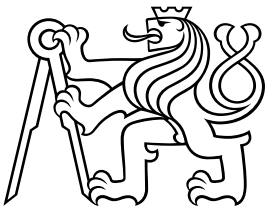
Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra měření

Multifunkční diagnostická logická sonda

Milan Jiříček

Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Fischer, CSc.
Studijní program: Otevřená informatika
May 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 kombinujee 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 řežimu 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 periferií 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.

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.

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 předloženou práci vypracoval/a samostatně a že jsem uvedl/a veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

v Praze, 02. 05. 2025

8 TODOs remaining

Obsah

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam úryvků kódu

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 Transmiter
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 realném 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 náležitostem 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 pulzů 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 periferií. Možnost sestrojení sondy na nepájivém kontaktním poli poskytuje flexibilitu vyučujícím vytvořit rychle multifunkční logickou sondu. Jelikož návrh bere zřetel na možnost realizace studentem, je při sesta-

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 periferiím (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 úrovní 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 pomocí periferie UART skrze převodník UART-USB. Sonda takto poskytne uživatelské rozhraní, které se vygeneruje na straně mikrokontroleru a zobrazí skrze terminálovou aplikací podporující tzn. ANSI sekvence[1]. 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

[1] Např. PuTTY, GTKTerm…

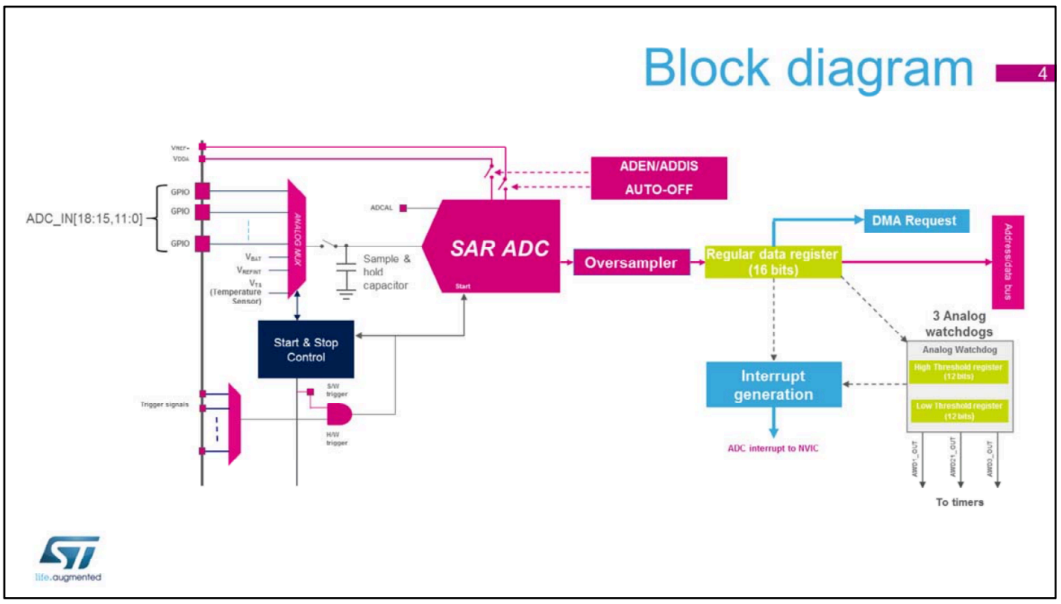
řadu G031 jsou typické kompaktní rozměry ať už vývojové Nucleo desky, tak typové pouzdra jako například **TSSOP20** nebo **SOP8**, což poskytuje snadnou integraci do kompatního hardwarového návrhu [8]. Obě zmíněná pouzdra jsou použity pro implementaci logické sondy, o které pojednává **TODO: doplnit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

Analogo-digitální převodník

Mikrokontrolér STM32G031 je vybaven analogo-digitálním převodníkem[2], který obsahuje 8 analogových kanálů o rozlišení 12 bitů. Maximální vzorkovací frekvence převodníku je 2 MSPS. Při měření kanálů se postupuje sekvenčně, která je určená pomocí tzv. ranků[3]. 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. oversampling[4]. 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.

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

AD převodník, po dokončení měření vzorků, vrací hodnotu, která není napětí. Tato hodnota je poměrná hodnota vůči napájecímu napětí vyjádřena 12 bitově[5]. Pro převedení hodnoty převodníku na napětí je nutné znát referenční napětí systému ($V_{\text{REF}+}$). Referenční napětí může být proměnlivé, hlavně pokud systém využívá VDDA[6] 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]

[2]Neboli ADC
[3]Rank určuje v jakém pořadí je kanál změřen.
[4]Proběhne více měření a následně jsou výsledky např. zprůměrovány aby byla zajištěna větší přesnost.
[5]Např. hodnota 4095 značí, že naměřené napětí je stejně velké jako napájecí napětí.
[6]VDDA je označení pro analogové napájecí napětí v mikrokontrolérech STM32.

$V_{\mathrm{REF+}}$ se používá interní referenční napětí V_{REFINT} kalibrační data uložená během výroby mikrořadiče a naměřené hodnoty z ADC [2].

Vztah pro výpočet je následující:

$$V_{\mathrm{REF+}} = \frac{V_{\mathrm{REFINT\_CAL}} \times 3300}{V_{\mathrm{REFINT\_ADC\_DATA}}} \tag{2}$$

kde:

- $V_{\mathrm{REFINT\_CAL}}$ je kalibrační hodnota interního referenčního napětí, která je uložená ve flash paměti mikrořadiče během výroby. Tato hodnota představuje digitální hodnotu, kdy $V_{\mathrm{REF+}}$ je přesně `3.3 V`. Hodnota se získává čtením z pevné adresy[7] [2], [10].
- 3300 je konstanta odpovídající referenčnímu napětí při kalibraci ve výrobě vyjádřená v milivoltech.
- $V_{\mathrm{REFINT\_ADC\_DATA}}$ 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.

$$V_{\mathrm{CH}} = \frac{V_{\mathrm{CH\_ADC\_DATA}}}{2^{\mathrm{rozlišení}} - 1} \times V_{\mathrm{REF+}} \tag{3}$$

kde:

- V_{CH} je napětí naměřené na daném kanálu.
- $V_{\mathrm{CH\_ADC\_DATA}}$ je digitální hodnota získaná z AD převodníku.
- rozlišení je počet bitů AD převodníku.
- $V_{\mathrm{REF+}}$ 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 přerušení při dosažení specifické hodnoty časovače apod [11].

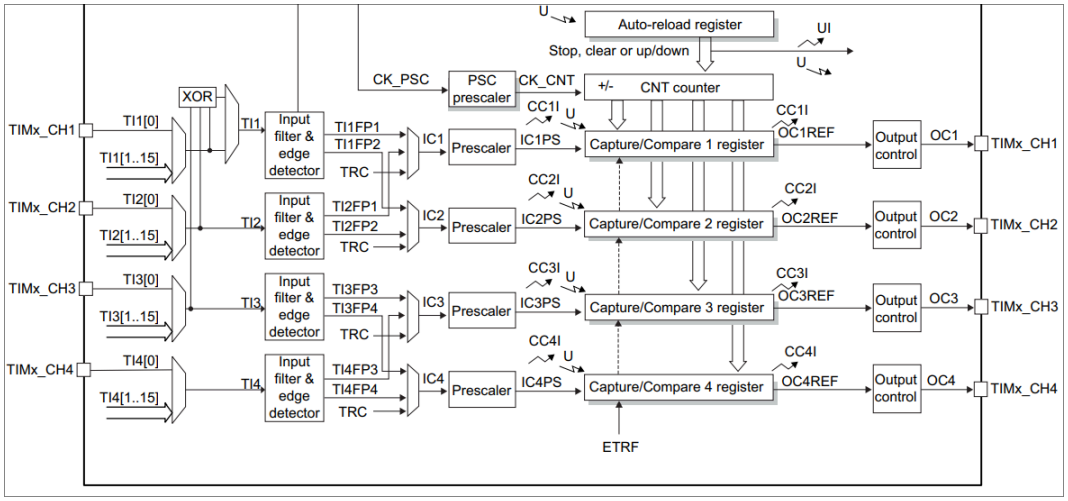
Před spuštěním časovače je potřeba nastavit, jak často má časovač čítat. Frekvenci časovače nastavuje tzn. prescaler, neboli „předdělička“. Prescaler dělí s konstantou, která je zvolena, frekvenci hodin dané periferie. Pro případ STM32G0 je to 64 MHz. Frekvence časovače určuje, jak často časovač inkrementuje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

$$F_{\mathrm{TIMx}} = \frac{F_{\mathrm{clk}}}{\mathrm{Prescaler} + 1} \tag{4}$$

Velikost čítače časovače, zda je 16bitový nebo 32bitový[8], souvisí s jeho tzv. periodou. Perioda určuje hodnotu, při jejímž dosažení se čítač automaticky resetuje na 0. Tuto

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

[8] U 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 Rovnice 5.

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

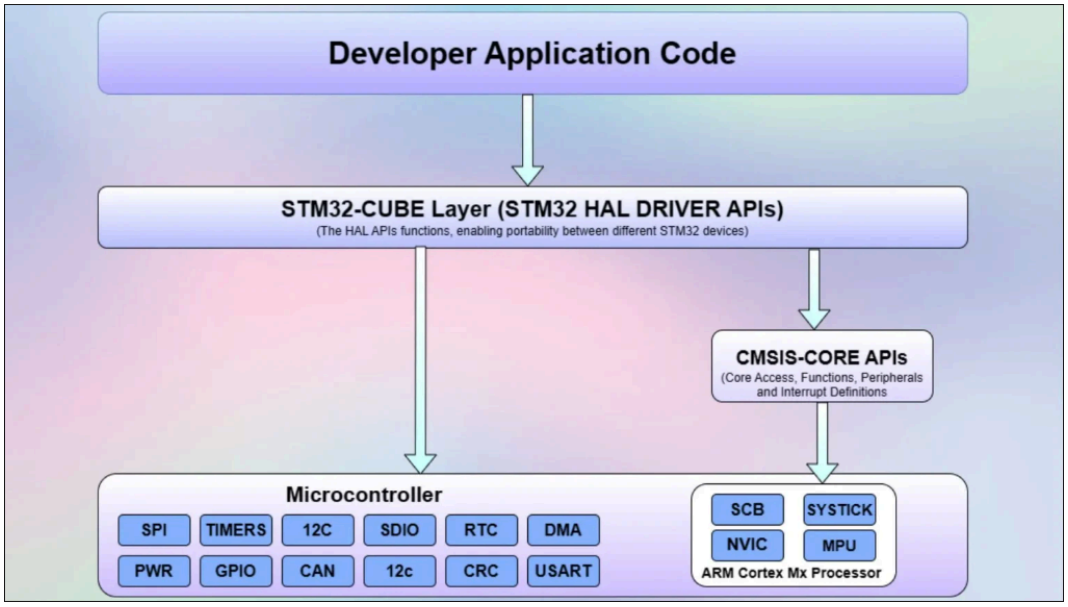
2.3.2 Knihovna STM HAL

Hardware abstraction layer je knihovna poskytovaná společností STMicroelectronics pro jejich mikrořadiče řady STM32. Tato knihovna tvoří vrstvu abstrakce mezi aplikací a periferiemi mikrokontroléru. Pokytuje funkce na vyšší úrovni, které usnadňují přístup např. k GPIO, USART, SPI, I2C bez nutnosti přímého přístupu k registrům procesoru [12].

Mezi vlastnosti, kromě zmíněné jednoduchosti patří přenositelnost. Spousta mikrořadičů například využívají jiné adresy pro specifickou funkcionalitu. Pokud vývojář bude potřebovat portovat aplikaci na jiný mikrořadič, není nutné přepisovat různé adresy a logiku programu ale pouze změnit hardware a jelikož program pracuje s abstrakcí, bude nadále fungovat.ti přímého přístupu k registrům procesoru. Obrázek 3 znázorňuje diagram, který znázorňuje architekturu HAL [13].

Součástí HALu je tzv. CMSIS, což je sada standardizovanách rozhraní, které umožňují konfiguraci periferií, správu procesorového 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 HALu[9] STMicroelectronics je ten, že CMSIS je poskytnuto přímo ARM a slouží pouze na ovládání Cortex M procesorů zatímco část od STMicroelectronics poskytuje abstrakci periferií.

[9] STMicroelectronics do svého HALu zabaluje i CMSIS od ARM.



Obrázek 3: STM32CubeMX HAL architektura [3]

2.4 Měření veličin testovaného obvodu

Pro měření veličin je nutné využít vztahů pro analýzu obvodů a schopnost sondy na vypočítat veličiny na základě měření AD převodníku nebo hodnot čítače. **TODO: rozvinout**

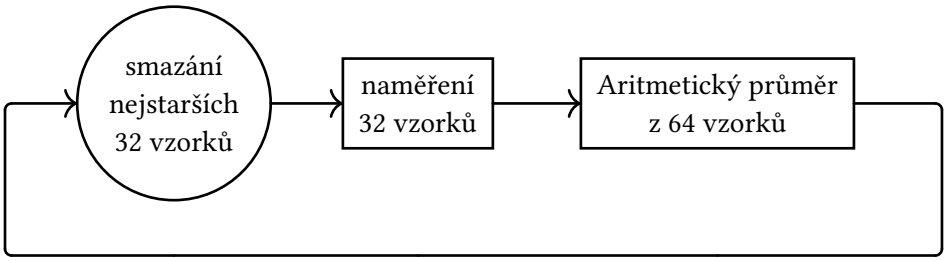
2.4.1 Měření napětí a logických úrovní

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.

$$U = \frac{\sum_{i=0}^{2^5}(U_{\text{staré i}}) + \sum_{i=0}^{2^5}(U_{\text{nové j}})}{2^6} \tag{6}$$

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[10]. 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[11] [15].

[10] Jedná se o klouzavý průměr.
[11] Dojde k eliminaci aliasingu.



Pro zjistění 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: $V_{\mathrm{ILmax}} < V < V_{\mathrm{IHmin}}$. Napětí v této oblasti v realném obvodu může vést k nepredikovatelnému chování, proto logická sonda toto napětí detekuje.

$$V_{\mathrm{ILmax}} = 0.3 \times V_{\mathrm{dd}} \tag{7}$$

$$V_{\mathrm{IHmin}} = 0.7 \times V_{\mathrm{dd}} \tag{8}$$

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 4. Rezistory $R_{\mathtt{norm}}$ (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]:

$$U_{\mathrm{dd}} = U_{R_{\mathtt{norm}}} + U_{R_x} \tag{9}$$

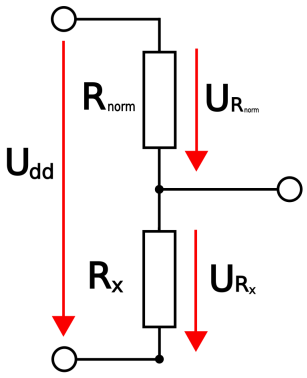
Pomocí pravidla pro napěťový dělič lze vztah mezi napětími a odpory vyjádřit jako:

$$U_{R_x} = U_{\mathrm{dd}} \times \frac{R_x}{R_{\mathrm{norm}} + R_x} \tag{10}$$

Za předpokladu, že $R_{\mathtt{norm}}$ a napájecí napětí U_{dd} jsou známé, a hodnota U_{R_x} je změřena ADC, lze neznámý odpor R_x vypočítat z upravené rovnice 10 [17]:

$$R_x = R_{\mathrm{norm}} \times \frac{U_{R_x}}{U_{\mathrm{dd}} - U_{R_x}} \tag{11}$$

V praxi probíhá měření neznámého odporu R_x následujícím způsobem: Uživatel sestaví napěťový dělič skládající se z normálového rezistoru $R_{\mathtt{norm}}$ (typicky 10 $k\Omega$) a měřeného rezistoru R_x. Normálový rezistor je připojen mezi referenční napětí U_{dd} a vstup ADC (kanál 1), zatímco R_x je zapojen mezi tento vstup a zem (viz schéma Obrázek 4). Sonda následně změří napětí U_{dd} na kanálu 1 ADC a pomocí rovnice 11, vypočítá hodnotu neznámého odporu [17].



Obrázek 4: Schéma děliče napětí

2.4.3 Měření frekvence a střídy PWM

K měření frekvence je využíván 32 bitový časovač,

2.4.4 Detekce pulzů

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 Reciever Transmiter je rozhraní, kde data jsou odesílána bez společného hodinového signálu mezi odesílatelem a přijemcem. Místo toho je podstatný baudrate[12], 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 dat[13].
- **Paritní bity** - Paritní bity slouží k detekci chyby v přenosu. Parita nám dokáže pouze detekovat chybu rámce pouze v případech, kdy nevznikne chyb více[14].
- **Stop bit** - Stop bit[15] 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.

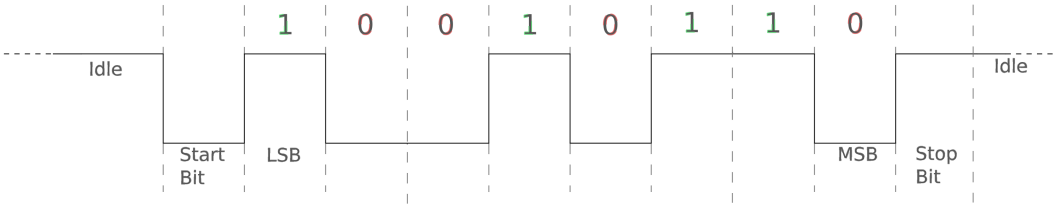
[12] Počet bitů přenesených za sekundu

[13] Lze používat i 7 bitů nebo 9 bitů dat.

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

[15] Stop bitů může být i několik

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 5 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.

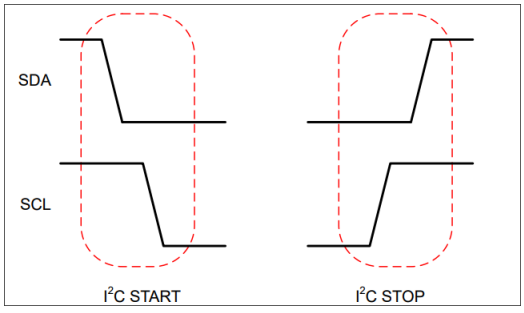


Obrázek 5: Způsob zpracování signálu UART bez parity

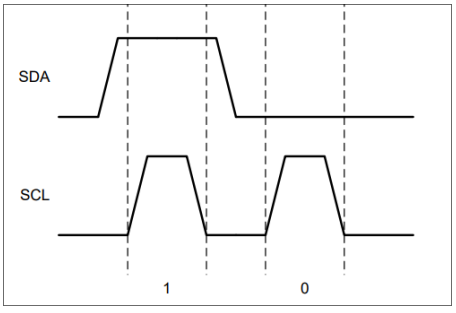
2.5.2 I2C Bus

Inter-Integrated Circuit je seriová komunikační sběrnice, který byl vytvořen Philips Semiconductor jako nízkorychlostní sběrnice pro propojení zařízení jako např. mikrokonkrolery 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].

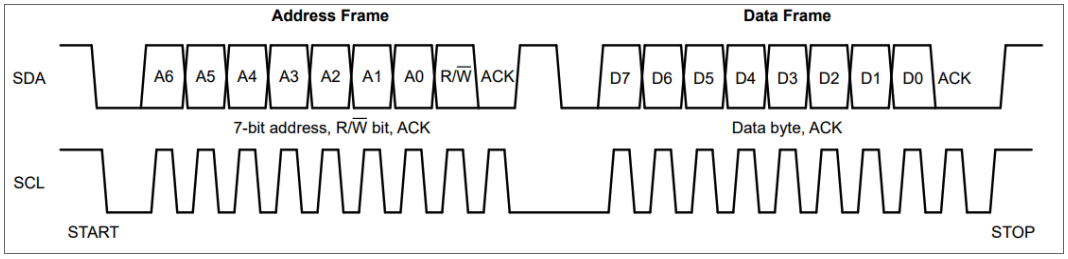


Obrázek 6: Zahájení a ukončení komunikace v I2C [4]



Obrázek 7: Logická jednička a logická nula v 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 8: Rámce I2C [4]

Obrázek 7 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. Přijimač 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

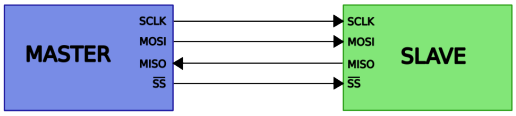
Serial peripherial interface je jeden z nejvíce využívaných rozhraní používaný mezi mikrokontrolery a periferiemi jako např. AD převodníky, SRAM, EEPROM apod. Rozhraní nemá definované jaké napětí se používají a ani velikosti rámců. Typicky se používá 8 bitů. Oproti UART a I2C vyniká rychlostí komunikace, 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[16]. `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`[17], neboli slave select. Ten určuje, se kterým slave zařízením probíhá komunikace, každé zařízení má vlastní `SS` pin [22]. Obrázek 9 ukazuje způsob zapojení vodičů v případě jednoho slave zařízení. Pro zahájení komunikace nastaví logicky nízkou úroveň na `SS`[18]. Master zahájí generování hodinového signálu, podle kterého se synchronizuje komunikace. Jelikož je 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 10 znázorňuje připojení více slave zařízení. V tomto případě master využívá více `SS` a podle přivedení nízké logické úrovně určuje směr komunikace [22].

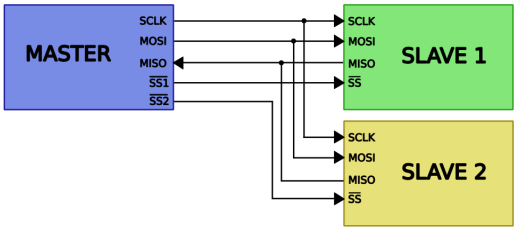
[16] 4 vodiče má v případě jednoho slave zařízení. S každým dalším slave zařízením musí být připojen další `SS`.

[17] Někdy také `CS` jako chip select.

[18] Jelikož se spíná vodič do log. 1, tak má značka `SS` nad sebou negaci.

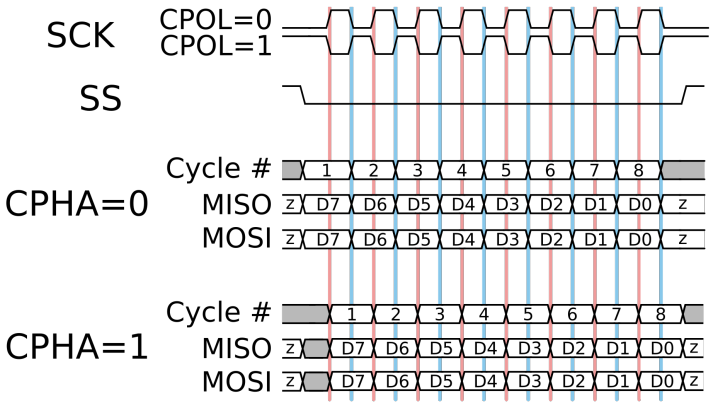


Obrázek 9: Diagram SPI komunikace s jedním slave zařízením



Obrázek 10: Diagram SPI komunikace s více slave zařízeními

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[19].



Obrázek 11: Časový diagram SPI zobrazující úroveň a posun hodinového signálu [5]

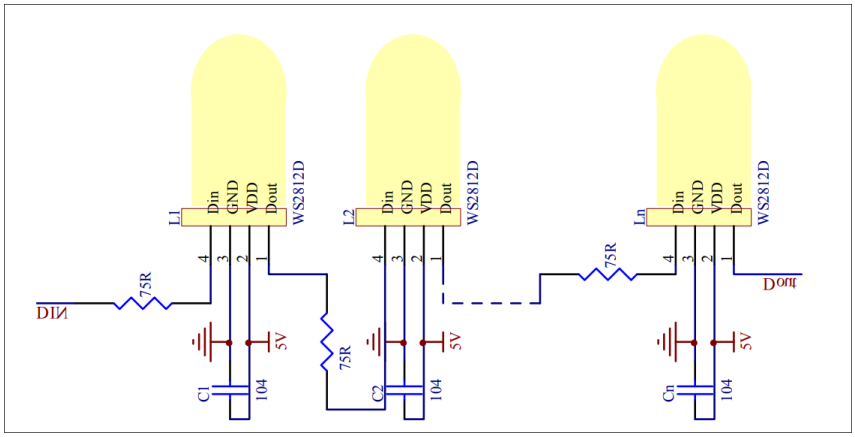
2.5.4 Neopixel

Neopixel je název pro kategorii adresovatelných RGB LED. Dioda má celkem 4 vodiče: ground, Vcc, DIn a DOut. LED má vlastní řídící obvod, který ovládá barvy diody na základě signálu z vodiče DIn. Výhoda LED je možnost připojit diody do serie, a jedním vodičem ovládat všechny LED v sérii [6]. Obrázek 12 znázorňuje zapojení více LED do série a schopnost ovládání jedním vodičem.

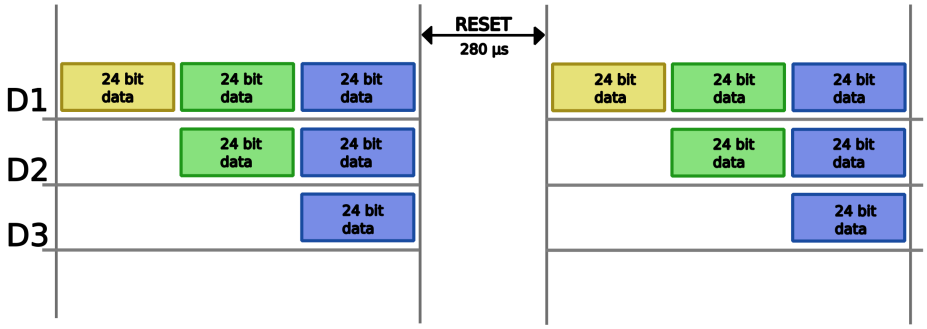
Data do LED se zasílají ve formě 24 bitů, kdy každých 8 bitů reprezentuje jednu barevnou složku. Parametry pořadí složek, časování apod. se může lišit v závislosti na konkrétním verzi a provedení LED. V této práci je vycházeno z WS2812D. První bit složky je, v případě WS2812, MSB[20].

[19] 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.

[20] Most significant bit



Obrázek 12: Způsob zapojení RGB LED do série [6]



Obrázek 13: Diagram posílání dat pro zapojené WS2812D v sérii [6]

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 řídícímu 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 řídící 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, řídící obvod, už neposílá data dále, ale zpracuje je Tabulka 2 ukazuje časování pro WS2812D.

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

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

2.6 Grafické řešení

Kapitola 2.1 zmiňuje důraz na jednoduchou přístupnost ve výuce, což zahrnuje i jednoduché zobrazení informací, které uživatel potřebuje. Proto aby byla sonda jednoduše použitelná bez nutnosti instalace specialního softwaru byla zvolena metoda generování TUI v terminálové aplikaci. Ke generaci rozhraní bude docházet na straně mikrokontroleru a posíláno UART periferií do PC.

2.6.1 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 [23].

Syntaxe

Základní syntaxe escape sekvencí pro formátování textu je:

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

- `\033` (ASCII 27 v osmičkové soustavě) označuje začátek escape sekvence[21]
- `[` 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.

[21] 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 dolu, `C` jako doprava a `D` jako doleva na pozici akce [24].

```bash
\033[<row>;<col>H // Pohyb na konkrétní pozici
\033[<posun><směr> // Posune kurzor o danou pozici
\033[10;15H // Posune kurzor na pozici 10. řádku a 15 sloupce
\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 [24]. .

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

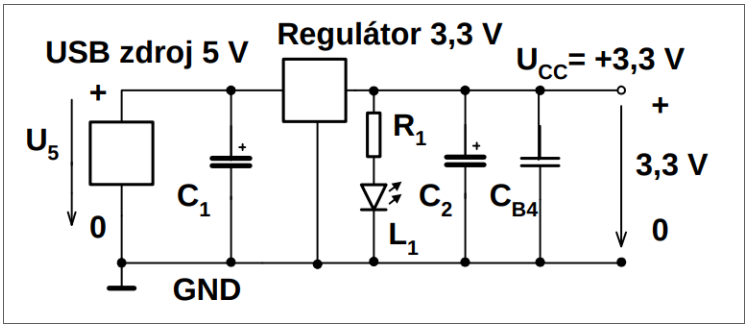
Kapitola 3

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 USB převodník. Převodník přivádí 5 V, které je využívané USB konektorem. Jelikož STM32 vyžaduje napětí cca 3.3 V je nutné napětí snížit. Pro snížení napětí byl využit zpětnovazební regulátor. Pro to byl použit linearní stabilizátor **HT7533**, který stabilizuje napětí na 3.3 ± 0.1 V. Ke vstupu je připojen kondenzátor `C1` k potlačení šumu o velikosti 10 μF. K výstupu je připojen keramický kondenzátor[22] `C2` k zajištění stability výstupu o velikosti také 10 μF [25].



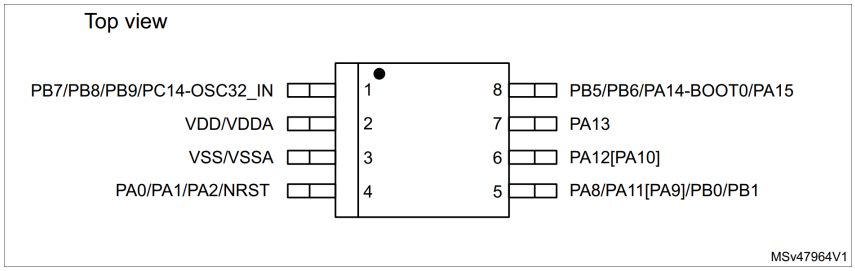
Obrázek 14: Zapojení regulátoru pro napájení STM32G030 [7]

Návrh zohledňuje implementaci lokálního módu. 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 zapojení 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 $0.7 \times V_{\mathrm{dd}}$, 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

[22] Keramický s důvodu, že LDO požadují nízké ESR



Obrázek 15: STM32G030Jx SO8N Pinout [8]

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

3.2 SOP8

Obrázek 17[23] ukazuje zapojení STM32G030 v malém pouzdře. 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, základní funkce terminálového režimu a vybrané pokročilé funkce tj. shift register a Neopixel testování.

Jelikož je pouzdro malé, tak se na jednom fyzickém pinu nachází více periferií Obrázek 15 ukazuje, že na pinu 4, kde se nachází `PA0`, má připojený i `NRST`. NReset 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.

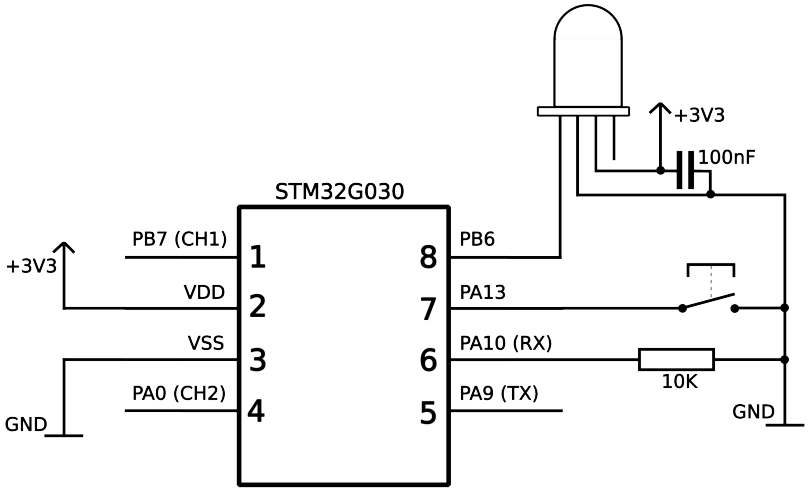
Address[1]	Corresponding option register (section)	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0x1FFF7800	FLASH_OPTR (3.7.8)	Res.		IRHEN	NRST_MODE		nBOOT0	nBOOT1	nBOOT_SEL	Res.	RAM_PARITY_CHECK	DUAL_BANK	nSWAP_BANK	WWDG_SW	IWDG_STBY	IWDG_STOP	IWDG_SW	nRST_SHDW	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

Obrázek 16: Paměťový prostor Flash option bits [2]

Další problém představuje pin 8, který obsahuje `PA14-BOOT0`. 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-BOOT0` ve vysoké logické úrovni, MCU se chová stejně, jako by paměť byla prázdná [2]. Standartně se mikrokontroler nahrává a debuguje pomocí tzn. SWD[24], 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 17. Pro

[23] Schéma zapojení bylo zrealizováno pomocí nástroje *Autodesk Eagle* [26]. Komponenta Neopixel RGB LED byla použita jako externí knihovna [27].

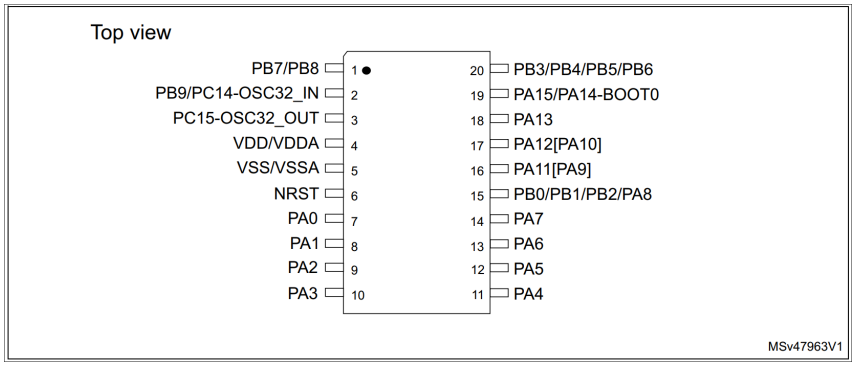
[24] Serial Wire Debug slouží pro jednoduší vývoj na mikrokontrolerech, je možné číst FLASH, RAM, nahrávat program, nastavovat option bity apod.



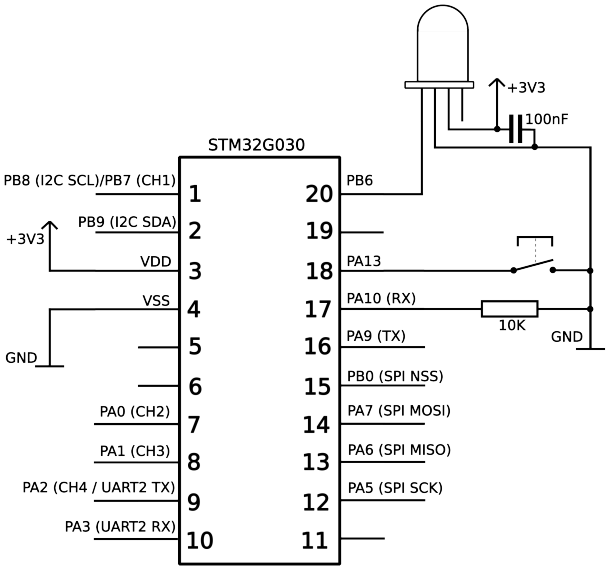
Obrázek 17: Schéma zapojení STM32G030 v pouzdře SOP8

jednoduchost se firmware nahraje pomocí UART. V tomto případě je ale potřeba řídit, zda má být nahráván firmware nebo spuštěn program. Optional bit `nBOOT_SEL` určuje, zda má být toto řízeno pomocí bitů `nBOOT0` a `nBOOT1` nebo pomocí úrovně `PA14-BOOT0`. V případě sondy, je potřeba druhá možnost, takže je nutné nastavit bit `nBOOT_SEL` na `0`.

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, odchytávání Neopixel dat, detekce pulsů a generování frekvence. Pin `PB6` je použit pro odesílání dat do testované RGB LED.



Obrázek 18: STM32G030Jx TSSOP20 Pinout [8]



Obrázek 19: Schéma zapojení STM32G030 v pouzdře TSSOP20

3.3 TSSOP20

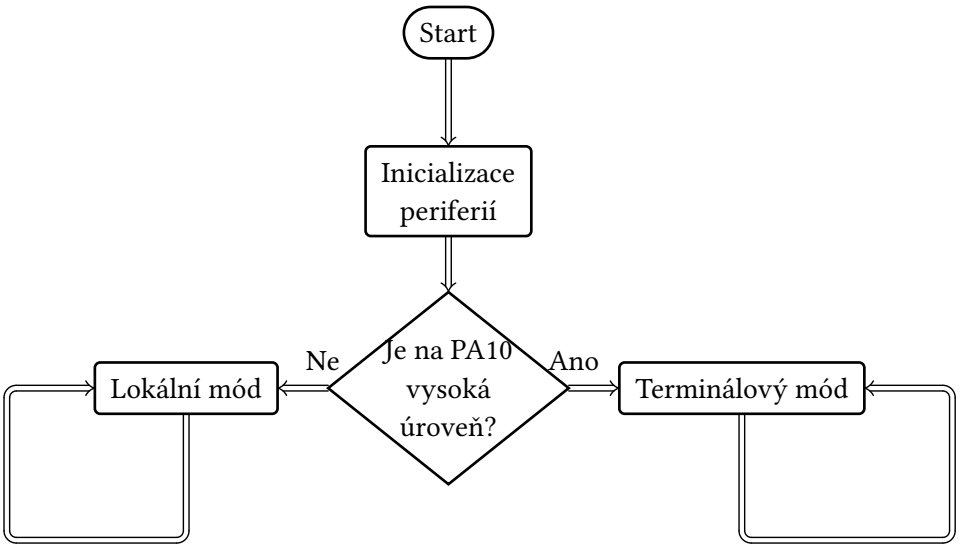
Kapitola 4

SW návrh logické sondy STM32

Při zapnutí mikrořadiče, proběhne inicializace všech nutných periferií. Pro STM32 je to Časovače číslo 1,2 a 3, AD převodník a UART1.

4.1 Logika nastavení módů

Po inicializaci zařízení zařízení zkontroluje, zda má dále pokračovat v terminál módu, nebo lokálním módu. Mód se aktivuje v závislosti na logické úrovni pinu PA10 na kterém se nachází periferie USART1. Jak bylo zmíněno v Kapitola 2.5.1, pokud je PC propojeno vodičem s mikrořadičem, na vodiči se nachází vysoká úroveň. Takto dokáže kontroler určit, zda je USB převodník připojen či nikoliv Obrázek 17 a Obrázek 19 má v zapojení rezistor o velikosti `10K` ohmů na pinu PA9 vůči zemi, který zaručuje, při nezapojeném pinu, nízkou logickou úroveň.



Po načtení módu zařízení reaguje na různé podněty v závislosti, na načteném módu. Aby uživatel mohl měnit jednotlivé módy, tak je zařízení vždy nutné vypnout a zapnout aby došlo ke správné inicializaci. Jednotlivé módy běží v nekonečném cyklu, dokud zařízení není vypnuto.

4.2 Lokální mód

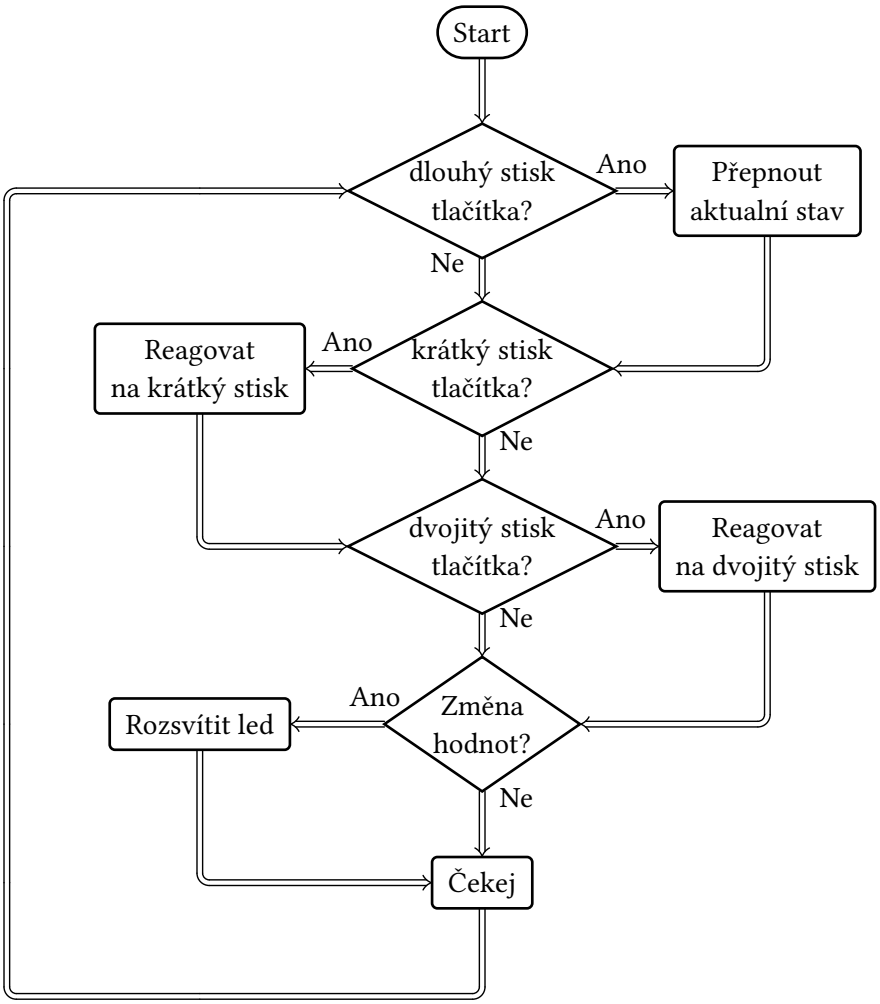
Jak Kapitola 2.2 zmiňuje, lokální mód je provozní režim, v němž zařízení nekomunikuje s externím počítačem a veškerá interakce s uživatelem probíhá výhradně prostřednictvím tlačítka a RGB LED diody. Zařízení skrze tlačítko rozpozná tři interakce: `krátký stisk` slouží k přepínání logických úrovních na určitém kanálu, `dvojitý stisk` umožňuje cyklické přepínání mezi měřícími 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. Stavy logické sondy jsou celkově tři.

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

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.

Poslední stav je **detekce pulzů**. Detekování pulzů probíhá za pomocí 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.

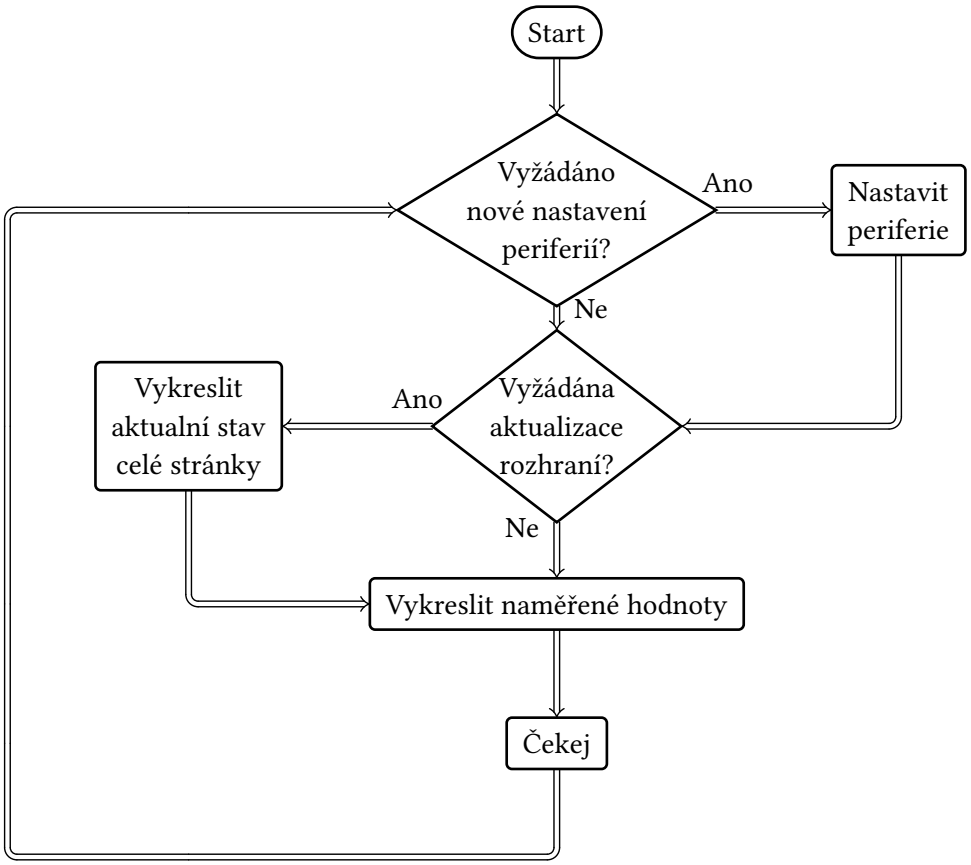
Lokální mód běží ve smyčce, kde se periodicky kontrolují změny a uživatelské vstupy. Důvod pro zvolení této metody je ten, že je nutné aby bylo přerušení krátké, tzn. není možné aby se na 1 sekundu rozsvítila led. Další důvod je ten, že takto je zaručeno, že se vždy splní úkony ve správném pořadí. V **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.



4.3 Terminálový mód

Tento mód využívá rozhraní UART, pro seriovou komunikaci s PC. Mód funguje způsobem, kdy periodicky reaguje na změny, které periferie či uživatel vyvolá. Tuto skutečnost ukazuje Obrázek 20. Sonda obsahuje datovou strukturu, ve které uchovává flagy, které značí požadavek na změnu. Tyto flagy jsou ovládány skrze přerušení. Pokud uživatel, stiskne tlačítko a tím pošle znak, UART rozhraní vyvolá přerušení a následně se dle stavu sondy a poslaného znaku provede akce. Přerušení také nastaví flagy, pokud například, je nutné vykreslit jinou stránku, nebo změnit měřící režim. Smyčka při dalším cyklu na tyto skutečnosti zareaguje a přenastaví potřebné periferie a vykreslí stránku. Pokud stránka zobrazuje měřené hodnoty, jsou aktualizovány v každém cyklu.

Tato metoda oproti okamžité reakci již v přerušení má výhodu v tom, že nemůže dojít k překrytí činnosti hlavní smyčky. 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 periferií. Touto medotou zajistíme, že vždy je vykonávána akce ve správném pořadí. **TODO: dokončit, napsat o tom jak funguje nastavovani periferii apod**



Obrázek 20: Diagram smyčky terminálového módu

Kapitola 5

Realizace logické sondy

TODO: REVIZE

5.1 Grafické rozhraní

TODO: REVIZE Pro snadné pochopení ovládání i jedincem, který se zabývá podobným tématem poprvé, je podstatné, aby logická sonda byla jednoduše ovladatelná, přenositelná a obecně aby zprovoznění sondy nebylo náročné. Pro spoustu začátečníků může být obtížné zjistit, jak mikrokontrolér připojit k PC, jaký program nainstalovat, jaké ovladače nainstalovat a podobně.

Proto v případě logické sondy bylo zvoleno řešení, kde uživatel pouze připojí logickou sondu k PC a nainstaluje si známý terminál pro seriovou komunikaci, a může sondu používat. Je to z důvodu, že logická sonda využívá ANSI escape sekvence pro generování terminálového uživatelského rozhraní. Tento přístup nevyžaduje instalaci ovladačů pro specifický software a hlavně není závislý na operačním systému. Tzn. podpora této logické sondy je na všechny standartní operační systémy. V Kapitola 2.5.1 bylo zmíněno, že UART umí full duplex komunikaci, díky tomu počítač může posílat zprávy i do mikrokontroleru. Tuto vlastnost logická sonda použije pro ovládání rozhraní uživatelem.

V rámci této práce byl využíván software **PuTTY**. FOSS[25], který má podporu různých komunikačních protokolů, jako je SSH, Telnet, SCP a další. PuTTY podporuje také ANSI escape sekvence a je možné upravit velké množství nastavení.

5.1.1 Odesílání zpráv

Před odesláním první zprávy přes seriovou komunikaci je žádoucí inicializovat UART periferii. To je možné přes STM32CubeMX[26], kde vývojář nastaví potřebné parametry a je mu vygenerován základní kód. Pro potřeby projektu bylo zvoleno následující nastavení:

Po inicializaci je možné poslat zprávu pomocí například následovně:

```c
void ansi_send_string(const char* str) {
    HAL_UART_Transmit(&huart1, (uint8_t*)str, strlen(str),
    HAL_MAX_DELAY);
}
```

kde reference na `huart1` je inicializovaná struktura. Pro jednodušší generování rozhraní byla vytvořena abstrakce zvaná `ansi abstraction layer` (dále jen AAL). Tato abstrakce umí potřebné ansi senkvence generovat. Zde je příklad funkce, která odesílá text, který již má speciální efekty:

[25] Free open source software

[26] STM32CubeMX je grafický program, který dává jednodušší možnost úpravy periferií.

```c
static void MX_USART1_UART_Init(void) {
    huart2.Instance = USART1;
    huart2.Init.BaudRate = 115200;
    huart2.Init.WordLength = UART_WORDLENGTH_8B; // velikost dat
    huart2.Init.StopBits = UART_STOPBITS_1; // počet stop bitů
    huart2.Init.Parity = UART_PARITY_NONE;
    huart2.Init.Mode = UART_MODE_TX_RX; // Zapnut full duplex
    huart2.Init.HwFlowCtl = UART_HWCONTROL_NONE;
    huart2.Init.OverSampling = UART_OVERSAMPLING_16;
    huart2.Init.OneBitSampling = UART_ONE_BIT_SAMPLE_DISABLE;
    huart2.Init.ClockPrescaler = UART_PRESCALER_DIV1;
    huart2.AdvancedInit.AdvFeatureInit = UART_ADVFEATURE_NO_INIT;
    if (HAL_UART_Init(&huart1) != HAL_OK) {
        Error_Handler();
    }
}
```

Úryvek kódu 1: test

```c
// Odesílání textu s efekty
void ansi_send_text(const char* str,
                    const char* color,
                    const char* bg_color,
                    const _Bool bold) {
    if (bg_color != NULL && strlen(bg_color) != 0) {
        ansi_send_string(bg_color);
    }
    if (color != NULL && strlen(color) != 0) {
        ansi_send_string(color);
    }
    if (bold) {
        ansi_send_string("\033[1m"); // Tučné písmo
    }
    ansi_send_string(str);
    ansi_send_string("\033[0m"); // Reset formátování
}
```

Nebo například funkce, která nastavuje kurzor na specifickou pozici:

```c
void ansi_set_cursor(const uint8_t row, const uint8_t col) {
```

```
2       if (row > TERMINAL_HEIGHT || col > TERMINAL_WIDTH) {
3           Error_Handler();
4       }
5
6       char result[BUFF_SIZE];
7
8       size_t ret = snprintf(result, BUFF_SIZE, "\033[%u;%uH", row,
        col);
9
10      if (ret >= sizeof(result) || ret < 0) {
11          Error_Handler(); // kontrola zda se text vešel do bufferu
12      }
13
14      ansi_send_string(result);
15  }
```

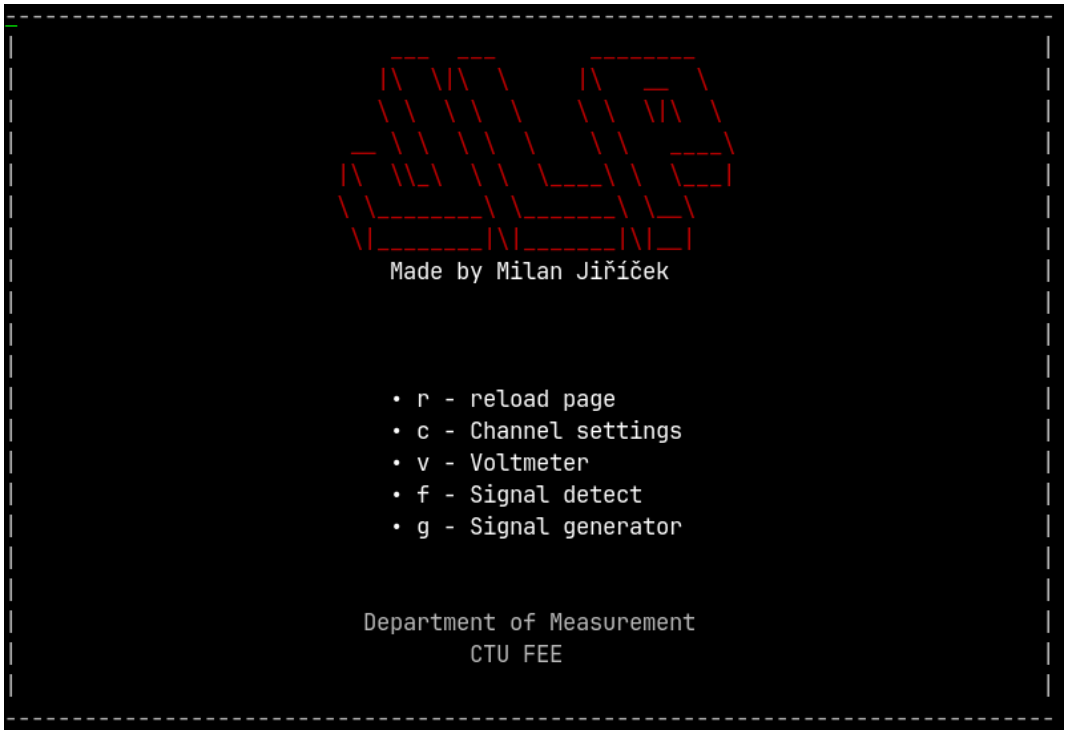
Další funkce, které zjednodušují ovládání jsou k nalezení v souboru `ansi_abstraction_layer.c`. Pro další kontext budou postačovat hlavně tyto dvě funkce.

Pomocí AAL je možné vykreslovat efektivně větší celky. Zde je příklad z TUI, kdy jedna funkce pomocí instrukcí sestaví větší celek, v tomto případě nápovědu pro odchytávání signálu:

```c
1  void ansi_frequency_reader_generate_hint(void) {
2      ansi_set_cursor(TERMINAL_HEIGHT - 2, 4);
3      ansi_send_text("m - change mode ", RED_TEXT, "", false);
4      ansi_set_cursor(TERMINAL_HEIGHT - 2, 21);
5      ansi_send_text("t - change gate time ", BLUE_TEXT, "", false);
6      ansi_set_cursor(TERMINAL_HEIGHT - 2, 45);
7      ansi_send_text("d - delete flag ", GREEN_TEXT, "", false);
8  }
```

Tyto větší celky ulehčili tvorbu tzv. `ASCII ART`[27], ohraničení nebo tvorby menu, což vylepší vizuál stránky Obrázek 21 ukazuje, jak vypadá hlavní stránka logické sondy realizované skrze AAL.

[27] ASCII ART je termín pro obrázek, který je vytvořen pomocí symbolů ASCII.



Obrázek 21: TUI hlavní stránky logické sondy

5.1.2 Přijimání zpráv

Pro zajištění komunikace mezi sondou a zařízením je nutné také zpracovávat vstupy od uživatele, které jsou přijímány na rozhraní UART. K tomuto účelu sonda využívá přerušení, které je vyvolané při přijetí znaku na UART. Pro implementaci je použit callback `HAL_UART_RxCpltCallback`, který je již deklarován v knihovně HAL, tzn. stačí ho definovat pro správnou funkcionalitu.

```c
void HAL_UART_RxCpltCallback(UART_HandleTypeDef* huart) {
    if (huart->Instance == USART1) {
        HAL_UART_Receive_IT(&huart1, &received_char, 1);
        if (received_char == 'r' || received_char == 'R') {  // reload
            ansi_clear_terminal();
            render_current_page();
        } else {
            get_current_control();
        }
    }
}
```

Callback se skládá ze dvou částí, jedna je samotný callback, který zjistí, jaký UART přijmul znak a zkontroluje, zda to není znak, který je obecný pro všechny okna TUI. Pokud ne, zavolá `get_current_control`. Kde se nachází switch, který podle stránky, na které se uživatel nachází, zvolí ovládací funkci.

```c
void control_main_page(void) {
    switch (received_char) {
        case 'v':
        case 'V':
            ansi_clear_terminal();
            ansi_voltage_page();
            break;
        case 'c':
        case 'C':
            ansi_clear_terminal();
            ansi_channel_set_page();
            break;
        case 'f':
        case 'F':
            ansi_clear_terminal();
```

```
16              ansi_frequency_reader_page();
17              break;
18          case 'g':
19          case 'G':
20              ansi_clear_terminal();
21              ansi_impulse_generator_page();
22      }
23  }
```

Zde je možné například vidět funkci, která slouží pro ovládání hlavní stránky. Jak je vidět, funkce podporuje velké i malé písmo. Po zjištění znaku spustí určitou akci. Například při stisku `V`, vyčistí terminalové okno a přenastaví stránku na voltmetr.

Zde je podstatné, že samotný interupt nenastavuje okno, ale pouze přenastaví flag a ke změně dojde v hlavní smyčce. Pokud by to tak nebylo, mohlo by dojít ke kolizi akcí. Například hlavní smyčka by byla v průběhu překreslování a v ten moment, by bylo vyvoláno přerušení UARTem. Přerušení by překreslilo stránku a program by po přerušení pokračoval ve stejném bodě. Zde by se mohlo stát, že by se polovina stránky překreslila a polovina ne.

5.2 Měření napětí a zjišťování logické úrovně

Pro měření napětí je využíván AD převodník. Jak již bylo uvedeno v Kapitola 2.3.1.1, převodník po realizaci měření vrátí digitální hodnotu, kterou je potřeba převést na napětí. Pro získání přesného napětí je žádoucí změřit a vypočítat referenční napětí a nepoužívat odhad. V projektech, které se nezakládají na přesnosti je časté používat hodnotu `3.3 V`, což je idealizované napájecí napětí. Ve skutečnosti, je ale běžné, že napětí kolísá, popř. napětí může poklesnout, pokud je mikrořadič vytížen. Pokud je nutné, aby napětí bylo, co nepřesnější, musí být vypočteno realné referenční napětí.

Podstatné je, aby byl inicializován AD převodník. Pomocí HALu je to možné následovně:

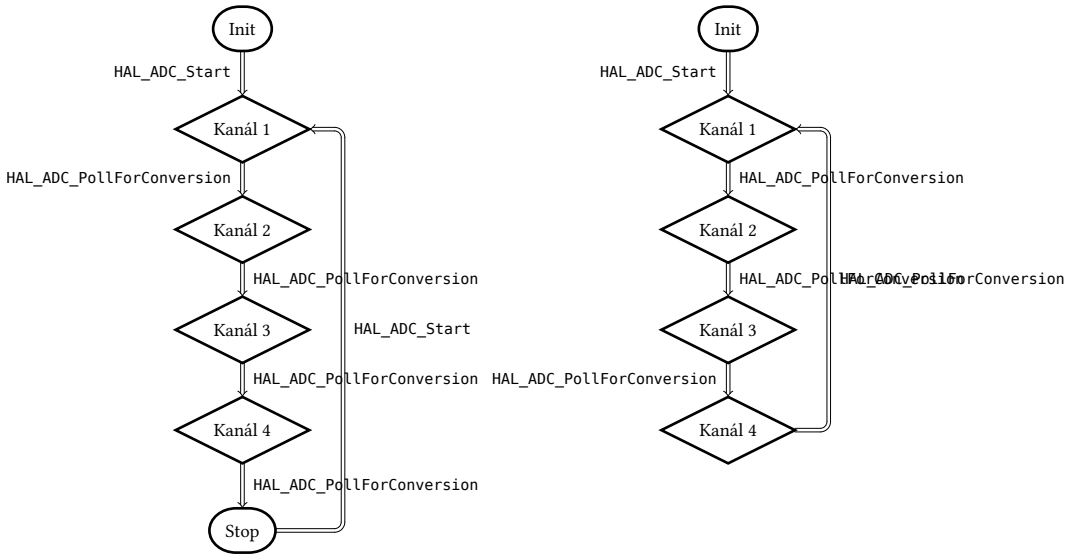
```c
static void MX_ADC1_Init(void) {
    ADC_ChannelConfTypeDef sConfig = {0};

    hadc1.Instance = ADC1;
    hadc1.Init.ClockPrescaler = ADC_CLOCK_ASYNC_DIV1; // předdělička
    hadc1.Init.Resolution = ADC_RESOLUTION_12B; // rozlišení 12 bitů
    hadc1.Init.DataAlign = ADC_DATAALIGN_RIGHT;
    hadc1.Init.ScanConvMode = ADC_SCAN_DISABLE;
    hadc1.Init.EOCSelection = ADC_EOC_SINGLE_CONV;
    hadc1.Init.LowPowerAutoWait = DISABLE;
    hadc1.Init.LowPowerAutoPowerOff = DISABLE;
```

```
12      hadc1.Init.ContinuousConvMode = ENABLE; // pokračuje i po konci
        cyklu
13      hadc1.Init.NbrOfConversion = 1; // počet kanálů
14      hadc1.Init.ExternalTrigConv = ADC_SOFTWARE_START;
15      hadc1.Init.ExternalTrigConvEdge = ADC_EXTERNALTRIGCONVEDGE_NONE;
16      hadc1.Init.DMAContinuousRequests = ENABLE;
17      hadc1.Init.Overrun = ADC_OVR_DATA_PRESERVED;
18      hadc1.Init.SamplingTimeCommon1 = ADC_SAMPLETIME_160CYCLES_5;
19      hadc1.Init.SamplingTimeCommon2 = ADC_SAMPLETIME_1CYCLE_5;
20      hadc1.Init.OversamplingMode = DISABLE;
21      hadc1.Init.TriggerFrequencyMode = ADC_TRIGGER_FREQ_HIGH;
22      if (HAL_ADC_Init(&hadc1) != HAL_OK) {
23          Error_Handler();
24      }
25      sConfig.Channel = ADC_CHANNEL_1;
26      sConfig.Rank = ADC_REGULAR_RANK_1;
27      sConfig.SamplingTime = ADC_SAMPLINGTIME_COMMON_1;
28      if (HAL_ADC_ConfigChannel(&hadc1, &sConfig) != HAL_OK) {
29          Error_Handler();
30      }
31      adc1_ch = create_adc_channels(&hadc1);
32      realloc_v_measures(adc1_ch, &v_measures);
33      setup_adc_channels(&hadc1, adc1_ch, true);
34  }
```

kde je spousta nastavení, které pro tento projekt nejsou úplně podstatné nicméně některá konfigurace je stěžejní.

Parametr `hadc1.Init.NbrOfConversion` určuje, kolik měření bude provedeno, než se AD převodník zastaví. Měření může probíhat na více kanálech (V tomto případě až na 4 kanálech) ale jeden převodník nemůže měřit všechny kanály najednou. Je nutné určit pořadí v jakém bude měřit.



V levém diagramu je možno vidět, jakým způsobem funguje převodník, pokud **není** `hadc1.Init.ContinuousConvMode` nastaven na `ENABLE`. Při každém zahájení měření kanálu pomocí `HAL_ADC_PollForConversion`, převodník udělá `x` vzorků během 160,5 cyklů[28]. Po dokončení vzorkování lze zjistit hodnotu funkcí `HAL_ADC_GetValue`. Jakmile AD převodník dokončí konverzi, kanál se nastaví na 2. Při zavolání konverze znovu se již měří na druhém kanálu. Takto sekvenčně převodník pokračuje dokud nedojde k poslednímu kanálu. Pokud už další kanál nenásleduje, ad převodník zastaví svou činnost a potřeba ho znovu zapnout aby pokračoval.

V pravém diagramu již kontinuální mód zapnutý a měření probíhá neustále dokola. Pokud AD převodník dojde k poslednímu kanálu, začne měřit opět první. K zastavení dojde pouze v případě, že je zavolána funkce `HAL_ADC_Stop`.

Logická sonda pracuje ve smyčce, kdy jednou za určitý krátký úsek zastaví klasické měření kanálů a změří referenční napětí. Tento způsob zajišťuje neustále validní referenci.

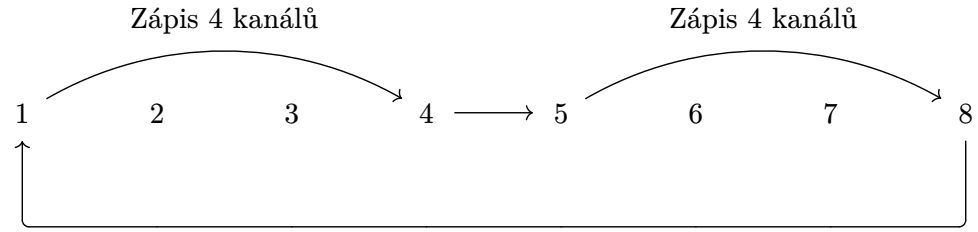
Během měření kanálů je nutné, aby nebyl zbytečně zatěžován procesor. Procesor v hlavní smyčce pracuje na vykreslování dat do terminálu a pokud by prováděl měření, mohlo by to ovlivnit rychlost měření napětí a nemuselo by být dosaženo dostatečnému sebrání vzorků pro plovoucí průměr. Toto je vyřešeno pomocí DMA[29]. HAL aktivuje DMA pro AD převodník pomocí `hadc1.Init.DMAContinuousRequests` nastavené na `ENABLE`. Parametry DMA lze nastavit pomocí STM32CubeMX. DMA je nastaveno jako cirkularní buffer, do kterého se zapisují hodnoty z AD převodníku. Procesor k těmto datům přistoupí, až bude potřebovat.

Logická sonda umí počet kanálů nastavovat dynamicky, tzn. může měřit pouze 1 kanál a nebo během běhu programu zapnout další dva. Možnost změny počtu kanálů během chodu je problém, jelikož pokud pro DMA je alokována pamět na zásobníku, velikost musí být ideálně statická.

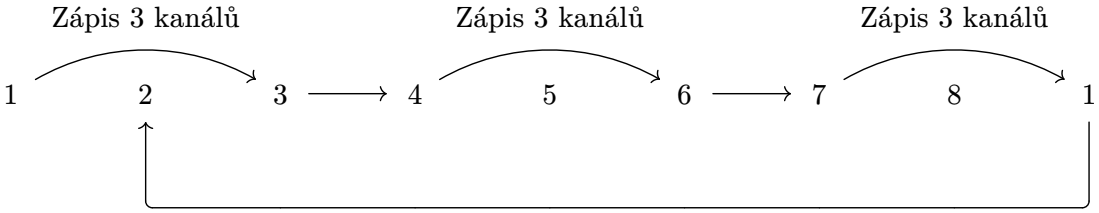
[28]Tato hodnota je v STM32G0 nejvyšší a zaručuje nám tu největší možnou přesnost. Některé mikrořadiče nabízí i vyšší počet odběrů.

[29]DMA je metoda, kdy periferie umí přímo zapisovat nebo číst z paměti. Vyhoda je, že procesor nemusí zasahovat a šetří se zdroje, které můžou být využity jinde.

Mějme alokovanou paměť na zásobníku, která bude 8 integerů, tzn. 2 integery pro každý kanál. Pokud jsou zapnuty 1, 2 nebo 4 kanály nenastává žádný problém, protože nakonci se začnou hodnoty ukládat opět od začátku. Takže při opakovaném zápisu nedojde k „rozjetí“ indexů. A jednodušše můžeme říct, že na indexu 6, je vždy kanál 2.



Pokud ale budeme mít aktivovány 3 kanály dojde k problému. Už při první iteraci se nám indexy posunou, což je nežádoucí.



Existuje možnost toto vyřešit pomocí nalezení nejmenšího společného násobku. Pokud, ale hledáme násobek pro 100, 200, 300, 400, tak dojdeme k tomu, že je to naprosté plýtvání pamětí, které si na STM32G0 nemůžeme dovolit.

Tento problém byl vyřešen tak, že paměť je alokována na haldě, takže je dynamicky vytvořená, a realokuje se při změně, tak aby stále odpovídal počet vzorků a nedocházelo k posunu.

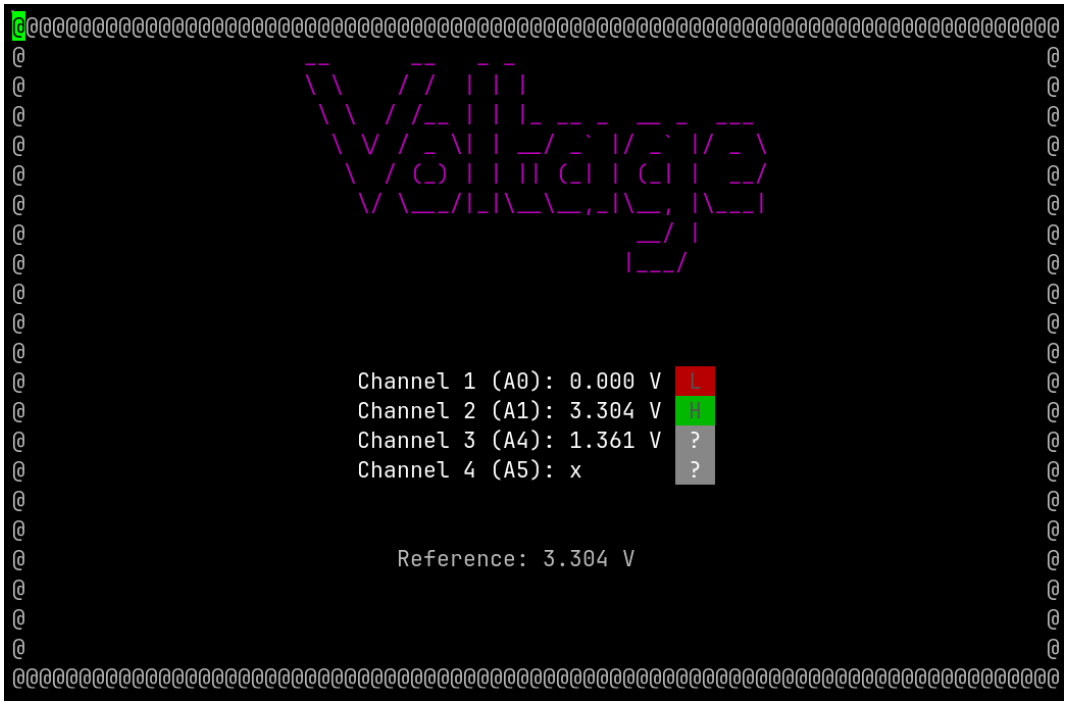
Po určitém časovém úseku, procesor zpracuje data z DMA a zprůměruje hodnoty z AD převodníku, následně hodnoty převede dle metodity v Kapitola 2.3.1.1 a vykreslí na seriovou linku pomocí ANSI sekvencí zmíněné v Kapitola 5.1.1.

TUI vykresluje hodnoty na každém kanálu a poté vykresluje, zda je logická úroveň vysoká, nízká a nebo je nejasná Obrázek 22 ukazuje vizuál stránky pro měření. Je možné pozorovat, že kanál 1 na pinu `A0` měří `0,0 V` a `L` znázorňuje nízkou úroveň. Kanál 2 ukazuje napětí `3,3V` a je to vysoká úroveň. Kanál 3 je plovoucí a není připojený. Proto úroveň je nejasná a měří pouze parazitní napětí. Kanál 4 je vypnutý.

Kanály je možné zapínat a vypínat pomocí stránky `Channels` Obrázek 23 ukazuje vzhled této stránky. Uživatel pomocí klávesových zkratek 1 až 4 volí jaké kanaly aktivovat, s tím, že po zvolení kanálů je nutné nastavení uložit stisknutím klávesy S.

Všechny data ohledně kanálů AD převodníku jsou uloženy ve struktuře zvané `adc_channels`. Tato struktura drží, jaké kanály jsou aktivovány, jaké kanály jsou označeny uživatelem, ale ještě nebyly uloženy a tím pádem aplikovány, jaká byla poslední průměrná hodnota měření, jaká čísla pinů kanály osidlují a nakonec instance `ADC_HandleTypeDef`, což je HAL struktura, která je abstrakce ovládání převodníku, ukládání konfigurací apod.

```c
typedef struct {
    _Bool channel[NUM_CHANNELS]; // aktivované kanály
```



Obrázek 22: Stránka pro měření napětí a logických úrovní

```
3       _Bool channel_unapplied[NUM_CHANNELS]; // kanály neaktivované
4       _Bool applied; // bylo nastavení uživatele aplikováno?
5       uint32_t avg_last_measure[NUM_CHANNELS]; // poslední průměr hodnot
```

Obrázek 23: Stránka pro nastavení jednotlivých kanálů

```
6     unsigned int pin[NUM_CHANNELS]; // čísla pinů
7     unsigned int count_active; // počet aktivních pinů
8     ADC_HandleTypeDef* hadc; // instance adc pro danou strukturu
9 } adc_channels;
```

5.3 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 zjistění frekvence musí být kladen důraz na režii. Při odběru dat by nesměl procesor provádět jakoukoliv. Toto se dá realizovat pomocí DMA podobně jako v Kapitola 5.2.

K zjištění frekvence je použita tzv. metoda hradlování. Metoda hradlování využívá periodu vzorkování, která je využita pro spočítání finální frekvence. Rovnice 12 uvádí způsob, jak spočítat frekvenci pomocí metody hradlování. Frekvence lze spočítat jako polovinu napočítaných pulzů za časový úsek[30]. K tomuto účelu je použit 32 bitový časovač, aby bylo možné měřit, co největší frekvence.

$$F = \frac{\frac{N}{2}}{T} \tag{12}$$

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 =                                    C
    (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 12 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.

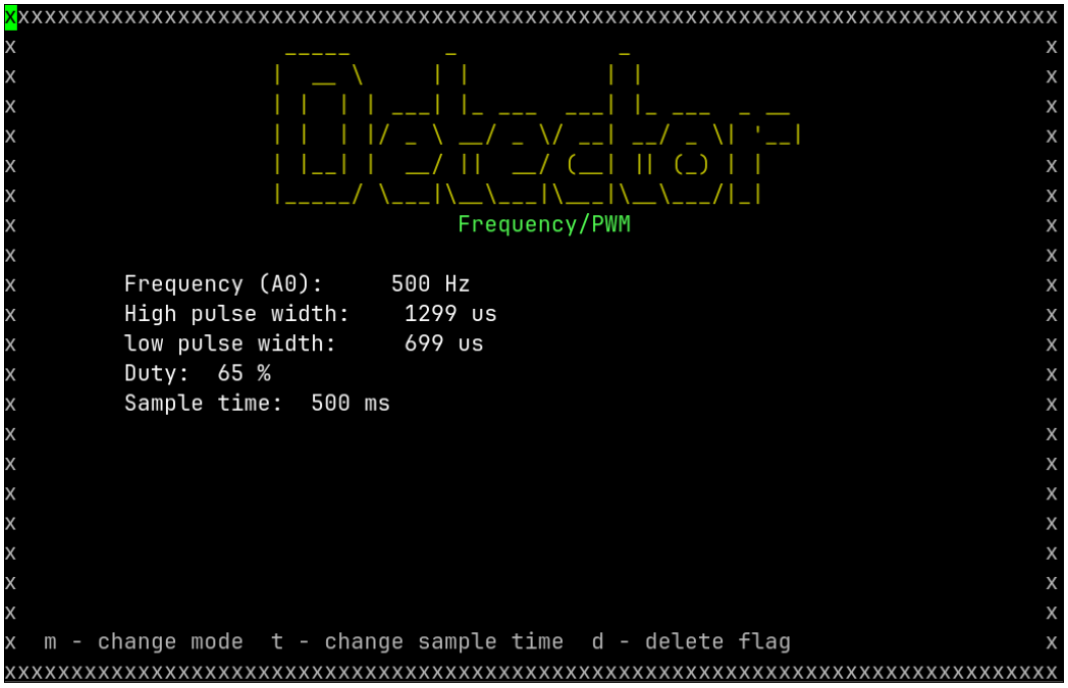
[30] Z důvodu, že časovač v tomto případě měří náběžný i sestupný pulz, je vždy počet pulzů v periodě signálu dvojnásobný, proto je zapotřebí počítat pouze s polovinou.

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 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.

```c
uint32_t rise_pulse_ticks;
if (sig_high_end > sig_high_start) {
    rise_pulse_ticks = sig_high_end - sig_high_start;
} else if (sig_high_end < sig_high_start) {
    rise_pulse_ticks = (0xFFFFFFFF - sig_high_start) + sig_high_end;
} else {
    rise_pulse_ticks = 0;
}
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 odchytávat 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 přerušení, pokud dojde k zachycení signálu, toto přerušení zkontroluje, zda hrana signálu je



Obrázek 24: Stránka pro měření frekvence a PWM

Obrázek 25: Stránka pro hledání pulzů

nástupná nebo sestupná. Poté rozhodne podle módu uživatele, kterou hranu má ignorovat a kterou má detekovat.

Když časovač odchytí správnou hranu, přerušení nastaví flag, který reprezentuje nalezený pulz. Tento pulz se poté promítne uživateli do TUI. Flag je možné smazat a čekat na další vyvolání přerušení. Do budoucna je plán, přidat automatické smazání flagu po určité době, aby této funkcionality mohlo být využíváno i bez nutnosti připojení na seriovou linku. Po nalezení pulzu se rozsvítí led, která po například 1 sekundě opět zhasne.

5.4 Generování pulzů

Při generování pulzu má uživatel možnost nastavit konkrétní délku pulzi 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 jednodušše 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 úrovně, které uživatel nemusí nutně používat jako generování pulzů, ale jako přepínání úrovní dle potřeby. **TODO: ještě se na to kouknout znovu a upravit to neaktualni**

```c
static void MX_TIM16_Init(void) {
    htim16.Instance = TIM16;
    htim16.Init.Prescaler = 63999; // předdělička
    htim16.Init.CounterMode = TIM_COUNTERMODE_UP;
    htim16.Init.Period = 999; // výchozí hodnota periody
    htim16.Init.ClockDivision = TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
    htim16.Init.RepetitionCounter = 0;
    htim16.Init.AutoReloadPreload = TIM_AUTORELOAD_PRELOAD_DISABLE;
    if (HAL_TIM_Base_Init(&htim16) != HAL_OK) {
        Error_Handler();
    }
    HAL_TIM_Base_Start_IT(&htim16);
    sig_gen_init(&signal_generator);
}
```

Obrázek 26 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.

```c
void sig_gen_toggle_pulse(sig_gen_t* generator, const _Bool con) {
    generator->start = false;

    // nastavení periody, která byla nastavena uživatelem
    __HAL_TIM_SET_AUTORELOAD(&htim16, generator->period - 1);

```

Obrázek 26: 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 6

Závěr a zhodnocení

Citace

[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] [Online]. Dostupné z: https://enxstandards.web.illinois.edu/standard/ansi-x3-4/

[24] fnky, „ANSI Escape Sequences". [Online]. Dostupné z: https://gist.github.com/fnky/458719343aabd01cfb17a3a4f7296797

[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

[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