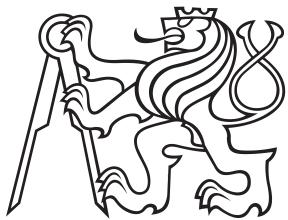


Diplomová práce



**České
vysoké
učení technické
v Praze**

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra měření

Digitální vzorkovací osciloskop s mikrořadičem pro výukové účely

Bc. Tadeáš Pilař

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

Studijní program: Kybernetika a Robotika

Obor: Kybernetika a Robotika

Květen 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pilař** Jméno: **Tadeáš** Osobní číslo: **456882**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Studijní obor: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Digitální vzorkovací osciloskop s mikrořadičem pro výukové účely

Název diplomové práce anglicky:

Microcontroller based digital sampling oscilloscope for teaching purposes

Pokyny pro vypracování:

Pro vyhodnocení dynamických vlastností elektronických obvodů a bloků v rámci studentských laboratorních experimentů navrhněte a realizujte systém s digitálním vzorkovacím osciloskopem pro měření ve frekvenční i v časové oblasti. Při realizaci vzorkovacího osciloskopu se orientujte na metodu softwarově definovaných přístrojů, kde se využije mikrořadič řady STM32 s vnitřním převodníkem ADC. Pro systém také navrhněte a realizujte vhodný generátor s digitálním nastavením frekvence, jehož výstupním signálem se budou obvody testovat.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Yiu, J.: The Definitive Guide to ARM® Cortex®-M3 and Cortex®-M4 Processors,
- [2] STMicroelectronics: RM0316, STM32F3 Reference manual
- [3] STMicroelectronics: DS10362 - STM32F303 Data

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Jan Fischer, CSc., katedra měření FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.01.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce:

do konce letního semestru 2020/2021

doc. Ing. Jan Fischer, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Janu Fischerovi, CSc. za odborné vedení práce a mnoho cenných rad.

Prohlášení

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

V Praze, 22. května 2020

.....

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem a implementací softwarově definovaného digitálního osciloskopu s funkcí vzorkování v ekvivalentním čase na mikrokontroléru STM32. K realizaci všech funkcí jsou využity interní periferie mikrokontroléru. Použitím vzorkování v ekvivalentním čase je dosaženo efektivní vzorkovací frekvence v řádu stovek MHz s maximální frekvencí signálu 50 MHz. Pomocí mikrokontroléru je realizován také generátor obdélníkového testovacího signálu. V případě potřeby měřit zdroje signálu s vysokou impedancí je možné využít napěťového sledovače realizovaného pomocí rychlého operačního zesilovače.

Součástí práce je multiplatformní řídící aplikace napsaná v jazyce C++ a frameworku Qt. Aplikace s osciloskopem komunikuje pomocí sběrnice USB. Slouží k zobrazení změrených dat a nastavení parametrů měření. Pomocí nástrojů aplikace lze vyhodnocovat výsledky experimentů v časové a frekvenční oblasti.

V práci jsou diskutovány různé přístupy k návrhu jednotlivých funkčních bloků s důrazem na jejich realizaci na vývojovém kitu Nucleo-F303RE.

Klíčová slova: STM32, ARM, STM32F303RE, Nucleo-F303RE, osciloskop, vzorkování v ekvivalentním čase, softwarově definovaný přístroj

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

Abstract

This diploma thesis describes design and implementation of software defined digital oscilloscope with equivalent time sampling functionality. The internal peripherals of the microcontroller are used to implement all functions of this oscilloscope. By utilizing equivalent time sampling, effective sampling frequencies in order of hundreds of MHz are achieved. A square wave test signal generator is also implemented using the microcontroller. If measurement of high impedance signals is required, external voltage follower is utilized.

Visualization of data and control of oscilloscope parameters is performed through multiplatform PC application connected to the oscilloscope via USB bus. Using this application, signal analysis in time and frequency domain is possible.

The thesis discusses different approaches to design of each functional block with emphasis on realization on Nucleo-F303RE development board.

Keywords: STM32, ARM, STM32F303RE, Nucleo-F303RE, oscilloscope, equivalent-time sampling, software-defined instrument

Title translation: Microcontroller based digital sampling oscilloscope for teaching purposes

Obsah

1 Úvod	1
2 Rozbor tématu	3
2.1 Vzorkování v ekvivalentním čase	4
2.2 Nabíjení vzorkovacího kondenzátoru	4
2.3 Frekvenční omezení vstupu AD převodníku	5
2.4 Generování testovacího signálu	6
2.5 Mikrokontroler STM32F303RE	7
2.5.1 Jádro a paměť	7
2.5.2 AD převodníky	7
2.5.3 Řadič DMA	8
2.5.4 Časovače(čítače)	8
2.5.5 Komparátory	9
2.5.6 DA převodník	9
2.5.7 Sériová linka UART	9
2.6 Vývojové kity Nucleo	9
3 Vztahy pro ekvivalentní vzorkování	11
3.1 Počet vzorků v periodě	11
3.2 Zrcadlení signálu	12
3.3 Maximální šířka pásma signálu při vzorkování v ekvivalentním čase	12
4 Realizace osciloskopu se vzorkováním v ekvivalentním čase	15
4.1 Dosažitelná ekvivalentní vzorkovací frekvence	17
4.1.1 Zvýšení dosažitelné ekvivalentní vzorkovací frekvence použitím zdroje signálu z druhého vývojového kitu	18

4.2 Zapojení osciloskopu	18
4.3 Měření napětí signálu	19
4.3.1 Kompenzace působení nestability referenčního napětí pomocí zabudované napěťové reference	21
4.4 Měření frekvence signálu	21
4.5 Měření frekvence signálu nedosahujícího logických úrovní mikrokontroleru	22
4.6 Generování obdélníkového signálu	22
4.7 Komunikace s PC	24
4.7.1 Komunikační protokol	24
4.8 Krabička pro vývojový kit NUCLEO-F303RE	25
5 Napěťový sledovač	27
5.1 Emitorový sledovač s NPN tranzistorem	27
5.2 Napěťový sledovač s operačním zesilovačem	28
5.2.1 Napěťový sledovač s operačním zesilovačem MCP662	30
5.2.2 Napěťový sledovač s operačním zesilovačem MAX4393	31
6 Aplikace pro PC	35
6.1 Grafické uživatelské rozhraní	36
6.1.1 Ovládací prvky	37
6.2 Proces měření	41
6.3 Výpočet vhodných vzorkovacích frekvencí	42
6.4 Automatické nastavení osciloskopu	43
6.5 Automatické nastavení měřítka grafu	44
7 Závěr	45
Literatura	47

A Obsah přiloženého CD 49

Obrázky

2.1	Vzorkování v ekvivalentním čase	4
2.2	Vzorkovací obvod AD převodníku. Zdroj [10]	5
2.3	Nabíjení vzorkovacího kondenzátoru přes $10k\Omega$ rezistor.	5
2.4	Frekvenční charakteristika A/D převodníku mikrokontroléru STM32F303 při vzorkovací frekvenci 281,25 kHz. Převzato [14]	6
3.1	Ekvivalentní vzorkování	11
3.2	Zrcadlení nesymetrického signálu	12
4.1	Vývojový kit NUCLEO-F303RE	15
4.2	Blokový diagram osciloskopu s vzorkováním v ekvivalentním čase na mikroprocesoru STM32F303RE	16
4.3	Měření 9.56 MHz signálu generovaného generátorem signálu HP 33120A při ekvivalentní vzorkovací frekvenci 1.495 GHz	18
4.4	Vývody osciloskopu na vývojové desce NUCLEO-F303RE	19
4.5	Ukázka spouštění AD převodníku, kdy je každý druhý vzorek spuštěn v polovině taktu převodníku.	20
4.6	Srovnání přesnosti měření recipročního a přímého čítače. Zdroj: [3]	21
4.7	Generování PWM pomocí časovače.	23
4.8	Krabička na vývojovou desku NUCLEO-F303RE	26
5.1	Napěťový sledovač s bipolárním tranzistorem	28
5.2	Napěťový sledovač s bipolárním tranzistorem	28
5.3	Napěťový sledovač s operačním zesilovačem	29
5.4	Oscilace ve zpětné vazbě operačního zesilovače MAX4393	29
5.5	Napěťový sledovač s operačním zesilovačem MCP662	30
5.6	Projev nízké rychlosti přeběhu operačního zesilovače MCP662	31

5.7 Napěťový sledovač s operačním zesilovačem MAX4393	32
5.8 Referenční zapojení napěťového sledovače s operačním zesilovačem MAX4393	33
5.9 Použití napěťového sledovače s operačním zesilovačem MAX4393	33
6.1 Uživatelské rozhraní aplikace pro PC	35
6.2 Dialogové okno pro připojení k osciloskopu	37
6.3 Vývojový diagram průběhu měření a zpracování dat	42
6.4 Seznam navržených vzorkovacích frekvencí	42
6.5 Vývojový diagram funkce automatického nastavení parametrů	44

Tabulky

2.1 Srovnání některých existujících osciloskopů na mikrokontroleru	3
2.2 Maximální vzorkovací rychlosť[1].	8
4.1 Periferie použité k realizaci osciloskopu	17
4.2 Vstupy a výstupy	19
4.3 Struktura příkazu pro mikrokontrolér	24
4.4 Hodnoty přidané k hlavičce	25

Kapitola 1

Úvod

Při práci v elektronické laboratoři se využívá velká škála různých přístrojů. S rostoucím výkonem a schopnostmi jednočipových mikrokontrolérů přicházejí snahy jimi pro výukové účely nahradit drahé profesionální přístroje. Jedním z nejdůležitějších z nich je bezesporu osciloskop.

Při výuce některých předmětů na Katedře měření FEL ČVUT se v současné době využívá projektu LEO(Little Embedded Oscilloscope) k měření vlastností elektrických obvodů v rámci studentských laboratorních experimentů. Osciloskop implementovaný v projektu LEO dosahuje maximální vzorkovací frekvence 4.8 MHz.

Cílem diplomové práce je návrh osciloskopu na mikrokontroléru, který by umožnil dosáhnout řádově vyšší efektivní vzorkovací frekvence pomocí vzorkování v ekvivalentním čase. Zároveň také bude realizován generátor obdélníkového testovacího signálu. Osciloskop bude realizován na vývojový kit NUCLEO-F303RE, obsahující mikrokontrolér STM32F303RE. Vývojový kit NUCLEO-F303RE byl zvolen z důvodu jeho využití v projektu LEO. Studenti využívající LEO k měření vlastností obvodů budou moci stejnou desku použít i pro měření na vyšších frekvencích pomocí vzorkování v ekvivalentním čase.

Osciloskop by měl umožnit vyhodnocení tvaru a amplitudy signálu a pomocí více kanálu také zpoždění signálu při průchodu el. systémem. K nastavení parametrů a zobrazení výsledků měření slouží multiplatformní software pro PC napsaný v jazyce C++ a frameworku Qt.

Kapitola 2

Rozbor tématu

Existující práce využívající mikrokontroler jako osciloskop jsou limitovány maximální vzorkovací rychlostí ADC vestavěného v použitém mikrokontroléru. Cílem takovýchto osciloskopů je typicky získat jednoduchý a laciný osciloskop, proto nemá smysl ve srovnání uvažovat projekty, které používají rychlé externí AD převodníky, jako například [9].

Projekt	Mikroprocesor	Vzorkovací rychlosť	Rozlišení
Little embeded oscilloscope (LEO)[5]	STM32F303RE	4.8 MPSP	12-bitů
Digitální osciloskop s ATXMEGA[6]	ATXmega128A1	2 MPSP	12-bitů
Oscilloscope based on Arduino[7]	ATMega328	10 KSPS	10-bitů
Low cost system-on-chip oscilloscope[8]	Cypress PSoC5	0.8 MSPS	12-bitů

Tabulka 2.1: Srovnání některých existujících osciloskopů na mikrokontroleru

Z tabulky 2.1 vyplývá, že dostupné osciloskopy na mikrokontroleru neumožňují záznam signálů rychlejších než několik MHz. Pokud bychom chtěli více vzorků na periodě (řekněme 10), i nejrychlejší z těchto osciloskopů zobrazí max 500 kHz signál.

Toto omezení lze efektivně obejít použitím vzorkování v ekvivalentním čase. To lze použít za těchto předpokladů:

- Měření periodického signálu
- Konstantní amplituda signálu
- Konstantní frekvence signálu
- Stálý tvar signálu
- Frekvence signálu na všech kanálech je stejná.

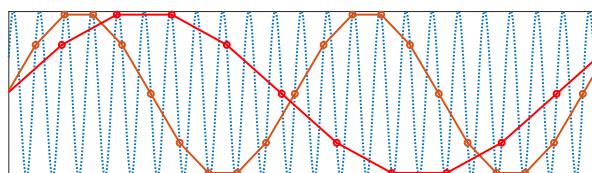
Pokud dojde k porušení některé z těchto podmínek, nelze zajistit správné zachycení signálu. Zároveň lze díky těmto omezujícím podmínkám zjednodušit proces měření oproti tradičním osciloskopům:

- Stačí změřit několik málo period signálu (všechny jsou stejné).
- Lze použít softwarový trigger (není třeba zachycovat jednorázové události).
- Není třeba zachycovat vysoké množství průběhů, všechny jsou stejné.

■ 2.1 Vzorkování v ekvivalentním čase

Vzorkování v ekvivalentním čase využívá aliasingu k zobrazení signálu s frekvencí vyšší, než je vzorkovací frekvence. Obrázek 2.1 toto ilustruje. Oranžově zobrazený signál vznikl vzorkováním v každé periodě signálu. Pokud bude odebrán vzorek jen v každé druhé periodě (červeně), stačí k zachycení stejného průběhu poloviční vzorkovací frekvence. Z toho vyplývá, že při vzorkování v ekvivalentním čase není frekvence signálu limitována použitou vzorkovací frekvencí. Nevýhodou tohoto přístupu jsou vyšší nároky na frekvenční stabilitu signálu, protože měření jednoho průběhu trvá déle.

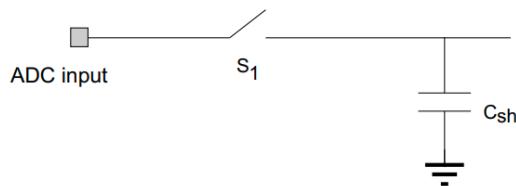
Maximální frekvence bude omezena parazitními kapacitami a indukčnostmi v použitém HW.



Obrázek 2.1: Vzorkování v ekvivalentním čase

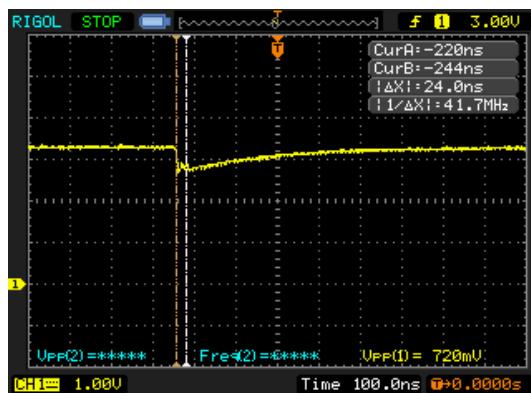
■ 2.2 Nabíjení vzorkovacího kondenzátoru

Mikrokontrolér STM32F303RE používá k měření napětí AD převodník s postupnou approximací. Ten měří napětí na vzorkovacím kondenzátoru C_{sh} . Vzorkovací kondenzátor je nabíjen z vstupu přes spínač S_1 , který se před každým změřením napětí na určitou dobu sepne. Za tu dobu musí dojít k nabití vzorkovacího kondenzátoru na měřené napětí.



Obrázek 2.2: Vzorkovací obvod AD převodníku. Zdroj [10]

Proud potřebný k nabítí za daný čas může dosáhnout až několika mA. V případě měření zdroje s vysokou impedancí, který není schopen dodat dostatečný proud, bude změřené napětí chybné. Obrázek 2.3 zachycuje nabíjení vzorkovacího kondenzátoru přes $10k\Omega$ rezistor. Okamžik sepnutí a rozepnutí spínače S_1 je znázorněn pomocí kurzorů. Je zjevné, že takto změřené napětí neodpovídá skutečnému napětí na vstupu AD převodníku.



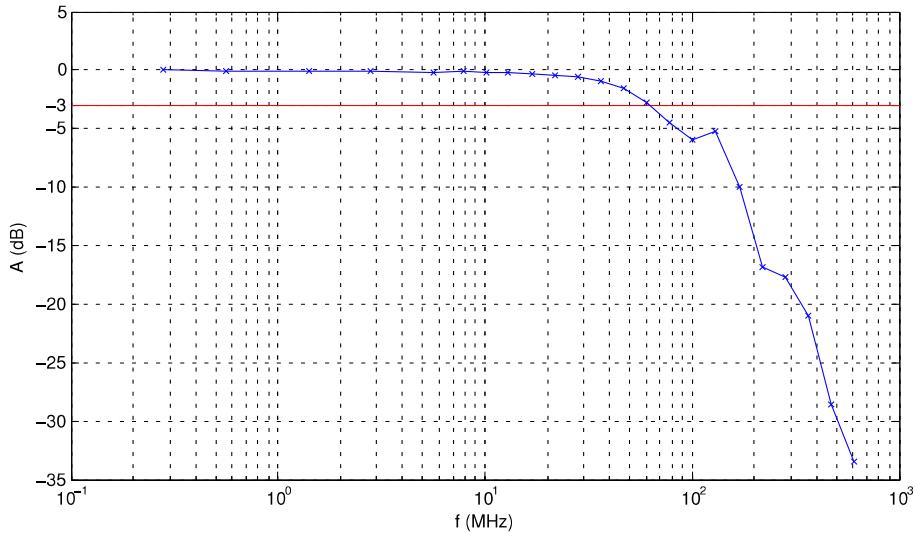
Obrázek 2.3: Nabíjení vzorkovacího kondenzátoru přes $10k\Omega$ rezistor.

Ve snaze dosáhnout co nejvyšší vzorkovací frekvence bude zvolen nejkratší možný vzorkovací čas (20.8 ns). Je tedy zřejmé, že je třeba použít zdroj s malou impedancí. Alternativně lze mezi zdroj signálu AD převodník zařadit napěťový sledovač s nízkou výstupní impedancí. Pro vzorkovací čas 20.8 ns výrobce doporučuje maximální impedanci zdroje signálu 150Ω [1].

2.3 Frekvenční omezení vstupu AD převodníku

Maximální vzorkovací frekvence AD převodníků v mikroprocesoru STM32F303RE při rozlišení 8 bitů je 7.2 MHz. Na vstup AD převodníku lze přivést i výrazně vyšší frekvence. Maximální frekvence, kterou lze změřit poté záleží na parazitních kapacitách a odporech na vývojové desce a v samotném mikroprocesoru.

V závislosti na použité vzorkovací frekvenci lze bez výrazného útlumu signálu měřit až do přibližně 10 MHz [14]. K poklesu o 3 dB dochází při 50 MHz.



Obrázek 2.4: Frekvenční charakteristika A/D převodníku mikrokontroléru STM32F303 při vzorkovací frekvenci 281,25 kHz. Převzato [14]

■ 2.4 Generování testovacího signálu

Pro testování charakteristik různých obvodů se běžně používá sinusový signál. Použití drahého profesionálního generátoru signálu by popíralo účel této práce. Použití RC oscilátoru, nebo obdobných jednoduchých zapojení je komplikované kvůli nedostatečné frekvenční stabilitě generovaného signálu. Jako nejvhodnější se tedy jeví generovat testovací signál pomocí mikrokontroléru.

Zabudovaným DA převodníkem lze generovat sinusový signál, avšak jeho maximální vzorkovací frekvence 1 MS/s omezuje použití na výrazně nižší frekvence. Zbývá možnost, použít obdélníkový signál generovaný pomocí časovače.

Maximální frekvence spínání GPIO pinů je 50 MHz[1]. Maximální frekvence časovačů je 144 MHz, vydělením třemi získáme signál s frekvencí 48 MHz. To je nejrychlejší signál, který lze z mikrokontroleru získat při frekvenci jádra 72 MHz. Strmost hrany signálu lze nastavit na 5, 8, nebo 12ns.

2.5 Mikrokontroler STM32F303RE

Mikroprocesory STM32 integrují v jednom integrovaném obvodu procesorové jádro, operační a programovou paměť a periferie. Integrované periferie, jejich počet a funkce se liší dle typu mikroprocesoru. Tato kapitola popisuje jádro mikroprocesoru a periferie použité k realizaci osciloskopu s ekvivalentním vzorkováním na mikroprocesoru STM32F303RE.

2.5.1 Jádro a paměť

V mikroprocesoru je použito 32-bitové jádro ARM Cortex-M4 na frekvenci až 72 MHz. Lze jej taktovat pomocí externího hodinového signálu, krystalu, nebo interního 8 MHz RC oscilátoru. Pomocí několika vestavěných násobiček a děliček frekvence lze se stejným krystalem nastavit mnoho různých frekvencí. Jádro obsahuje také FPU(floating point unit) jednotku, značně zrychlující výpočty s plavoucí čárkou.

K jádru je připojena operační paměť SRAM o velikosti 64 kB a 512 kB flash programové paměti. Programovou paměť lze naprogramovat pomocí rozhraní SWD(serial wire debug), nebo JTAG.

Napájet jej lze napětím 2-3.6 V.

2.5.2 AD převodníky

Mikroprocesor STM32F303RE obsahuje 4 12-bitové AD převodníky s postupnou approximací. Pro zrychlení převodu anebo šetření paměti lze snížit rozlišení na 10, 8, nebo 6 bitů. Každý z AD převodníku má několik multiplexovaných kanálů, ze kterých lze při převodu vybírat. Každý z převodníků má také možnost měřit interní referenční napětí V_{refint}

AD převodník měří napětí v rozsahu daném napětím na pinech V_{REF+} a V_{REF-} . Tyto piny jsou obvykle přímo připojeny na napájecí napětí.

AD převodníky mohou být taktovány frekvencí až 72 MHz. Nejvyšší rychlosť AD převodníků je 9MSPS. Rychlosť AD převodníku je dána dobou vzorkování a dobou převodu. Nejmenší možná doba odběru vzorku pro rychlé kanály (kanály 1 až 5) je 1.5 hodinového cyklu.

Převod lze spouštět pomocí časovačů, nebo softwarově.

Rozlišení převodu(bity)	Doba převodu(cyklů)	Maximální rychlos
12	12.5	5.14 MPSP
10	10.5	6 MPSP
8	8.5	7.2 MSPS
6	6.5	9 MSPS

Tabulka 2.2: Maximální vzorkovací rychlost[1].

■ Interní zdroj referenčního napětí

Zabudovaný zdroj napětí typu band-gap poskytuje stabilizované napětí $V_{refint} = 1.2V$ nehledě na napájecí napětí mikrokontroleru. Referenční napětí AD převodníků je na vývojovém kitu NUCLEO-F303RE připojeno na napájení procesoru, které může s proměnnou aktivitou procesoru napájecího zdroje kolísat. Proto je vhodné provést kalibraci AD převodníku vůči stabilní referenci.

Přesná hodnota referenčního napětí je při výrobě změřena a zapsána na konkrétní místo flash paměti procesoru. Při měření jí lze přečíst a použít k přesnému změření napájecího napětí a kalibraci AD převodníků.

■ 2.5.3 Řadič DMA

DMA(direct memory access) modul slouží k přenosu dat mezi periferiemi a pamětí, nebo mezi dvěma místy v paměti, bez asistence procesoru. Ten se tak může věnovat jiným úkolům. Zároveň je zajištěn včasný odběr dat z periferie a nehrozí tak přepsání nově příchozími daty. Po dokončení přenosu může být vygenerováno přerušení procesoru.

Mikrokontroleru STM32F303RE obsahuje dva DMA moduly, které umí obsluhovat až 12 přenosů. Každému přenosu lze přiřadit jednu ze 4 úrovní priority. Lze nastavit množství přenášených dat na 8,16, nebo 32 bitů.

Při použití všech 4 AD převodníků na jejich maximální vzorkovací frekvenci 7.2 MHz při rozlišení 8 bitů se jedná o datový tok 4 MB/s. Je tedy nezbytné využít DMA řadič, protože samotný procesor by tento datový tok nezvládal.

■ 2.5.4 Časovače(čítače)

Mikroprocesor STM32F303RE obsahuje jeden 32-bitový časovač a 9 16-bitových časovačů. Každý má rozdílné možnosti konfigurace, umožňující použití časovačů

pro mnoho různých účelů. Tento popis se proto bude soustředit pouze na funkce použité k realizaci osciloskopu. Jako zdroj hodinového signálu lze použít externí logický signál, systémový hodinový signál, nebo systémové hodiny vynásobené dvěma. Maximální frekvence většiny časovačů je 144 MHz. Každý z časovačů obsahuje děličku frekvence s nastavitelným dělícím poměrem 1-65536. Časovač počítá od nuly do hodnoty nastavené v 'AutoReload' registru. Poté dojde k vynulování časovače. Při dosažení nastavené hodnoty časovače lze spouštět události v ostatních částech systému, například vygenerovat přerušení procesoru, spustit AD převodník, spustit jiný časovač, atd....

2.5.5 Komparátory

Mikroprocesor STM32F303RE obsahuje 7 rychlých rail-to-rail komparátorů. Jako porovnávací napětí lze zvolit napětí z externího pinu, DA převodníku, nebo napětí odvozené od V_{refint} (1, 1/2, 1/4, 3/4). Lze nastavit také 4 různé úrovně hystereze (žádná, malá, střední, velká). Výrobce neuvádí maximální frekvenci komparátorů a proto jí bude třeba změřit.

2.5.6 DA převodník

Integrovaný dvoukanálový 12-bitový DA převodník je realizován pomocí rezistorové sítě. Referenční napětí je sdílené s AD převodníky. Generované napětí lze přivést na pin mikrokontroléru, nebo jej použít jako vstup pro integrované komparátory a operační zesilovače. Maximální rychlosť DA převodníků je 1 MS/s.

2.5.7 Sériová linka UART

Pomocí sériové linky lze komunikovat s jinými zařízeními. Mikroprocesor STM32F303RE integruje 5 UART modulů umožňujících asynchronní plně duplexní komunikaci.

2.6 Vývojové kity Nucleo

Vývojové kity NUCLEO produkované firmou ST Electronics jsou složené z mikroprocesoru STM32, programátoru/debuggeru ST-Link a podpůrných

2. Rozbor tématu

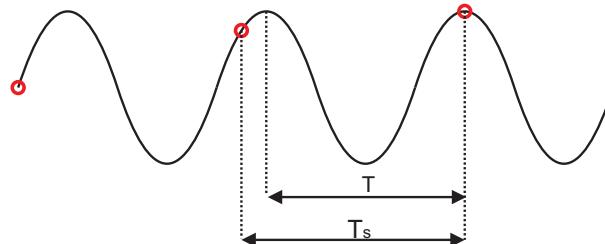
obvodů. Poskytuje 8 MHz hodinový signál generovaný krystalem na ST-Link a regulované napájecí napětí 3.3 V. Piny procesoru jsou vyvedeny na pinové lišty kompatibilní s rozložením ARDUINO UNO. Programování a napájení je zajištěno pomocí mini USB konektoru. ST-Link zároveň zpřístupňuje jeden UART z mikroprocesoru přes USB jako virtuální sériový port.

Kapitola 3

Vztahy pro ekvivalentní vzorkování

Osciloskop vytvořený v rámci této diplomové práce bude používat vzorkování v ekvivalentním čase pomocí vzorkování na konstantní frekvenci. Tato kapitola obsahuje odvození vztahů, kterými se bude vzorkování v ekvivalentním čase řídit.

3.1 Počet vzorků v periodě



Obrázek 3.1: Ekvivalentní vzorkování

Nechť je T perioda signálu a T_s perioda vzorkování. Rozdílová perioda ΔT pak je

$$\Delta T = T_s - T \quad (3.1)$$

Z obrázku 3.1 vidíme, že počet vzorků v periodě signálu S je

$$S = \frac{T}{\Delta T} \quad (3.2)$$

Tento vztah platí, pokud bude odebrán vzorek v každé periodě. Pokud by byl vzorek odebrán v každé n -té periodě, je třeba vztah rozšířit na

$$S = \frac{T}{T_s - T \cdot n} \quad (3.3)$$

Nakonec vztah převedeme z period na frekvence

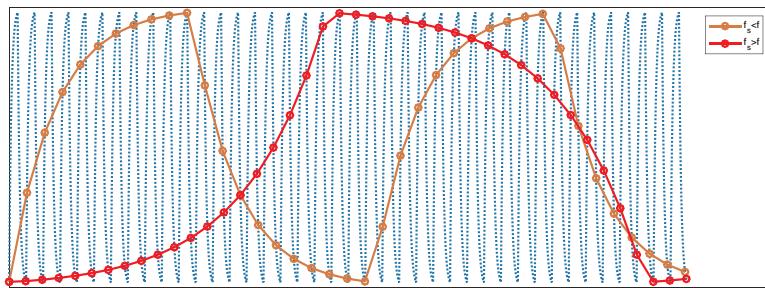
$$S = \frac{f_s}{f_s \cdot n - f} \quad (3.4)$$

kde f_s frekvence vzorkování a f je frekvence signálu. Vztah 3.4 lze již použít k nalezení vhodné vzorkovací frekvence.

■ 3.2 Zrcadlení signálu

V případě, že se okamžik odebrání vzorku v každé periodě posouvá dopředu(pozdější okamžik v periodě), dojde ke správnému zobrazení signálu. Pokud se však okamžik odběru vzorku posouvá v periodě dozadu(dřívější okamžik v periodě), dojde k zrcadlení signálu podle osy y. Tj. pokud je perioda vzorkování menší než perioda měřeného signálu.

Obrázek 3.2 ilustruje tuto situaci. Modré je vzorkovaný signál ve tvaru exponenciely. Oranžové je správně zobrazený signál, pro který platí $T_s > T$. Červeně zobrazený signál vznikl vzorkováním s $T_s < T$ a proto je zrcadlený.



Obrázek 3.2: Zrcadlení nesymetrického signálu

Při výpočtu vzorků v periodě pomocí 3.4 vyjde záporná rozdílová perioda, a proto i záporný počet vzorků v periodě. I toto vzorkování lze použít, avšak je třeba signál při zpracování zrcadlit.

■ 3.3 Maximální šířka pásma signálu při vzorkování v ekvivalentním čase

Šířka pásma při ekvivalentním vzorkování je dána počtem vzorků v periodě. Vzorkovací teorém říká, že maximální rekonstruovatelná frekvence je polovinou

..... 3.3. Maximální šířka pásma signálu při vzorkování v ekvivalentním čase

vzorkovací frekvence. Tj. že v každé periodě musí být alespoň dva vzorky. Toto zjevně platí i pro ekvivalentní vzorkování. Nejvyšší frekvenční složka zachycená při ekvivalentním vzorkování proto bude

$$f_{max} = \frac{S \cdot f}{2} \quad (3.5)$$

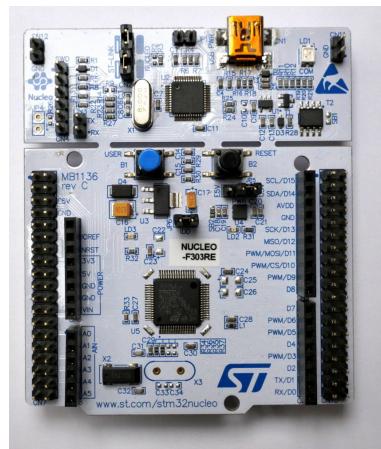
Z rovnice 3.5 vyplývá, že šířka pásma při ekvivalentním vzorkování není limitována vzorkovací frekvencí, protože počet vzorků v periodě lze dle vztahu 3.4 libovolně zvolit nastavením f_s a n .

Kapitola 4

Realizace osciloskopu se vzorkováním v ekvivalentním čase

Osciloskop je realizován pomocí vývojového kitu NUCLEO-F303RE s mikroprocesorem STM32F303RE. Výhodou použití tohoto kitu je vestavěný UART->USB převodník, 8MHz krystalový oscilátor a další podpůrné obvody. Napájení a připojení k PC je zajištěno pomocí mini USB konektoru.

Piny mikroprocesoru jsou vyvedeny po stranách plošného spoje na dvou 2x19 kolíkových lištách označovaných jako "St-morpho". Na těchto lištách jsou vyvedeny všechny IO piny mikroprocesoru. Některé piny jsou zároveň zdvojeny na dvou zdířkových lištách kompatibilních s rozložením Arduino UNO.

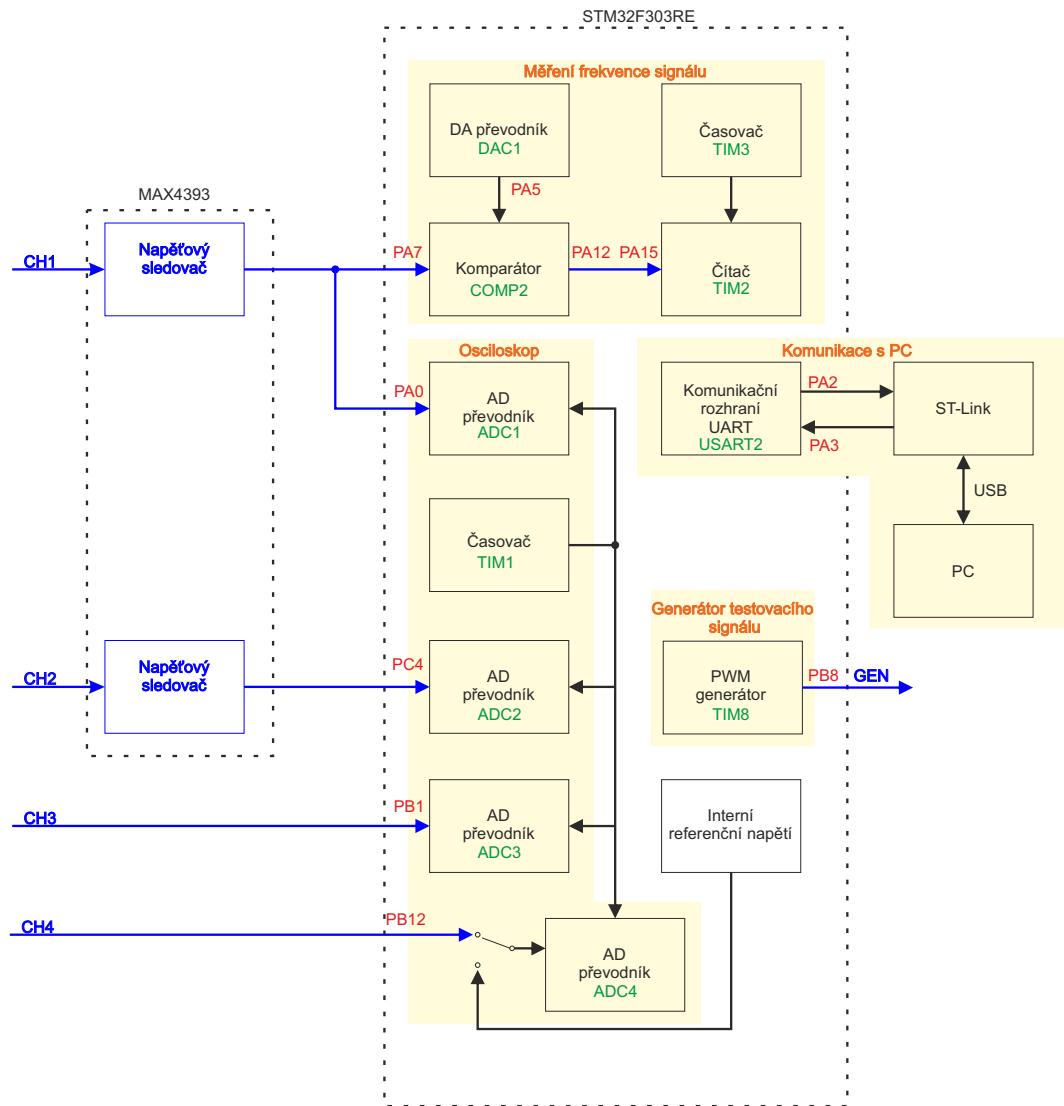


Obrázek 4.1: Vývojový kit NUCLEO-F303RE

Aby došlo k správnému zobrazení signálu, je třeba přesně znát jeho frekvenci a navrhnout vhodnou vzorkovací frekvenci, kterou lze v mikroprocesoru realizovat. Dále je vhodné zajistit co největší vstupní impedanci a zesílení

4. Realizace osciloskopu se vzorkováním v ekvivalentním čase

signálu pomocí vstupního zesilovače. Pomocí čítače lze také snadno realizovat zdroj obdélníkového signálu, pomocí kterého lze měřit například frekvenční charakteristiky filtrů. Výhodou použití signálu z mikroprocesoru je jeho známá frekvence a synchronnost s frekvencí jádra mikroprocesoru.



Obrázek 4.2: Blokový diagram osciloskopu s vzorkováním v ekvivalentním čase na mikroprocesoru STM32F303RE

Obrázek 4.2 znázorňuje blokový diagram navrženého osciloskopu. Vstupem osciloskopu jsou čtyři analogové kanály. Výstupem UART rozhraní pro přenos dat do PC a generátor obdélníkového signálu. Modrou barvou jsou znázorněny spojení, které musí uživatel zapojit před použitím osciloskopu. Červenou barvou jsou popsány piny procesoru pro tato spojení. Zeleně jsou jména konkrétních periferií použitých k realizaci dané funkce. Žlutě jsou podbarveny jednotlivé funkční bloky.

Na kanálech 1 a 2 se počítá s připojením externího napěťového sledovače. Napěťový sledovač poskytuje vstup s vysokou impedancí a zároveň je schopen dodat proud potřebný pro nabíjení AD převodníků. Na kanál 4 lze připojit interní band-gap napěťovou referenci(1.2 V). Toto lze využít ke kompenzaci nestálého napájecího napětí.

Ke kanálu 1 je připojen obvod pro měření frekvence signálu. Pomocí komparátoru je analogový signál převeden na digitální signál a přiveden do čítače, který změří jeho frekvenci. Na komparátoru lze nastavit prahové napětí.

Periferie	Funkce
TIM1	Spouštění AD převodníků
TIM2	Čítání náběžných hran na externím signálu
TIM3	Resetování TIM2 po 1ms
TIM8	Generátor signálu
ADC1-4	Měření napětí
COMP2	Převod analogového napětí na digitální signál
DAC1	Nastavení prahové úrovně pro COMP2
USART2	Komunikace s PC
DMA1	Přenos dat z ADC1 a TIM2 do paměti
DMA2	Přenos dat z ADC2-4 do paměti

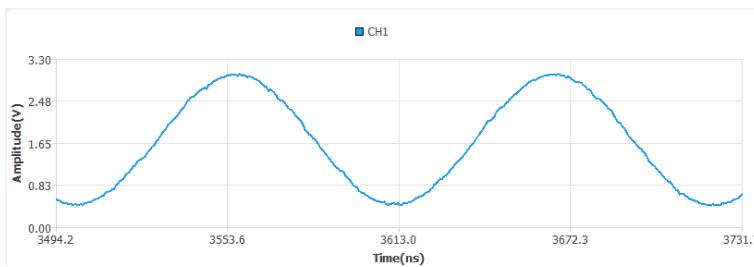
Tabulka 4.1: Periferie použité k realizaci osciloskopu

4.1 Dosažitelná ekvivalentní vzorkovací frekvence

Maximální dosažitelné ekvivalentní vzorkovací frekvence je teoreticky neomezená. V praxi je limitována frekvencemi, které lze na mikroprocesoru realizovat a jittrem v spínání vzorkovacího kondenzátoru.

V případě měření externího zdroje signálu byla dosažena ekvivalentní vzorkovací frekvence v řádu jednotek GHz. Při takto vysoké vzorkovací frekvenci už se projevují nepřesnosti v okamžiku sepnutí vzorkovacího kondenzátoru, patrné na obrázku 4.3. Sinusový signál pochází z generátoru HP 33120A a je velmi čistý(ověřeno osciloskopem RIGOL DS1052E). Takto vysoké ekvivalentní vzorkovací frekvence proto nejsou příliš užitečné.

V případě měření signálu generovaného pomocí mikrokontroléru, je maximální ekvivalentní vzorkovací frekvence limitována frekvencí, od které je odvozeno spouštění AD převodníků(72 MHz). Převod může být spuštěn pouze



Obrázek 4.3: Měření 9.56 MHz signálu generovaného generátorem signálu HP 33120A při ekvivalentní vzorkovací frekvenci 1.495 GHz

v okamžik daný tímto hodinovým signálem. Protože generovaný signál je s ním synchronní, ekvivalentní vzorkovací frekvence je omezena na 72 MHz.

■ 4.1.1 Zvýšení dosažitelné ekvivalentní vzorkovací frekvence použitím zdroje signálu z druhého vývojového kitu

Vývojový kit NUCLEO-F303RE používá k taktování procesoru krystalový oscilátor o frekvenci 8 MHz. Tento oscilátor je sice velmi stabilní, ale nikdy nemá přesně 8 MHz. Pomocí druhého vývojového kitu proto lze generovat testovací signál, který není dokonale synchronní se zdrojem spouštění pro AD převodník a tím zvýšit dosažitelnou ekvivalentní vzorkovací frekvenci.

■ 4.2 Zapojení osciloskopu

Navržený osciloskop s ekvivalentním vzorkováním se skládá z několika funkčních bloků (Viz. obrázek 4.2). Některé z nich nelze propojit interně a je třeba spojení zajistit externím vodičem. Konkrétně jde o tyto propojení:

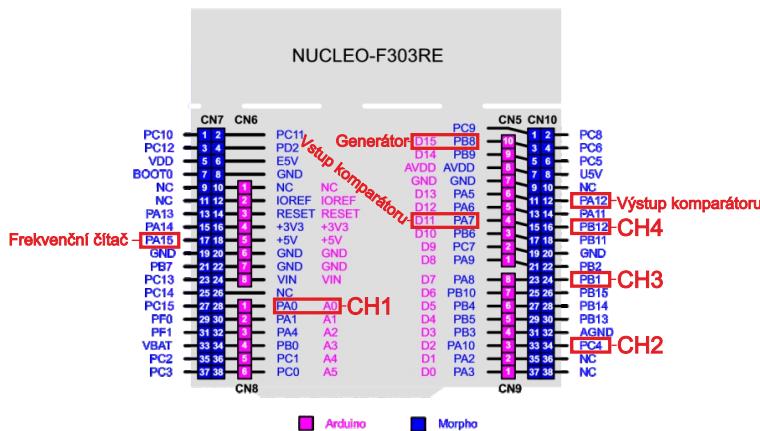
- Kanál 1 a vstup komparátoru (PA0, PA7)
- Výstup komparátoru a měřič frekvence (PA12, PA15)

Tabulka 4.2 popisuje všechny použité piny. Některé z nich jsou přítomny i na Arduino konektorech. Zdvojení kanálu 1 na PA0 i A0 je užitečné k propojení s komparátorem pomocí pinu PA0 a zároveň připojení měřeného signálu na A0.

ST-Morpho pin	Arduino UNO pin	Funkce
PA0	A0	Kanál 1
PC4	-	Kanál 2
PB1	-	Kanál 3
PB12	-	Kanál 4
PA7	D11	Vstup komparátoru
PA12	-	Výstup komparátoru
PA15	-	Měření frekvence
PB8	D15	Generátor signálu

Tabulka 4.2: Vstupy a výstupy

Pro většinu funkcí mikrokontroléru lze vybrat z několika alternativních pinů. Použité piny byly vybrány tak, aby byly pokud možno rozprostřené po celé desce a tím se minimalizovalo riziko přeslechů. Zároveň je třeba vybírat u AD převodníků pouze rychlé kanály, což jsou kanály 1 až 5. Pomalé kanály neumožňují použít vzorkovací dobu 1.5 taktu.

**Obrázek 4.4:** Vývody osciloskopu na vývojové desce NUCLEO-F303RE

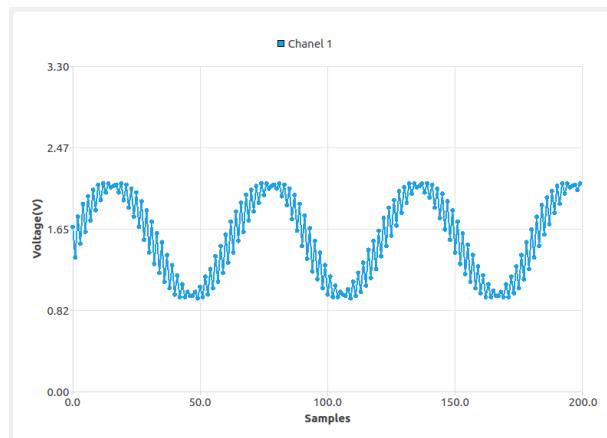
4.3 Měření napětí signálu

K měření napětí jsou využity všechny 4 AD převodníky dostupné v mikrokontroleru STM32F303RE. Každý pro jeden kanál. S cílem dosáhnout co nejvyšší vzorkovací frekvence bylo zvoleno rozlišení 8 bitů a doba vzorkování 20.8 ns (nejkratší možná). AD převodníky jsou taktované na frekvenci 72 MHz. Doba převodu je 1.5 + 8.5 taktu, tj. 138.8 + ns. Použití 8bitových hodnot také značně zjednodušuje práci s daty. V neposlední řadě by také větší čísla zabírala dvojnásobek paměti, protože i s 10ti, nebo 12ti bitovými čísly je v

mikroprocesoru zacházeno jako s 16ti bitovými.

Pro každý z převodníků lze nakonfigurovat spouštění z mnoha různých zdrojů. Jediný zdroj, kterým lze spustit všechny 4 AD převodníky je "Timer 1 Capture Compare 3 event"(CC3e). Časovač 1 běží na frekvenci 144 MHz. K spuštění převodu dojde na náběžné hraně CC3e. S každým přetečením přepne stav CC3e, což efektivně sníží frekvenci čítače na polovinu.

Je nezbytné, aby k spuštění AD převodníku docházelo synchronně s taktem převodníku. V případě použití 144 MHz časovače, a spuštění v polovině taktu převodníku dojde k zdvojení signálu viz. obrázek 4.5. Tento jev je způsoben tím, že převodník při každém druhém spuštění musí čekat na svůj hodinový signál a převod se tím opozdí. Pro spuštění AD převodníků tedy nelze využít rychlejších časovačů, než je jejich takt.



Obrázek 4.5: Ukázka spuštění AD převodníku, kdy je každý druhý vzorek spuštěn v polovině taktu převodníku.

Po skončení převodu jsou data pomocí DMA přenesena do paměti. Mikroprocesory STM32F303RE mají 64 kB operační paměti. Z toho 48 kB bylo alokováno pro naměřená data. Zbývajících 16 kB je určeno pro běh programu. Pro každý kanál bylo pevně alokováno 12 kB paměti. Při rozlišení AD převodníku 8 bitů je maximální hloubka paměti pro každý kanál 12 000 vzorků.

AD převodníky mohou měřit napětí v rozsahu 0-3.3 V. V případě že je na vstup AD převodníků přivedeno napětí přesahující tyto meze, může dojít k jejich poškození. Vstup mikroprocesoru lze chránit pomocí rezistoru zapojeného do série se signálem, tím ale dojde k zpomalení nabíjení vzorkovacího kondenzátoru a tím potenciálně chybnému výsledku měření. Tento postup se proto nedoporučuje.

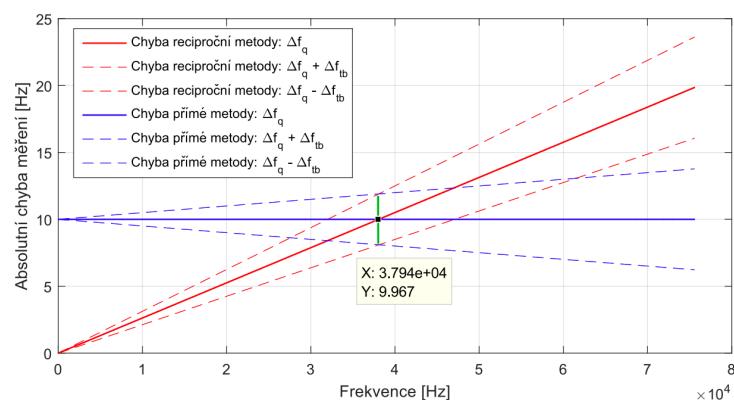
4.3.1 Kompenzace působení nestability referenčního napětí pomocí zabudované napěťové reference

Měřením interní napěťové reference lze dopočítat skutečné napájecí napětí mikrokontroleru, které může kolísat. V případě měření rychlých signálů by bylo užitečné měřit referenci se stejným taktem jako samotný signál a kompenzovat každý vzorek zvláště. Za tímto účelem byla implementována funkce měření referenčního napětí na kanálu 4.

Během testování vyšlo najevo, že referenční zdroj napětí není dodat dostatečně velký proud k nabití vzorkovacího kondenzátoru za 20.8 ns. Výrobce uvádí[1] minimální dobu vzorkování interní reference 2.2 μ s. Interní reference tedy v tomto případě trpí problémem popsaným v kapitole 2.2. Napětí změřené s příliš krátkou vzorkovací dobou nelze použít přímo ke kompenzaci nestability napájecího napětí, ale lze na něm případnou nestabilitu napájení alespoň sledovat.

4.4 Měření frekvence signálu

K výpočtu vhodné vzorkovací frekvence pro vzorkování v ekvivalentním čase je třeba znát frekvenci měřeného signálu. Měření frekvence lze provést přímou, nebo reciproční metodu. Obě metody používají dva čítače. Pro měření frekvencí vyšších než cca. 40 kHz je přesnější přímá metoda[3] a proto byla zvolena tato metoda. Způsob realizace přímé metody měření frekvence na mikrokontroleru STM32F303RE byl převzat z [3].



Obrázek 4.6: Srovnání přesnosti měření recipročního a přímého čítače. Zdroj: [3]

Přímé měření frekvence je založeno na čítači, který počítá náběžné hrany měřeného signálu a časovači, kterým je čítač hradlován. Jako doba hradlování

byla zvolena 1 ms. Zároveň s hradlováním je také pomocí DMA do kruhového bufferu uložena hodnota z čítače. Velikost kruhového bufferu byla zvolena na 10 hodnot. Toto měření frekvence probíhá neustále a DMA v buffery vždy nejstarší hodnotu přepíše novou. V okamžiku kdy dochází k sestavení zprávy pro ovládací aplikaci jsou hodnoty z bufferu zprůměrovány a vloženy do zprávy. Průměrováním je z měření frekvence signálu odstraněn kvantifikační šum. Pokud by šum nebyl odstraněn, ovládací aplikace by přeypočítávala a vypisovala návrhy na vzorkovací frekvence příliš často a docházelo by tak k zbytečnému snížení responzivnosti aplikace.

■ 4.5 Měření frekvence signálu nedosahujícího logických úrovní mikrokontroleru

Frekvence signálu je v mikrokontroléru měřena pomocí čítače, avšak ten pro správné čítání signálu vyžaduje překročení úrovní logického signálu. Pro napájení 3.3 V jde o 2.31 V pro logickou 1 a 0.99 V pro logickou 0. V případě, že signál nepřekročí obě tyto úrovně v každé periodě, změřená frekvence bude chybná.

Tento problém je vyřešen použitím jednoho z komparátorů vestavěném v mikrokontroléru STM32F303RE. Na neinvertující vstup komparátoru je přiveden měřený signál. Na invertující vstup je přivedeno referenční napětí vytvořené vestavěným DA převodníkem. Výstup komparátoru pak může být připojen na čítač měřící frekvenci. Toto propojení bohužel nelze realizovat vnitřně v mikrokontroléru a je nutné jej zajistit fyzickým propojením pinů PA12 a PA15.

Výrobce neuvádí maximální frekvenci komparátorů (pouze, že jsou ultra-rychlé). Omezeným experimentováním s dvěma různými vývojovými kity NUCLEO-F303RE bylo zjištěno, že vestavěné komparátory spolehlivě fungují do frekvence cca 30 MHz.

■ 4.6 Generování obdélníkového signálu

Obdélníkový signál slouží k testování charakteristik obvodů. Pro tento účel by byl vhodnější sinusový signál, avšak DA převodníky integrované v mikrokontroleru STM32F303RE mají vzorkovací rychlosť maximálně 1 MHz, což omezuje generovaný sinusový signál na maximálně vyšší desítky kHz.

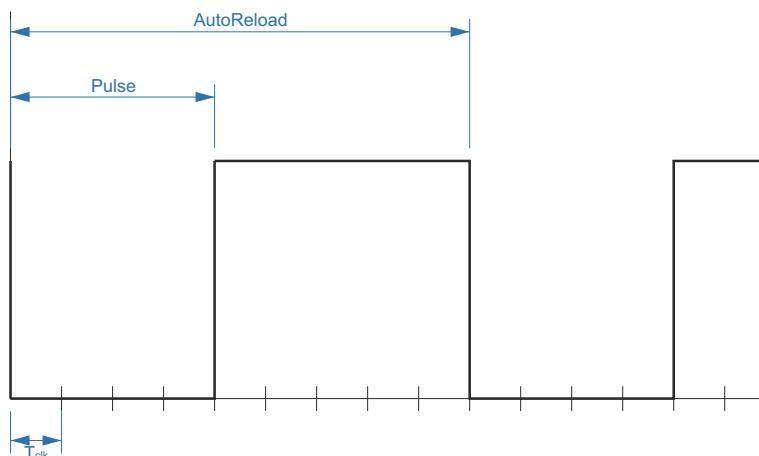
Pomocí PWM funkce časovačů lze generovat obdélníkový signál o frekvenci až 50 MHz (limitováno schopnostmi IO obvodů). Frekvence generovaného signálu vznikne vždy celočíselným dělením frekvence časovače. V tomto případě 144 MHz. Nastavení proto probíhá nikoliv specifikováním frekvence, ale specifikováním děliče. Dělič je uložen do "AutoReload" registru. Do registru "Pulse" použitého PWM kanálu je uložena polovina děliče.

Časovač s každou periodou hodinového signálu přičte 1. Po dosažení hodnoty uložené v "Pulse" registru příslušného PWM kanálu dojde k nastavení výstupu na vysokou úroveň. Po dosažení hodnoty uložené v "AutoReload" registru. V tomto okamžiku dojde k vynulování hodnoty časovače a k nastavení výstupu všech PWM kanálů na nízkou úroveň.

V případě, že je hodnota děliče liché číslo, je do registru "Pulse" uložená polovina zaokrouhlena dolů. To znamená, že při výběru lichého děliče je nízká úroveň signálu o jednu periodu hodinového signálu (6.94 ns) kratší.

Amplituda generovaného signálu je dána napájecím napětím mikrokontroléru, což je v případě vývojového kitu NUCLEO-F303RE 3.3 V. Strmost hran je přibližně $500 \text{ V}/\mu\text{s}$. V důsledku konečné strmosti hrany dochází k zakulacení obdélníkového signálu, takže připomíná spíše signál sinusový. Omezená strmost hran dohromady s parazitními kapacitami v zapojení způsobují přibližně od 15 MHz pokles amplitudy signálu.

Generátor je schopen generovat signál o frekvenci 2.197 kHz - 48 MHz.



Obrázek 4.7: Generování PWM pomocí časovače.

4.7 Komunikace s PC

Komunikace s PC probíhá pomocí USB->UART převodníku, který je součástí vývojové desky Nucleo-F303RE. Přenosová rychlosť byla zvolena relativně nízká, 115200 baudů, aby nedocházelo k přehlcení PC daty a zasekávání aplikace. Při vyšších rychlostech se tento problém vyskytoval na operačním systému Windows. V případě použití maximální hloubky paměti, tj. 4x12 000 bodů, vychází doba přenosu dat na 416 ms. V tomto případě to není problém, protože podmínkou pro ekvivalentní vzorkování je stálý periodický signál a neperiodické změny signálu zachytit nelze.

4.7.1 Komunikační protokol

Komunikační protokol je kombinace ASCII textových příkazů a binárních dat. Posílání příkazů v textové formě bylo zvoleno kvůli snazšímu hledání chyb a možnosti ovládat mikroprocesor i pomocí terminálu.

Komunikace do mikrokontroleru

Příkaz odeslaný mikroprocesoru obsahuje vždy všechny nastavitelné parametry měření. Začíná i končí dvojtečkou(':''). Jednotlivé parametry jsou v pevně daném pořadí a odděleny svislou čárou('|').

Pořadí	Příkaz	Hodnota
1	Dělič vzorkování	50-65535
2	Dělič generátoru	1-65535
3	Napětí komparátoru	0-4096
4	Hystereze komparátoru	0-3
5	Kanál 1	0/1
6	Kanál 2	0/1
7	Kanál 3	0/1
8	Kanál 4	0/1
9	Hloubka paměti	1-48000
10	Počet bitů	8, 12
11	Měření referenčního napětí	0/1

Tabulka 4.3: Struktura příkazu pro mikrokontrolér

Příkaz pro mikrokontroler může vypadat například takto:

: 500|4|2046|2|1|0|0|1|2000|8|1 :

Mikrokontrolér vždy čeká na přijetí příkazu a poté provede měření dle parametrů přijatého příkazu. Po odeslání naměřených dat opět čeká na další příkaz.

Hodnoty děličů(dělících poměrů) jsou tak, jak budou zapsány do příslušných registrů v mikrokontroléru. T.j. pokud je v příkazu odeslán dělič 0, frekvence časovače bude ve skutečnosti dělena jedničkou. V případě generátoru signálu znamená dělič 0 vypnutý generátor.

Komunikace z mikrokontroleru

Zprávy odesílané z mikrokontroleru do PC se skládají z hlavičky a dat v formátu

: Hlavička|Frekvencesignálu|Kalibračníhodnota| : Data!

Hlavička je stejná, jako příkaz pro mikrokontrolér. Každá zpráva proto obsahuje kompletní nastavení osciloskopu. Za nastavení je přidána frekvence signálu na kanálu 1 a kalibrační hodnota pro interní napěťovou referenci.

Pořadí	Příkaz
12	Frekvence signálu na kanálu 1
13	Kalibrační hodnota interní napěťové reference

Tabulka 4.4: Hodnoty přidané k hlavičce

Data po kanálech, vždy všechna data jednoho kanálu za sebou. Pořadí kanálů v odeslaných datech je dáno jejich číslem. V případě že je daný kanál vypnutý, nic se neodesílá. Jednotlivé kanály nejsou v datovém toku nijak separovány.

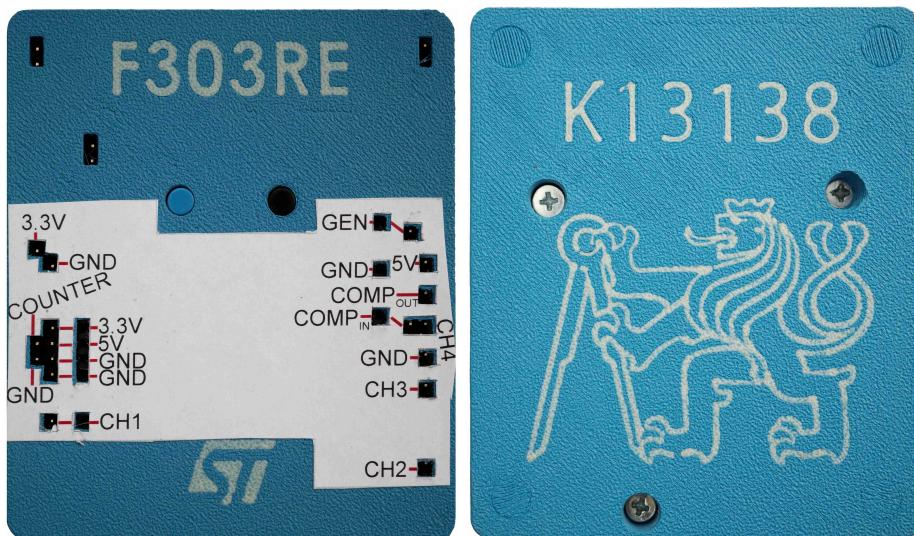
4.8 Krabička pro vývojový kit NUCLEO-F303RE

Krabička slouží k mechanické ochraně vývojového kitu, obzvláště při přepravě. Zároveň také chrání pracovní plochu před poškrábáním od vývodů na spodní straně vývojového kitu.

4. Realizace osciloskopu se vzorkováním v ekvivalentním čase

Krabička vhodná k výrobě pomocí 3D tisku vznikla mírnou úpravou krabičky navržené pro LEO[13]. Nápisy a loga na krabičce byly zvýrazněny pomocí dvoubarevného tisku. Nevyužité vývody mikroprocesoru jsou překryty, což uživateli značně zjednodušuje lokalizaci funkčních pinů a tím snižuje riziko poškození mikrokontroléru chybným zapojením. Na horní stranu krabičky je přilepen štítek s popisem funkcí jednotlivých pinů.

Na horní stranu krabičky může být oboustrannou páskou připevněno malé nepájivé kontaktní pole o rozměru (2x5)x17 kontaktů(Obrázek 5.8). Toto kontaktní pole je dostatečně velké pro realizaci napěťového sledovače a jedno- duchého měřeného obvodu. Díky blízkosti ke konektorům vývojového kitu lze minimalizovat délku vodičů a tím i vliv parazitních indukčností na měření.



Obrázek 4.8: Krabička na vývojovou desku NUCLEO-F303RE

Kapitola 5

Napěťový sledovač

Tato kapitola popisuje použití napěťového sledovače k zvýšení vstupního odporu AD převodníku. Tato kapitola popisuje dvě jednoduchá zapojení napěťového sledovače, která lze realizovat v nepájivém kontaktním poli.

Sinusový signál o frekvenci 30 MHz a amplitudě 3.3 V má maximální rychlosť prěběhu $622 \cdot 10^6$ V/s. Vzorkovací kondenzátor AD převodníků má velikosť 5pF, společně s parazitními kapacitami na vývojové desce přibližně 7 pF. Abychom vzorkovací kondenzátor za těchto podmínek udrželi nabité je třeba jej nabíjet(vybíjet) proudem

$$i_C = C \cdot \frac{dU}{dt} = 7 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{6.22 \cdot 10^8}{1} = 4.4mA \quad (5.1)$$

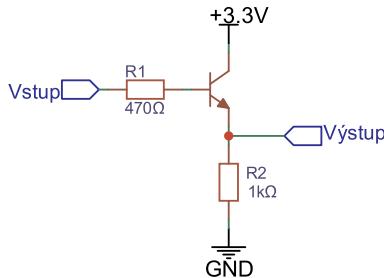
Tento proud může výrazně ovlivnit měření napětí v obvodech s vysokou impedancí. Protože na rozdíl od profesionálních osciloskopů není možnost použít kompenzovanou sondu, je potřeba použít zesilovač s menší vstupní kapacitou. Tento zesilovač zároveň musí být realizovatelný studenty na nepájivém kontaktním poli. Tato podmínka klade značné nároky na návrh, protože odpory kontaktního pole se může výrazně měnit(oxidace vývodů součástek) a příliš dlouhé propojovací kably mohou do obvodu zanést parazitické indukčnosti.

5.1 Emitorový sledovač s NPN tranzistorem

Jednoduchý sledovač lze získat obvodem na obrázku 5.1. Výhodou tohoto zapojení je ochrana AD převodníku. Nehledě na napětí na vstupu nemůže být napětí na výstupu větší než 3.3 V, nebo menší než 0 V. Zároveň je tento obvod velmi stabilní, díky absenci zpětné vazby.

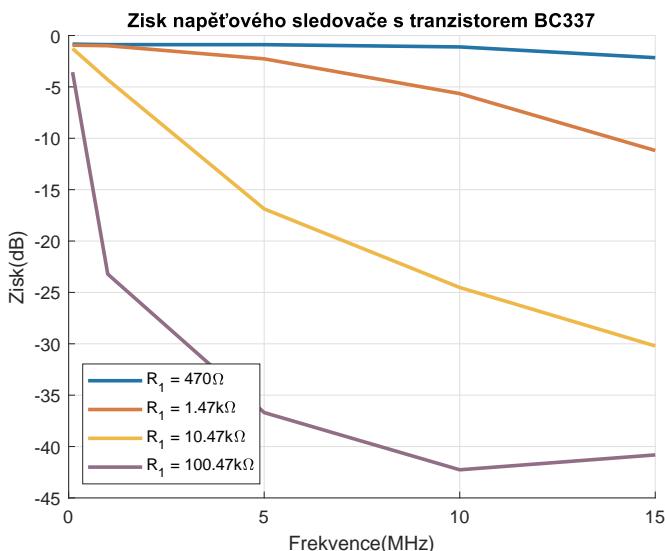
5. Napěťový sledovač

Nevýhodou je úbytek napětí na přechodu báze-emitor, kvůli kterému bude napětí na výstupu vždy o 0.7 V nižší, než napětí na vstupu. Tento obvod proto lze použít pouze pro vstupní signály s minimálním napětím více než 0.7 V.



Obrázek 5.1: Napěťový sledovač s bipolárním tranzistorem

Napěťový sledovač byl realizován s tranzistorem BC337. Na obrázku 5.2 vidíme zisk tohoto sledovače pro různé vstupní odpory. Testování bylo prováděno sinusovým signálem o amplitudě 2 V a střední hodnotě 2 V. Amplituda na výstupu byla měřena pomocí mikrokontroleru STM32F303RE, tudíž tento graf zahrnuje zátěž AD převodníku.

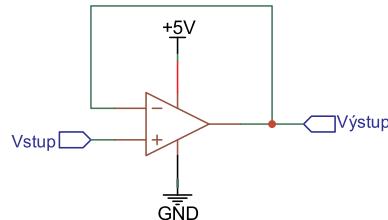


Obrázek 5.2: Napěťový sledovač s bipolárním tranzistorem

5.2 Napěťový sledovač s operačním zesilovačem

Pomocí operačního zesilovače lze zapojit jednoduchý napěťový sledovač podle schématu na obrázku 5.3. Pro realizaci byly vybrány operační zesilovače

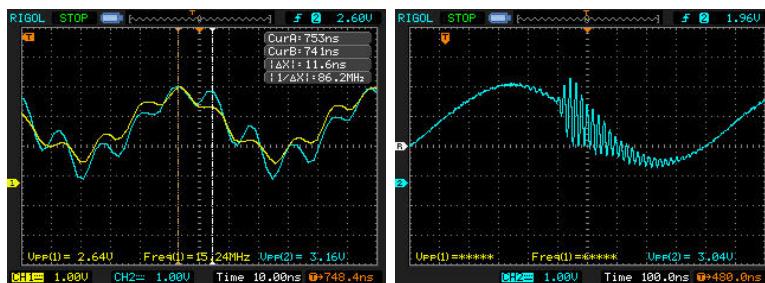
MCP662 a MAX4393.



Obrázek 5.3: Napěťový sledovač s operačním zesilovačem

Zde je třeba použít rail-to-rail operační zesilovače s vysokou rychlostí přeběhu. Výhodou tohoto zapojení je přesné sledování napětí bez poklesu napětí jako v u emitorového sledovače.

Nevýhodou je možná nestabilita zpětné vazby při zapojení v nepájivém kontaktním poli. Pokud je zpětná vazba vedena příliš dlouhým vodičem, dochází v důsledku indukčnosti vodiče k oscilacím ve zpětné vazbě. Ty se mohou projevovat různými způsoby v závislosti na poměru parazitních odporů, kapacit a indukčností v zpětné vazbě(Obrázek 5.4).



Obrázek 5.4: Oscilace ve zpětné vazbě operačního zesilovače MAX4393

Rychlosť přeběhu operačního zesilovače

Při použití operačního zesilovače pro signály v řádu megahertz je limitem rychlosť přeběhu operačního zesilovače. Rychlosť přeběhu signálu lze nalézt derivací signálu v čase a nalezením maxima. V případě sinusového signálu tedy platí

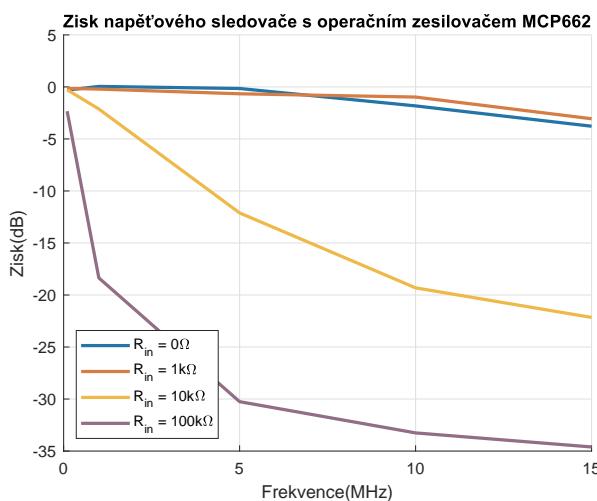
$$SR = \text{Max} \left(\frac{d}{dt} \cdot a \cdot \sin(2\pi ft) \right) = A2\pi f \quad (5.2)$$

kde SR je rychlosť přeběhu(Slew Rate), a je amplituda a f je frekvence signálu. Z vztahu 5.2 plyne, že rychlosť přeběhu sinusového signálu je lineárně závislá na frekvenci a amplitudě. Snížení amplitudy signálu nám umožní sledovat stejným operačním zesilovačem rychlejší signály.

■ 5.2.1 Napěťový sledovač s operačním zesilovačem MCP662

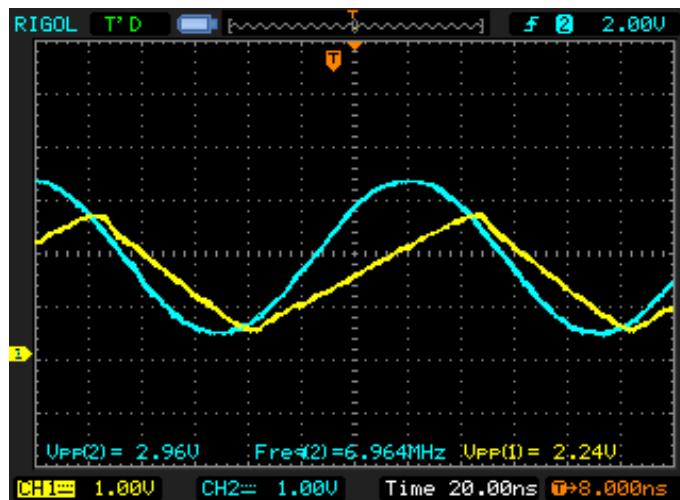
MCP662 je dvoukanálový operační zesilovač s rychlostí přeběhu $32V/\mu s$ a tranzientním kmitočtem 60 MHz [11]. Maximální vstupní napětí je $V_{dd} = 1.3V$. Aby byl schopen pracovat s 3.3 V signálem, je nutné jej napájet napětím alespoň 4.6 V. Vývojová deska NUCLEO-F303RE má zabudované zdroje 3.3 V a 5 V, proto bylo použito napájení 5V. Rychlosť přeběhu jej při amplitudě signálu 3.3 V, dle vztahu 5.2, omezuje na 1.54 MHz. Tento operační zesilovač byl vybrán proto, že díky nízké rychlosti přeběhu nezpůsobuje oscilace zpětné vazby při realizaci obvodu v nepájivém kontaktním poli. Tento operační zesilovač je dostupný pouze v SMD provedení. K zapojení v nepájivém kontaktním poli je nutné použít SMD adaptér.

Napěťový sledovač s operačním zesilovačem MCP662 byl realizován v nepájivém kontaktním poli dle schématu na obrázku 5.3. Testování bylo prováděno sinusovým signálem o rozkmitu 2 V a střední hodnotě 2 V. Amplituda na výstupu byla měřena pomocí mikrokontroleru STM32F303RE, tudíž tento graf zahrnuje zátěž AD převodníku. Test byl proveden pro několik hodnot vnitřního odporu zdroje signálu.



Obrázek 5.5: Napěťový sledovač s operačním zesilovačem MCP662

V důsledku omezené rychlosti přeběhu dochází při vyšších frekvencích k deformaci signálu. Tento jev je zachycen na obrázku 5.6. Při tvorbě grafu na obrázku 5.5 byla měřena pouze amplituda signálu. Nezachycuje tedy fakt, že při vyšších frekvencích už operační zesilovač nestíhal napětí sledovat a výstupní signál měl jiný tvar.

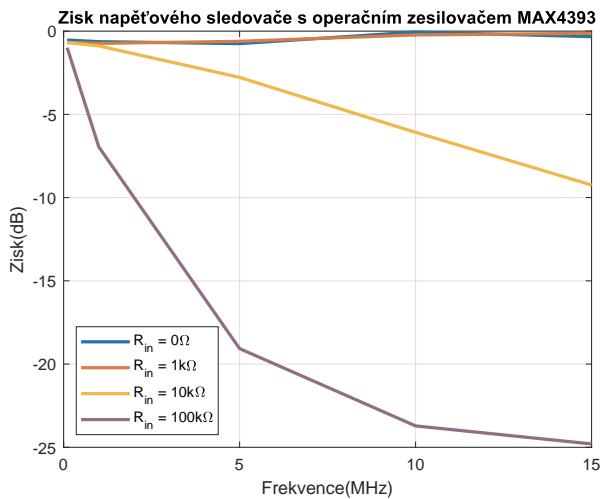


Obrázek 5.6: Projev nízké rychlosti přeběhu operačního zesilovače MCP662

■ 5.2.2 Napěťový sledovač s operačním zesilovačem MAX4393

MAX4393 je dvoukanálový operační zesilovač s rychlosí přeběhu $500 \text{ V}/\mu\text{s}$ a tranzientním kmitočtem 85 MHz [12]. Minimální napájecí napětí je 4.5 V. Napájen proto byl z 5 V zdroje integrovaného ve vývojovém kitu NUCLEO-F303RE. Při amplitudě 3.3 V zvládne dle vztahu 5.2 přenést sinusový signál o maximální frekvenci 24.11 MHz. Tento operační zesilovač byl vybrán pro svojí nízkou cenu (47Kč) a zároveň vysokou rychlosí přeběhu. Rychlosí přeběhu operačního zesilovače MAX4393 je podobná jako nejvyšší změřená rychlosí přeběhu u signálu generovaného pomocí mikrokontroléra STM32F303RE ($500\text{V}/\mu\text{s}$). Díky tomu by nemělo docházet k deformování signálu v případě, že bude použit mikrokontroler jako zdroj testovacího signálu.

Napěťový sledovač s operačním zesilovačem MAX4393 byl realizován v nepájivém kontaktním poli dle schématu na obrázku 5.3. Testování bylo prováděno sinusovým signálem o amplitudě 2 V a střední hodnotě 2 V. Amplituda na výstupu byla měřena pomocí mikrokontroléra STM32F303RE, tudíž tento graf zahrnuje zátěž AD převodníku. Test byl proveden pro několik hodnot vnitřního odporu zdroje signálu.

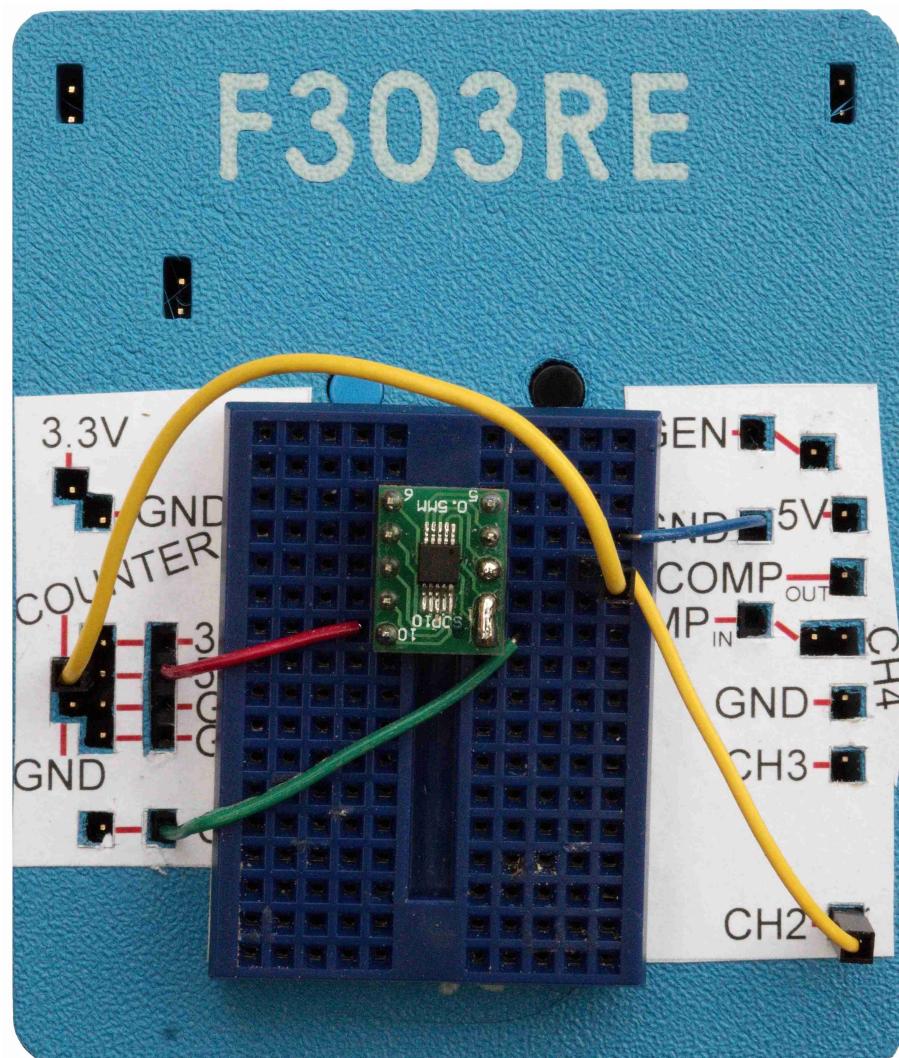


Obrázek 5.7: Napěťový sledovač s operačním zesilovačem MAX4393

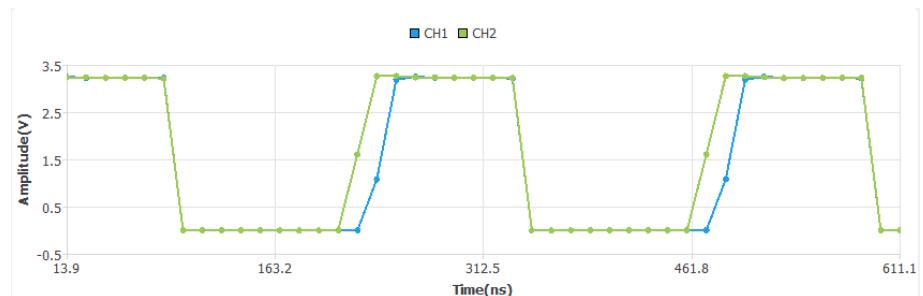
■ Referenční zapojení napěťového sledovače s operačním zesilovačem MAX4393

Kvůli vysoké rychlosti tohoto operačního zesilovače při zapojení na nepájivém kontaktním poli dochází k oscilacím ve zpětné vazbě (Obrázek 5.4). Tyto je nutné eliminovat použitím co nejkratších propojovacích vodičů a propájení zpětné vazby přímo na SMD adaptérů. Na spodní straně SMD adaptéru je mezi napájecí vývody operačního zesilovače připájen blokovací kondenzátor o velikost 100 nF. Referenční zapojení napěťového sledovače s operačním zesilovačem MAX4393 v nepájivém kontaktním poli je na obrázku 5.8.

V tomto zapojení je použit pouze jeden z kanálů operačního zesilovače MAX4393. Zapojen je tak, aby osciloskop zobrazoval signál z generátoru na kanálu 2 a signál po průchodu napěťovým sledovačem na kanálu 1 (Obrázek 5.9). Signál lze při tomto využití přivést přímo do frekvenčního čítače, bez použití komparátoru. Toto zapojení také demonstruje využití osciloskopu k vyhodnocení zpoždění signálu při průchodu operačním zesilovačem.



Obrázek 5.8: Referenční zapojení napěťového sledovače s operačním zesilovačem MAX4393



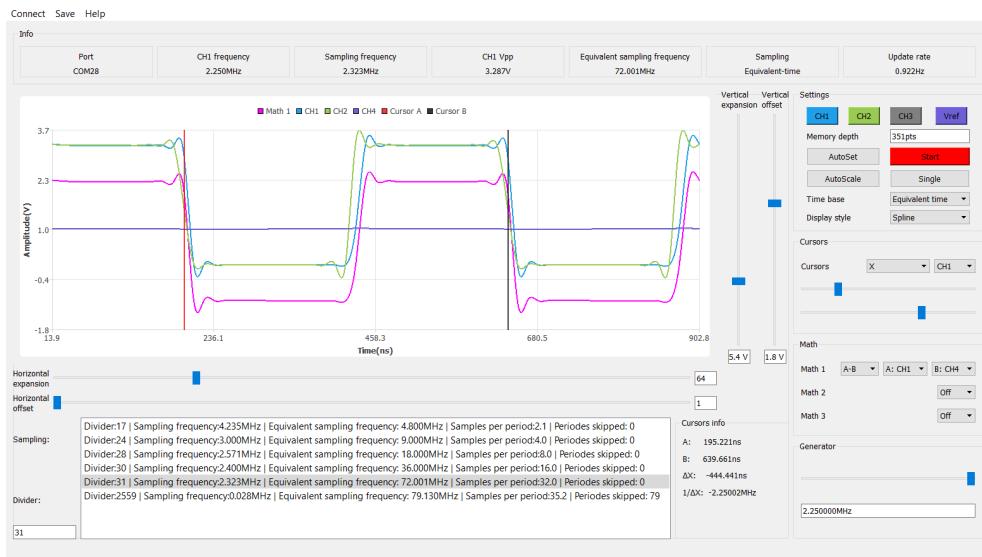
Obrázek 5.9: Použití napěťového sledovače s operačním zesilovačem MAX4393

Kapitola 6

Aplikace pro PC

Tato kapitola popisuje aplikaci pro ovládání osciloskopu a její grafické uživatelské rozhraní. Zároveň slouží jako návod k ovládání aplikace.

Aplikace pro ovládání osciloskopu a zobrazení změřených dat je implementována v jazyce C++ pomocí frameworku Qt. Framework Qt je kompatibilní s operačními systémy Windows (Windows 7 a vyšší), Linux a MacOS. Správná funkčnost aplikace byla testována na operačních systémech Windows 7, Windows 10 a Ubuntu 18.



Obrázek 6.1: Uživatelské rozhraní aplikace pro PC

V aplikaci jsou implementovány algoritmy pro návrh vhodné vzorkovací frekvence k dosažení aliasingu, řízení průběhu měření, automatického nastavení, připojení k mikrokontroléru a deserializaci dat. Dále je implementováno

grafické uživatelské rozhraní sloužící k nastavení parametrů měření a zobrazení naměřených dat.

■ **6.1 Grafické uživatelské rozhraní**

Grafické uživatelské rozhraní slouží k ovládání osciloskopu a zobrazení naměřených dat. Veškeré popisky jsou v anglickém jazyce. Rozhraní je rozděleno na několik částí. Centrem uživatelského rozhraní je graf osciloskopu, na kterém se zobrazují naměřené průběhy napětí, kurzory a matematické funkce. U grafu lze měnit měřítko zobrazení a posun v horizontálním i vertikálním směru. V informační liště se zobrazují informace o aktuálně zobrazeném měření. Sekce nastavení umožňuje zapínat a vypínat měření i jednotlivé, nastavit hloubku paměti, časovou základnu a způsob zobrazení průběhů. Pomocí kurzorů lze měřit přesné hodnoty napětí a času bez nutnosti odečítat je z mřížky grafu. Matematické funkce umožňují provádět tři nezávislé operace sčítání, odčítání a násobení. Pomocí vztahu 3.4 jsou navrhovány vhodné vzorkovací frekvence, které jsou uživateli prezentovány v podobě seznamu.

■ **Připojení k osciloskopu**

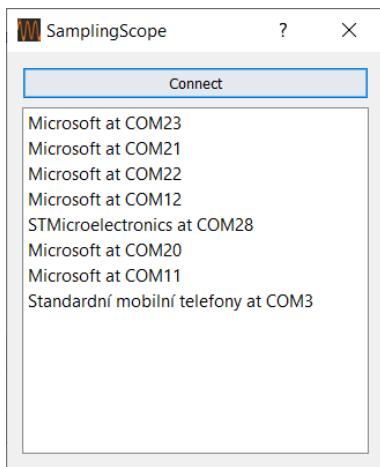
Komunikace s osciloskopem probíhá pomocí virtuálního COM portu přes USB. Pomocí dialogového okna připojení (Connect) na obrázku 6.2 lze zvolit sériový port a připojit se k němu. Port je v seznamu identifikován výrobcem zařízení a číslem portu. V seznamu se zobrazí všechny sériové porty, které jsou v operačním systému dostupné. Před prvním použitím osciloskopu je nutné nainstalovat ovladače ST-Link.

■ **Nápověda v aplikaci**

Pomocí menu Help lze otevřít nápovědu v anglickém jazyce. Nápověda obsahuje zapojení osciloskopu a jednoduchý návod.

■ **Uložení naměřených dat**

Naměřená data lze pomocí menu Save uložit jako obrázek, nebo CSV(Comma Separated Values).



Obrázek 6.2: Dialogové okno pro připojení k osciloskopu

V případě uložení obrázku se provede snímek celého okna a uloží se na uživatelem zvolené místo ve formátu PNG.

V případě uložení jako CSV se uloží data všech aktivních kanálu. Z důvodu kompatibility s programem Microsoft Excell jsou hodnoty odděleny středníkem (;) s oddělovačem desetinných míst dle jazykového nastavení operačního systému. V případě češtiny jsou desetinná místa oddělena čárkou(,). Přestože toto není standartní formát CSV, lze jej importovat i do Matlabu. Podrobný postup, jak import do Matlabu provést, je v návodě.

■ 6.1.1 Ovládací prvky

K ovládání jsou použity posuvné voliče, okénka pro zadání hodnoty, tlačítka a (výsuvných) seznamů.

Posuvné voliče lze ovládat kliknutím a tažením, pomocí kolečka myši, nebo kliknutím a poté šipkami na klávesnici. K použití nově nastavené hodnoty dojde při puštění tlačítka myši. V případě ovládání pomocí kolečka, nebo šipek dojde k použití nové hodnoty okamžitě. V případě, že lze daný parametr měnit pomocí posuvného voliče i políčka s hodnotou, dojde při změně k okamžité synchronizaci hodnot mezi políčkem s hodnotou a posuvným voličem.

Do políček lze zadávat čísla. Pokud je zadán text, je ignorován. Políčka pro nastavení hloubky paměti a frekvence generátoru podporují také zadání jednotek a SI předpon 'k' a 'M'. V případě že není specifikována jednotka, je použita základní jednotka pro danou hodnotu. K použití nově nastavené hodnoty dojde zmáčknutím klávesy Enter, nebo kliknutím na jiný prvek aplikace.

6. Aplikace pro PC

Tlačítka lze ovládat kliknutím myši. Stav ovládané funkce je indikován barvou tlačítka.

Výsuvný seznam lze rozevřít kliknutím na šipku na pravé straně seznamu. Požadovanou hodnotu poté vybrat kliknutím.

Použití většiny ovládacích prvků je možné i bez připojení k mikroprocesoru. Zvolené nastavení pak bude aplikováno na první měření po připojení. V libovolný okamžik lze na nucleu zmáčknout tlačítko reset (černé). Aplikace neztratí spojení s nucleem, protože o USB komunikaci se nestará přímo mikroprocesor a měření bude pokračovat po uvolnění resetu. Tento postup lze použít v případě, že dojde chybě v přenosu parametrů měření a zaseknutí nuclea.

■ Informační lišta

V horní části okna se nachází lišta označená "Info". Zde se zobrazují informace o aktuálním nastavení parametrů měření. Tyto informace pocházejí z parametrů odeslaných z mikrokontroleru. Nehledě na aktuální nastavení aplikace zobrazuje správné informace o aktuálně zobrazeném signálu. Konkrétně se jedná o tyto hodnoty.

- Sériový port, který používá tato instance aplikace pro komunikaci s osciloskopem
- Frekvence signálu na kanálu 1
- Skutečná vzorkovací frekvence (společná pro všechny kanály)
- Amplituda signálu na kanálu 1
- Ekvivalentní vzorkovací frekvence
- Mód vzorkování (reálný, nebo ekvivalentní čas)
- Rychlosť obnovování grafu

■ Graf osciloskopu

V grafu se zobrazují naměřené průběhy, kurzory a matematické funkce. Zobrazené prvky jsou od sebe odlišeny těmito barvami:

- Kanál 1 - světle modrá

- Kanál 2 - světle zelená
- Kanál 3 - oranžová
- Kanál 4 - fialová
- Kurzor A - červená
- Kurzor B - černá
- Matematická funkce 1 - růžová
- Matematická funkce 2 - tmavě zelená
- Matematická funkce 3 - tmavě modrá

V grafu je zobrazena také legenda a měřítka os. Graf je napevno rozdělen mřížkou 4x4, která je okotována skutečnými hodnotami pro dané místo grafu. Při změně měřítka nebo posunu se kóty mění s grafem.

Měřítka a posun grafu v obou směrech lze ovládat pomocí posuvných voličů po stranách, nebo zadáním hodnoty do políčka u daného voliče. Ovládání horizontální osy je uváděno ve vzorcích. Tj. o kolik vzorků je zobrazený graf posunutý a kolik vzorků se do něj na šířku vejde. Ovládání vertikálního osy je ve voltech.

■ Výběr vzorkovací frekvence

Návrhy možných vzorkovacích frekvencí jsou získávány pomocí algoritmu popsaného v kapitole 6.3 a zobrazeny uživateli v podobě seznamu. Společně s vzorkovací frekvencí je uživateli zobrazen také dělící poměr, pomocí kterého je dosaženo vzorkovací frekvence, ekvivalentní vzorkovací frekvence, počet vzorků na periodu a počet přeskočených period.

Uživatel by se při výběru vzorkovací frekvence měl řídit zejména počtem vzorků na periodu. Počet vzorků musí být zvolen tak, aby se do nastavené hloubky paměti vešly alespoň 2 periody. Jinak nedojde k správnému triggrování. Zároveň by se měl uživatel také snažit minimalizovat počet přeskočených period, zejména pokud zdroj signálu nepochází z vestavěného generátoru. Pokud je signál nestabilní, lze zvolením menšího počtu vzorků na periodu zkrátit dobu měření a tím i vliv nestability frekvence. Kliknutím na jeden z návrhů dojde k nastavení nového děliče pro příští měření a zároveň k přepnutí osy X z vzorků na čas a nastavení měřítka zobrazení na 2 periody.

Zvolení vzorkovací frekvence z tohoto seznamu je nutnou podmínku pro přepnutí na zobrazení času na ose X a správnému zobrazení ekvivalentní vzorkovací frekvence v informační liště. V případě že návrh vzorkovací frekvence z jakéhokoliv důvodu selže, nebo nevyhovuje, v levém dolním rohu lze zadat dělící poměr manuálně. Hodnota může být od 10 do 65 536. V takovém případě ale nelze dopočítat ekvivalentní vzorkovací frekvenci nastavit časovou základnu na čas.

Nastavení parametrů měření

V box "Settings" se nachází obecné ovládací prvky. Tlačítka CH2-CH4 lze zapnout/vypnout daný kanál. Stav kanálu je znázorněn barvou tlačítka. Při zapnutém kanálu má tlačítko stejnou barvu, jako příslušná kanál v grafu. Vypnutý kanál je znázorněn šedou barvou. Kanál 1 vypnout nelze, protože je na něj navázáné triggrování. Kanál 4 lze klikáním na tlačítko přepnout mezi měřením napětí na pinu PB12 a měřením interní napěťové reference.

V políčku pod nastavením kanálu lze změnit délku záznamu. Výchozí hodnota je 500, maximum 12 000 vzorků na kanál. Tlačítko "Autoset" spustí proceduru automatického nastavení parametrů popsanou v kapitole 6.4. Tlačítka Start/Stop lze zastavit měření. Zastavené měření je signalizované červenou barvou tlačítka. Měřítko grafu a polohu kurzorů lze měnit i při zastaveném měření.

Pomocí výsuvných seznamů lze zvolit časovou základnu a styl zobrazení grafu. Časová základna může být udávána v čase, nebo vzorcích. Možnost zobrazení osy X v čase je dostupná pouze pokud byla vybrána vzorkovací frekvence ze seznamu. Průběhy v grafu mohou být zobrazeny lineárním proložením změrených hodnot, nebo křivkou. U obou variant lze zapnout, nebo vypnout zobrazení zaznamenaných bodů.

Kurzory

Pomocí kurzorů lze přesně změřit vzdálenost dvou bodů grafu. Program umožňuje zobrazení dvou kurzorů v grafu. Zvolit lze mezi kurzory v ose X, v ose Y, nebo sledujícími napětí(Tracking). Kurzory se ovládají pomocí dvou posuvných jezdců. Kurzory X a Y lze nastavit na libovolné místo v grafu. Kurzory sledující napětí se přichytávají k změřeným bodům. Po zapnutí kurzorů se v dolní části okna programu zobrazí poloha obou kurzorů a jejich vzdálenost.

■ Matematické funkce

Matematické funkce umožňují provádět jednoduché výpočty přímo v programu a zobrazit je v grafu. Lze aktivovat až tři matematické funkce. Dostupné funkce jsou A+B, A-B a A*B. Zdrojem může být libovolná kombinace dvou zapnutých kanálů. V případě že zvolený kanál není zapnutý, matematická funkce se v grafu nezobrazí. Jednotlivé funkce jsou od sebe v grafu barevně odlišeny.

■ Generátor

Na pinech PB8 a D15 lze zapnout generátor obdélníkového signálu s amplitudou 3.3 V a střídou 50 %. Tento signál je vhodný k buzení testovaného obvodu, protože je synchronní s hodinami osciloskopu a nehrozí proto problémy s nestabilní frekvencí.

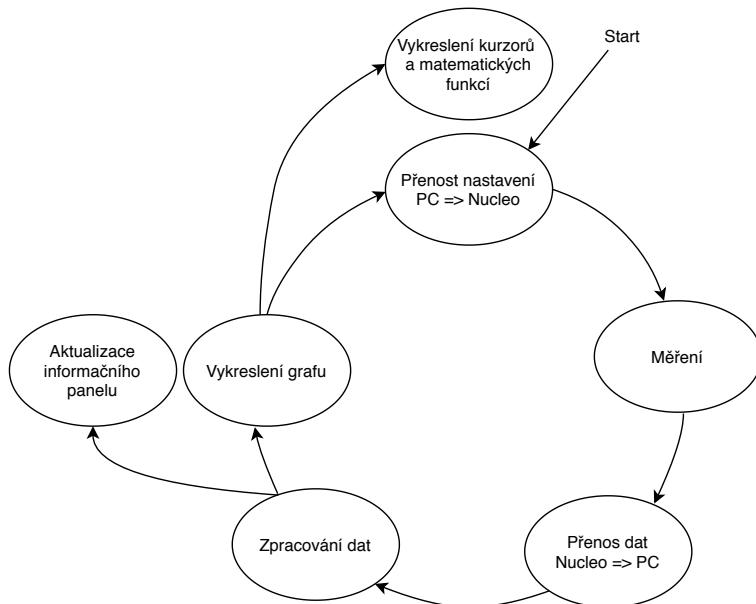
Frekvenci generátoru lze nastavit pomocí posuvného voliče, nebo napsáním hodnoty do políčka pod voličem. Mikrokontrolér dokáže generovat pouze frekvence vzniklé celočíselným dělením 144 MHz. V případě zadání frekvence, kterou generovat nelze, je generována nejbližší možná. Nastavitelný rozsah je 48MHz - 2.197336 kHz. Pokud je frekvence nastavena na 0 Hz, generátor je vypnutý. V případě že frekvence generátoru vznikla dělením lichým číslem, nízká úroveň signálu trvá o 6.94 ns déle.

■ 6.2 Proces měření

Obrázek 6.3 znázorňuje průběh záznamu dat, přenosu dat, zpracování dat a vykreslení grafu. Celý cyklus je navržen tak, aby v průběhu měření nedocházelo ke komunikaci na sériové lince, která by mohla ovlivnit měření(přeslechy mezi cestami na plošném spoji vývojového kitu). Zároveň zajistuje aby nedošlo k přehlcení aplikace naměřenými hodnotami, které se nestíhají vykreslit.

Cyklus začíná odesláním parametrů měření do mikrokontroléru. Následuje měření pomocí daných parametrů. Po skončení měření mikrokontrolér odesle změřená data a parametry měření do ovládací aplikace. Tím je zároveň potvrzeno, že nedošlo k chybě v komunikaci. Ovládací aplikace pokračuje deserializací dat, překreslením grafu a návratem na začátek cyklu.

Během tohoto cyklu může uživatel kdykoliv změnit některý z parametrů měření. Nové parametry se uloží a k jejich odeslání dojde až s novým začátkem cyklu. Tím je zajištěno, že nedojde k změně parametrů během měření.



Obrázek 6.3: Vývojový diagram průběhu měření a zpracování dat

■ 6.3 Výpočet vhodných vzorkovacích frekvencí

Hlavním prvkem odlišujícím tento osciloskop od jiných podobných projektů je schopnost využít ekvivalentní vzorkování k zobrazení signálu na frekvencích výrazně vyšších, než je vzorkovací frekvence. Pro dosažení aliasingu bez deformace signálu je třeba najít vhodnou vzorkovací frekvenci, kterou lze zároveň na mikrokontroléru realizovat.

Divider:17 Sampling frequency:4.235MHz Equivalent sampling frequency: 4.800MHz Samples per period:2.1 Periodes skipped: 0
Divider:24 Sampling frequency:3.000MHz Equivalent sampling frequency: 9.000MHz Samples per period:4.0 Periodes skipped: 0
Divider:28 Sampling frequency:2.571MHz Equivalent sampling frequency: 18.000MHz Samples per period:8.0 Periodes skipped: 0
Divider:30 Sampling frequency:2.400MHz Equivalent sampling frequency: 36.000MHz Samples per period:16.0 Periodes skipped: 0
Divider:31 Sampling frequency:2.323MHz Equivalent sampling frequency: 72.001MHz Samples per period:32.0 Periodes skipped: 0
Divider:2559 Sampling frequency:0.028MHz Equivalent sampling frequency: 79.130MHz Samples per period:35.2 Periodes skipped: 79

Obrázek 6.4: Seznam navržených vzorkovacích frekvencí

Návrhy pro volbu vzorkovací frekvence jsou získávány pomocí vztahu 3.4. Pomocí dvou vnořených cyklů prochází všechny přípustné děliče (1 až 65536) a počet přeskovených period(0-100). Počet přeskovených period je limitován na 100, aby měření netrvalo příliš dlouho. Mohla by se zde projevit případná nestabilita frekvence signálu, nebo hodin procesoru. Pokud vyjde počet vzorků na periodu větší než 2, je tento dělič uložen do seznamu kandidátů.

Pokud během výpočtu počtu vzorků na periodu vyjde záporné číslo, znamená

to, že dochází k zrcadlení signálu v důsledku aliasingu (Viz. kapitola 3.2). Takový návrh je také přidán na seznam kandidátů. Pokud jej uživatel zvolí aplikace automaticky začne signál zrcadlit kolem osy Y, aby došlo k správnému zobrazení.

V případě že je frekvence signálu menší než 100kHz, přepne se aplikace do režimu záznamu v reálném čase a navrhuje děliče tak, aby nedocházelo k aliasingu. V režimu reálného času lze vždy dosáhnout alespoň 72 vzorků na periodu.

Při některých vzorkovacích frekvencích může docházet k zrcadlení signálu. V tom případě vyjde z vztahu 3.4 záporný počet vzorků na periodu. V případě zvolení této frekvence aplikace začne automaticky zrcadlit signál tak, aby byl zobrazen jeho skutečný tvar. Zároveň uživateli tento fakt signalizuje tím, že ekvivalentní vzorkovací frekvence v informační liště je záporná.

Filtrace návrhů vzorkovací frekvence

V závislosti na frekvenci signálu se může stát, že seznam obsahuje velké množství podobných délek periody, nebo i několik různých dělících poměrů, které dosahují stejné délky periody. Aby uživatel nemusel procházet dlouhý seznam návrhů, jsou návrhy dále filtrovány. Cílem navrženého filtru je nabídnout uživateli více možností počtu vzorků na periodu a zároveň nezobrazovat velké množství návrhů s podobným počtem vzorků na periodu.

Bylo zvoleno 15 různých počtů vzorků na periodu, které by bylo vhodné uživateli nabídnout: 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 75, 100, 200, 350, 500, 1000. Ke každému z těchto počtů vzorků na periodu je přiřazen jeden návrh vzorkovací frekvence, který je mu nejblíže. Následně jsou zobrazeny pouze návrhy, které byly přiřazeny k jednomu z ideálních počtů, tedy maximálně 15 návrhů. Tím je zajištěno, že se nebudou opakovat návrh s podobným počtem vzorků na periodu.

6.4 Automatické nastavení osciloskopu

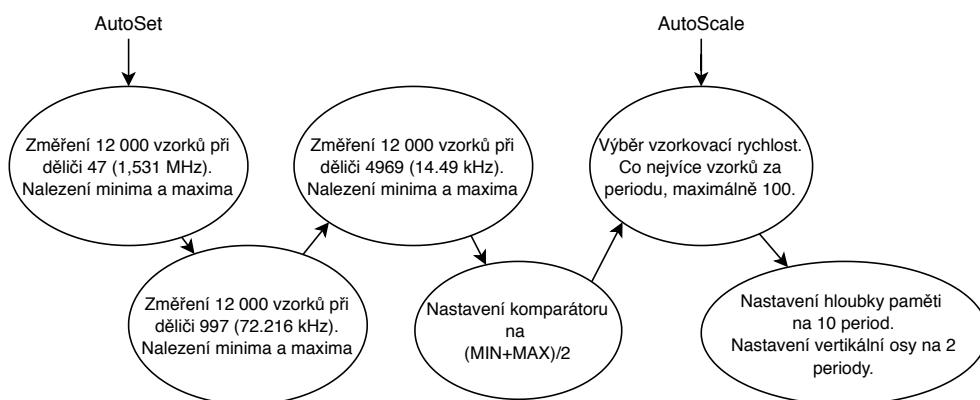
V některých případech se uživatel nechce zabývat podrobným nastavováním parametrů měření a chce jen rozumným způsobem zobrazit signál. Pro tento účel byl navržen algoritmus automatického nastavení osciloskopu.

Algoritmus automatického nastavení osciloskopu, který se vyvolá volbou

funkce "AutoSet", zajišťuje správné nastavení referenčního napětí komparátoru (Viz kapitola 4.5), výběr vhodné vzorkovací frekvence a nastavení vertikálního měřítka tak, aby byly zobrazeny dvě periody signálu.

Referenční napětí komparátoru by mělo být nastaveno na průměr maxima a minima signálu. Bez znalosti frekvence signálu však není možné nastavit správné ekvivalentní vzorkování a nemůžeme si tak být jisti, že byla změřena celá perioda signálu a zachyceno skutečné maximální a minimální napětí signálu. Maxima a minima jsou proto zachycena pomocí tří různých vzorkovacích frekvencí. Jako dělící poměr jsou zvolena prvočísla, což snižuje možnost že by u všech tří záznamů docházelo k aliasingu, při kterém se neprojeví maximální rozkmit signálu. Pomocí maximální délky záznamu (12 000 bodů) je dále snížena pravděpodobnost, že nedojde k zachycení celé periody signálu.

Po nastavení komparátoru a změření frekvence signálu jsou vypočítány návrhy na vzorkovací frekvence. Zvolena je vzorkovací frekvence, která zajistí nejvíce vzorků na periodu, maximálně však 100. Délka záznamu je nastavena na 10 period signálu a časová osa grafu na 2 periody. Vertikální osa grafu nijak upravena není. Celý tento proces trvá přibližně 4 s.



Obrázek 6.5: Vývojový diagram funkce automatického nastavení parametrů

6.5 Automatické nastavení měřítka grafu

Proces automatického nastavení osciloskopu nastaví mimo jiné meřítko grafu, ale trvá poměrně dlouho. Proto byla přidána funkce automatického nastavení měřítka, která vykoná pouze poslední dva kroky z funkce automatického nastavení osciloskopu.

Funkci automatického nastavení měřítka grafu lze vyvolat pomocí tlačítka "AutoScale" a na rozdíl od funkce "AutoSet" je okamžitá.

Kapitola 7

Závěr

Cílem práce bylo navrhnut programově definovaný osciloskop využívající vzorkování v ekvivalentním čase a generátor signálu pro testování obvodů na mikrokontroléru STM32F303RE. Dále byla vytvořena ovládací aplikace pro PC.

V rámci této práce byl úspěšně vytvořen osciloskop s vzorkováním v ekvivalentním čase na mikrokontrolér STM32F303RE. Program pro mikrokontrolér zvládá měřit napětí až na 4 kanálech a umožňuje měřit frekvenci na kanálu 1. Změřené hodnoty jsou odeslány do ovládací aplikace běžící na PC pomocí virtuální sériové linky přes USB port.

Podarilo se vytvořit algoritmus pro výpočet vhodné vzorkovací frekvence, kterou lze generovat pomocí čítačů na použitém mikrokontroléru. Přestože maximální vzorkovací frekvence integrovaných AD převodníků je 7.2 MHz, pomocí vhodné navozeného aliasingu lze dosáhnout ekvivalentní vzorkovací frekvence v řádu stovek MHz. V případě použití testovacího signálu ze zabudovaného generátoru obdélníkového signálu, maximální ekvivalentní vzorkovací frekvence je 144 MHz. Tím je dosaženo 30x vyšší efektivní vzorkovací frekvence oproti osciloskopu LEO. Při měření signálu s malou výstupní impedancí lze měřit signály do frekvence 50MHz(pokles 3dB). Pro měření signálů s vysokou výstupní impedancí bylo navrženo několik variant napěťového sledovače.

Nevýhodou tohoto přístupu je nutnost měřit periodické signály se stabilní frekvencí. To omezuje měření signálů z RC, LC, nebo keramických oscilátorů kde může docházet k fluktuacím frekvence signálu.

Pro ovládání osciloskopu byla v jazyce C++ a frameworku Qt vytvořena aplikace kompatibilní s operačními systémy Windows, Linux a MacOS. Na prvních dvou byla i otestována.

7. Závěr

Zadání diplomové práce bylo splněno navržením osciloskopu s řádově vyšší vzorkovací frekvencí než dosavadní řešení používané při výuce. S pomocí vytvořeného osciloskopu lze měřit periodické signály v časové i frekvenční oblasti. Pro testování obvodů byl implementován generátor obdélníkového signálu s digitálně nastavitelnou frekvencí. Zároveň byl splněn požadavek na realizaci pouze pomocí vývojového kitu STM NUCLEO a jednoduchých obvodů, které lze realizovat na nepájivém kontaktním poli.

Literatura

- [1] STMicroelectronics, *STM32F303RE Datasheet[online]* <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f303re.pdf>>
- [2] STMicroelectronics, *RM0316 Reference manual[online]* <https://www.st.com/resource/en/reference_manual/dm00043574-stm32f303xb-c-d-e-stm32f303x6-8-stm32f328x8-stm32f358xc-stm32f.pdf>
- [3] Bc. Jan Mucala *Univerzální čítač pro systém LEO* ČVUT FEL 2018 <<http://hdl.handle.net/10467/73940>>
- [4] STMicroelectronics *NUCLEO-XXXXRX NUCLEO-XXXXRX-P Data brief[online]* <https://www.st.com/resource/en/data_brief/nucleo-f303re.pdf>
- [5] Jan Fischer *LEO - Little Embedded Oscilloscope“ prezentace a ukázky[online]* <https://embedded.fel.cvut.cz/sites/default/files/platformy/LEO_Soubory/Seminar_skoly_2016_11_25_LEO_13_reduk___ETC.pdf>
- [6] Vojtěch Kadlec *Digitální osciloskop s jednočipovým mikropočítačem ATXMEGA* <<https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/4009/1/BP.pdf>>
- [7] Ishtiaq Ahmed Karim *A low cost portable oscilloscope based on Arduino and GLCD* <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6850686>>
- [8] Liberty Mutauranwa, Malvin Nkomo *Design and realization of a compact low cost system-on-chip based digital audio oscilloscope* <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8073789>>

7. Závěr

- [9] M. Krauss, H. Thieme, H.-G. Schniek, E. Wittig *Fully-integrated 5 V CMOS system for a 20 M sample/s sampling oscilloscope* <<https://ieeexplore.ieee.org/document/488727>>
- [10] STMicroelectronics *AN2834 Application note* <https://www.st.com/resource/en/application_note/cd00211314-how-to-get-the-best-adc-accuracy-in-stm32-microcontrollers-stmicroelectronics.pdf>
- [11] Microchip *MCP660/1/2/3/4/5/9 Datasheet* <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20002194E.pdf>>
- [12] Maxim Integrated *MAX4389/MAX4390/MAX4392–MAX4396 Datasheet* <[https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds\(MAX4389-MAX4396.pdf](https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds(MAX4389-MAX4396.pdf)>
- [13] *Webová stránka LEO* <<https://embedded.fel.cvut.cz/platformy/leo>>
- [14] Bc. Michal Přibil *Tříkanálová měřící jednotka s mikrořadičem STM32*

Příloha A

Obsah přiloženého CD

- Diplomová práce ve formátu PDF
- Zdrojový kód grafické ovládací aplikace
- Aplikace zkompilovaná pro OS Windows
- Zdrojový kód firmware osciloskopu
- Zkompilovaný firmware osciloskopu
- 3D model krabičky pro Nucleo-F303RE