FAKULTA
INFORMAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ČVUT V PRAZE

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Název:	Programovatelný generátor průběhů (sinus, trojúhelník, obdélník)
Student:	Karel Hevessy
Vedoucí:	Ing. Pavel Kubalík, Ph.D.
Studijní program:	Informatika
Studijní obor:	Počítačové inženýrství
Katedra:	Katedra číslicového návrhu
Platnost zadání:	Do konce letního semestru 2020/21

Pokyny pro vypracování

1) Prozkoumejte existující řešení generování průběhů s pomocí DDS generátorů.
2) Navrhněte a zrealizujte zařízení pro generování sinusového, trojúhelníkového a obdélníkového průběhu.
3) Pro zařízení vyberte vhodnou platformu pro řízení DDS generátorů.
4) Zařízení bude možné ovládat s pomocí grafického dotykového displeje.
5) Pro výsledné zařízení naprogramujte obslužnou aplikaci.
6) Aplikaci naprogramujte v jazyce C/C++.
7) Výsledné zařízení otestujte.

Seznam odborné literatury

Dodá vedoucí práce.

doc. Ing. Hana Kubátová, CSc.
vedoucí katedry

doc. RNDr. Ing. Marcel Jiřina, Ph.D.
děkan

V Praze dne 5. února 2020

FAKULTA
INFORMAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ČVUT V PRAZE

Bakalářská práce

Programovatelný generátor průběhů (sinus, trojúhelník, obdélník)

Karel Hevessy

Katedra číslicového návrhu
Vedoucí práce: Ing. Pavel Kubalík, Ph.D.

4. června 2020

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Pavlu Kubalíkovi, Ph.D za ochotu a cenné rady při vypracování této bakalářské práce.

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.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, ve znění pozdějších předpisů. V souladu s ust. § 2373 odst. 2 zákona č. 89/2012 Sb., občanský zákoník, ve znění pozdějších předpisů, tímto uděluji nevýhradní oprávnění (licenci) k užití této mojí práce, a to včetně všech počítačových programů, jež jsou její součástí či přílohou a veškeré jejich dokumentace (dále souhrnně jen „Dílo"), a to všem osobám, které si přejí Dílo užít. Tyto osoby jsou oprávněny Dílo užít jakýmkoli způsobem, který nesnižuje hodnotu Díla a za jakýmkoli účelem (včetně užití k výdělečným účelům). Toto oprávnění je časově, teritoriálně i množstevně neomezené. Každá osoba, která využije výše uvedenou licenci, se však zavazuje udělit ke každému dílu, které vznikne (byť jen zčásti) na základě Díla, úpravou Díla, spojením Díla s jiným dílem, zařazením Díla do díla souborného či zpracováním Díla (včetně překladu) licenci alespoň ve výše uvedeném rozsahu a zároveň zpřístupnit zdrojový kód takového díla alespoň srovnatelným způsobem a ve srovnatelném rozsahu, jako je zpřístupněn zdrojový kód Díla.

V Praze dne 4. června 2020 . . . . . .

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta informačních technologií
© 2020 Karel Hevessy. Všechna práva vyhrazena.
Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí a nad rámec oprávnění uvedených v Prohlášení na předchozí straně, je nezbytný souhlas autora.

Odkaz na tuto práci

Hevessy, Karel. *Programovatelný generátor průběhů (sinus, trojúhelník, obdélník).* Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta informačních technologií, 2020.

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem a realizací generátoru analogového signálu harmonického průběhu. Zařízení umožňuje generovat sinusový, trojúhelníkoový a obdélníkový průběh. Lze měnit frekvenci výsledného průběhu. Na dotykovém displeji, kterým se aplikace ovládá, jsou zobrazeny aktuální informace. Samotná deska s generátorem je ovládaná mikrokontrolérem přes SPI.

Klíčová slova generátor signálu, dotykový displej, generátor SI5351, generátor AD9834, Arduino

Abstract

This thesis describes design and creation of analog signal generator. Device can generate sine, triangle and square waves. Generated frequency can be changed. The device is controlled by touchscreen, on which are also shown information about generated wave. The board with the generator module is controlled by a microprocessor via SPI.

Keywords signal generator, touchscreen, SI5351 generator, AD9834 generator, Arduino

Obsah

Úvod **1**

1 Cíl práce **3**

2 Rešerše existujících řešení **5**
2.1 Stolní přístroje 5
2.2 Jednodeskové generátory 6
2.3 Srovnání 8

3 Analýza a návrh **11**
3.1 Generátory funkcí 11
3.1.1 DDS generátory 11
3.1.2 Dostupné generátory 12
3.2 Komunikace s generátorem 12
3.2.1 SPI 12
3.2.2 I^2C 13
3.3 Platforma k řízení generátoru 13
3.3.1 Arduino 15
3.4 Zobrazování 16
3.5 Generátor 18
3.6 Návrh řešení – blokové schéma 19
3.7 Výběr součástek 20
3.7.1 Řízení 20
3.7.2 Displej 21
3.7.3 Generátor 21
3.8 Cena 21

4 Realizace – hardware **23**
4.1 Součástky 24
4.1.1 Arduino 24

4.1.2 Displej 24
4.1.3 Generátory 24
4.2 Fyzická realizace 24

5 Realizace – software **29**
5.1 Externí knihovny 29
5.1.1 UTFT 29
5.1.2 TFT_Touch 30
5.1.3 MD_AD9833 30
5.1.4 Etherkit Si5351 31
5.2 Implementace kódu 31
5.2.1 Vývojový diagram 31
5.2.2 Obrazovky 32

6 Testování **37**

Závěr **41**

Bibliografie **43**

A Výsledky měření na stolním osciloskopu – tabulky naměřených hodnot **49**

B Výsledky měření AD9834 na stolním osciloskopu – obrázky **51**

C Výsledky měření SI5351 na stolním osciloskopu – obrázky **57**

D Seznam použitých zkratek **63**

E Obsah přiloženého CD **65**

Seznam obrázků

2.1 Generátor Tektronix AFG3101C 6
2.2 Generátor Voltcraft DDS-3025 7
2.3 Generátor Analog Devices AD9850 7
2.4 Generátor Analog Devices AD9833 8

3.1 Ilustrace DDS syntézy 11
3.2 Časování SPI 12
3.3 Časování I^2C 13
3.4 Arduino Mega 2560 14
3.5 PIC18F47Q10 Curiosity Nano 14
3.6 OLED displej 16
3.7 Použitý TFT LCD displej 16
3.8 Generátor Analog Devices AD9850 17
3.9 Generátor Analog Devices AD9833 17
3.10 Deska s generátorem AD9834 18
3.11 Deska s generátorem SI5351 19
3.12 Schéma řešení 20
3.13 Převodník k displeji 21

4.1 Schéma řešení 23
4.2 Ilustrace zapojení generátorů 26
4.3 Celé zařízení 27

5.1 Vývojový diagram ovládacího programu 33
5.2 Obrazovka 1 34
5.3 Obrazovka 2 34
5.4 Obrazovka 3 35

6.1 Osciloskop DSO138 37
6.2 Sinusový výstup AD9834 38
6.3 Trojúhelníkový výstup AD9834 39

6.4 Obdélníkový výstup SI5351 40

B.1 Sinusový výstup AD9834 – 20 MHz bez zátěže 51
B.2 Sinusový výstup AD9834 – 24 MHz bez zátěže 52
B.3 Sinusový výstup AD9834 – 24 MHz se zátěží 52
B.4 Trojúhelníkový výstup AD9834 – 500 kHz bez zátěže 53
B.5 Trojúhelníkový výstup AD9834 – 3 MHz bez zátěže 53
B.6 Trojúhelníkový výstup AD9834 – 19 MHz bez zátěže 54
B.7 Obdélníkový výstup AD9834 – 10 kHz bez zátěže 54
B.8 Obdélníkový výstup AD9834 – 10 kHz se zátěží 55
B.9 Obdélníkový výstup AD9834 – 5 MHz se zátěží 55
B.10 Obdélníkový výstup AD9834 – 15 MHz bez zátěže 56

C.1 Výstup SI5351 – 10 MHz bez zátěže 57
C.2 Výstup SI5351 – 100 MHz bez zátěže 58
C.3 Výstup SI5351 – 100 MHz se zátěží 58
C.4 Výstup SI5351 – 160 MHz bez zátěže 59
C.5 Výstup SI5351 – 160 MHz se zátěží 59
C.6 Výstup SI5351 – 220 MHz bez zátěže 60
C.7 Dva výstupy SI5351 – 10 a 5 MHz, se zátěží 60
C.8 Dva výstupy SI5351 – 10 a 1 MHz bez zátěže 61
C.9 Dva výstupy SI5351 – oba 100 MHz se zátěží 61

Seznam tabulek

2.1 Generátory Tektronix AFG3101C a Voltcraft DDS-3025 6
2.2 Srovnání generátorů 9

3.1 Srovnání MCU PIC18F47Q10, ATmega2560 a STM8S207K8 . . . 15
3.2 Typy Arduina 15
3.3 Srovnání generátorů 20
3.4 Shrnutí rozdílů vybraných generátorů AD9834 a SI5351 22
3.5 Cena 22

4.1 Připojení displeje 25
4.2 Pinout AD9834 26
4.3 Pinout SI5351 26

A.1 Výsledky měření AD9834 – sinusový průběh 49
A.2 Výsledky měření AD9834 – trojúhelníkový průběh 50
A.3 Výsledky měření AD9834 – obdélníkový průběh 50
A.4 Výsledky měření SI5351 – obdélníkový průběh 50

Seznam výpisů kódu

1 Nejdůležitější funkce `UTFT` 29
2 Debounce pomocí `TFT_Touch` 30
3 Použité funkce z `MD_AD9833` 31
4 Použité funkce z `Si5351` 31

Úvod

Generátor funkcí je důležitým přístrojem, má uplatnění ve všech elektrotechnických odvětvích. Nejpoužívanější a nejpřesnější je generování pomocí přímé digitální syntézy (DDS).
Generátory signálu jsou základním zařízením v elektrotechnické praxi. Používají se například při designu, testování nebo opravách elektronických zařízení. Výstupem práce bude zařízení, které si bude moci kdokoli levně sestrojit, pokud bude mít zájem o generování signálu.
V práci se nejdříve věnuji přehledu samotných generátorů. Následuje popis metody DDS, pokračuji přehledem možných platforem k řízení generátoru a dále vybírám vhodnou platformu. Také vybírám generátor. V další kapitole popisuji implementaci. Poslední kapitola popisuje výsledné zařízení a jeho testování.

Kapitola 1

Cíl práce

Hlavním cílem práce je návh a realizace zařízení pro generování sinusového, trojúhelníkového a obdélníkového průběhu. V rámci toho je potřeba splnit několik dílčích podcílů. Nejprve je potřeba prozkoumat existující řešení generování průběhu pomocí DDS generátorů. Dále je nutné vybrat vhodnou platformu pro řízení DDS generátoru. Následuje implementace ovládání zařízení pomocí dotykového displeje, pokračuje naprogramování obslužné aplikace výsledného zařízení a to v jazyce C nebo C++. Závěrem je třeba otestovat výsledné zařízení a zhodnotit jeho funkčnost.

Kapitola 2

Rešerše existujících řešení

Pojem generátor signálu označuje širokou škálu produktů. Od integrovaných obvodů, pro jejichž funkčnost je potřeba další hardware, až po komplexní drahé přístroje. První jmenované často umí generovat jen průběhy pro základní funkce v nich uložené, ty druhé mohou generovat i libovolný periodický průběh (omezený velikostí paměti a šířkou D/A převodníku). Na obojí lze použít metodu DDS (Direct Digital Synthesis, viz dále 3.1.1).

Generátory se tedy dají zařadit do dvou kategorií, stolních přístrojů a jednodeskových generátorů. Pro ilustraci jsem z obou kategorií vybral několik příkladů a dále popíšu jejich parametry. Výše uvedený princip, tedy generování průběhu libovolné periodické funkce, se nazývá AWG (Arbitrary Waveform Generator, generátor arbitrárního průběhu). AWG generátory, které využívají princip DDS, se jmenují AFG (Arbitrary Function Generator, generátor arbitrární funkce). Co do funkčnosti jsou v zásadě stejné jako AFG [1]. Dále se používá také zkratka ARB, která znamená jednoduše Arbitrary a označuje jak AWG tak AFG.

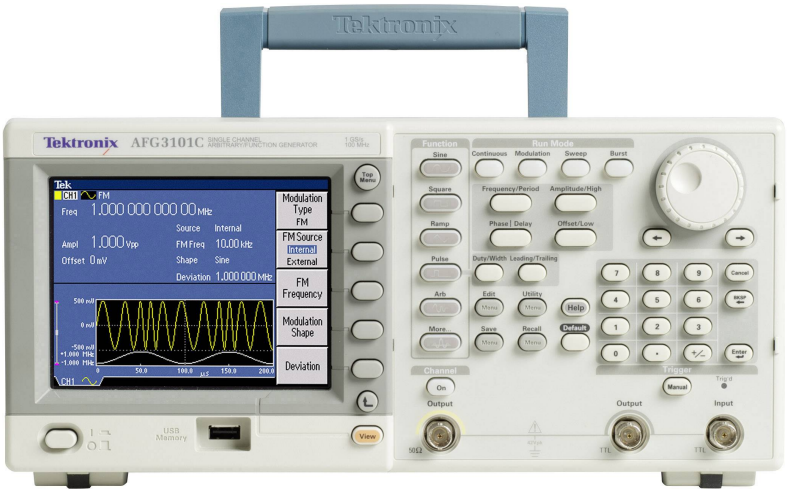
2.1 Stolní přístroje

Laboratorní generátory průběhu má v nabídce mnoho výrobců elektronického vybavení, například Siglent [2], Rigol [3], Keysight [4], Tektronix [5] nebo Rohde-Schwarz [6].
V našich školních laboratořích jsou generátory Tektronix AFG3101C. Tyto umí produkovat signál předdefinovaných funkcí, jako je sinus, obdélník, trojúhelník a šum; dále obsahují funkcionalitu AFG. Základní charakteristiky jsou uvedeny v tabulce 2.1. Jak zařízení vypadá, je vidět na obrázku 2.1. Cena se pohybuje kolem 130 000 korun, což odpovídá vysoké přesnosti generátoru.

Jako druhý příklad jsem vybral levnější generátor Voltcraft, který je zajímavý tím, že je ovládán pomocí programu v počítači. Stojí zhruba 7 000 korun. Jeho výhodou je možnost AWG za velmi příznivé ceny, nevýhodou je

Tabulka 2.1: Generátory Tektronix AFG3101C a Voltcraft DDS-3025 [7], [8]

	Tektronix	Tektronix	Voltcraft	Voltcraft
Vlna	Min. fce	Max. fce	Min. fce	Max. fce
Sinus	1 μHz	100 MHz	1 Hz	50 MHz
Obdélník	1 μHz	50 MHz	1 Hz	5 MHz
Trojúhelník	1 μHz	1 MHz	1 Hz	10 MHz
AWG	1 mHz	50 MHz	1 Hz	25 MHz



Obrázek 2.1: Generátor Tektronix AFG3101C [7]

celkem malý rozsah frekvencí. Pro srovnání s předchozím viz opět tabulku 2.1 a obrázek 2.2.

2.2 Jednodeskové generátory

Malé funkční generátory se dají rozdělit do dvou skupin. Tou první jsou integrované obvody, pro jejichž řízení stačí diskrétní součástky. Ty druhé využívají čipy pro DDS, které je potřeba řídit pomocí mikrokontroléru.

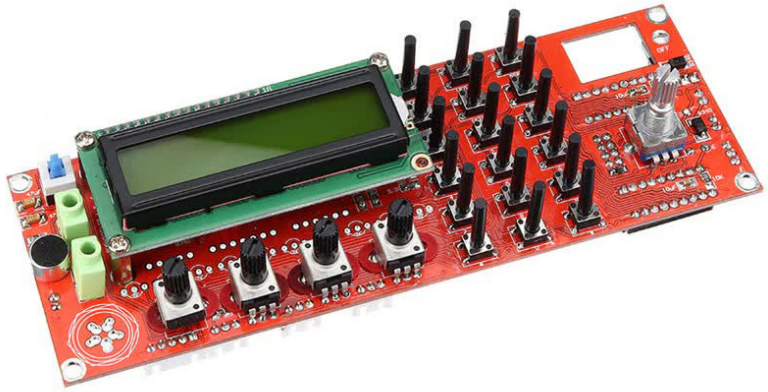
První příklad by byla stavebice od GME [9], založená na obvodu ICL8038. Má rozsah frekvencí 50 Hz – 50 kHz a napájí se 12 V. Výhodou je, že k řízení není potřeba mikrokontrolér, a nízká cena (kolem 160 korun [9]). Nevýhodou je malý rozsah frekvencí. Hotový produkt ale nemá displej k zobrazení informací a navíc jde o stavebnici vyžadující pájení, takže ho nelze srovnávat s výše zmíněnými generátory. Dále se jím tedy nebudu zabývat.

Do skupiny DDS čipů patří například generátory nabízené firmou Analog Devices, konkrétně jejich produktová řada AD98* (například AD9833, AD9834, AD9850 nebo AD9851 [10]). Dají se zakoupit již napájené na vývo-

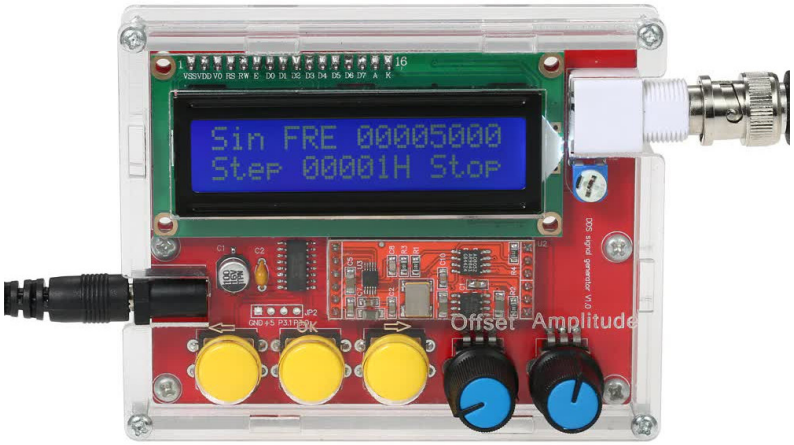
Obrázek 2.2: Generátor Voltcraft DDS-3025 [8]

jovou destičku pro snadnější vývoj, a existují s nimi i kompletní řešení. Těmi se budu dále zabývat.

Příkladem těchto zařízení je generátor založený na obvodu AD9850, viz obrázek 2.3. Lze ho sehnat z [11]. Obvod je řízen dvěma MCU řady PIC16F. Zařízení je napájeno 12 V. Výrobce uvádí rozsah frekvencí 0 – 55 MHz pro obdélníkovou vlnu, žádné další parametry neuvádí. Detailnější informace se dají najít v datasheetu AD9850 [12]. Tomuto obvodu se věnuji podrobněji v 3.5, zde jen parametry vln. Je možné generovat obdélníkový a sinusový průběh, první o maximální frekvenci 1 MHz, druhý 40 MHz. Rozlišení je 0,0291 Hz. Cena zařízení se pohybuje kolem 850 Kč.



Obrázek 2.3: Generátor Analog Devices AD9850 [11]



Obrázek 2.4: Generátor Analog Devices AD9833 [13]

Poslední příklad je od stejné firmy, a je to AD9833, viz 2.4. Je nabízen například zde: [13]. Dostupné tvary generovaných průběhů jsou uváděny trojúhelníkový, obdélníkový a sinusový. Maximální frekvenci bohužel výrobce neuvádí. Parametry lze opět dohledat v datasheetu použitého čipu – tam je uveden rozsah 0 až 12,5 MHz a rozlišení 0,1 Hz s 25 MHz hodinami. Od předchozího se liší především možností generovat i trojúhelníkový průběh a trochu nižší cenou, která je cca 500 Kč.

Projektů s jednodeskovými generátory se dá na internetu nalézt velké množství. Dá se to vysvětlit slušnými vlastnostmi těchto obvodů při zachování příznivé ceny. Nedají se ale koupit jako hotové řešení, takže je uvádím jen pro přehled. Pro podrobnější informace o integrovaných obvodech, na kterých jsou založené, viz sekci 3.5. Již tedy jen jmenovitě, například [14], [15], [16], [17]. První dva projekty jsou založeny na generátoru AD9834, třetí AD9833 a poslední na AD9850. První a třetí využívají desku Arduino, třetí a čtvrtý samotný mikrokontrolér Atmel.

2.3 Srovnání

Mezi vlastnosti, které nás mezi generátory zajímají, patří tvar generovaného signálu, jeho frekvence, a cena daného generátoru. Z hlediska těchto parametrů porovnávám výše popsané generátory v tabulce 2.2. Pro představu uvádím i parametry generátoru ICL8038, i když jsem ho dále nerozepisoval pro přílišnou jednoduchost. U generátorů založených na obvodech od firmy Analog Devices se mi nepodařilo dohledat přesného výrobce, proto uvádím

Tabulka 2.2: Srovnání generátorů

	AFG3101C	DDS-3025	ICL8038	AD9850	AD9833
Výrobce	Tektronix	Voltcraft	Intersil	Hode Store	Warms Store
Sinus – min.	1 μHz	1 Hz	50 Hz	29,1 mHz	100 mHz
Sinus – max.	100 MHz	50 Mhz	5 kHz	40 Mhz	12,5 MHz
Obdélník – min.	1 μHz	1 Hz	50 Hz	29,1 mHz	100 mHz
Obdélník – max.	50 MHz	5 Mhz	5 kHz	40 Mhz	12,5 MHz
Trojúhelník – min.	1 μHz	1 Hz	50 Hz	–	100 mHz
Trojúhelník – max.	1 MHz	10 Mhz	5 kHz	–	12,5 MHz
AWG – min.	1 mHz	1 Hz	–	–	–
AWG – max.	50 MHz	25 Mhz	–	–	–
Amplituda	20 mV až 10 V	3,5 V	až 4 V	neuvádí se	neuvádí se
Cena (orientačně)	130 000 Kč	7 000 Kč	160 Kč	850 Kč	500 Kč

pouze obchod, u kterého jsem produkt našel na Aliexpressu. Vidíme, že pro naše účely (kdy není potřeba AWG a frekvence nám stačí nejvýše jednotky MHz) by nám stačil generátor podobný tomu od Analog Devices (AD9833).

Kapitola 3

Analýza a návrh

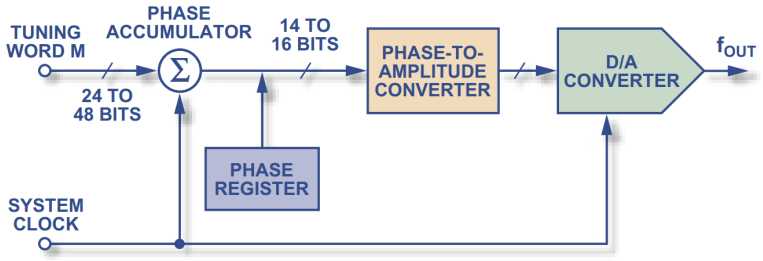
Tato kapitola se zabývá popisem generování signálu pomocí DDS, přehledem možných komunikačních rozhraní generátoru. Dále v ní popisuji možnosti řízení generátoru, především platformu Arduino. Poté uvádím možnosti zobrazení ovládání a některé generátory, které bych mohl použít. Na jejím závěru popisuji návrh řešení ve formě blokového schématu, výběr součástek a cenový odhad.

3.1 Generátory funkcí

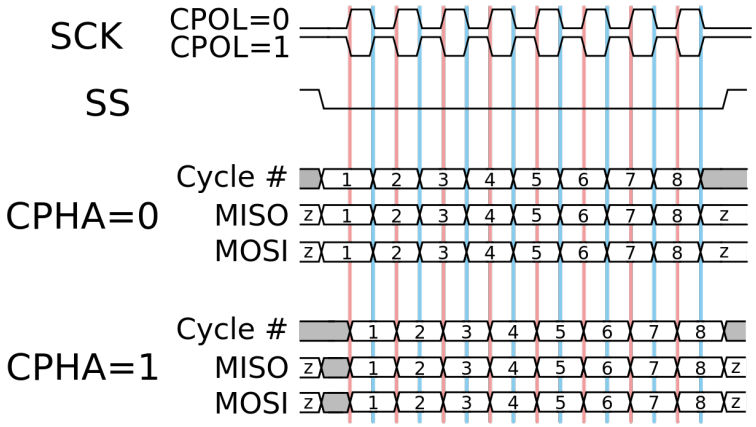
Funkční generátor je zařízení, generující průběh napětí s určitým periodickým průběhem. Umožňuje měnit některé parametry výsledného signálu, a to především frekvenci a periodu. Může být vybaven grafickým displejem.

3.1.1 DDS generátory

DDS, neboli přímá digitální syntéza, je základní princip funkce digitálních generátorů signálu. DDS generátor obsahuje akumulátor fáze, pomocí kterého přistupuje do tabulky uložené v paměti ROM, ve které jsou uloženy funkční



Obrázek 3.1: Ilustrace DDS syntézy [18]



Obrázek 3.2: Časování SPI [19]

hodnoty požadované funkce. Tato hodnota je pak přivedena do DAC převodníku, na jehož výstupu je již požadovaná analogová hodnota. Tento princip je vidět na obrázku 3.1.

3.1.2 Dostupné generátory

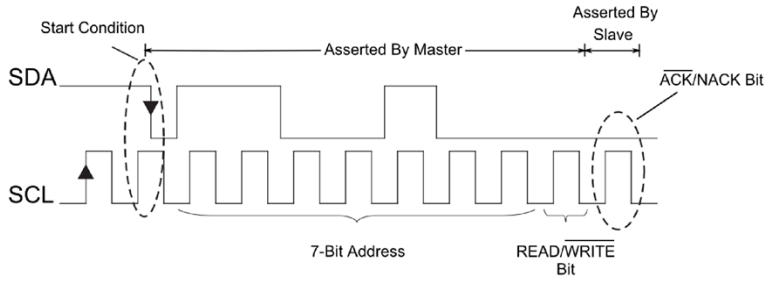
Existují různé dostupné generátory, viz výše. Pro implementaci jsou nejjednodušší takové, které mají kolem sebe už vývojovou desku, která zajišťuje jednoduchou komunikaci a napájení čipu.

3.2 Komunikace s generátorem

S generátorem se komunikuje pomocí sériového nebo paralelního komunikačního rozhraní. Ze sériových standardizovaných to nejčastěji bývá I^2C nebo SPI.

3.2.1 SPI

SPI je sériové komunikační rozhraní, vymyšlené společností Motorola v 80. letech 20. století [20] (nyní NXP). Skládá se minimálně ze čtyř vodičů, dvou datových (MOSI, MISO), jednoho hodinového (SCLK) a jednoho synchronizačního (SS). Každý slave musí mít zvláštní SS vodič, pomocí kterého ho master adresuje. Komunikace probíhá tak, že nejdříve master jednotka logickou nulou na vodiči SS aktivuje komunikaci se slave jednotkou. Potom se při každém hodinovém pulzu přesouvá jeden bit dat. Existují čtyři různé módy SPI komunikace podle polarity hodin (CPOL) a časování dat vzhledem k hodinám (CPHA). Hodiny mají klidovou úroveň buď v 1 nebo v 0; data jsou



Obrázek 3.3: Časování I^{2}C [22]

platná buď na hraně hodin nebo uprostřed. 4 možnosti jsou dány všemi kombinacemi těchto parametrů. Na obrázku 3.2 je pěkně ilustrována komunikace pro všechny 4 módy.

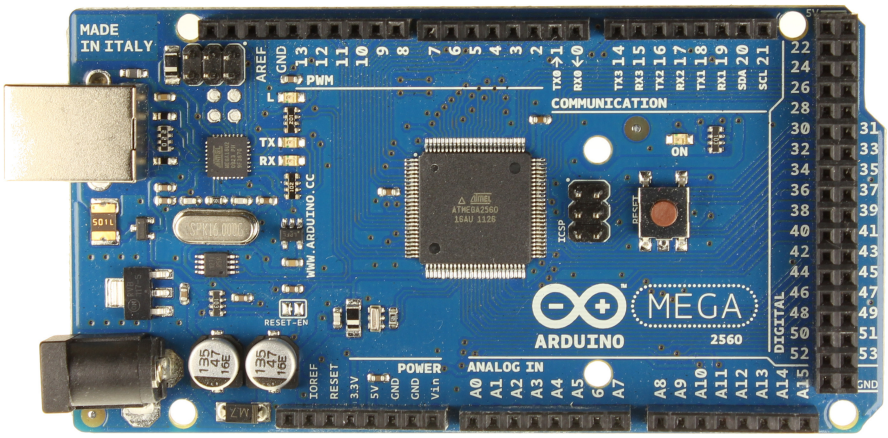
3.2.2 I^{2}C

I^{2}C je také sériové rozhraní, které vymyslel Philips v roce 1982 [21] (nyní taktéž NXP). K jeho implementaci stačí dva vodiče, obousměrný datový SDA a hodinový SCL. Toto je velká výhoda proti jiným sériovým rozhraním, které i pro spojení dvou zařízení potřebují více vodičů. Nevýhodou je složitější adresování, které spočívá v arbitraci pomocí prvních 7 bitů rámce (po start bitu) – nižší adresa znamená vyšší prioritu. Oba vodiče, SDA i SCL, by měly být připojeny pull-up rezistory k napájení ([21], str. 8). Z toho vyplývá, že klidová úroveň je logická 1. Příklad komunikace je na obrázku 3.3.

3.3 Platforma k řízení generátoru

Pokud bychom použili generátor s deskou, který je potřeba nějak řídit, nabízelo by se použití nějakého univerzálního mikrokontroléru, který by umožnil jednoduše ovládat desku s generátorem. Pro takovéto projekty jsou v současnosti používány například tyto skupiny mikrokontrolérů: AVR od firmy Atmel a PIC od společnosti Microchip. Vzhledem k tomu, že v roce 2016 Microchip odkoupil Atmel, je programové vybavení pro obě větve do značné míry sjednoceno.

Obě rodiny nabízejí 8bitové mikrořadiče, které pro naše účely postačují. Jako ilustraci PIC jsem vybral PIC18F47Q10, ke kterému existuje vývojová deska Curiosity Nano. Tento kit je poměrně novým produktem firmy Microchip a můžeme ho vidět na obrázku 3.5. Součástí této desky je debugger, takže pro programování i debug stačí připojení k počítači. Použité vývojové prostředí je Mplab X, který je založen na NetBeans. Z toho, co nás zajímá, tento mikrokontrolér obsahuje 128 KB flash paměti pro program, 3728 B SRAM a 1024 B datové EEPROM. Má 35 vstupně-výstupních pinů. Mezi komunikační periferie patří 2krát UART, 2krát SPI a 2krát I^{2}C.

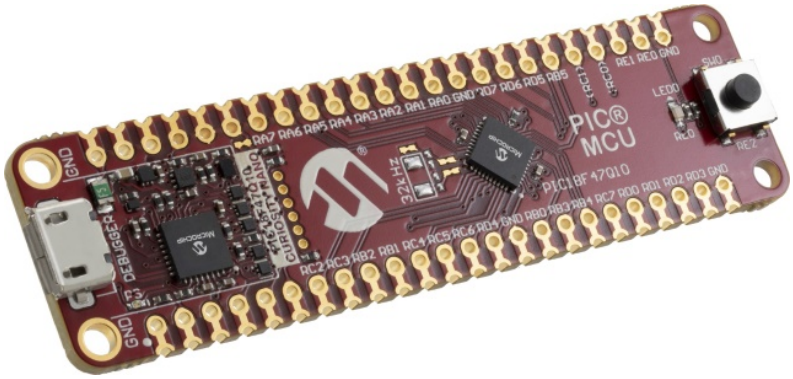


Obrázek 3.4: Arduino Mega 2560 [23]

Příkladem ze skupiny AVR je ATmega328P. Obsahuje 32 KB programové flash paměti, 1 KB EEPROM pro data, 2 KB SRAM a má 23 I/O pinů. Podporuje taktéž SPI (to dvakrát) a I^2C, má UART. Výchozí prostředí pro programování je Atmel Studio, v současné době lze použít i Mplab. Na tomto mikrokontroléru je postavena deska Arduino UNO.

To jsou ale dosti slabé parametry, které by pro naši aplikaci nestačily. Nebudu se proto tímto MCU dále zabývat. Jiným příkladem AVR je ATmega2560. Má 256 KB programové flash paměti, 4 KB EEPROM pro data, 8 KB SRAM a 54 I/O pinů. Důležité je, že má 8krát UART, 5krát SPI a jednou I^2C, takže umožňuje ovládat velké množství zařízení. Existuje pro něj deska Arduino Mega, kterou můžeme vidět na obrázku 3.4.

Parametry výše uvedených mikrořadičů jsou v tabulce 3.1. Do tabulky jsem ještě pro názornost přidal mikrokontrolér STM8S207K8 od firmy STMicroelectronics, který má více vstupně-výstupních pinů. Nakonec jsem vybral des-



Obrázek 3.5: Deska PIC18F47Q10 Curiosity Nano [24]

Tabulka 3.1: Srovnání MCU PIC18F47Q10, ATmega2560 a STM8S207K8 [25], [26], [27]

	PIC18F47Q10	ATmega2560	STM8S207K8
Výrobce	Microchip	Microchip	STMicroelectronics
Počet I/O	35	54	68
Komunikace	2 x UART	8 x UART	1 x UART
	2 x SPI	5 x SPI	1 x SPI
	2 x I^2C	1 x I^2C	1 x I^2C
Paměť flash	128 KB	256 KB	128 KB
SRAM	3728 B	8192 B	6144 B
EEPROM	1 KB	4 KB	2 KB
Vývojová deska	Curiosity Nano	Arduino	Nucleo

ku Arduino, a to kvůli nejlepším kouminkačním možnostem, dostupnosti různých knihoven, zjednodušení vývoje a určitým zkušenostem s touto platformou.

3.3.1 Arduino

Arduino je otevřená platforma vzniklá v Itálii v roce 2005. Jsou to vývojové desky založené na mikrokontrolérech Atmel ATmega. Různé typy obsahují různou velikost paměti a různé počty vstupně výstupních pinů. V tabulce 3.2 je srovnání základních vlastností desek Arduino.

Nejmenší deskou je Arduino Nano. Obsahuje napájené piny pro nasazení do nepájivého pole. Dalším typem je Uno, to je již větší, ale má stejný počet digitálních pinů. Podobné rozložení jako Uno má Arduino Mega, ale obsahuje již 54 digitálních I/O, čímž se hodí i na větší projekty. Arduino Leonardo má stejný počet pinů jako Uno, ale zásadně se liší v tom, že jeho mikrokontrolér ATMega 32u4 má už v sobě USB kontrolér.

Tabulka 3.2: Druhy desek Arduino a jejich základní parametry, viz [28]

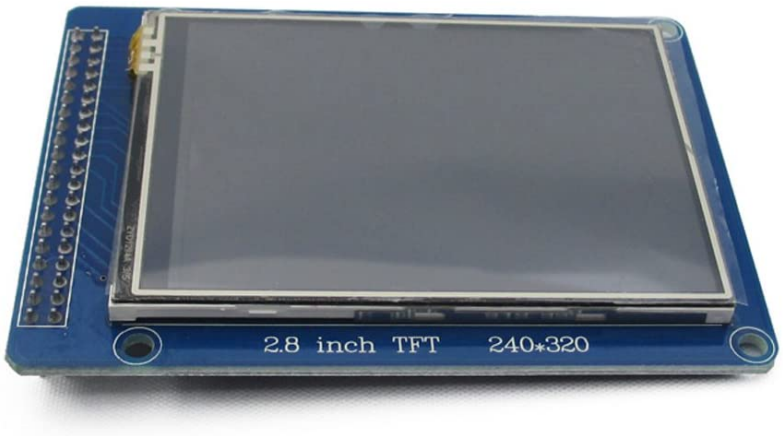
Typ	Procesor	Paměť flash	Digit. piny	Analog. piny
Nano	ATmega 328	32 kB	14	8
Uno	ATmega 328p	32 kB	14	6
Mega 2560	ATMega 2560	256 kB	54	16
Leonardo	ATMega 32u4	32 kB	14	6

Obrázek 3.6: OLED displej [29]

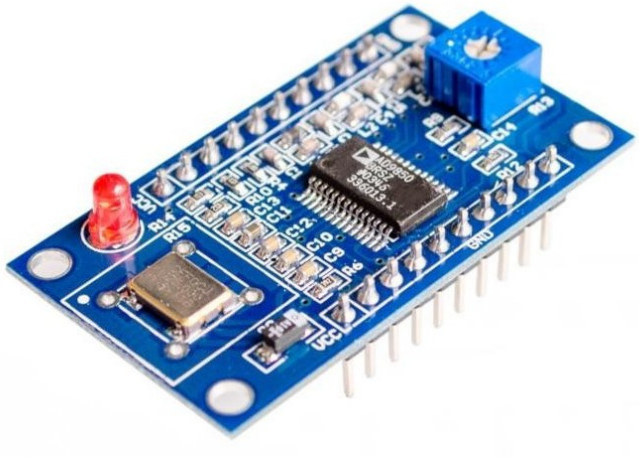
3.4 Zobrazování

K Arduinu existuje mnoho typů displejů. Dvě základní technologe jsou OLED a LCD. OLED displeje jsou úspornější a mají lepší zobrazení černé barvy. Pro Arduino se vyrábějí mnohem menší, než LCD – například 0,96” nebo 1,3”. Jak asi takový displej vypadá, můžeme vidět na obrázku 3.6. Neprodávají se v dotykové variantě.

LCD displeje jsou buď znakové, nebo TFT. Znakové displeje umí zobrazovat pouze alfanumerické znaky, nejčastěji jich je 32. TFT LCD displeje jsou nejvariabilnější. Vyrábějí se o úhlopříčce 2,4, 2,8 nebo 3,2”. Rozlišení může být například 128 x 160, 480 x 800 nebo 240 x 320 pixelů.



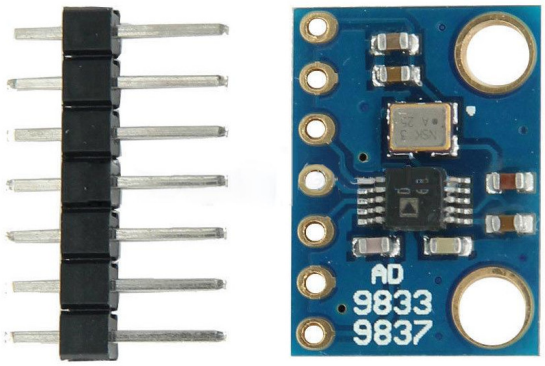
Obrázek 3.7: Použitý TFT LCD displej [30]



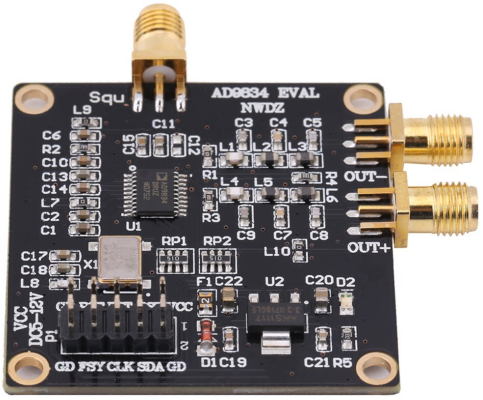
Obrázek 3.8: Generátor Analog Devices AD9850 [31]

Displej může být ovládán přes SPI, I^2C nebo paralelní rozhraní. Nejčastěji se používá paralelní rozhraní, protože je to nejrychlejší a při práci s displejem (zobrazování) je rychlost důležitá. Některé displeje jsou napájeny a komunikují na 3,3 V, některé na 5 V.

Vzhledem k požadavku ovládání dotykem jsem vybral tento displej: 2,8" TFT dotykový s rozlišením 240x320. Viz obrázek 3.7. Má řadič ILI9325 a čínskou kopii dotykového kontroléru XPT2046. Displej je napájen a komunikuje na 3,3 V.



Obrázek 3.9: Generátor Analog Devices AD9833 [32]



Obrázek 3.10: Deska s generátorem AD9834 [35]

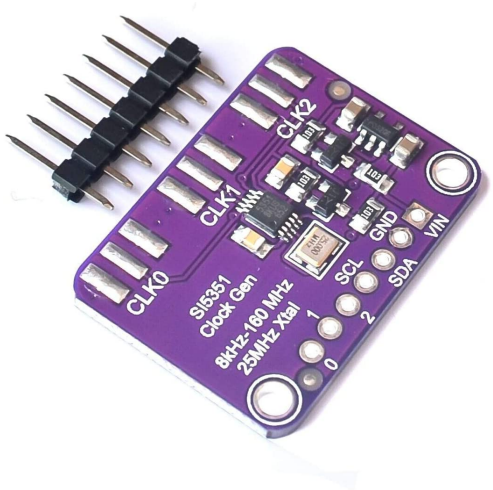
3.5 Generátor

Mezi dostupné DDS generátory patří například čipy od firmy Analog Devices, a to produktová řada AD98*. Hotovým produktům s obvody AD9833 a AD9850 jsem se věnoval již v rešerši, teď zmíním vlastnosti desek, na kterých jsou založeny.

Deska s obvodem AD9850 je určená pro řízení platformou Arduino, viz foto 3.8. Je kompatibilní s 3 V i 5 V napájením a logikou. Dostupné vlny jsou obdélníková a sinusová, první o maximální frekvenci 1 MHz, druhá 40 MHz. Generátor samotný by mohl generovat signál o frekvenci až 62,5 MHz, deska to neumožňuje. Zajímavostí je komunikace s generátorem, která je možná buď 8bitová paralelní, nebo sériová na jednom datovém pinu [12]. Tento generátor patří k těm lepším, které se dají v této kategorii sehnat, čemuž odpovídá vyšší cena (cca 700 korun [31]).

Další obvod je od stejné firmy, a je to AD9833, viz 3.9. Cenově se pohybuje níže než AD9850, stojí asi 250 korun [32]. Oproti AD9850 je lepší zejména tím, že umí generovat i trojúhelníkový výstup a ovládá se přes 3-wire SPI, což je standardizované komunikační rozhraní (viz dále). Co se týče parametrů, taktéž může být napájen třemi nebo pěti volty, výrobce uvádí napájení 2,3–5,5 V. Frekvence signálu je od 0 do 12,5 MHz; díky 28bitovému D/A převodníku je rozlišení frekvence 0,1 Hz s 25 MHz hodinami [33]. Cena se u nás pohybuje kolem 280 Kč [34]. Oba generátory lze koupit v Číně o hodně levněji (AD9850 250 Kč, AD9833 řádově desetikoruny), já v tomto případě uvádím ceny v České republice.

Podobný čip jako AD9833 je AD9834, taktéž od Analog Devices. Umožňuje generovat výstupní signál o frekvenci od jednotek Hz až do 37,5 MHz a pod-



Obrázek 3.11: Deska s generátorem SI5351 [36]

porované funkce jsou sinus, trojúhelník a obdélník. S tímto generátorem se také komunikuje pomocí 3-wire SPI. Jedná se o sběrnici podobnou SPI (viz 3.2.1), ale pouze na třech vodičích. Jsou dvě možnosti použití (viz například [37]): buď jsou vodiče MISO a MOSI na straně mastera spojeny rezistorem o odporu 10 kΩ a tento vodič je použit na obousměrnou komunikaci, nebo slave žádná data zpět neposílá a vodič MISO na straně mastera vůbec není zapojen. V tomto případě se jedná o druhou variantu, tedy že master nemá vodič MISO vůbec zapojen, protože slave nic neodpovídá.

Dalším výrobcem, který vyrábí podobné obvody, je Silicon Labs. Od této firmy jsem konkrétně vybral generátor SI5351. Nejnižší frekvence generovaného signálu SI5351 je 2,5 kHz a nejvyšší až 200 MHz, ale jedná se jen o obdélníkový signál – tento čip je vlastně jen generátor hodin. S SI5351 se dá komunikovat přes I^2C (viz 3.2.2).

Deska s AD9834 je na obrázku 3.10 a SI5351 na 3.11. Základní parametry všech čtyřech generátorů jsou shrnuty v tabulce 3.3.

3.6 Návrh řešení – blokové schéma

Z hlediska uživatelského ovládání přicházejí v úvahu v zásadě dvě možnosti – buďto ovládání dotykovým displejem, nebo tlačítky. V případě tlačítek by stačil jednodušší displej, který by tedy nemusel být dotykový; v opačném případě by byl potřeba kvalitní displej pro zobrazení i s dotykovou vrstvou. Podle zadání jsem vybral ovládání displejem. Zdá se to být i jako lepší varianta, vzhledem k zjednodušení obsluhy a ušetření kabeláže.

Ve schématu 3.12 je tedy vidět přehled navrhovaného řešení. Celý generátor bude řízen deskou Arduino, která bude ovládat generátory a grafický

Tabulka 3.3: Srovnání generátorů

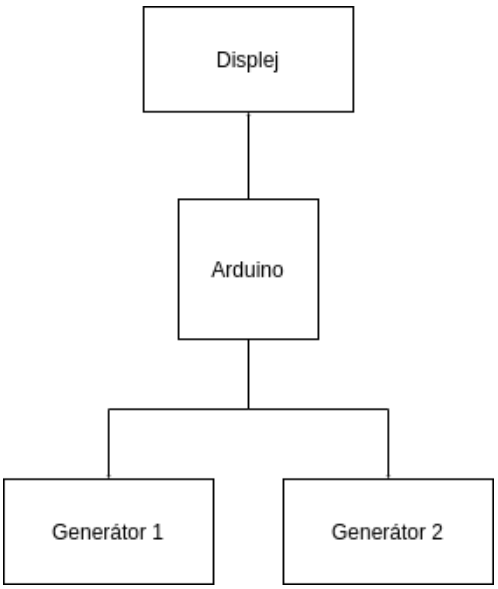
	AD9850	AD9833	AD9834	SI5351
Výrobce	Analog	Analog	Analog	Silicon Labs
Sinus – min.	29,1 mHz	100 mHz	0	–
Sinus – max.	40 Mhz	12,5 MHz	37,5 MHz	–
Obdélník – min.	29,1 mHz	100 mHz	0	8 kHz
Obdélník – max.	40 Mhz	12,5 MHz	37,5 MHz	160 MHz
Trojúhelník – min.	–	100 mHz	0	–
Trojúhelník – max.	–	12,5 MHz	37,5 MHz	–
Cena (orientačně)	700 Kč	250 Kč	285 Kč	80 Kč

displej. GUI bude zobrazeno na displeji a bude ovládáno dotykem od uživatele.

3.7 Výběr součástek

3.7.1 Řízení

Vybral jsem desku Arduino Mega 2560, viz výše. Kromě toho, že má nejvíce paměti, obsahuje taky hodně komunikačních pinů a rozhraní. To se nám hodí, vzhledem k tomu, že chceme ovládat dva generátory a k tomu ještě komunikovat s dotykovým displejem. Koupil jsem ho v Číně, viz 3.8.



Obrázek 3.12: Schéma řešení

3.7.2 Displej

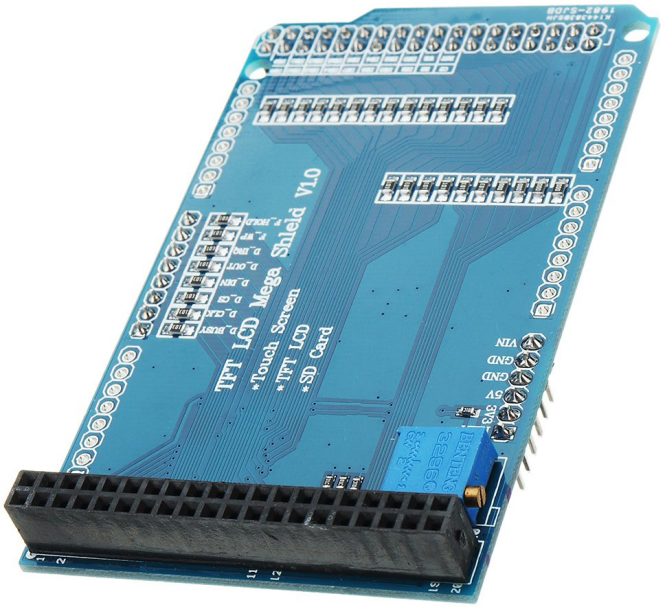
Jak jsem psal výše, zvolený displej komunikuje na 3,3 V. To znamená, že ho nepůjde zapojit do Arduina přímo, protože Mega komunikuje na 5 V. Je tedy třeba mít převodník, který zajistí nejenom správné napěťové úrovně, ale i kompatibilitu s rozložením pinů Arduino Mega. Ten je na obrázku 3.13.

3.7.3 Generátor

Z generátorů uvedených v 3.5 jsem vybral SI5351 [39] od Silicon Labs a AD9834 [40] od Analog Devices. AD9834 umožňuje generovat výstupní signál o frekvenci od jednotek Hz až do 37,5 MHz a podporované funkce jsou sinus, trojúhelník a obdélník. Nejnižší frekvence signálu SI5351 je 2,5 kHz a nejvyšší až 200 MHz, ale generuje jen obdélníkový signál – je to vlastně jen generátor hodin.

3.8 Cena

Samotná deska Arduino se dá buď koupit v originální licencované verzi nebo jako čínská kopie. Kopie kromě méně kvalitního plastu a možného horšího pro-



Obrázek 3.13: Převodník k displeji [38]

Tabulka 3.4: Shrnutí rozdílů generátorů AD9834 a SI5351 [40], [39]

	AD9834	SI5351
Možné vstupní hodiny	až 75 MHz	25 nebo 27 MHz
Použitý krystal	75 MHz	25 MHz
Dostupné vlny	Obdélník, trojúhelník, sinus	Obdélník
Maximální frekvence	37,5 MHz	150 MHz
Minimální frekvence	Neudává se	8 kHz
Amplituda – obdélník	0,6 V	3,3 V
Amplituda – trojúhelník	3,3 V	–
Amplituda – sinus	3,3 V	–
Napájení	2,3 – 5,5 V	2,5 nebo 3,3 V
Komunikace	3-wire SPI	I^2C

Tabulka 3.5: Cena jednotlivých komponent

Položka	Cena	Kde koupeno
Arduino Mega 2560	200 Kč	`Aliexpress.com` [42]
Dotykový displej 2.8”	330 Kč	`Ebay.com` [43]
AD9834	250 Kč	`Aliexpress.com` [44]
Převodník pro displej	150 Kč	`Aliexpress.com` [45]
SI5351	80 Kč	`Aliexpress.com` [46]
Propojovací dráty Dupont	5 Kč	`Aliexpress.com` [47]
Dutinkové lišty	50 Kč	`Arduino-shop.cz`[48][49][50]
Spojovací materiál, plexisklo	200 Kč	Obchod s dom. potřebami
Celkem	1235 Kč	

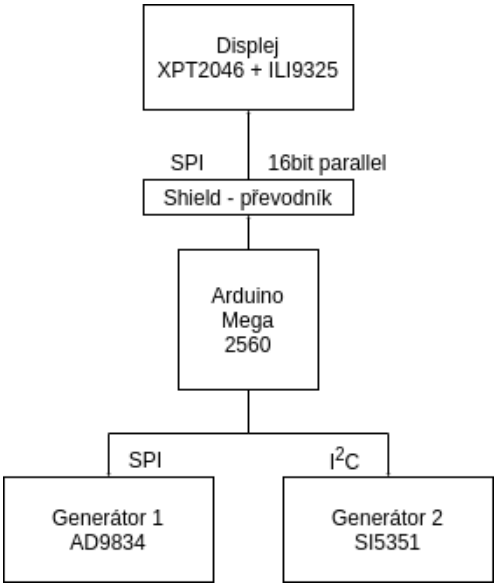
vedení některých pájených spojů nepřináší žádná negativa, takže díky o dost výhodnější ceně se ho vyplatí zakoupit tímto způsobem.

Pokud bych tedy kupoval originální Arduino, bylo by nejdražší položkou celého zařízení – stojí kolem 1000 korun [41]. Já koupil neoriginální z Číny, kde stojí zhruba 200 korun. Taktéž z Číny, ale na Aliexpressu, jsem koupil displej za 330 korun. To byly dvě nejdražší položky, třetí je deska s generátorem AD9834 za 250 korun z Aliexpressu. Ostatní položky jsou vyjmenované v tabulce 3.5. Propojovací dráty stály 70 korun v balení se 120 ks, z toho jich bylo potřeba použít jen několik. Celková cena je tedy okolo 1235 Kč.

Kapitola 4

Realizace – hardware

Dále se věnuji zapojení součástek k Arduinu a fyzické realizaci celého zařízení. Upřesněná verze blokového schématu, upravená podle skutečného zapojení, je na obrázku 4.1. Srdcem zařízení je Arduino Mega 2560. Generátory jsou připojeny pomocí SPI a I^2C, displej je přes převodník připojen pomocí SPI a 16bitového paralelního rozhraní.



Obrázek 4.1: Schéma řešení

4.1 Součástky

4.1.1 Arduino

Jak jsem již zmiňoval výše, Arduino Mega komunikuje na pěti voltech a použitý displej má třívoltové komunikační rozhraní. Bylo tedy nutné použít shield (tak se říká k Arduinu připojitelným periferiím), který slouží jako převodník úrovní. Zapojení pinů displeje (a převodníku) je vidět v tabulce 4.1.

4.1.2 Displej

Pinout vybraného displeje displeje je v tabulce 4.1. Displej podporuje 16bitovou komunikaci. Při inicializaci v knihovně `UTFT` (viz dále, 5.1.1) se používá makro `ILI9325D_16`. Na shieldu převodníku displeje jsou na konektoru vyvedeny i drátky, které není potřeba použít. Konkrétně to jsou ty piny na jeho kratší straně, které nejsou nijak popsány. Díky tomu bylo možné napájet moduly generátorů přímo z Arduina pomocí pinů označených GND a 5 V.

S displejem byly potíže, v jednu chvíli úplně přestal fungovat. Ukázalo se, že na vině je ne dost dobře připájený flex konektor, po jeho zahřátí začal displej opět fungovat.

4.1.3 Generátory

Komunikační rozhraní vybraných generátorů je popsáno výše (3.7.3). Na rozdíl od displeje mohou generátory komunikovat s Arduinem přímo. Jejich pinouty jsou v tabulkách 4.3 a 4.2. Jejich zapojení k Arduinu je na obrázku 4.2 – zapojení shieldu tam není, protože to je zřejmé z jeho fyzických dispozic (jinak ani zapojit nejde).

4.2 Fyzická realizace

Všechny součástky jsem umístil na desku z plexiskla, aby byla celá sestava kompaktnější. Deska AD9834 dorazila už sestavená. Na desku s SI5351 bylo nutné napájet 3 SMA konektory a Arduino kompatibilní header (je vidět na obr. 3.11 vlevo), aby ji bylo možné k Arduinu připojit. Na displeji ani převodníku k němu již nic pájet nebylo potřeba.

Menší problém byl, že displej, když se k Arduinu připojí přes shield (viz 4.1.2), přímo zabírá veškeré volné piny Arduina. Ne všechny ale opravdu využívá, viz 4.1, takže řešení spočívalo v připojení přes stohovatelné dutinkové lišty a vynechání nepoužitých konektorů, díky nimž se celý displej zvednul asi o 1 cm.

Celá výsledná sestava je vidět na obrázku 4.3.

Tabulka 4.1: Připojení displeje, obdobně jako [51]

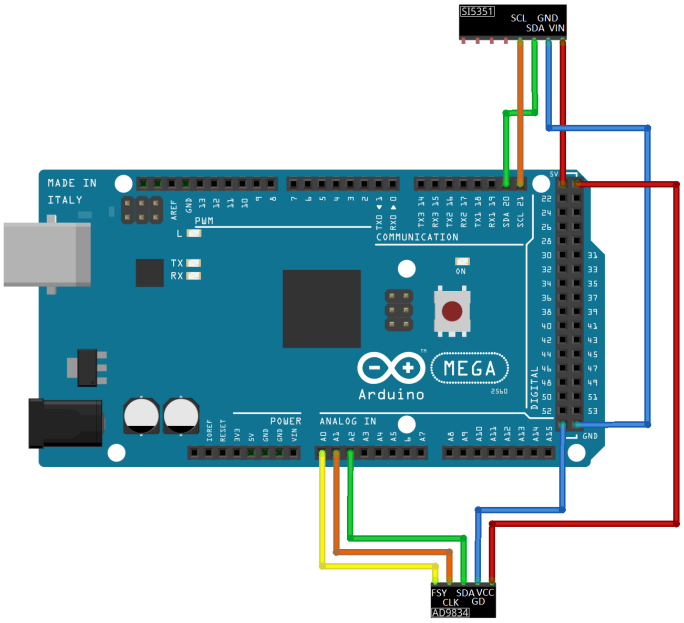
Pin	Arduino	Popis
D_BUSY	D7	Signalizace BUSY (XPT2046)
D_CLK	D6	SPI SCK (XPT2046)
D_CS	D5	SPI SS (XPT2046)
D_DIN	D4	SPI Data In – MOSI (XPT2046)
D_OUT	D3	SPI Data Out – MISO (XPT2046)
D_IRQ	D2	Signalizace přerušení při detekci dotyku (XPT2046)
F_WP	D1	Nepoužito
F_HOLD	D0	Nepoužito
DB8	D22	D8 paralelního rozhraní ILI9325
DB9	D23	D9 paralelního rozhraní ILI9325
DB10	D24	D10 paralelního rozhraní ILI9325
DB11	D25	D11 paralelního rozhraní ILI9325
DB12	D26	D12 paralelního rozhraní ILI9325
DB13	D27	D13 paralelního rozhraní ILI9325
DB14	D28	D14 paralelního rozhraní ILI9325
DB15	D29	D15 paralelního rozhraní ILI9325
DB7	D30	D7 paralelního rozhraní ILI9325
DB6	D31	D6 paralelního rozhraní ILI9325
DB5	D32	D5 paralelního rozhraní ILI9325
DB4	D33	D4 paralelního rozhraní ILI9325
DB3	D34	D3 paralelního rozhraní ILI9325
DB2	D35	D2 paralelního rozhraní ILI9325
DB1	D36	D1 paralelního rozhraní ILI9325
DB0	D37	D0 paralelního rozhraní ILI9325
RS	D38	Volba instrukce / data pro ILI9325
WR	D39	Volba zápisu ILI9325
CS	D40	Chip select ILI9325
RST	D41	Reset ILI9325
VIN	5V	Napájení
GND	Ground	Země
GND	Ground	Země
5V	5 V	Napájení regulátoru
3V3	3.3 V	Napájení
REST	RESET	Reset

Tabulka 4.2: Pinout AD9834

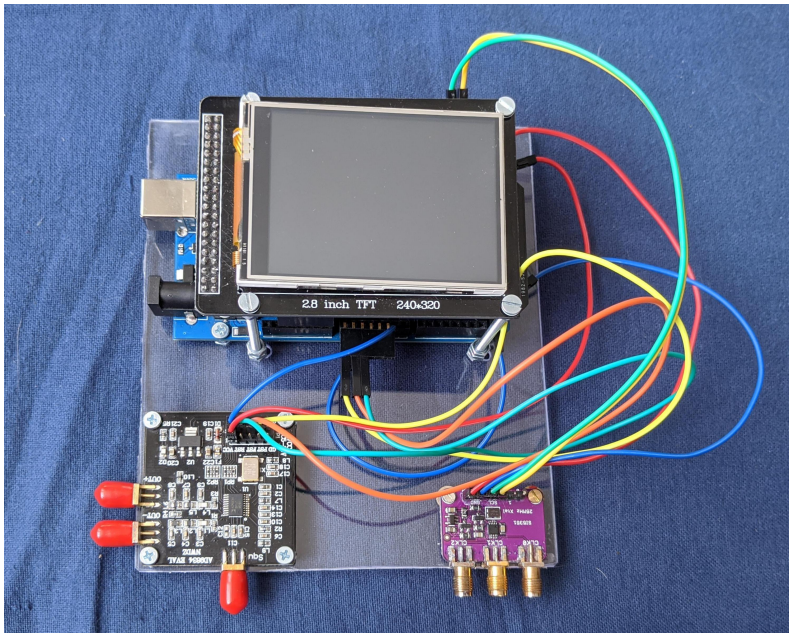
Pin	Arduino	Popis
VCC	5 V	Napájení
GD	GND	Země
SDA	A2	Data
CLK	A1	Hodiny
FSY	A0	Slave Select

Tabulka 4.3: Pinout SI5351

Pin	Arduino	Popis
SCL	SCL (21)	Hodiny
SDA	SDA (20)	Data
GND	GND	Země
VIN	5 V	Napájení



Obrázek 4.2: Ilustrace zapojení generátorů



Obrázek 4.3: Celé zařízení

Kapitola 5

Realizace – software

5.1 Externí knihovny

K oběma použitým generátorům jsou v Arduino IDE dostupné knihovny k doinstalaci. Pro daný displej existují knihovny pro zobrazování a načítání dotyků. Rozhodl jsem se je použít, neboť v nich implementovaná funkčnost dostačuje.

5.1.1 UTFT

Knihovna UTFT [52] slouží k jednoduchému ovládání vykreslování na displej. Níže schematicky uvádím nejdůležitější funkce z této knihovny (1). Komunikace s LCD řadičem ILI9325 probíhá přes 16bitové paralelní rozhraní. Piny RS, WR, CS a RST se se knihovně předávají pomocí konstruktoru objektu `UTFT`, datové piny DB0–DB15 jsou určeny automaticky.

```
UTFT(model, RS, WR, CS, RST);      // konstruktor pro 16bitové
                                   // displeje
setColor(color);                   // výběr barvy kreslení
setBackColor(color);               // výběr barvy pozadí
drawLine(x1, y1, x2, y2);          // nakreslení úsečky
drawRoundRect(x1, y1, x2, y2);     // nakreslení čtverce se
                                   // zaoblenými rohy
setFont(fontname);                 // výběr fontu s daným jménem
print(string, x, y);               // vypsání řetězce na dané
                                   // souřadnice
```

Výpis kódu 1: Nejdůležitější funkce `UTFT`

```
/*
 * Debounce the touch and count actual x and y coordinates from it.
 */
void getTouch(unsigned* x, unsigned* y)
{
  unsigned xRaw, yRaw;
  int cnt = 0;

  while (!myTouch.Pressed())
    delay(1);

  xRaw = myTouch.RawX();
  yRaw = myTouch.RawY();

  while (cnt < 10)
  {
    delay(1);
    if (myTouch.Pressed())
      cnt = 0;
    else if (!myTouch.Pressed())
      cnt++;
  }

  *x = map(xRaw, 130, 3800, 320, 0);
  *y = map(yRaw, 185, 3800, 0, 240);
}
```

Výpis kódu 2: Debounce pomocí `TFT_Touch`

5.1.2 TFT_Touch

Tuto knihovnu [53] používám k příjmu a zpracování dotyků. Je určena pro kontrolér XPT2046, a přestože mnou použitý displej má jeho čínskou kopii bez označení typu, i tak s knihovnou funguje. Ve výpisu kódu 2 je pro ilustraci uveden debounce za pomoci metod této knihovny. Komunikace s dotykovým kontrolérem probíhá přes SPI. Piny DCS, DCLK, DIN a DOUT se knihovně předávají v konstruktoru objektu `TFT_Touch`.

5.1.3 MD_AD9833

Tato knihovna [54] pochází od australské společnosti Majic Designs. Jak název napovídá, primárně je určena k ovládání generátoru AD9833, ale vzhledem k tomu, že ten má totožnou komunikaci a nastavení registrů jako AD9834, lze ji použít i na tento generátor. Použité metody jsou v 3. Knihovna potřebuje

```
begin();                              // inicializace
setFrequency(channel, frequency); // vybrání frekvence
setActiveFrequency(channel);      // zvolení aktivního kanálu
setMode(mode);                        // vybrání módu (tvaru vlny)
```

Výpis kódu 3: Použité funkce z `MD_AD9833`

```
init(crystal, reference, correction); // inicializace
set_freq(frequency, channel);         // vybrání frekvence
```

Výpis kódu 4: Použité funkce z `Si5351`

standardní knihovnu `SPI`, která je součástí distribuce Arduino IDE. Podle toho, s kolika parametry je zavolán konstruktor objektu `MD_AD9833`, je použito buď hardwarové rozhraní SPI (na Arduino Mega na pinech 51–53), nebo libovolné piny.

5.1.4 Etherkit Si5351

Knihovna [55] k ovládání generátoru hodin SI5351. Tato je od firmy Etherkit z Oregonu. Existuje i jiná knihovna, která je od Adafruitu, což je známý výrobce otevřeného hardwaru. Ta se ale neovládá tak pohodlně jako tato a co do funkčnosti je stejná, takže jsem se rozhodl použít tu od Etherkitu. V 4 jsou schematicky vypsány použité funkce. Tato knihovna používá hardwarové I^2C piny na Arduinu a potřebuje ke své činnosti knihovnu `Wire`, která je součástí distribuce Arduino IDE, takže ji není potřeba instalovat.

5.2 Implementace kódu

Kód je tvořen jedním `.ino` souborem `project.ino` a jedním hlavičkovým souborem `project.h`, jak je v projektů v prostředí Arduina běžné. Pro úspěšnou kompilaci je potřeba mít doinstalované knihovny `UTFT`, `TFT_Touch`, `MD_AD9833` a `Si5351`. Nejnovější verze se dá stáhnout z Internetu ([52], [53], [54], [55]), jednodušší je instalace z repozitáře Arduino IDE přímo ve vývojovém prostředí.

5.2.1 Vývojový diagram

Vývojový diagram kódu je na obrázku 5.1. Nejprve jsou ve funkci `setup()` inicializovány knihovny a vše je připraveno. V hlavní smyčce, která je tvořena funkcí `loop()`, se pouze v prvním běhu nakreslí menu na displej. Blok *Zpracování dotyku* označuje jak čekání na dotyk, tak následné ošetření zákmitů. Reprezentuje funkci `getTouch()`. Následuje tedy zpracování dotyku a jeho interpretace ve funkci `parseInput()`. Ta rozhodne, co dotyk znamená vzhledem k GUI a podle toho se zařídí. Pokud se jedná o změnu obrazovky, jsou

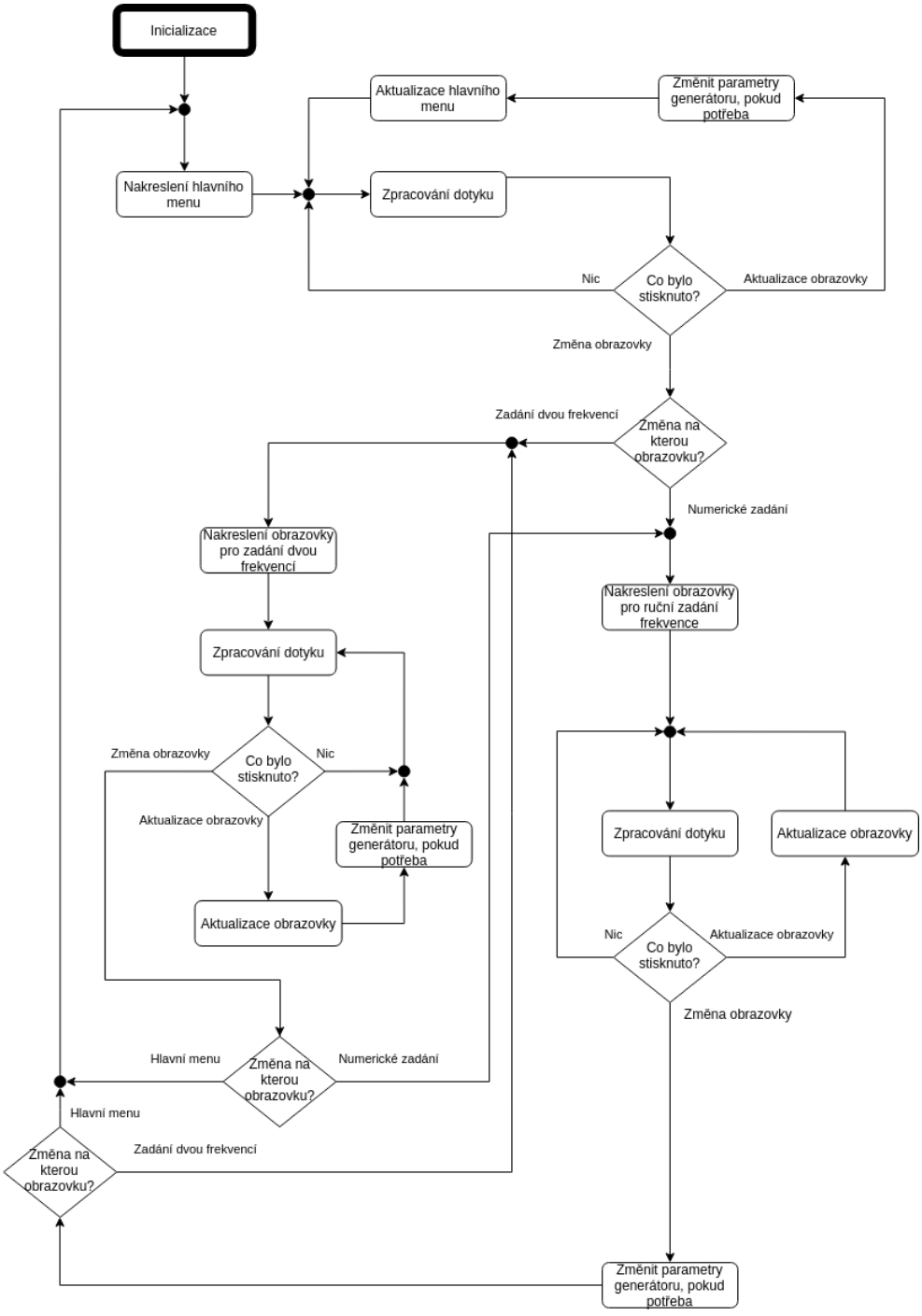
dvě možnosti – buďto se jedná o změnu na obrazovku zadání dvou frekvencí, nebo je požadována ruční změna frekvence (ve smyslu zadání přesného čísla, nikoli jen inkrement nebo dekrement). V prvním případě se volá funkce `drawSiScr()` a `parseInputSi()`, ve druhém pak `drawManualInputScreen()` a následně `parseManualInput()`. Obě obrazovky fungují principiálně podobně jako hlavní menu, s tím rozdílem, že na jejich konci se vrací kontrola do nadřazené obrazovky. Všechny funkce začínající na `parse` fungují podobně – nejdřív čekají na zpracování dotyku, potom rozhodují co se má stát dál. Z manuálního zadání frekvence i zadání dvou frekvencí se po ukončení zpracování vstupu opět kontrola vrací do `loop()`, je nakresleno hlavní menu, a vše probíhá tak, jako na začátku.

5.2.2 Obrazovky

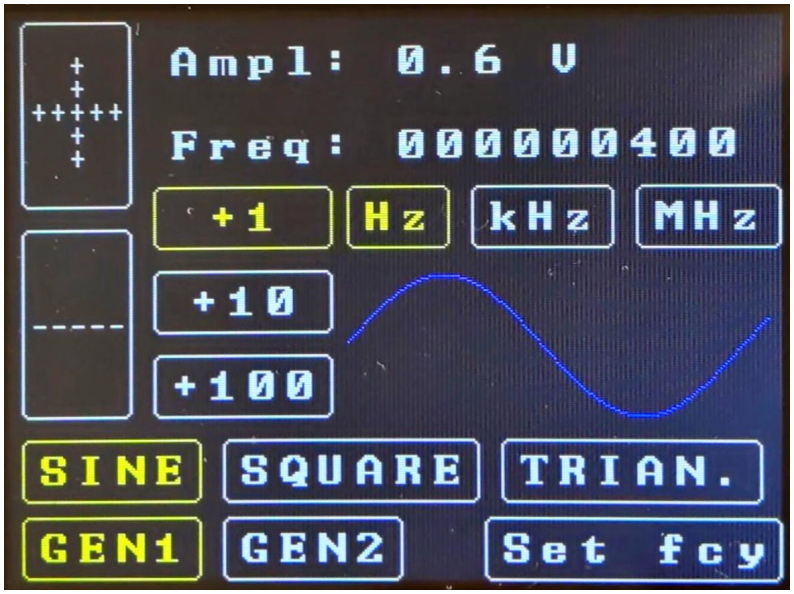
K ovládání jsem implementoval 3 obrazovky. Jedna slouží k postupnému zvyšování / snižování frekvence v diskrétních krocích, přepínání mezi generátory a výběru požadovaného funkčního průběhu. Také zobrazuje amplitudu daného signálu. Umožňuje měnit zobrazení desetinné tečky a přičítanou hodnotu, takže možná změna frekvence činí 1 / 10 nebo 100, a to Hz / kHz nebo MHz.

Druhá slouží k manuálnímu číselnému zadání frekvence, taktéž se dá vybrat, jestli v Hz, kHz nebo MHz. Po stisknutí Esc se frekvence nezmění. Frekvence můžou být jenom celočíselné, desetinná tečka slouží k pohodlnějšímu zadání v kHz nebo MHz; jinak se desetinná část zahodí.

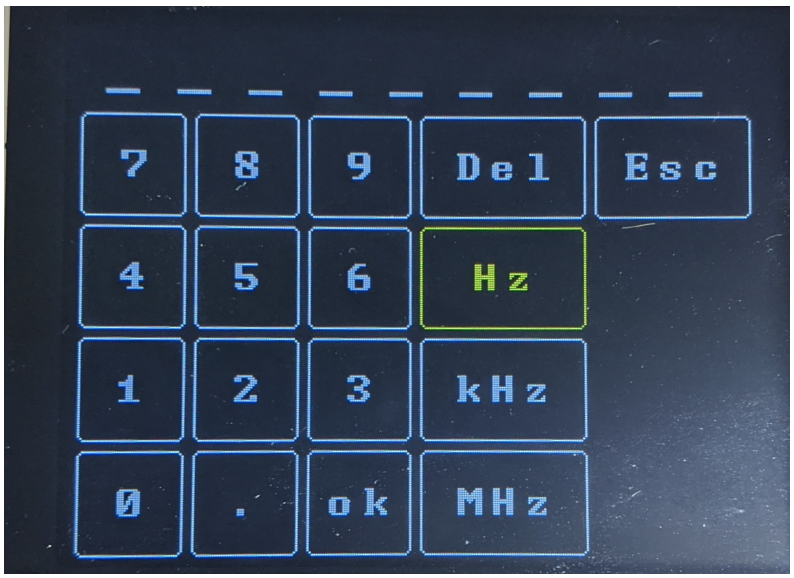
Třetí obrazovka slouží k nastavení dvou různýchv frekvencí pro generátor SI5351. Umožňuje přidávat a ubírat frekvenci v krocích podobně jako obrazovka 1. K přepínání mezi hodnotami přičítané frekvence 1 / 10 / 100 slouží jedno tlačítko, stejně tak pro změnu zobrazených jednotek. Frekvence pro úpravu se vybere dotykem na ní a druhým dotykem se změní její fáze o 180 stupňů (je invertovaná). Pozná se to tak, že nápis „Freq:“ zčervená. Přiřazení výstupů k frekvenci se provádí dotykem na požadovaný výtup. Výstup CLK0 je označen OUT1, CLK1 OUT2 a CLK2 OUT3. Obrazovky můžeme vidět na obrázkách 5.2, 5.3 a 5.4.



Obrázek 5.1: Vývojový diagram ovládacího programu



Obrázek 5.2: Obrazovka 1



Obrázek 5.3: Obrazovka 2

Obrázek 5.4: Obrazovka 3

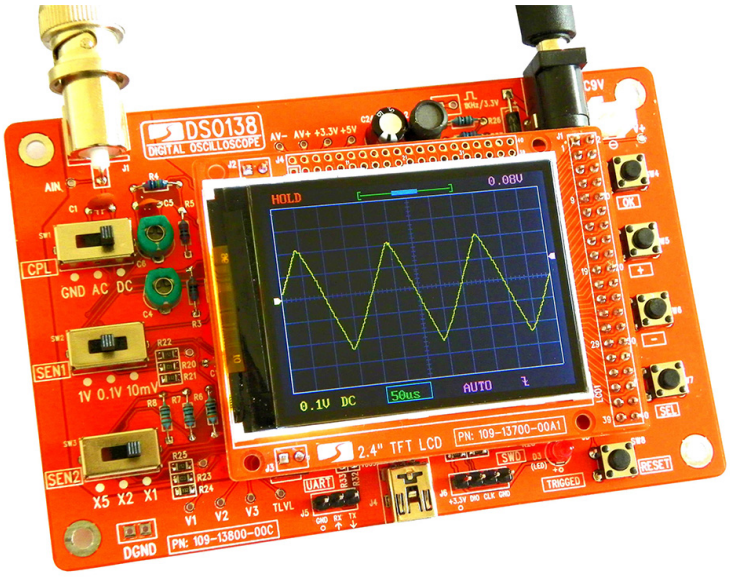
Kapitola 6

Testování

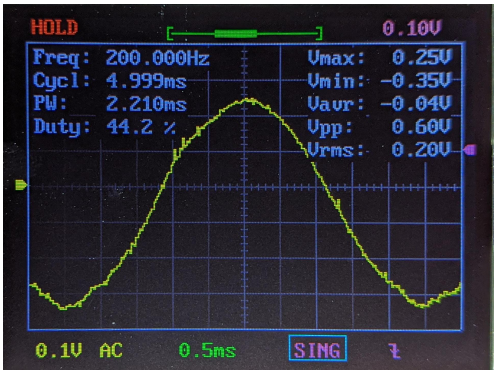
Testování jsem prováděl ručním ověřením funkčnosti generátoru. Zkoušel jsem přesnost a spolehlivost ovládání a přesnost generovaného signálu.

Co se týče ovládání, na displej je potřeba vcelku silně zatlačit, aby zaregistroval dotyk. Protože byl zpočátku upevněn pouze za převodník úrovní, kterým je připojen k Arduinu, bylo ho nutné držet, což znesnadňovalo používání. Po přišroubování celého zařízení k desce z plexiskla tento problém zmizel. Jinak je díky dostatečné šířce ovládacích prvků (několik desítek pixelů) ovládání uživatelsky přívětivé.

Někdy je ale měření dotyků nepřesné. Nejspíš je to způsobeno výrobní va-



Obrázek 6.1: Osciloskop DSO138 [56]



Obrázek 6.2: Sinusový výstup AD9834

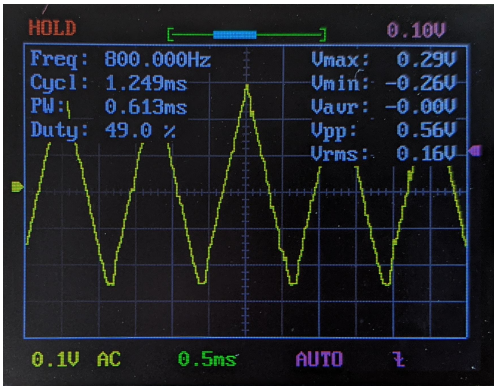
dou daného kusu, protože když jsem zkoušel dotyky testovat s jiným displejem (taktéž s driverem ILI9325, ale s originálním řadičem XPT2046) zapůjčeným od vedoucího práce, tento problém u něj nenastával. Displej také čas od času nefungoval a nakonec přestal fungovat úplně. Vyřešil jsem to koupí nového displeje. Toto byla nejspíš také vada daného kusu.

Z hlediska přesnosti výstupů jsem generátor nejdříve testoval s jednoduchým osciloskopem DSO138 od čínského výrobce JYE Tech. Je to kit a sestavený je vidět na obrázku 6.1 (mně se podařilo ho sehnat již sestavený). Má šířku frekvenčního pásma pouze 200 kHz a vzorkovací frekvenci 1 MSa/S [56], takže jsem pomocí něj testoval jen základní funkčnost. Později jsem zařízení otestoval ve škole na stolním osciloskopu Agilent DSO7104A. Ten má frekvenční pásmo 1 GHz a vzorkovací frekvenci 4 GSa/S, což dostačuje i na otestování nejvyšších frekvencí výstupních vln.

Nejdříve k základnímu měření pomocí DSO138. Měřením jsem zjistil, že většinou je přesnost generovaného signálu větší než přesnost daného osciloskopu. Někdy ale frekvence kolísala o desetiny hertzů. Na obrázkách 6.2, 6.3 vidíme sinusový a trojúhelníkový výstup generátoru AD9834 o frekvencích 200 a 800 Hz. Je vidět, že trojúhelníkový signál má spodní špičky lehce zaoblené – to se s narůstající frekvencí zhoršovalo, ale ne moc.

Na obrázku 6.4 je vlna z generátoru SI5351 o frekvenci 14 kHz, na které vidíme malou strmost náběžné i spádové hrany, tento problém se také s narůstající frekvencí projevuje výrazněji. Od kmitočtu cca 90 kHz je signál spíš trojúhelníkový. Toto je ale zřejmě z velké části způsobeno malou vzorkovací frekvencí použitého osciloskopu, který je v takovýchto podmínkách na hranici svých možností.

Dál bych chtěl zmínit měření velkým osciloskopem DSO7104A. První dva problémy, zploštění špiček i strmost hran, byly nejspíš způsobeny malou vzorkovací frekvencí osciloskopu. Problémy se reálně projevovaly až ve vyšších frekvencích. Signál z SI5351 je ale skutečně ve vyšších frekvencích bez zátěže velmi zkreslen, viz příloha C.



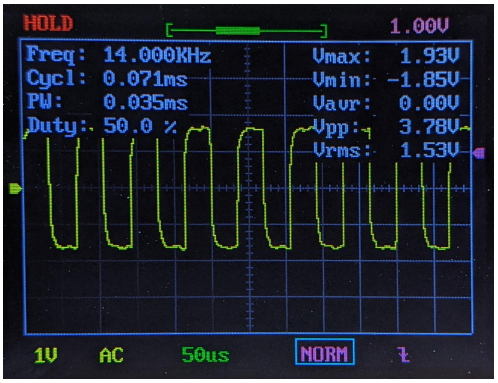
Obrázek 6.3: Trojúhelníkový výstup AD9834

Teď ke konkrétním výsledkům. Měřením jsem zjistil, že generátor AD9834 generuje sinusovou vlnu do frekvence zhruba 24 MHz, pak se výstup úplně ztrácí. Trojúhelníkový průběh má uspokojivý tvar v nižších jednotkách MHz, pak se zaoblují obě špičky a začíná vypadat spíše jako sinus. Výstup se úplně ztrácí kolem 20 MHz. Co se týče obdélníkové vlny, ta má až do několika stovek kHz dobrý tvar nezatížená. Při zatížení 50 Ω se spádové hrany tak zplošťují, že výstup téměř nevypadá jako obdélník. Naopak v jednotkách MHz je výstup dostatečně obdélníkový se zatížením i bez něj.

U obdélníkového průběhu SI5351 byla situace přesně opačná. Až do několika MHz měl signál hezký tvar, ale při vyšších frekvencích se v něm tvořilo několik izolovaných vrcholů spojených „vlnkou“. V desítkách MHz připomínal spíš sinus. Špatný tvar bez zatížení ve větších frekvencích se dal očekávat, vzhledem k nepřizpůsobeného vedení. Se zatížením měl obdélník obstojný tvar až do maxima. Měřením jsem zjistil, že udávaná maximální frekvence všech výstupů najednou 100 MHz, kterou uvádí výrobce, je pravdivá. Dále jsem zjistil, že ačkoliv podle datasheetu by měla být maximální frekvence jednoho výstupu maximálně 160 MHz, reálně je generátor schopen se dostat až lehce přes 200 MHz. Tvar průběhu je i nad specifikovaným maximem velmi dobrý. Pak už se frekvence dále zvýšit nedá. Co se týče minima, výrobce uvádí minimální dostupnou frekvenci 8 kHz, zjistil jsem ale, že lze generovat frekvence nejméně až do 4 kHz.

Amplitudy pro vybrané frekvence jsou v tabulkách A.1, A.2, A.3 a A.4 v příloze A. Amplituda je peak-to-peak a měřil jsem vždy nejdříve bez zatížení, potom se zatížením 50 Ω. Také uvádím skutečně naměřenou frekvenci. Některé obrázky z měření jsou pro představu o tvaru vln na obrázkách v přílohách B a C.

Při testování jsem zjistil, že když se rukou silně zavadí o jeden z konektorů u SI5351, někdy se to projeví úplným výpadkem signálu. To by šlo vyřešit nastavením časovače, který by generátoru periodicky nastavoval správnou



Obrázek 6.4: Obdélníkový výstup SI5351

frekvenci. Nakonec ale stačilo připojit Arduino k 9V externímu zdroji napětí (namísto PC) a výpadky se už neprojevovaly. Zřejmě byla potíž v tom, že USB port počítače nebyl schopen dodávat dost proudu k napájení desky. Co se ale děje pořád je to, že po odpojení a opětovném připojení k osciloskopu přestane generátor SI5351 úplně reagovat a celé zařízení je nutno vypnout a zapnout. Tento problém se mi bohužel nepodařilo vyřešit, nejspíš to je způsobeno vadou desky s generátorem.

Závěr

Cílem práce bylo vytvoření generátoru signálu ovládaného dotykovým displejem. Zařízení mělo generovat sinusový, obdélníkový a trojúhelníkový signál. Frekvence měla jít změnit. Všechny tyto cíle se podařilo splnit, zařízení funguje. Byly použity dva generátory signálu, a to SI5351 a AD9834. Generátory jsou řízeny pomocí Arduina Mega. Jako displej byl použit 2,8" TFT dotykový modul. Výhodou řešení je možnost si snadno a levně ze vzniklých podkladů sestavit vlastní funkční generátor.

Bibliografie

1. *Electronics Notes*. Arbitrary Function Generator, AFG [online] [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: https://www.electronics-notes.com/articles/test-methods/signal-generators/arbitrary-function-generator-afg-dds.php.
2. *Siglent*. Siglent SDG6022X 200 MHz Function / Arbitrary Waveform Generator [online] [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: https://www.siglent.eu/product/1138498/siglent-sdg6022x-200mhz-function-arbitrary-waveform-generator.
3. *Rigol*. RIGOL Waveform Generators [online] [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: https://www.rigolna.com/products/waveform-generators/.
4. *Keysight Technologies*. Signal Generators [online] [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: https://www.keysight.com/en/pcx-x2015003/signal-generators-signal-sources.
5. *Tektronix*. Signal Generator [online] [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: https://www.tek.com/signal-generator.
6. *Rohde & Schwarz*. Signal Generators [online] [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: https://www.rohde-schwarz.com/nl/products/test-and-measurement/signal-generators/pg_overview_63667.html.
7. *Conrad*. Arbitrární generátor funkcí Tektronix AFG3101C, 1 μHz – 100 MHz [online] [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: https://www.conrad.cz/arbitrarni-generator-funkci-tektronix-afg3101c-1-uhz-100-mhz.k406131.
8. *Conrad*. USB arbitrární generátor funkcí Voltcraft DDS-3025, 50 MHz [online] [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: https://www.conrad.cz/usb-arbitrarni-generator-funkci-voltcraft-dds-3025-50-mhz.k1188090.

9. *GM Electronic*. Stavebnice Generátoru Funkcí 50Hz–5kHz [online] [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://www.gme.cz/stavebnice-generatoru-funkci-50hz-5khz.

10. *Analog Devices*. Direct Digital Synthesis [online] [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://www.analog.com/en/parametricsearch/11018#/.

11. *Aliexpress.com*. 0–55 MHz AD9850 Module DDS Signal Generator Shortwave radio Wave band for HAM Radio SSB6.1 Transceiver VFO SSB [online] [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: https://www.aliexpress.com/item/32966847292.html.

12. *Analog Devices*. AD9850 [online] [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9850.pdf.

13. *Aliexpress.com*. AD9833 Function Signal Generator DIY Kit Synthesizer Sine/Triangle/Square Output 1–10000Hz Adjustable Frequency generator [online] [cit. 2020-05-26]. Dostupné z: https://www.aliexpress.com/item/4000562979590.html.

14. *LloydM*. AD9834 DDS (Part 1) [online] [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://www.lloydm.net/Demos/ad9834.html.

15. *Hackaday.io*. Inexpensive function generator [online] [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://hackaday.io/project/57488-inexpensive-function-generator.

16. *Ajarn Changpuak*. AD9833 Micro Waveform Generator [online] [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://www.changpuak.ch/electronics/AD9833-MicroWaveformGenerator.php.

17. *vwlowen.co.uk*. AD9850 Waveform Generator [online] [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: http://www.vwlowen.co.uk/arduino/AD9850-waveform-generator/AD9850-waveform-generator.htm.

18. *Analog Devices*. Ask The Application Engineer – 33 All About Direct Digital Synthesis [online] [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-38/number-3/articles/all-about-direct-digital-synthesis.pdf.

19. *Wikimedia Commons*. Časový diagram SPI sběrnice [online] [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SPI_timing_diagram.svg.

20. *NXP*. Spi Block Guide [online] [cit. 2020-02-06]. Dostupné z: https://www.nxp.com/files-static/microcontrollers/doc/ref_manual/S12SPIV4.pdf.

21. *NXP*. I^{2}C-bus specification and user manual [online] [cit. 2020-02-06]. Dostupné z: https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf.

22. *Analog Devices*. I^{2}C Primer: What is I^{2}C? (Part 1) [online] [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: https://www.analog.com/en/technical-articles/i2c-primer-what-is-i2c-part-1.html.

23. *Electro Schematics*. Arduino Mega 2560 Pinout [online] [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: https://www.electroschematics.com/arduino-mega-2560-pinout/.

24. *Microchip Technology*. PIC18F47Q10 Curiosity Nano Summary [online] [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: https://www.microchip.com/Developmenttools/ProductDetails/DM182029.

25. *Microchip Technology*. PIC18F47Q10 Device Overview [online] [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: https://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC18F47Q10.

26. *Microchip Technology*. ATmega2560 Device Overview [online] [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega2560.

27. *STMicroelectronics*. STM8S207K8 [online] [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm8s207k8.html.

28. *Arduino*. Arduino Products [online] [cit. 2020-02-06]. Dostupné z: https://www.arduino.cc/en/main/products.

29. *arduino-shop.cz*. IIC I^{2}C OLED LCD 1,3" displej 128x64 Bílý [online] [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: https://arduino-shop.cz/arduino/3181-iic-i2c-oled-lcd-1-3-displej-128x64-bily.html.

30. *Amazon.com*. Cloud LED 2.8 Inch Tft Touch LCD Module Ili9325 3 V Regulator [online] [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: https://www.amazon.com/Cloud-LED-Module-Ili9325-Regulator/dp/B06ZYXTV1Q.

31. *laskarduino.cz*. DDS Generátor signálu 0–40 MHz AD9850 [online] [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://www.laskarduino.cz/dds-generator-signalu-0-40mhz-ad9850/.

32. *Joom*. AD9833 DDS Signal Generator Module 0–12.5 MHz Sine/Square Wave Output Accessory [online] [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://www.joom.com/en/products/5c0484181436d40101242d12.

33. *Analog Devices*. AD9833 Data Sheet [online] [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9833.pdf.

34. *laskarduino.cz*. Programovatelný generátor signálu DDS pro sinusové a čtvercové vlny AD9833 [online] [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: https://arduino-shop.cz/arduino/1671-programovatelny-generator-signalu-dds-pro-sinusove-a-ctvercove-vlny-ad9833.html.

35. *Amazon.com*. 1Pcs AD9834 DDS Signal Generator Module Board Sine / Triangle / Square Wave Generator Module DDS Signal Source Generator Module [online] [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: https://www.amazon.com/AD9834-Signal-Generator-Module-Triangle/dp/B078V3SWTB.

36. *Amazon.com*. Xia Fly 10PCS / LOT Si5351 Si5351A Clock Breakout Board Precision 25 MHz Crystal Controller Signal [online] [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: https://www.amazon.com/Xia-Fly-Breakout-Precision-Controller/dp/B07MYJRTGY.

37. *Total Phase*. Interfacing with 3-wire SPI [online] [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: https://www.totalphase.com/support/articles/200350046-Interfacing-with-3-wire-SPI.

38. *Amazon.in*. Seasiant India 3.3V TFT LCD Adjustable Shield Expansion Board for Arduino Mega 2560 R3 3.2 (Single Item) [online] [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: https://www.amazon.in/Seasiant-India-Adjustable-Expansion-Arduino/dp/B07SZ8NZ6L.

39. *Silicon Labs*. I^{2}C–Programmable Any–Frequency CMOS Clock Generator + VCXO [online] [cit. 2020-02-06]. Dostupné z: https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/Si5351-B.pdf.

40. *Analog Devices*. AD9834 Data Sheet [online] [cit. 2020-02-06]. Dostupné z: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9834.pdf.

41. *hwkitchen.cz*. ARDUINO MEGA 2560 R3 [online] [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: https://www.hwkitchen.cz/arduino-mega-2560-r3/.

42. *Aliexpress.com*. MEGA 2560 R3 (ATmega2560-16AU CH340G) Pro mini MEGA2560 AVR USB board Development board MEGA2560 with cable for Arduino [online] [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: https://www.aliexpress.com/item/4000235952850.html.

43. *Ebay.com*. 3.3 V 2.8" TFT LCD module Digital Display lcd ILI9325 240x320 Touch panel w/ SD [online] [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: https://www.ebay.com/itm/300964146590.

44. *Aliexpress.com*. 1Pcs AD9834 DDS Signal Generator Module 20 mW 37.5 MHz Sine/Triangle/Square Wave Generator Module Board Signal Sources Generator [online] [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: https://www.aliexpress.com/item/32871055393.html.

45. *Aliexpress.com*. 3.3 V TFT LCD Adjustable Shield Expansion Board Module For Arduino Mega 2560 R3 3.2 [online] [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: https://www.aliexpress.com/item/32921233578.html.

46. *Aliexpress.com*. DC 3 V–5 V CJMCU-5351 Si5351A Si5351 I^{2}C Clock Generator Breakout Board Module Signal Generator Clock 8 kHz-160 MHz For Arduino [online] [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: %5Curl%7Bhttps://www.aliexpress.com/item/32881587285.html%7D.

47. *Aliexpress.com*. Dupont line 120pcs 20 cm male to male + male to female and female to female jumper wire Dupont cable for Arduino diy kit hjxrhgal [online] [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: https://www.aliexpress.com/item/32990585262.html.

48. *arduino-shop.cz*. Stohovatelná dutinková lišta 6 pin - samice [online] [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: https://arduino-shop.cz/arduino/2215-stohovatelna-dutinkova-lista-6-pin-samice.html.

49. *arduino-shop.cz*. Stohovatelná dutinková lišta 8 pin - samice [online] [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: https://arduino-shop.cz/arduino/2214-stohovatelna-dutinkova-lista-8-pin-samice.html.

50. *arduino-shop.cz*. Stohovatelná dutinková lišta 10 pin - samice [online] [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: https://arduino-shop.cz/arduino/2213-stohovatelna-dutinkova-lista-10-pin-samice.html.

51. *HAOYU Electronics*. 3.2"Touch Screen TFT LCD Module - ILI9325 [online] [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: https://www.hotmcu.com/32-touch-screen-tft-lcd-module-ili9325-p-127.html.

52. *Rinky-Dink Electronics*. Library: UTFT [online] [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: http://www.rinkydinkelectronics.com/library.php?id=51.

53. *Bodmer*. Arduino touch screen library for XPT2046 [online] [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: https://github.com/Bodmer/TFT_Touch.

54. *Majic Designs*. Library for using a AD9833 Programmable Waveform Generator hardware by Analog Devices. [online] [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: https://github.com/MajicDesigns/MD_AD9833.

55. *Etherkit*. Library for the Si5351 clock generator IC in the Arduino environment [online] [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: https://github.com/etherkit/Si5351Arduino.

56. *JYE Tech*. DSO 138 Oscilloscope DIY Kit [online] [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: https://jyetech.com/dso-138-oscilloscope-diy-kit/.

Příloha A

Výsledky měření na stolním osciloskopu – tabulky naměřených hodnot

Tabulka A.1: Výsledky měření AD9834 – sinusový průběh

Frekvence	Změřená frekvence	Amplituda	Amplituda – zátěž 50 Ω
1 Hz	1,117 Hz	600 mV	116 mV
100 Hz	100 Hz	584 mV	115 mV
1 kHz	1 kHz	584 mV	118 mV
100 kHz	100 kHz	580 mV	116 mV
1 MHz	1-1,002 MHz	560 mV	115 mV
5 MHz	5-5,01 MHz	490 mV	115 mV
10 MHz	9,95-10,05 MHz	384 mV	100 mV
15 MHz	14,95-15,1 MHz	385 mV	90 mV
20 MHz	19,96-20,04 MHz	315 mV	52 mV

Tabulka A.2: Výsledky měření AD9834 – trojúhelníkový průběh

Frekvence	Změřená frekvence	Amplituda	Amplituda – zátěž 50 Ω
1 Hz	1,116 Hz	584 mV	123 mV
100 Hz	99,5-100,5 Hz	584 mV	117,5 mV
1 kHz	0,998-1,002 kHz	581 mV	117,5 mV
100 kHz	99,8-100,2 kHz	570 mV	115 mV
1 MHz	9,96-1,002 MHz	538 mV	112 mV
5 MHz	4,99-5,03 MHz	416 mV	101 mV
10 MHz	9,96-10,08 MHz	316 mV	82 mV
15 MHz	14,97-15,02 MHz	150 mV	70 mV
19 MHz	18,94-19,06 MHz	180 mV	72 mV

Tabulka A.3: Výsledky měření AD9834 – obdélníkový průběh

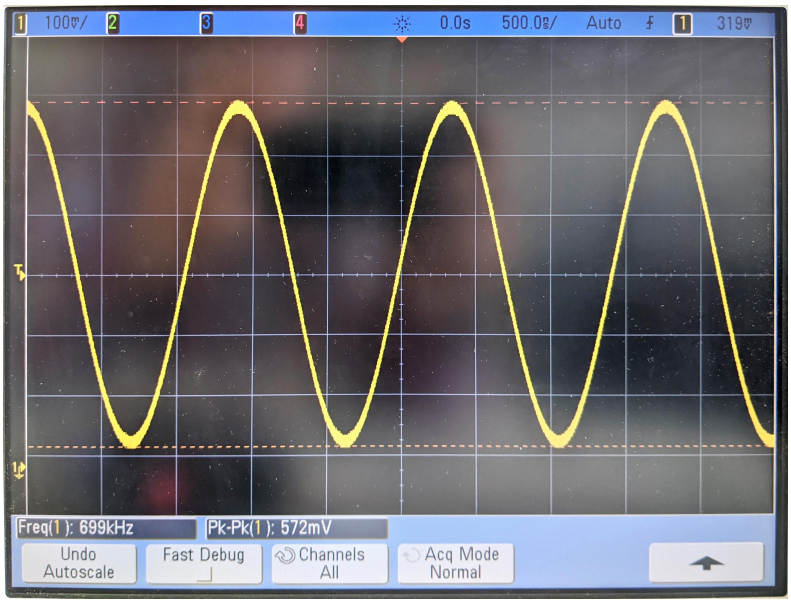
Frekvence	Změřená frekvence	Amplituda	Amplituda – zátěž 50 Ω
1 Hz	1,45 Hz	0 mV	116 mV
100 Hz	100 Hz	850 mV	800 mV
1 kHz	1 kHz	850 mV	840 mV
100 kHz	100 kHz	844 mV	550 mV
1 MHz	1,000 MHz	860 mV	450 mV
5 MHz	5,000 MHz	850 mV	440 mV
10 MHz	9,3-10,7 MHz	850 mV	438 mV
15 MHz	14,97-15,02 MHz	850 mV	440 mV
19 MHz	18-25 MHz	852 mV	440 mV

Tabulka A.4: Výsledky měření SI5351 – obdélníkový průběh

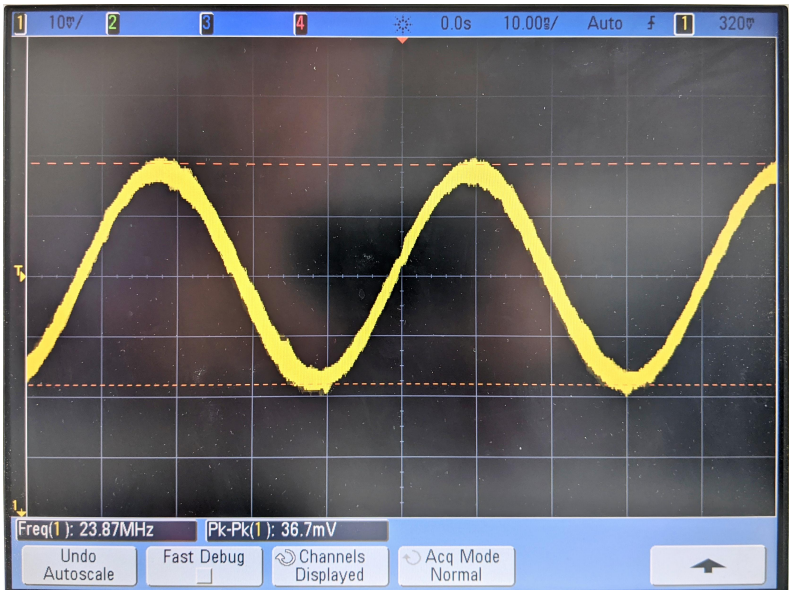
Frekvence	Změřená frekvence	Amplituda	Amplituda – zátěž 50 Ω
4 kHz	4,01 Hz	3,4 V	450 mV
10 kHz	10,02 Hz	3,38 V	440 mV
100 kHz	100 kHz	3,38 V	450 mV
1 MHz	1,000 MHz	3,35 V	450 mV
10 MHz	9,98–10,02 MHz	3,3 V	450 mV
50 MHz	49,9-50,1 MHz	2,30 V	440 mV
100 MHz	99,8-100,2 MHz	1,6 V	440 mV
160 MHz	159,7-160,3 MHz	2,65 V	438 mV
200 MHz	196-203 MHz	1,1 V	510 mV

Příloha B

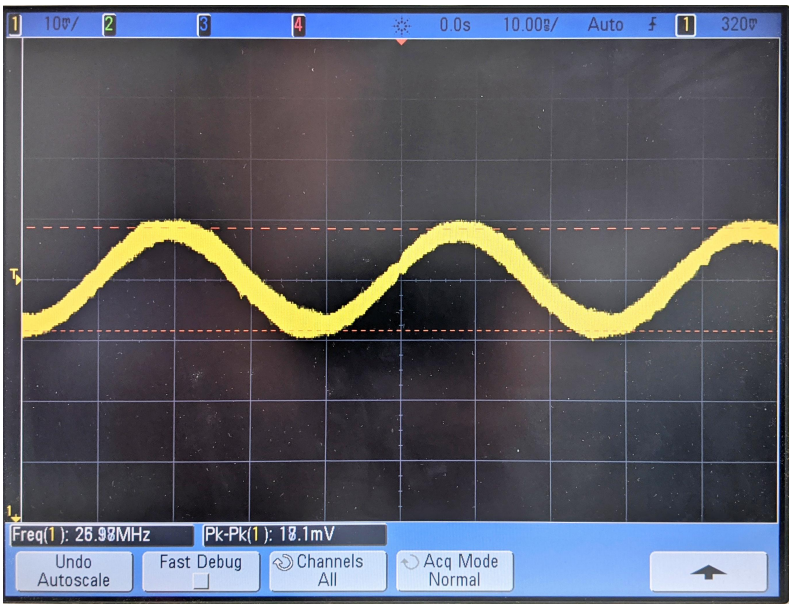
Výsledky měření AD9834 na stolním osciloskopu – obrázky



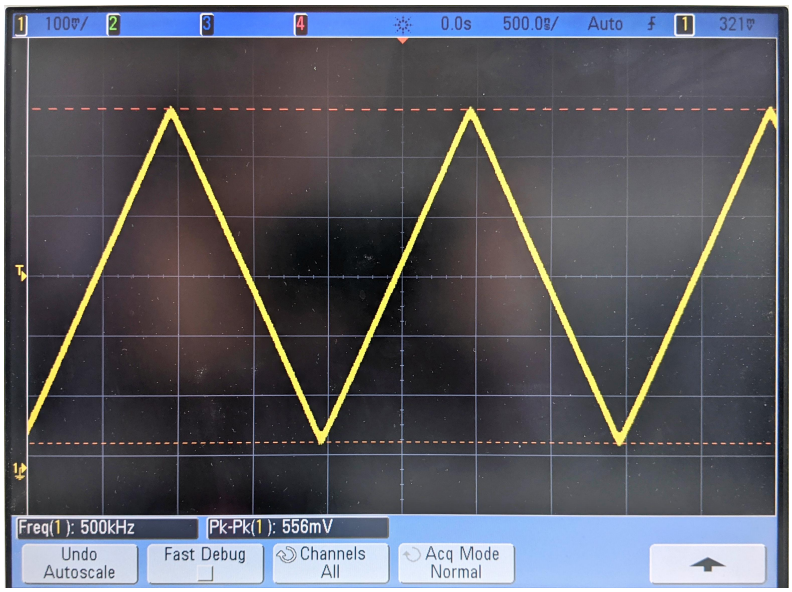
Obrázek B.1: Na 20 MHz (bez zátěže) má sinusový výstup AD9834 ukázkový tvar a frekvenci celkem přesnou.



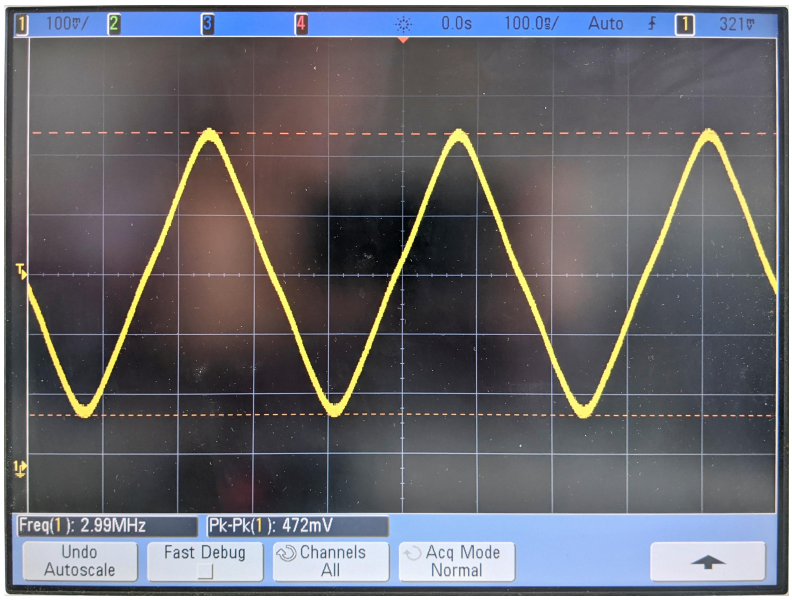
Obrázek B.2: Maximální frekvence sinusového signálu AD9834, bez zátěže. Vidíme dost malou amplitudu.



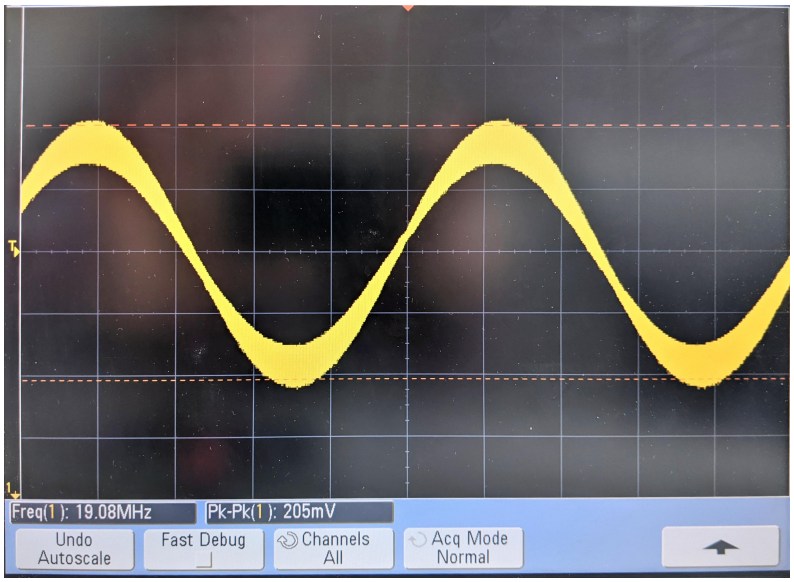
Obrázek B.3: Totéž co na obrázku B.2, ale se zátěží 50 Ω



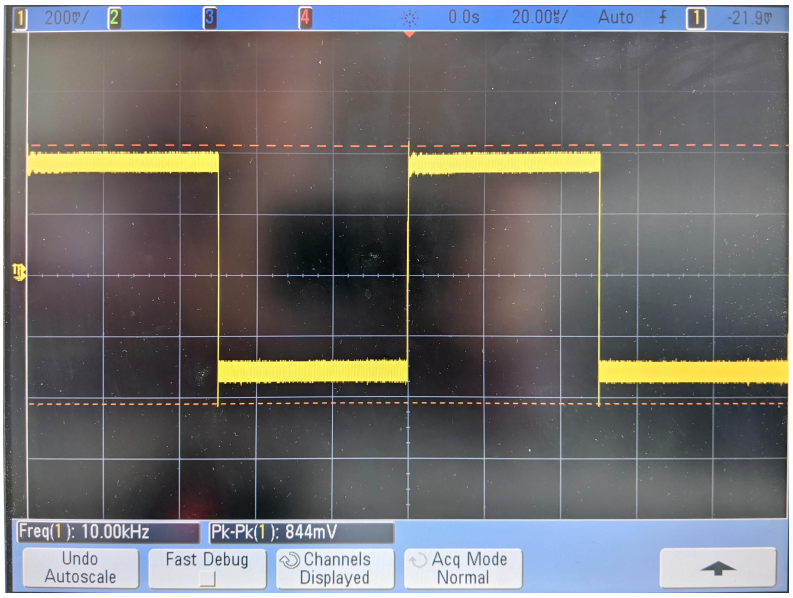
Obrázek B.4: V řádu stovek kHz má trojúhelníkový signál pěkný tvar.



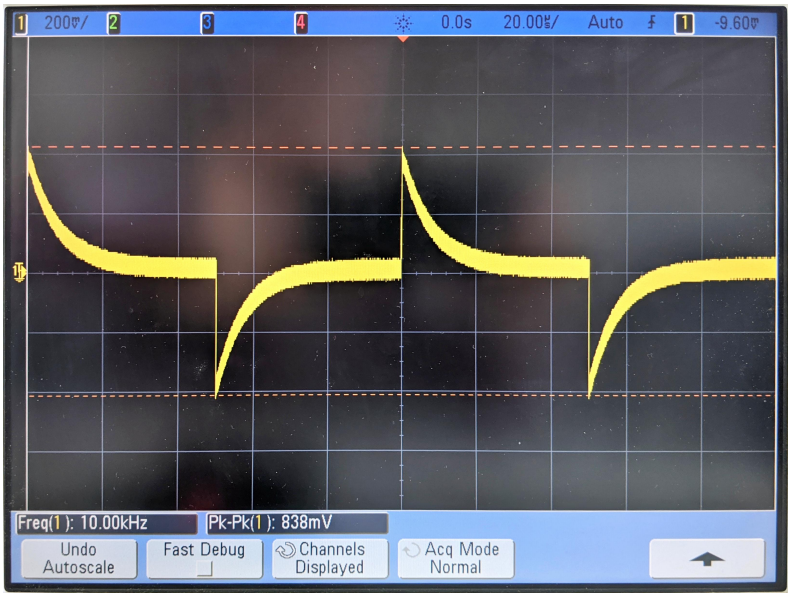
Obrázek B.5: Nejvyšší frekvence, při které trojúhelníkový výstup vypadá více jako trojúhelník než jako sinus. Při vyšších frekvencích už byly špičky moc ploché. Měřeno bez zátěže.



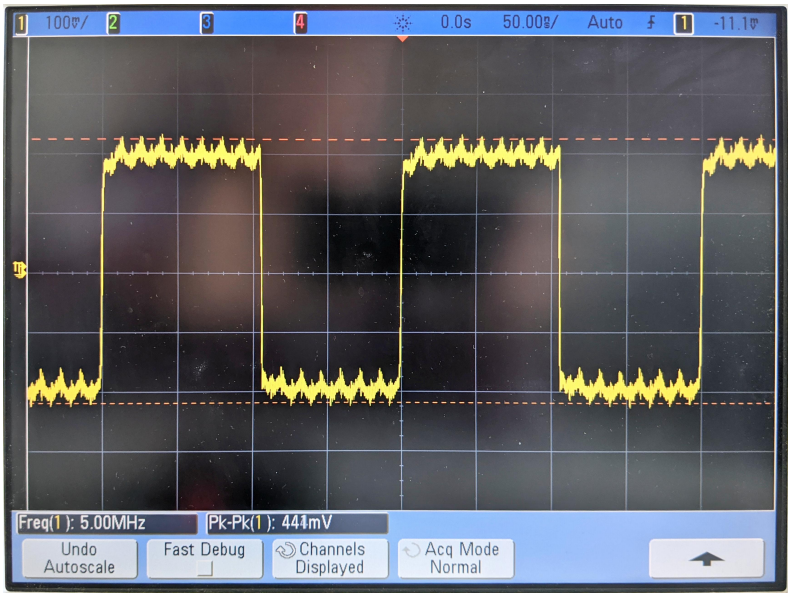
Obrázek B.6: Na 19 MHz (nejvyšší dosažená frekvence) už trojúhelníkový výstup vůbec nevypadá jako trojúhelník.



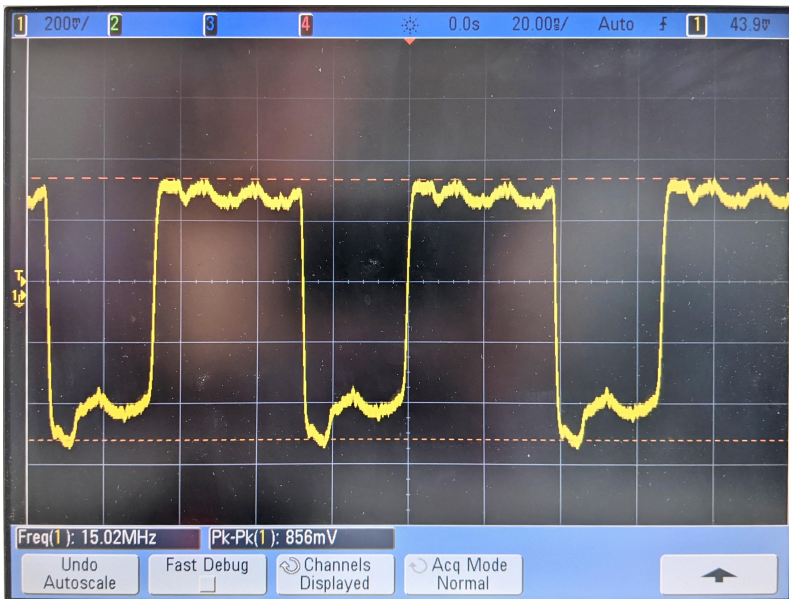
Obrázek B.7: V 10 kHz má obdélníkový signál z AD9834 bez zátěže pěkný tvar i přesnost.



Obrázek B.8: Až do 1 MHz má AD9834 se zátěží tak malou strmost spádové hrany, že výstup ani nevypadá jako obdélník.



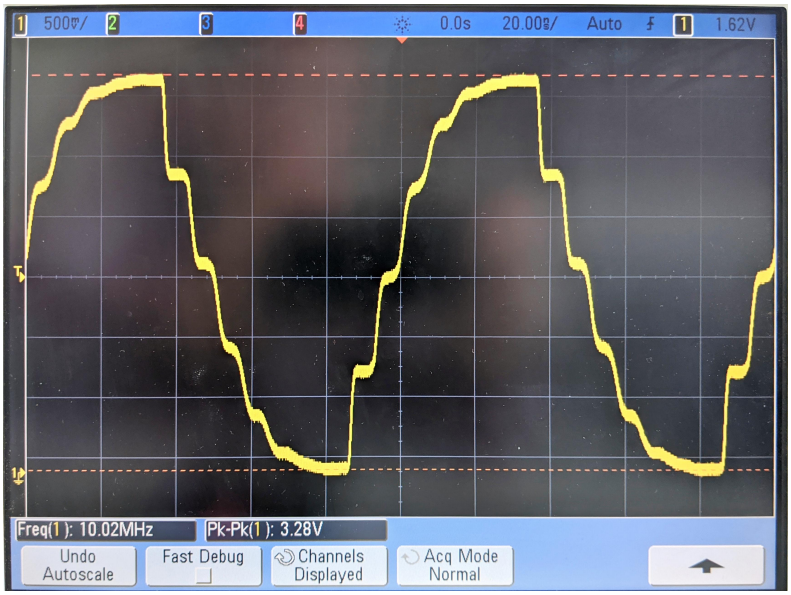
Obrázek B.9: Nejvyšší frekvence obdélníkového výstupu AD9834 se zátěží, při které má ještě čistě obdélníkový tvar.



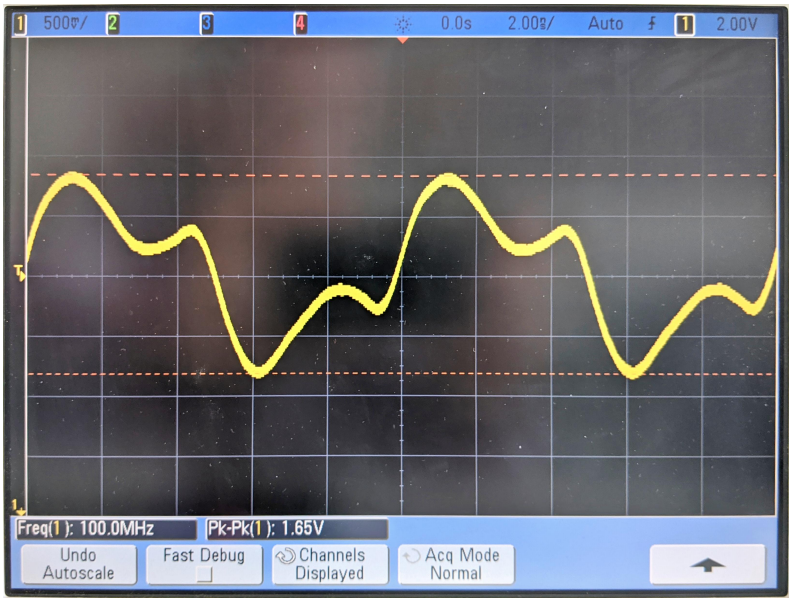
Obrázek B.10: Maximální frekvence bez zátěže, kde má obdélníkový signál z AD9834 ještě dobrý tvar.

Příloha C

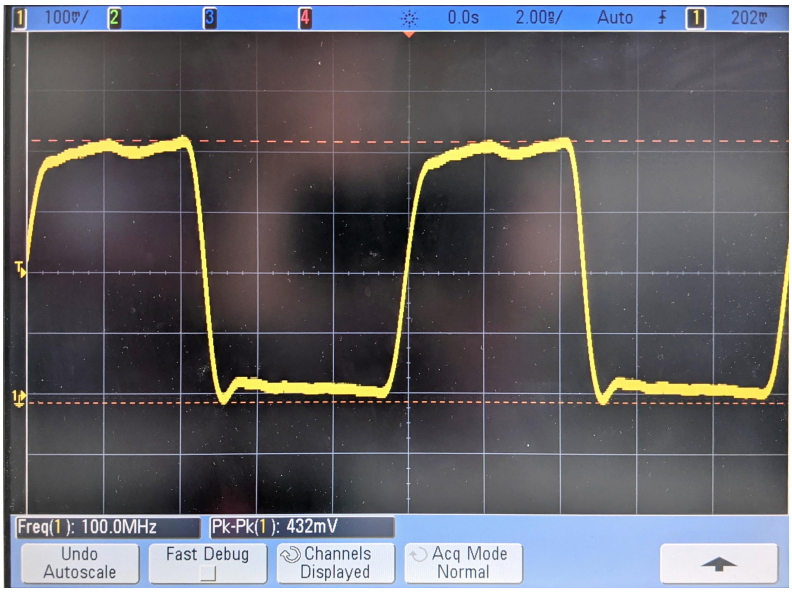
Výsledky měření SI5351 na stolním osciloskopu – obrázky



Obrázek C.1: Již od jednotek MHz začíná mít výstup SI5351 bez zátěže velmi zvláštní tvar, nejspíš je to vlivem nepřizpůsobeného vedení.

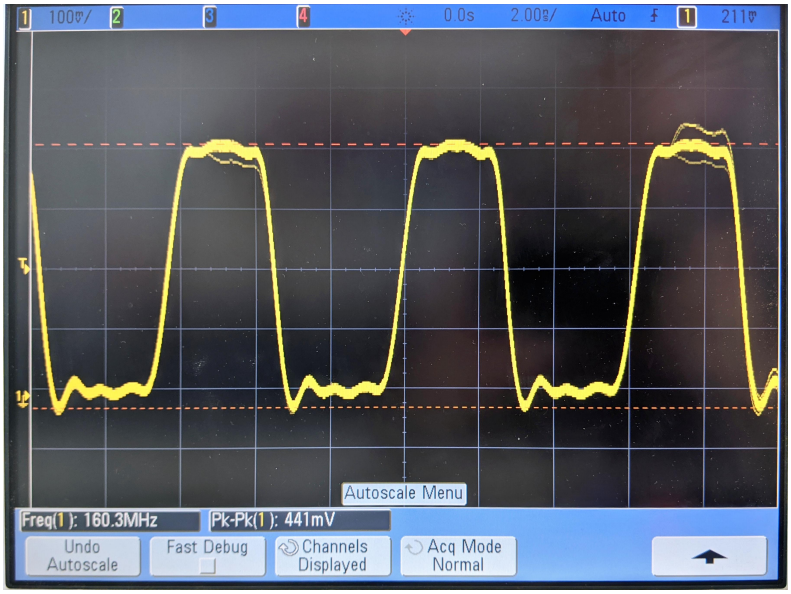


Obrázek C.2: Na vyšších frekvencích se to ještě zhoršuje, od několika desítek MHz se ani nedá poznat, že se jedná o obdélník.

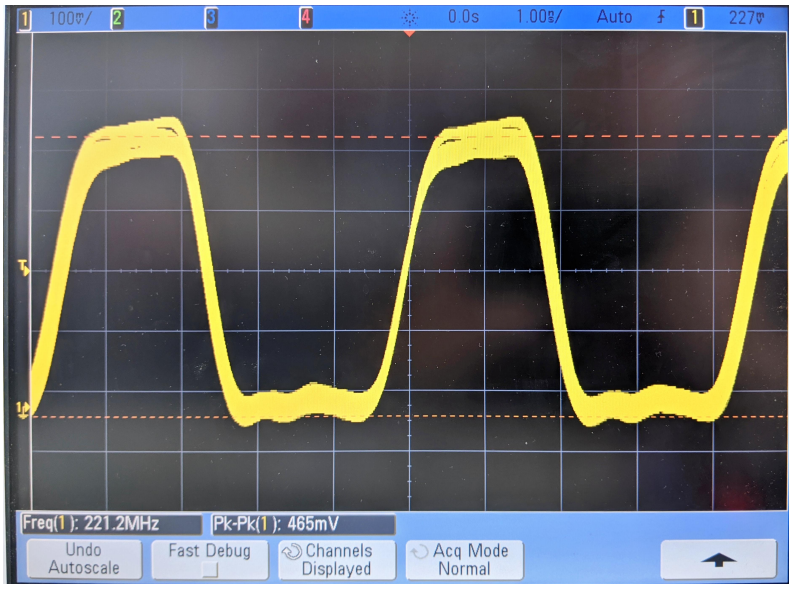


Obrázek C.3: Se zátěží má ale pěkný průběh pořád, i když nad 50 MHz je menší strmost hran. Na tomto obrázku je zachycena největší frekvence, které jde dosáhnout, pokud nastavujeme všechny tři výstupy na stejnou hodnotu.

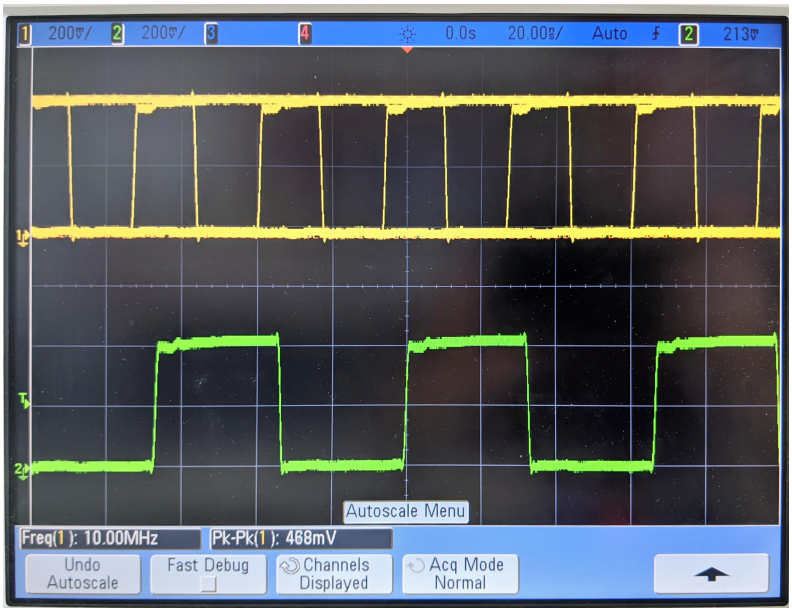
Obrázek C.4: Maximální deklarovaná frekvence generátoru SI5351, tedy 160 MHz. Měřeno bez zátěže, proto má výstup téměř trojúhelníkový tvar. Zajímavé ale je, úplně zmizela zkreslení, která byla patrná v nižších frekvencích.



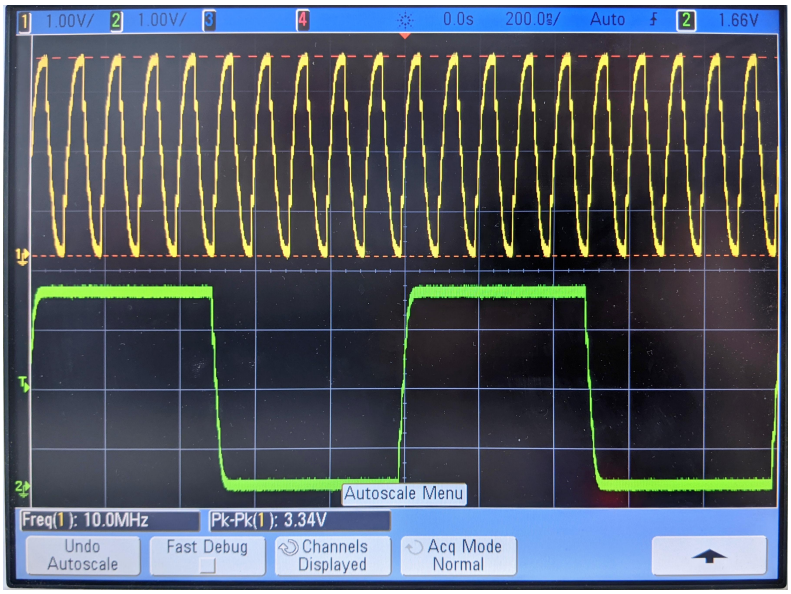
Obrázek C.5: Maximální deklarovaná frekvence SI5351, tentokrát se zátěží. Vidíme přesnější tvar obdélníka.



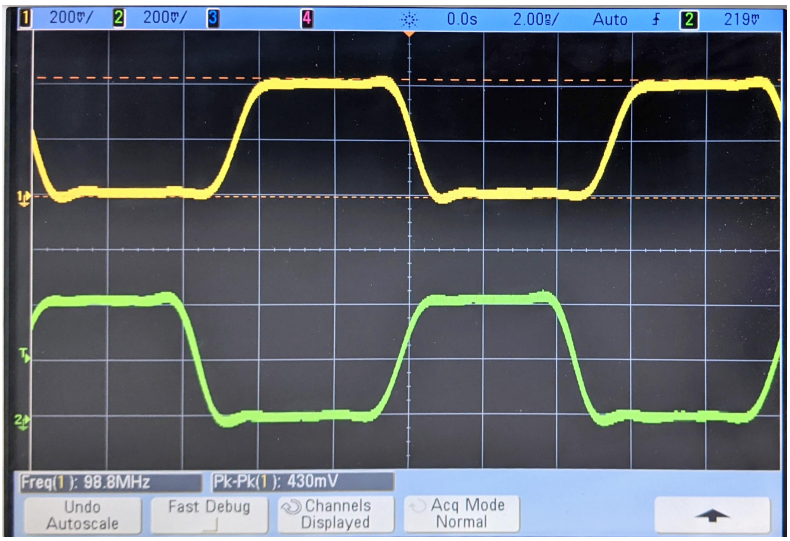
Obrázek C.6: Nejvyšší dosažená frekvence, zachyceno bez zátěže. Opět se jedná o přesnější obdélníkový průběh než v nižších frekvencích bez zátěže. Se zátěží mělo velmi podobný tvar.



Obrázek C.7: Měření dvou výstupů generátoru SI5351, oba se zátěží. Na prvním kanále je frekvence 10 MHz, na druhém 5 MHz



Obrázek C.8: Měření dvou výstupů generátoru SI5351, tentokrát bez zátěže. Na prvním kanále je frekvence 10 MHz, na druhém 1 MHz



Obrázek C.9: Měření dvou výstupů generátoru SI5351, se zátěží. Na obou kanálech je frekvence 100 MHz, vidíme, že oba signály jsou vůči sobě o 180 stupňů fázově posunuté.

Příloha D

Seznam použitých zkratek

AFG Arbitrary function generator

ARB Arbitrary

AWG Arbitrarty waveform generator

CPHA Clock phase

CPOL Clock polarity

DAC, D/A Digital-to-analog converter

DDS Direct digital synthesis

GUI Graphical user interface

I^{2}C Inter-Integrated Circuit

LCD Liquid-crystal display

MCU Micro Controller Unit

MISO Master Input Slave Output

MOSI Master Output Slave Input

OLED Organic light-emitting diode

SCL Serial Clock Line

SCLK Serial Clock

SDA Serial Data

SPI Serial Peripheral Interface

SS Slave Select

TFT Thin-film transistor

Příloha **E**

Obsah přiloženého CD

- `readme.txt` ..... stručný popis obsahu CD
- `src`
  - `prog` ..... zdrojové kódy implementace
  - `lib` ..... použité knihovny
  - `thesis.tex` ..... zdrojová forma práce ve formátu LaTeX
- `text` ..... text práce
  - `thesis.pdf` ..... text práce ve formátu PDF