREFINT)“. [Online]. Dostupné z: <https://stackoverflow.com/questions/58328342/calibrating-stm32-adc-vrefint>
- [11] M. Dudka, „STM32 Timery“. [Online]. Dostupné z: http://www.elektromys.eu/clanky/stm_timer1/clanek.html
- [12] STMicroelectronics, „STM32CubeMX“. [Online]. Dostupné z: https://www.st.com/content/st_com/en/stm32cubemx.html
- [13] M. Hasan, „Understanding STM32 HAL Library Fundamentals“. [Online]. Dostupné z: <https://embeddedthere.com/understanding-stm32-hal-library-fundamentals/>
- [14] A. Limited, „What is CMSIS?“. [Online]. Dostupné z: <https://www.keil.arm.com/cmsis>
- [15] H. Nazeran, „Reducing Power Line Interference in Digitised Electromyogram Recordings by Spectrum Interpolation“, *Medical and Biological Engineering and Computing*, 2004.
- [16] All About Circuits, „Logic Signal Voltage Levels“. [Online]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/digital/chpt-3/logic-signal-voltage-levels/>
- [17] R. Nave, [Online]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/voldiv.html>
- [18] G. A. Center, [Online]. Dostupné z: <https://germanna.edu/sites/default/files/2022-03/Ohms%20and%20Kirchoffs%20Laws.pdf>
- [19] G. Wright, „Definition USART (universal synchronous/asynchronous receiver/transmitter)“. [Online]. Dostupné z: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/USART-Universal-Synchronous-Asynchronous-Receiver-Transmitter>
- [20] U. Wisconsin–Madison, „Uart Basics“. [Online]. Dostupné z: <https://ece353.engr.wisc.edu/serial-interfaces/uart-basics/>
- [21] V. H. Adams, „Universal Asynchronous Receiver Transmitter“. [Online]. Dostupné z: <https://vanhunteradams.com/Protocols/UART/UART.html>
- [22] 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>
- [23] 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
- [24] Autodesk, „Eagle“. [Online]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/eagle/overview>
- [25] Albert van Dalen, „addressable LED rings NeoPixel WS2812B-2020“. [Online]. Dostupné

- z: <https://github.com/avandalen/Eagle-library-addressable-LED-rings>
- [26] [Online]. Dostupné z: <https://enxstandards.web.illinois.edu/standard/ansi-x3-4/>
- [27] fnky, „ANSI Escape Sequences“. [Online]. Dostupné z: <https://gist.github.com/fnky/458719343aabd01cfb17a3a4f7296797>

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 9: 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 10: 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 11: 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 12: Ovládání menu


```

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 13: Využití HAL maker pro převod poměrových hodnot na napětí

```

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 14: Struktura globálních proměnných