

**UNIVERZITA PARDUBICE
ÚSTAV ELEKTROTECHNIKY A
INFORMATIKY**

**GENERÁTOR SIGNÁLU PŘESNÉHO
KMITOČTU**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR PRÁCE: Jan Šafařík

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Josef Marek, CSc.

2007

**UNIVERSITY OF PARDUBICE
INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERING
AND INFORMATICS**

EXACT FREQUENCY SIGNAL GENERATOR

BACHELOR WORK

AUTHOR: Jan Šafařík

SUPERVISOR: Ing. Josef Marek, CSc.

2007

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 9. 8. 2007

Jan Šafařík

Poděkování

V úvodu bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce, Ing. Josefu Markovi, CSc, za rady a připomínky týkající se bakalářské práce a za odborné vedení při návrhu generátoru.

Abstrakt

Tato práce se zabývá popisem vlastností zvuku a ladění hudebních nástrojů. Praktická část se věnuje výběru vhodných komponent pro návrh generátoru, který bude generovat signál s přesným kmitočtem v rozsahu základní harmonické všech tónů kláves standardního pianina pro případ rovnoměrného ladění. Generátor bude mít možnost výběru požadované oktávy a tónu.

Obsah

Seznam tabulek.....	8
Seznam tabulek.....	8
1 Úvod	10
2 Tón a jeho charakteristika.....	10
3 Hudební nástroje.....	11
3.1 Strunné nástroje	11
3.2 Klavírkové nástroje.....	12
4 Ladění	13
4.1 Rovnoměrné temperované ladění	13
5 Požadavky na generátor.....	15
6 Návrh generátoru	15
6.1 Počáteční návrh generátoru	15
6.2 Kompletní návrh generátoru.....	17
7 Výběr a popis jednotlivých částí generátoru	23
7.1 Nastavitelný zdroj přesného kmitočtu	23
7.1.1 LMX 2335	24
7.1.2 Napěťově řízený oscilátor MAX 2607	35
7.1.3 Zdroj referenčního kmitočtu.....	37
7.2 Periférie AVR ATmega 32	39
7.2.1 Ovládání.....	39
7.2.2 D/A převodník, dolní propust.....	39
7.2.3 LCD zobrazovač.....	40
7.3 Mikroprocesor AVR ATmega32	41
7.3.1 Popis nejdůležitějších částí programu uP	41
7.4 Nízkofrekvenční zesilovač TDA 2030	42
7.5 Napájecí zdroj.....	47
8 Závěr.....	51

Seznam obrázků

Obr.1 Rozdělení hudebních nástrojů	11
Obr.2 Blokové schéma generátoru	16
Obr.3 Blokové schéma konečného návrhu generátoru	18
Obr.4 Grafické znázornění funkce čítače a paměti	19
Obr.5 Skutečný signál generovaný generátorem	21
Obr.6 Chybový signál	22
Obr.7 Schématická značka LMX2335 [9]	24
Obr.8 Blokové schéma integrovaného obvodu LMX 2335 [9]	26
Obr.9 Nastavování obvodu pomocí sériového třídrátového rozhraní [9]	27
Obr.10 Přehled nastavovacích bitů pro programovatelný referenční dělič (RF1 a RF2 R counters) [9]	27
Obr.11 Přehled nastavovacích bitů pro programovatelný dělič N counter [9]	28
Obr.12 Charakteristika VCO [9]	31
Obr.13 Závislost proudu tekoucího do VCO na ladícím napětí [9]	32
Obr.14 Závislost výstupní frekvence oscilátoru na ladícím napětí [7]	36
Obr.15 Schématická značka VCO [7]	36
Obr.16 Standardní zapojení VCO [7]	37
Obr.17 Připojení krystalu k syntezátoru	37
Obr.18 Připojení krystalového oscilátoru k syntezátoru	38
Obr.19 Vnitřní zapojení obvodu 74HC04 [6]	38
Obr.20 Připojení tlačítek na piny uP.	39
Obr.21 Příklad rozmístění znaků LCD displeje	41
Obr.22 Schéma zapojení nízkofrekvenčního zesilovače	43
Obr.23 Graf výstupního výkonu v závislosti na napájecím napětí [5]	43
Obr.24 Závislost ztrátového výkonu na výstupním výkonu zesilovače a závislost účinnosti na výstupním výkonu zesilovače [5]	44
Obr.25 Chladič V5616x [10]	46
Obr.26 Schéma napájecího zdroje	48
Obr.27 Chladič DO3A [3]	49

Seznam tabulek

Tab.1 Přehled kroků čítače s odpovídající kvantizační úrovní.....	20
Tab.2 Přehled kmitočtů, které musí vyrábět zdroj přesného kmitočtu....	24
Tab.3 Nastavení jednotlivých bitů pro konkrétní dělič [9].....	28
Tab.4 Nastavení dělicího poměru [9]	28
Tab.5 Nastavení 7-bitového dělicího poměru děliče A counter [9].....	29
Tab.6 Nastavení 11-bitového dělicího poměru děliče B counter [9].....	29
Tab.7 Funkce jednotlivých bitů v programovém režimu [9].....	31
Tab.8 Nastavení jednotlivých bitů v programovém režimu [9].....	31
Tab.9 Možnosti připojení částí syntezátoru na multiplexovaný výstup F _{OLD} [9].....	33
Tab.10 Neměnné nastavení syntezátoru	34
Tab.11 Porovnání skutečných kmitočtů generátoru s požadovanými kmitočty	35
Tab.12 Přehled tepelných odporů mezi pouzdrem a chladičem [3]	45
Tab.13 Přehled zaokrouhlených napájecích napětí	50

Seznam zkratk

uP – mikroprocesor

VCO – napětově řízený oscilátor

Seznam termínů

aliquotní tóny – neboli vyšší harmonické frekvence, udávají barvu tónu

disonance – souzvuk tónů, které působí nepříjemně

1 Úvod

V teoretické části bakalářská práce popisuje vlastnosti zvuku a ladění hudebních nástrojů. V praktické části se věnuje návrhu vhodného generátoru, který bude použitelný pro ladění klavíru. Zabývá se výběrem jednotlivých částí generátoru a jejich funkčním popisem. Obsahuje také informace, podle kterých by se navržený generátor dal vyrobit.

První kapitola bakalářské práce je úvod. Ve druhé kapitole je popisován tón a jeho charakteristika. Ve třetí je rozdělení hudebních nástrojů obsahující popis klavíru, který je třeba ladit navrženým generátorem. Čtvrtá kapitola se věnuje popisu rovnoměrně temperovaného ladění. Pátá kapitola se zabývá požadavky na generátor. Šestá kapitola zkoumá teoretické možnosti návrhu generátoru. Rozděluje generátor do jednotlivých funkčních bloků a zkoumá, zda dané zapojení vyhovuje požadavkům zadání. V sedmé kapitole je výběr a popis jednotlivých integrovaných obvodů funkčního zapojení. Poslední osmou kapitolou je závěr. V něm jsou shrnuty výsledky bakalářské práce.

2 Tón a jeho charakteristika

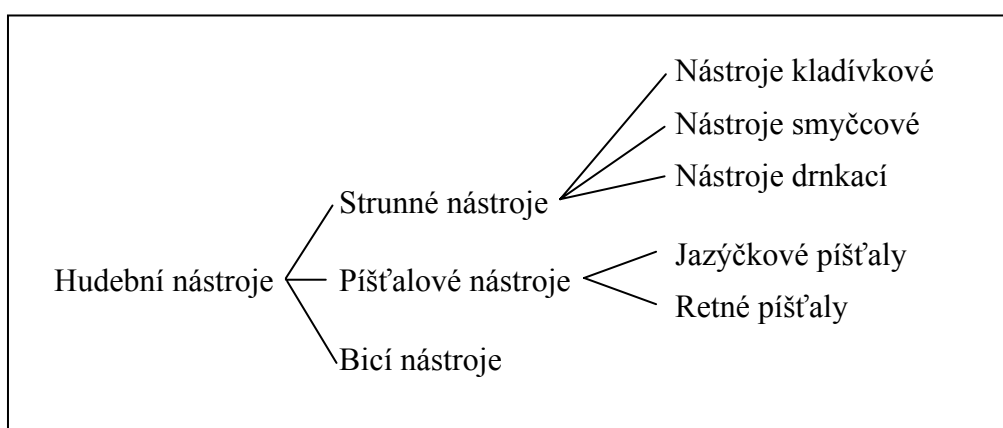
Každý zvuk vzniká chvěním tělesa. Pokud těleso kmitá pravidelně s určitou frekvencí, vydává tón. Příkladem je třeba chvění struny. Těleso, jehož kmity nemají konstantní frekvenci, vydávají hluky. Jako například činely. Každý tón lze charakterizovat pomocí základních vlastností jako je výška, barva, délka a síla. Pro teorii ladění je důležitá pouze výška tónů, ale s laděním hluboce souvisí i barva tónu.

Vnímaná výška tónu se odvíjí od frekvence kmitání tělesa. Čím vyšší je počet kmitů za sekundu, tím vyšší tón vnímáme. Každý tón obsahuje i celou řadu tónů dalších, které již jako samostatné tóny neslyšíme. Tyto tzv. alikvotní tóny udávají barvu tónu. Vznikají tak, že

kromě chvění celku zároveň odráží i chvění stále menších a menších částí tělesa. Struna se tedy chvěje celá, zároveň se však chvějí i její polovina, třetiny apod., teoreticky až do nekonečna. Barva tónu tedy závisí na tom, jak jsou jednotlivé alikvotní tóny silné. Uspořádání těchto tónů je naprosto zásadní pro teorii ladění. Jak již bylo řečeno, alikvotní tóny vznikají samostatným chvěním poloviny, třetiny a dalších zlomků struny nebo jiného tělesa vydávajícího tón. Když strunu zkrátíme na polovinu zjistíme, že zní o oktávu výše než celá, struna zkrácená na třetinu zní o oktávu a kvintu výše a tak dále. [2]

3 Hudební nástroje

Hudební nástroje můžeme rozdělit do tří základních skupin a dalších podskupin, jak je vidět na Obr.1. [1]



Obr.1 Rozdělení hudebních nástrojů

3.1 Strunné nástroje

Struna představuje soustavu kmitajících bodů upevněnou na obou koncích. V koncových bodech se vytvářejí během kmitání uzly, mezi nimiž vzniká jedna nebo dvě nebo tři atd. půlvlny s odpovídajícími kmitočty f , $2f$, $3f$ atd. Chvějící se struna může tedy vytvářet kromě

základního tónu s kmitočtem f , i další harmonické složky ($2f$, $3f$, $4f$...). Spektrální složení tónů závisí u strunných nástrojů na místě, v kterém byla struna rozechvěna. Rozechvěje-li se uprostřed, vznikají pouze liché harmonické a kmitočty f , $3f$, $5f$ atd., kdežto sudé harmonické chybějí. Podobně při rozechvění struny v $\frac{1}{4}$ délky chybějí harmonické $4f$, $8f$, $12f$ atd. V praxi se volí místo rozkmitání v $\frac{1}{7}$ nebo $\frac{1}{9}$ délky, protože v těchto případech mizí harmonické, které působí v základním tónu disonance. Podle způsobu rozechvívání strun dělíme strunné nástroje do tří základních skupin na kladívkové, smyčcové a drnkací. [1]

3.2 Kladívkové nástroje

Do této skupiny patří například klavír, cembalo a cimbál. Jejich struny jsou rozechvívány dřevěným kladívkem překrytým plstí. Při úhozu kladívka na strunu stoupá amplituda tónu rychle k maximu a pak nastává pomalé doznívání tónu. Barva tónu závisí na síle a časové délce úderu. Při slabém úderu jsou zdůrazněny především nižší harmonické, při silném úderu se uplatňují i vysoké harmonické.

U klavírů je klávesový mechanismus konstruován tak, aby podle potřeby struny nedoznivaly ihned po puštění kláves. Při stisku kláves se současně zvedá i příslušná tlumicí vložka, ta dopadá zpět na strunu po uvolnění klávesy. Je-li potřeba, aby struna zněla ještě určitou dobu po puštění klávesy, lze zamezit dopadu tlumicí vložky na strunu pomocí sešlápnutého pedálu.

Při úhozu klávesy vznikají u všech tónů, kromě harmonických složek, také složky šumové. Šumy jsou způsobeny nedokonalou ohebností strun a povlečením kladívka a brzy po úhozu doznívají.

Při použití jedné struny jsou nestejně hlasitosti na hlubokých, středních a vysokých tónech. Z tohoto důvodu se na hlubokých tónech používá jedna struna pro každý tón, ve středních tónech dvě struny a ve vysokých tónech tři struny. Čím je totiž struna delší a hmotnější, tím silnější vydává tón. [1]

4 Ladění

Ladění hudebního nástroje znamená uspořádání vzájemných výškových poměrů jednotlivých tónů stupnice. Stupnice je řada tónů, která je vytvořena podle určitého principu a nepřesahuje rozsah jedné oktávy. Pro vzájemnou polohu tónů v řadě není rozhodující rozdíl kmitočtů, ale jejich podíl. Místo součtu nebo rozdílu výšek tónů se intervaly vždy násobí nebo dělí. V zásadě se rozeznává ladění čisté (všechny intervaly ve stupnici jsou vyjádřeny poměry celých čísel) a ladění temperované (některé intervaly ve stupnici nejsou v poměru celých čísel). Způsoby ladění prošly dlouhým historickým vývojem, než se dospělo k dnešnímu dvanáctistupňovému rovnoměrnému temperovanému systému. Je několik způsobů podle čeho se dá hudební nástroj naladit. Od nejjednodušších mechanických ladiček, přes elektronické zdroje referenčního kmitočtu, až po spektrální analýzu signálu. [1]

4.1 Rovnoměrné temperované ladění

V tomto ladění jsou čisté pouze oktávové intervaly a všechny ostatní intervaly jsou temperované. Tóny v tomto ladění jsou melodické a pro lidský sluch přijatelné. V rovnoměrně temperovaném ladění platí, že tóny sousední vyšší oktávy jsou dvojnásobkem tónů nižší oktávy. Dále je každá oktáva rozdělena na 12 stejných temperovaných půltónů tak, že pro kterékoli dva sousední půltóny platí vztah:

$$f_{n+1} = qf_n$$

kde f_{n+1} je nejbližší vyšší půltón k půltónu f_n

q – kmitočtový interval temperovaného půltónu

Pro kmitočet tónu položeného o oktávu výše, než je tón f_n , pak platí :

$$f_{n+12} = q^{12} f_n = 2f_n$$

tedy

$$q = \sqrt[12]{2} = 1,05946309$$

V tab.1, která je součástí přílohy A jsou přehledně uspořádány základní vztahy a kmitočty všech tónů pro rovnoměrné temperované ladění s ladícím tónem $a^1 = 440$ Hz. V prvním řádku je nakreslena klavatura rozsahu jedné oktávy. Její uspořádání vyplývá z historického vývoje. Za základ byla zvolena sedmistupňová diatonická stupnice C dur se sedmi bílými klávesami a zbývajících 5 půltónů se doplnilo černými klávesami.

Pro usnadnění výpočtů a porovnávání intervalů se běžně používá logaritmická stupnice, v níž je základní jednotka cent. Jeden cent odpovídá intervalu:

$$\sqrt[100]{q} = 1,000577$$

který vznikne rozdělením intervalu temperovaného půltónu ($q = \sqrt[12]{2}$) na sto stejných poměrných dílů. Je-li potřeba vyjádřit vzdálenost dvou tónů s kmitočty f_1 a f_2 v x centech, vypočítá se tímto způsobem:

$$\frac{f_2}{f_1} = 2^{\frac{x}{1200}}$$

$$\log\left(\frac{f_2}{f_1}\right) = \left(\frac{x}{1200}\right) \cdot \log 2$$

$$x = 3986,3137 \log\left(\frac{f_2}{f_1}\right)$$

Je-li známa velikost intervalu v x centech mezi dvěma tóny a kmitočet f_1 základního tónu, může se vypočítat kmitočet f_2 druhého tónu ze vztahu :

$$f_2 = f_1 \cdot 2^{\frac{x}{1200}} \text{ [Hz]}$$

Údaje vyjádřené v centech charakterizují intervalové vzdálenosti a nemají přímý vztah k absolutním výškám tónu. Například temperovaný půltón obsahuje 100 centů, celý tón 200 centů atd. Intervaly mezi

jednotlivými stupni se v centové míře určují součtem nebo rozdílem příslušných hodnot. [1]

5 Požadavky na generátor

Navrhovaný generátor bude sloužit jako zdroj referenčního tónu pro porovnávání s tónem z klavíru. Umožní tak přesné ladění laikovi. Z toho vyplývají vlastnosti generátoru.

Přibližně harmonický průběh v rozsahu základní harmonické všech tónů kláves standardního pianu. Rozsah tónů je přes devět oktáv, celkem 88 tónů. Začíná subkontra oktávou tónem A a končí pětičárkovanou oktávou tónem c. Tóny, které využívá klavír jsou v příloze A obr.1 zvýrazněny žlutě. Dále je třeba, aby generátor umožňoval výběr požadované oktávy a tónu pomocí přehledného menu. Přesnost tónu musí být alespoň jeden cent, to znamená, že:

$$\frac{f_g}{f_t} \leq 2^{\frac{1}{1200}} = 1,000577 \quad \text{platí pro } f_t \leq f_g \quad [1]$$

nebo

$$\frac{f_t}{f_g} \leq 2^{\frac{1}{1200}} = 1,000577 \quad \text{platí pro } f_t \geq f_g \quad [1]$$

kde f_g je kmitočet tónu generátoru

f_t je kmitočet tónu v rovnoměrně temperovaném ladění

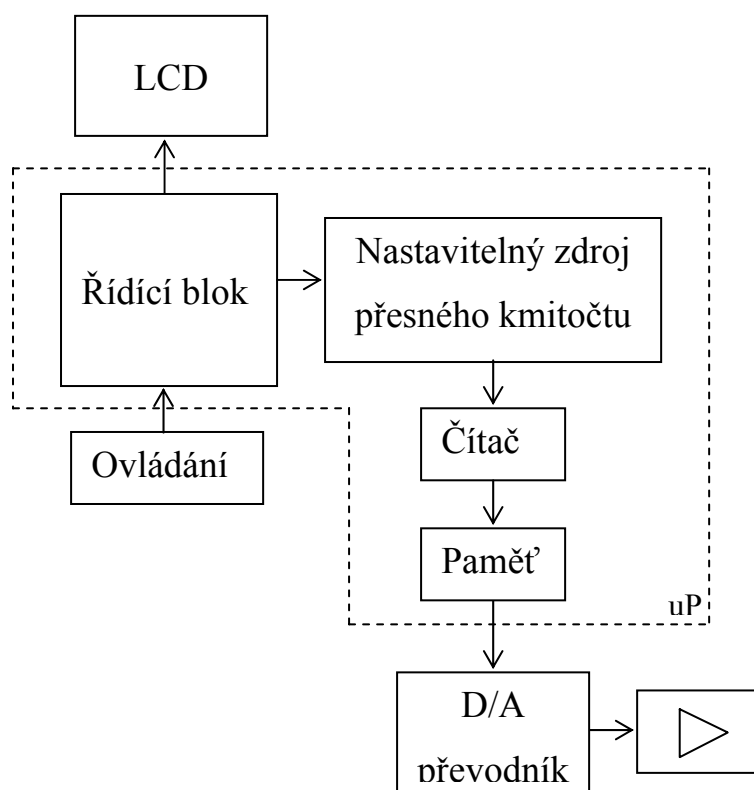
Výstupní výkon generátoru musí být alespoň 4W do zátěže 4 Ω . Zkreslení tónu by nemělo přesáhnout 10%.

6 Návrh generátoru

6.1 Počáteční návrh generátoru

Základní a nejdůležitější částí generátoru musí být blok, který je schopen měnit kmitočty podle potřeb rovnoměrně temperovaného ladění v rozsahu od 27,5 Hz do 4186,01 Hz s danou kmitočtovou přesností na 1 cent. Dále pak musí obsahovat neodmyslitelné části jako řídicí blok, nízkofrekvenční zesilovač, jednoduché ovládání třeba tlačítka nebo klávesnici a LCD zobrazovač. Při použití digitální techniky, je zapotřebí se také zamyslet, jak převést digitální signál na analogový (sinusový).

Prvotní úvaha byla, využít mikroprocesor ATmega 32 (dále jen uP) současně jako nastavitelný zdroj přesného kmitočtu, řídicí blok a také čítač a paměť pro vygenerování analogového signálu. Blokové schéma takto navrženého generátoru je na Obr.2.



Obr.2 Blokové schéma generátoru

Pro takto navržený generátor je nutné, aby kmitočty digitálního signálu z nastavitelného zdroje přesného kmitočtu, byly alespoň o osminásobek větší, než jaké jsou kmitočty v rovnoměrně temperovaném ladění.

Důvodem je zkonstruování přibližně sinusového průběhu právě pomocí čítače a paměti, které jsou součástí uP. Bude vysvětleno dále.

Po podrobném prostudování možností uP bylo patrné, že takto realizovat generátor nelze. Výše zmiňovaný uP má dva 8 bitové a jeden 16 bitový čítač. Pomocí těchto čítačů se dají nastavit libovolné kmitočty podle vztahu:

$$f_{\text{výst}} = \frac{F_{\text{osc}}}{2 \cdot n(1 + \text{OCR0})} \quad [8]$$

kde

$f_{\text{výst}}$ je výstupní kmitočet z čítače

F_{osc} je frekvence krystalového oscilátoru

n je volitelná předdělička, může nabývat tyto hodnoty (1,8,64,256,1024)

OCR0 je předvolba pro komparační jednotku, nabývá hodnot

podle počtu

bitů (0-255 nebo 0-65535)

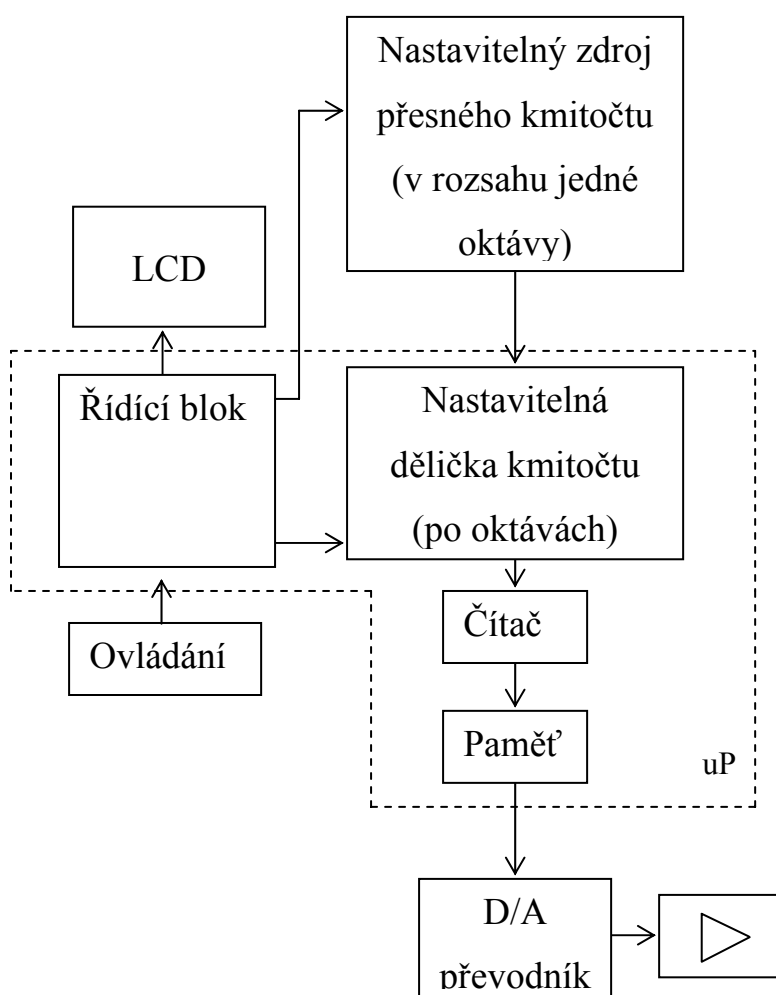
Přesnost takto vygenerovaných kmitočtů je však nepostačující a proto je zapotřebí ještě jemnějšího dělení.

Jak již bylo řečeno, v rovnoměrně temperovaném ladění jsou čisté pouze oktávy intervaly. Ty uP dokáže vygenerovat celočíselným dělením. Tóny které jsou součástí oktávy však uP vygenerovat neumí.

6.2 Kompletní návrh generátoru

Předchozí neúspěšný návrh tedy bude třeba doplnit o obvod, který dokáže vygenerovat kmitočty jedné oktávy a to té nejvyšší, která se bude používat. (příloha A tab.1 zvýrazněno zeleně) Dále je pak snadné nastavit ostatní kmitočty, protože stačí pro nižší oktávu, kmitočty vygenerované v nastavitelném zdroji, dělit dvěma. Vyplývá to z rovnoměrně temperovaného ladění. Nejvyšší používanou oktávou tedy rozumíme pětičárkovanou oktávu s kmitočtem od 4186,01Hz do 7902,13Hz. Například pro čtyřčárkovanou oktávu se kmitočty z nastavitelného zdroje

vydělí 2, pro tříčárkovanou oktávu se vydělí 4, pro dvoučárkovanou 8, atd. Blokové schéma takovéto sestavy je na Obr.3.

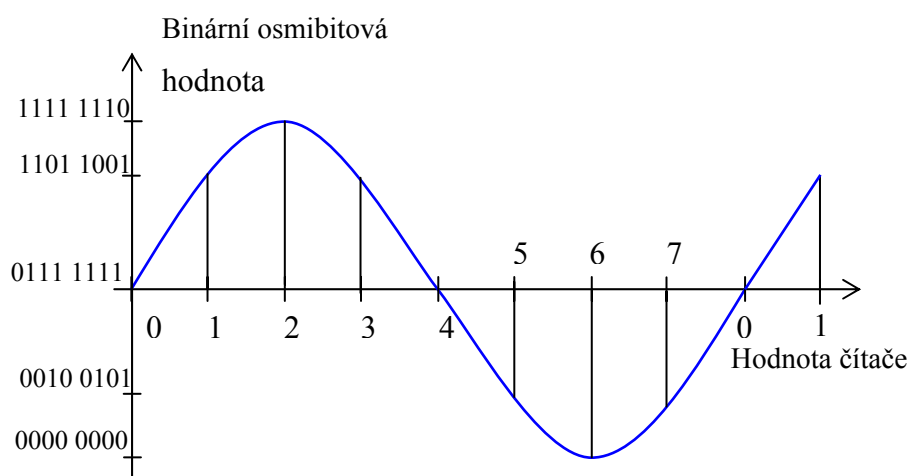


Obr.3 Blokové schéma konečného návrhu generátoru

Jak již bylo zmíněno, kmitočty z nastavitelného zdroje přesného kmitočtu musejí být osmkrát větší. Důvodem je digitální signál, který se musí převést na analogový. To zajistí skupina bloků čítač, paměť a D/A převodník.

Řekněme, že známe 8 vzorků sinusovky. Čítač tedy musí počítat do osmy, pro zkonstruování celé periody sinusovky. Každý krok čítače má

přidělenou osmibitovou binární hodnotu, která odpovídá danému vzorku. Jak graficky naznačuje Obr.4.



Obr.4 Grafické znázornění funkce čítače a paměti

Osmibitová hodnota vzorku je spočítána pomocí jednoduché úvahy. Známe úrovně jednotlivých vzorků. Spočítají se pomocí vztahu pro sinusový průběh. Máme 8 bitů kvantování. To znamená, že je možnost využít 256 kvantizačních hodnot. Ve skutečnosti se využije 255 kvantizačních hodnot. Pro zápornou půlvlnu sinusovky 127 hodnot (od 0 do 126), pro kladnou půlvlnu také 127 hodnot (od 128 do 254) a jedna hodnota pro nulu (127). Další úroveň, která je třeba spočítat je kvantizační hodnota $\sin u \frac{\pi}{4}$, která je stejná jako $\frac{3\pi}{4}$. Vypočítá se

tak, že polovinu rozsahu kvantování násobíme hodnotou $\sin u \frac{\pi}{4}$. Tedy

$\frac{255}{2} \cdot 0,7071 = 90,2$. Tato hodnota se musí zaokrouhlit na celé číslo tedy

90. Výsledkem je pak kvantizační hodnota jen kladné půlvlny sinusovky. Z důvodu posunutí počátku kvantování do minima záporné půlvlny se ještě musí přičíst hodnota 127, která charakterizuje o kolik se počátek posunul. Zároveň je to střední hodnota kvantizačního rozsahu. Výsledná kvantizační úroveň je pak $127 + 90 = 217$. Stejným způsobem se spočítá i

poslední kvantizační úroveň, která je charakterizována vzorkem sinu v $\frac{5\pi}{4}$ a $\frac{7\pi}{4}$. V Tab.1 je přehled kroků čítače a odpovídajících kvantizačních úrovní .

Tab.1 Přehled kroků čítače s odpovídající kvantizační úrovní

Vzorek sinusovky, Hodnota čítače	Hodnota vzorku	Kvantizační hodnota vzorku	
		dekadicky	binárně
0	$\sin 0 = 0$	127	0111 1111
1	$\sin \frac{\pi}{4} = 0,7071$	217	1101 1001
2	$\sin \frac{\pi}{2} = 1$	254	1111 1110
3	$\sin \frac{3\pi}{4} = 0,7071$	217	1101 1001
4	$\sin \pi = 0$	127	0111 1111
5	$\sin \frac{5\pi}{4} = -0,7071$	37	0010 0101
6	$\sin \frac{3\pi}{2} = -1$	0	0000 0000
7	$\sin \frac{7\pi}{4} = -0,7071$	37	0010 0101

Binární hodnoty budou uloženy v paměti uP a v daném kroku čítače také přivedeny na 8 pinů uP. Dále je pak zapotřebí tuto binární hodnotu převést na úroveň napětí pomocí D/A převodníku. V tomto případě je to převod paralelní. To znamená že, v daném kroku čítače se na 8 pinech uP objeví odpovídající binární hodnota, která je v zápětí převedena na úroveň napětí. Dále pak tento signál pokračuje přes dolní propust do nízkofrekvenčního zesilovače. Dolní propust zajišťuje odfiltrování vyšších harmonických.

Důležitý parametr pro představu generovaného signálu je poměr výkonu chybového signálu k výkonu sinusového signálu. Energie obecného signálu se počítá podle vztahu (1).

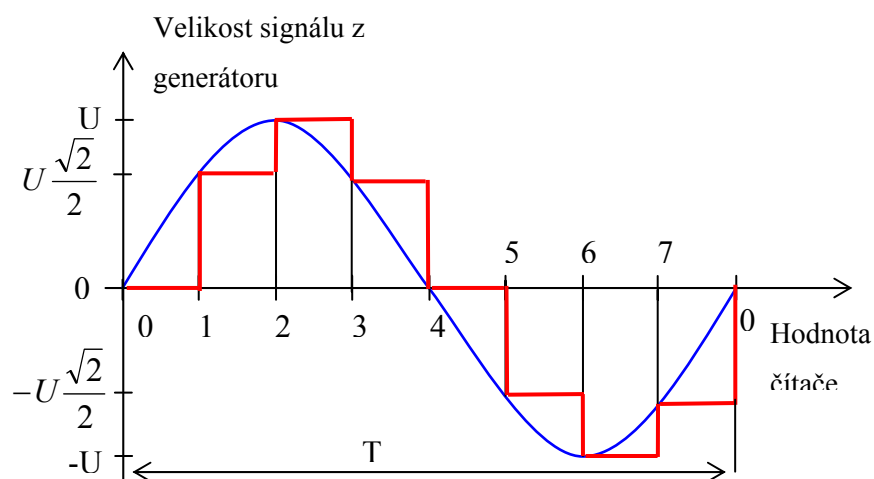
$$E = \int_0^T u^2(t) dt \quad [\text{V}^2\text{s}] \quad (1)$$

Dále spočítáme energii půl periody sinusového průběhu (2).

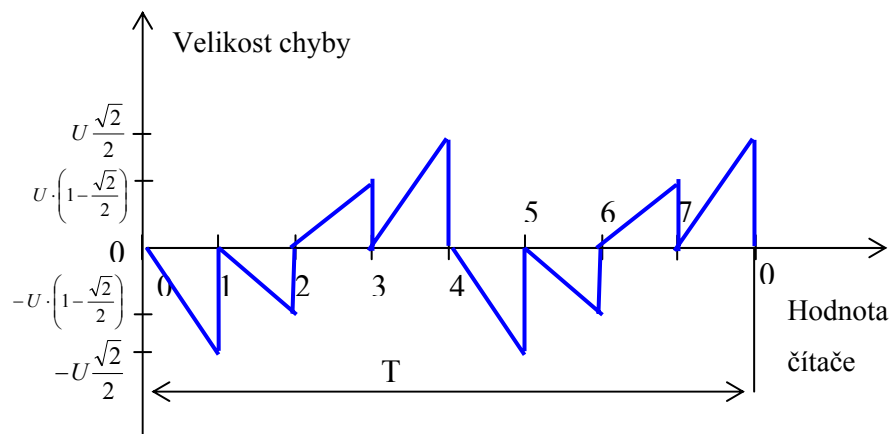
$$E_{\text{sin}} = \int_0^{\frac{T}{2}} \left[u \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{1}{T} t\right) \right]^2 dt = \quad (2)$$

$$= \int_0^{\frac{T}{2}} \left(\frac{1 - \cos \frac{4\pi}{T} t}{2} \right) dt = \frac{1}{4} u^2 T \quad [\text{V}^2\text{s}]$$

Chybový signál je znázorněn na obr.6 a je to rozdíl mezi skutečným průběhem z generátoru (vykreslen červeně obr.5) a sinusovým průběhem (vykreslen modře obr.5). Pro zjednodušení výpočtu energie tohoto signálu se uvažuje chybový signál jako trojúhelníkový.



Obr.5 Skutečný signál generovaný generátorem



Obr.6 Chybový signál

Průběh trojúhelníkového signálu je $\frac{A}{T}t$, kde A je amplituda a T je perioda tohoto signálu. Po dosazení do vztahu (1) spočteme energii trojúhelníkového signálu.

$$E_{trojuhel} = \int_0^T \left(\frac{A}{T}t \right)^2 dt = \frac{A^2}{T^2} \left[\frac{t^3}{3} \right]_0^T = \frac{A^2}{T^2} \cdot \frac{T^3}{3} = \frac{1}{3} A^2 T \text{ [V}^2\text{s]} \quad (3)$$

Dále pak vypočítáme energii chybového signálu za půl periody. Pro jednu chybovou složku platí perioda T/8. Amplitudy chybových signálů jsou na obr.6.

$$E_{chyb} = 2 \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot \frac{u^2}{2} \cdot \frac{T}{8} + \frac{1}{3} u^2 \cdot (1,5 - \sqrt{2}) \cdot \frac{T}{8} \right] = \frac{1}{12} u^2 T \left(\frac{1}{2} + 1,5 - \sqrt{2} \right) = \frac{1}{12} u^2 T (2 - \sqrt{2}) \text{ [V}^2\text{s]} \quad (4)$$

V dalším kroku se převedou vypočítané energie signálu na výkon pouhým vydělením periodou T. Nakonec se spočítá poměr výkonu chybového a sinusového signálu, který je následně vyjádřen v procentech (5).

$$\begin{aligned} \frac{S_{chyb}}{S_{sin}} \cdot 100 &= \frac{\frac{E_{chyb}}{T}}{\frac{E_{sin}}{T}} \cdot 100 = \frac{\frac{1}{12} u^2 (2 - \sqrt{2})}{\frac{1}{4} u^2} \cdot 100 = \\ &= \frac{4}{12} \cdot (2 - \sqrt{2}) \cdot 100 = 19,5\% \end{aligned} \quad (5)$$

Ze vztahu (5) vyplývá, že výkon chybového signálu je 19,5% z výkonu sinusového signálu.

7 Výběr a popis jednotlivých částí generátoru

Tato část se zabývá výběrem konkrétních integrovaných obvodů, které jsou potřeba pro správnou funkci generátoru s detailním funkčním popisem.

7.1 Nastavitelný zdroj přesného kmitočtu

Nejdůležitější částí generátoru je obvod, který dokáže nastavit osminásobek dvanácti kmitočtů té nejvyšší oktávy, která se používá. Samozřejmě s danou přesností na 1 cent. Přehled těchto kmitočtů je v Tab. 2.

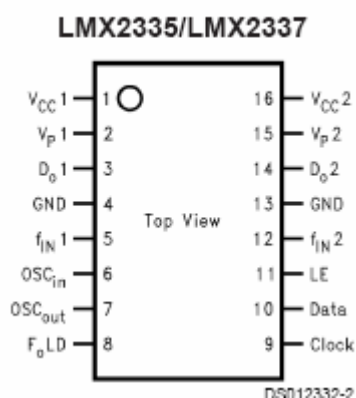
Tab.2 Přehled kmitočtů, které musí vyrábět zdroj přesného kmitočtu

Název tónu	Pětičárkovaná oktáva [Hz]	Kmitočet nast. zdroje [Hz]	Maximální chyba nast. zdroje	
			Kladná [Hz]	Záporná [Hz]
c	4186,01	33488,08	33507.4	33468.77
cis	4434,92	35479,36	35499,83	35458.9
d	4698,64	37589,12	37610,81	37567,44
dis	4978,03	39824,24	39847,22	39801,28
e	5274,04	42192,32	42216,67	42167,99
f	5587,65	44701,2	44726,99	44675,42
fis	5919,91	47359,28	47386,61	47331,97
g	6271,93	50175,44	50204,39	50146,51
gis	6644,88	53159,04	53189,71	53128,39
a	7040	56320	56352,5	56287,52
ais	7458,62	59668,96	59703,39	5963455
h	7902,13	63217,04	63253,52	63180,59

7.1.1 LMX 2335

Tento integrovaný obvod od firmy National Semikonduktor dokáže vytvořit požadované kmitočty. Byl vyvinut pro celulární telefonní systémy, bezdrátovou telefonii a je možné ho použít všude tam, kde je potřeba zdroje přesného kmitočtu.

Vyniká nízkou spotřebou maximálně 15mA. Napájecí napětí je od 2,7V do 5,5 V. Schématická značka je na Obr.7. [9]



Obr.7 Schématická značka LMX2335 [9]

Popis vývodů:

V_{cc} – napájecí napětí

V_p – napájecí napětí pro nábojovou pumpu, musí být $\geq V_{cc}$

D₀ – pro připojení na vstup externího VCO

GND – zem napájecího napětí

f_{in} – vstup předděliče, pro připojení výstupu z VCO

OSC_{in} – vstup pro externí zdroj referenčního kmitočtu

OSC_{out} – zřejmě výstup oscilátoru

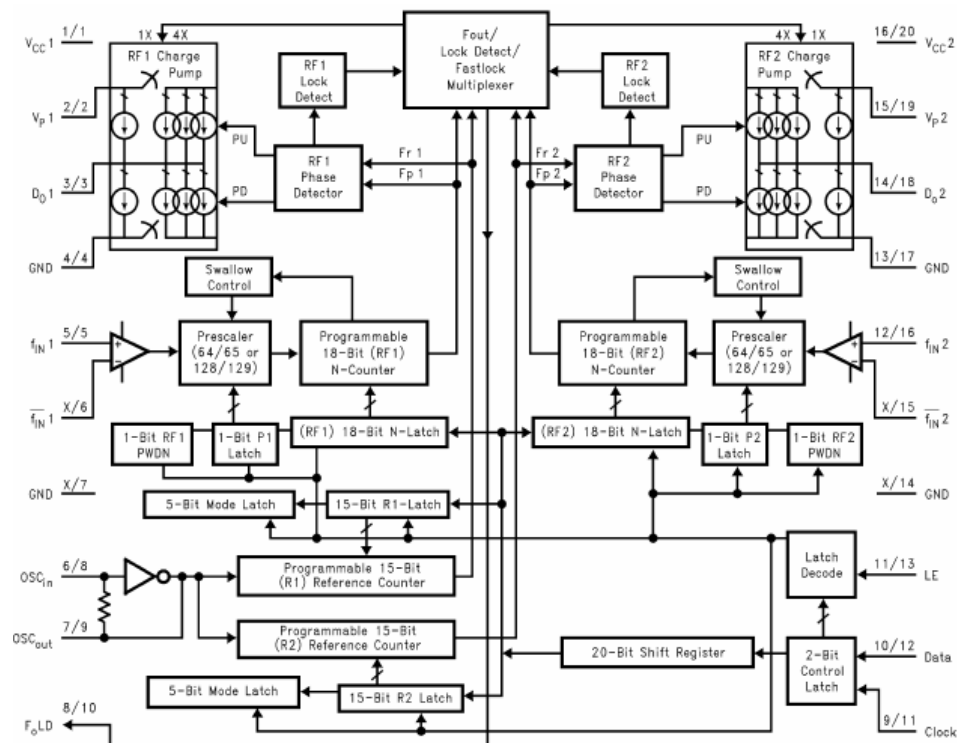
F₀LD – multiplexovaný výstup

Clock – vstup hodin

Data – vstup binárních sériových dat

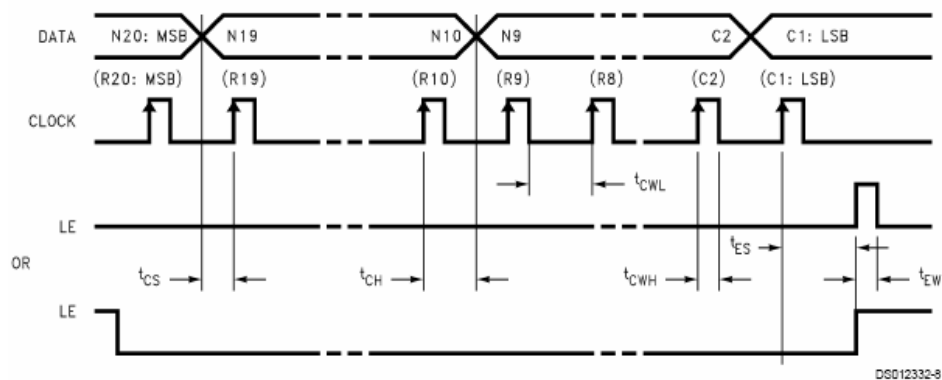
LE – vysvětleno níže

Je to duální frekvenční syntezátor. Obsahuje dvě na sobě nezávislé části, které se starají o přesné naladění kmitočtu. Každá část má nastavitelné vysokofrekvenční čítače, fázový detektor a napěťově řízený oscilátor (VCO). Pro funkci se musejí připojit externí součásti jako referenční zdroj kmitočtu a napěťově řízený oscilátor. Na obr.8 je blokové schéma tohoto obvodu. Referenční kmitočet je pomocí programovatelného 15 bitového čítače vydělen a přiveden na jeden ze vstupů fázového detektoru. Na druhý vstup je přiveden kmitočet z VCO vydělený programovatelným 18 bitovým čítačem. Oba kmitočty jsou tedy porovnávány ve fázovém detektoru. Výstupem je ladící napětí, které nastaví VCO na požadovaný kmitočet. [9]



Obr.8 Blokové schéma integrovaného obvodu LMX 2335 [9]

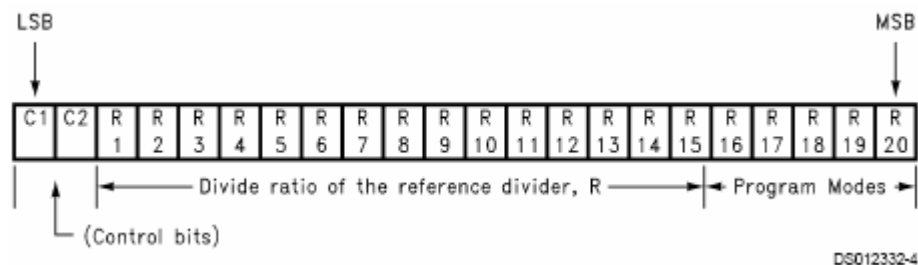
V blokovém schéma na Obr.8 jsou vidět nastavitelné prvky jako dva 15-bit R Counter , dva 18-bit N Counter a jednotlivé bity jim přerozděluje jeden 22-bit Data registr. Nastavování obvodu a tedy i požadovaného kmitočtu se provádí pomocí třídrátového rozhraní CLOCK, DATA, LE. Funkce pinu CLOCK je stejná jako u ostatních logických obvodů. Důležité je vědět, že obvod reaguje na vzestupnou hranu hodin Obr. 9. Jednotlivé nastavovací bity se přivádějí sériově na pin DATA, tedy do Data registru a to tak, že nejvyšší bit jako první. Po přivedení logické 1 na pin LE, se data uložená v posuvném registru načtou do jednoho vybraného ze čtyř děličů. [9] Elektrické zapojení tohoto obvodu je v elektrickém schéma generátoru v příloze C.



Obr.9 Nastavování obvodu pomocí sériového třídrátového rozhraní [9]

Programovatelný referenční dělič (RF1 a RF2 R counters)

Počet nastavovacích bitů, které se odesílají do Data registru pro jeden dělič je 22. To znamená, že pro čtyři děliče se celkem odešle 88 nastavovacích bitů. Pro děliče RF1 R counter a RF2 R counter platí Obr.10.



Obr.10 Přehled nastavovacích bitů pro programovatelný referenční dělič (RF1 a RF2 R counters) [9]

C1 a C2 jsou bity, které vybírají konkrétní dělič, který se bude nastavovat. Více v Tab. 3.

Tab.3 Nastavení jednotlivých bitů pro konkrétní dělič [9]

Control Bits		DATA Location
C1	C2	
0	0	RF2 R Counter
0	1	RF1 R Counter
1	0	RF2 N Counter
1	1	RF1 N Counter

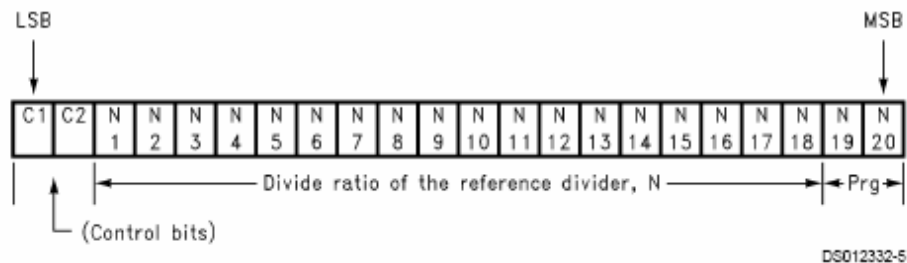
Dalších 15 bitů slouží pro nastavení dělicího poměru Tab.4. Rozmezí, ve kterém je povoleno se pohybovat je od 3 do 32767. Posledních 5 bitů slouží pro nastavení programového režimu. Bude vysvětleno níže.

Tab.4 Nastavení dělicího poměru [9]

Divide Ratio	R 15	R 14	R 13	R 12	R 11	R 10	R 9	R 8	R 7	R 6	R 5	R 4	R 3	R 2	R 1
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
.
32767	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Programovatelný dělič (N counter)

Na Obr.11 jsou vidět bity C1 a C2, které vybírají zvolenou děličku, dalších 18 bitů slouží pro nastavení dělicího poměru. Poslední dva bity jsou pro programový režim, který bude vysvětlen níže.



Obr.11 Přehled nastavovacích bitů pro programovatelný dělič N counter [9]

Programovatelný dělič N counter se rozděluje na další dva děliče A counter Tab.5 a B counter Tab.6

Tab.5 Nastavení 7-bitového dělicího poměru děliče A counter [9]

Divide Ratio A	N	N	N	N	N	N	N
	7	6	5	4	3	2	1
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	1
.
127	1	1	1	1	1	1	1

Tab.6 Nastavení 11-bitového dělicího poměru děliče B counter [9]

Divide Ratio B	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
.
2047	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Při počítání hodnot těchto děličů je třeba dávat pozor na podmínky, které musejí být splněné pro správnou funkci.

$$B \geq A$$

$$A < P$$

Kde:

A - dělicí poměr 7-bitového děliče A counter (od 0 do 127)

B - dělicí poměr 11-bitového děliče B counter (od 3 do 2047)

P - dělicí hodnota předděliče RF Prescaler (64 nebo 128)

Výstupní kmitočet, který se nastaví pomocí těchto děličů je popsán vztahem (6)

$$f_{VCO} = \frac{[(P \cdot B) + A] \cdot f_{OSC}}{R} \quad (6)[9]$$

Kde:

f_{VCO} – výstupní frekvence externího napěťově řízeného oscilátoru (VCO)

f_{OSC} - výstupní frekvence externího referenčního zdroje kmitočtu, v tomto konkrétním návrhu je zvoleno 5 MHz

R - dělicí poměr 15-bitového děliče R counter (od 3 do 32767)

Pro konkrétní návrh generátoru, kde je zapotřebí pracovat s kmitočty v rozsahu od 33,5 kHz až do 63,5 kHz, jsou kmitočty z f_{VCO} příliš vysoké. Proto je třeba ještě další dělení. Využije se tedy vstup f_{in} RF2 druhého kanálu syntezátoru Obr.8. Signál je pak možno ještě vydělit děliči RF2 Prescaler a také RF2 N counter. Vydělený signál je pak přiveden na multiplexovaný výstup F_{0LD} . Výstupní kmitočet se pak spočítá podle vztahu (7).

$$F_{0LD} = \frac{[(P_1 \cdot B_1) + A_1] \cdot f_{OSC}}{R_1 \cdot [(P_2 \cdot B_2) + A_2]} \quad [\text{Hz}] \quad (7)$$

Jak je patrné ze vztahu (7), dělič RF2 R counter se v tomto zapojení neuplatňuje. Pro takto zapojený syntezátor je třeba pochopit funkci programového režimu. Tab. 7 jsou ukázány funkce pěti bitů děliče R counter a dvou bitů děliče N counter. Další Tab. 8 ukazuje nastavení těchto bitů.

Bit R16 charakterizuje polaritu z fázového detektoru. Logickou 1 pro stav (1) a logickou 0 pro stav (0). (Obr.12)

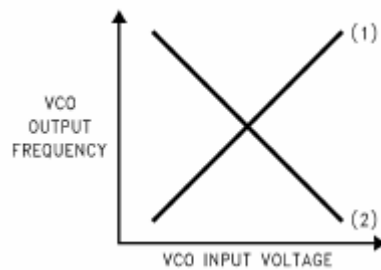
Tab.7 Funkce jednotlivých bitů v programovém režimu [9]

C1	C2	R16	R17	R18	R19	R20
0	0	RF2 Phase Detector Polarity	RF2 I_{CPo}	RF2 D_o TRI-STATE	RF2 LD	RF2 F_o
0	1	RF1 Phase Detector Polarity	RF1 I_{CPo}	RF1 D_o TRI-STATE	RF1 LD	RF1 F_o

C1	C2	N19	N20
1	0	RF2 Prescaler	Pwdn RF2
1	1	RF1 Prescaler	Pwdn RF1

Tab.8 Nastavení jednotlivých bitů v programovém režimu [9]

	Phase Detector Polarity (Note 7)	D_o TRI-STATE	I_{CPo} (Note 5)	RF1 Prescaler	RF2 Prescaler	Pwdn (Note 6)
0	Negative	Normal Operation	LOW	64/65	64/65	pwr d up
1	Positive	TRI-STATE	HIGH	128/129	128/129	pwr d dn

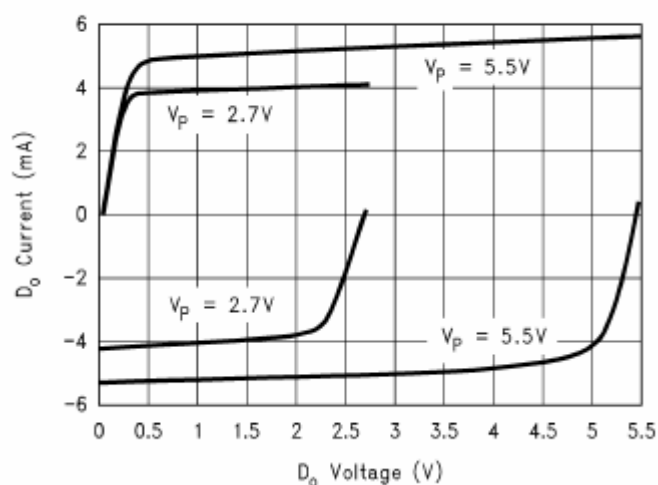


Obr.12 Charakteristika VCO [9]

Bit R17 charakterizuje, jakou závislost proudu tekoucího do VCO na ladícím napětí je třeba zvolit. Odvíjí se od vybraného VCO. Pro konkrétní návrh generátoru bude hodnota tohoto bitu na log 0 Obr. 13

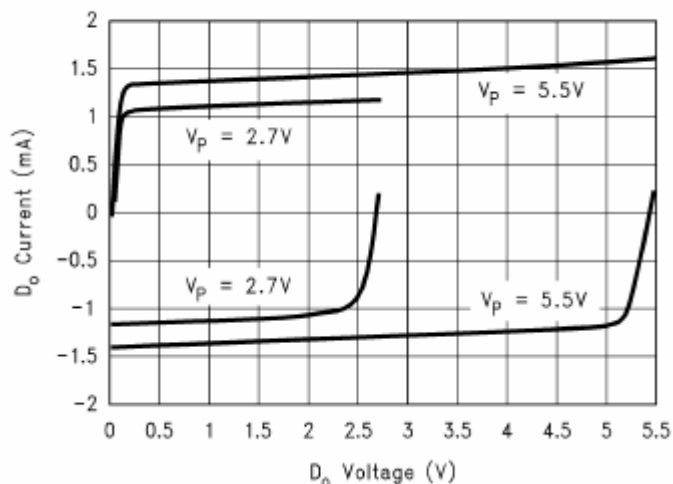
Charge Pump Current vs D_0 Voltage

$I_{CP} = \text{HIGH}$



Charge Pump Current vs D_0 Voltage

$I_{CP} = \text{LOW}$



Obr.13 Závislost proudu tekoucího do VCO na ladícím napětí [9]

Hodnota bitu R18 bude pro tuto aplikaci nastavena vždy na logickou 0, tedy *normální činnost* (stále připojená nábojová pumpa).

Poslední dva bity R19 a R20 nastavují připojení vybraných částí syntezátoru na multiplexovaný výstup F_{OLD} . V tomto návrhu generátoru, jak již bylo zmíněno, tedy výstup z programovatelného 18 bitového děliče Programmable N-counter (RF2) podle Obr7. Nastavení bitů pro připojení tohoto děliče je zvýrazněno v Tab. 9.

Tab.9 Možnosti připojení částí syntezátoru na multiplexovaný výstup

F_{OLD} [9]

RF1 R[19] (RF1 LD)	RF2 R[19] (RF2 LD)	RF1 R[20] (RF1 F ₀)	RF2 R[20] (RF1 F ₀)	F ₀ LD Výstupní stav	
0	0	0	0	Uzavřen - nachází se v log 0	
0	1	0	0	RF2	detekce uzamčení VCO, když ano log 1
1	0	0	0	RF1	
1	1	0	0	RF1 a RF2	
X	0	0	1	R2	Připojení výstupu z referenčního děliče (R)
X	0	1	0	R1	
X	1	0	1	RF2	Připojení výstupu z pro- gramovatelného děliče (N)
X	1	1	0	RF1	
0	0	1	1	Rychlý zámek	
0	1	1	1	Jen pro vnitřní použití	
1	0	1	1		
1	1	1	1		
1	1	1	1	Reset děličů	

Bit N19 slouží pro nastavení dělicího poměru předděliče RF Prescaler. Pro logickou úroveň 0 je dělicí poměr nastaven na 64 a pro log 1 je nastaven na 128.

Funkce bitu N20, je pro tuto aplikaci nepotřebná proto se nastaví natrvalo log 0.

Po podrobném vysvětlení nastavování obvodu, jsou tedy možné zjistit 4 konkrétní 22-bitové posloupnosti dat pro 1 tón. Základní neměnné bity jsou v Tab.10.

Tab.10 Neměnné nastavení syntezátoru

Umístění dat	C1	C2	R1 – R15 (LSB první)		R16	R17	R18	R19	R20
RF2 R counter	0	0			1	0	0	1	1
RF1 R counter	0	1			1	0	0	0	0
	C1	C2	N1 – N7 (LSB první)		N8 – N18 (LSB první)		N19	N20	
RF2 N counter	1	0							0
RF1 N counter	1	1							0

Pro ostatní nastavení bitů, byly vytvořeny dva programy pro výpočet jednotlivých dělicích poměrů, které jsou součástí přílohy na CD.

První program je vytvořen v Excelu, je to spíše šablona, kde se metodou pokus omyl mění nastavení děličů a tím se hledají jednotlivé kmitočty (tóny). Jsou vytvořeny také podmínky, které hlídají dovolené nastavení obvodu a také podmínka, která určuje, zda dané nastavení vyhovuje zadané přesnosti na 1 cent.

Druhý program je vytvořen v programovacím jazyku C#. Obsahuje stejné podmínky, které musejí být splněny. Rozdíl je, že testuje nastavení obvodu a vybírá to, které se co nejvíce přibližuje kmitočtu temperovaného tónu. Základem tohoto programu jsou tedy cykly jednotlivých nastavení děličů. Protože počet hodnot, které mohou nabývat děliče, je příliš velký, je zapotřebí cykly zkrátit na rozumné rozmezí hodnot, které počítač zvládne spočítat za přijatelnou dobu. Tímto programem lze kmitočty nastavit velmi blízko, ne-li přesně k temperovaným tónům.

Zjištěné dělicí poměry jsou v příloze B. Tyto hodnoty jsou poznamenány v dekadickém tvaru. Je třeba dát pozor při zápisu

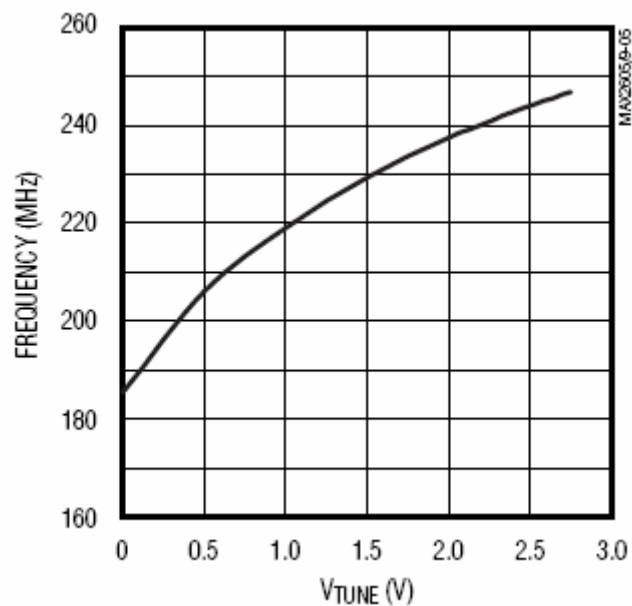
v binárním tvaru, začíná se bitem s nejnižší vahou. V tab.11 je přehled kmitočtů, které bude generátor vyrábět. Pro porovnání jsou poznamenány ještě kmitočty požadované (přesné) a kmitočty s maximální chybou.

Tab.11 Porovnání skutečných kmitočtů generátoru s požadovanými kmitočty

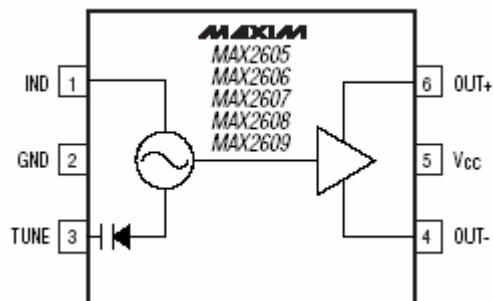
Název tónu	Kmitočet nast. zdroje [kHz]	Maximální chyba nast. zdroje		Skutečný kmitočet generátoru [kHz]
		Kladná [kHz]	Záporná [kHz]	
c	33,48808	33,5074	33,46877	33,48808
cis	35,47936	35,49983	35,4589	35,47936
d	37,58912	37,61081	37,56744	37,58912
dis	39,82424	39,84722	39,80128	39,82424
e	42,19232	42,21667	42,16799	42,19232
f	44,7012	44,72699	44,67542	44,7012
fis	47,35928	47,38661	47,33197	47,35928
g	50,17544	50,20439	50,14651	50,17544
gis	53,15904	53,18971	53,12839	53,15904
a	56,320	56,3525	56,28752	56,320
ais	59,66896	59,70339	59,63455	59,66895
h	63,21704	63,25352	63,18059	63,21705

7.1.2 Napěťově řízený oscilátor MAX 2607

Obvod LMX2335 ke své činnosti potřebuje VCO. Byl vybrán obvod Max 2607. Je využíván v mobilní telefonii, v přístrojích GPS, v radiových přijímačích a dalších aplikacích. Napájecí napětí tohoto obvodu je v rozmezí od 2,7V do 5,5V. Maximální odebíraný proud je 5mA. Pracovní kmitočet je od 200MHz do 240MHz a ladící napětí se pohybuje od 0,4V do 2,4V jak je vidět na Obr.14. Schématická značka je na Obr. 15. Standardní zapojení je na Obr.16. [7]



Obr.14 Závislost výstupní frekvence oscilátoru na ladícím napětí [7]



Obr.15 Schématická značka VCO [7]

Popis vývodů:

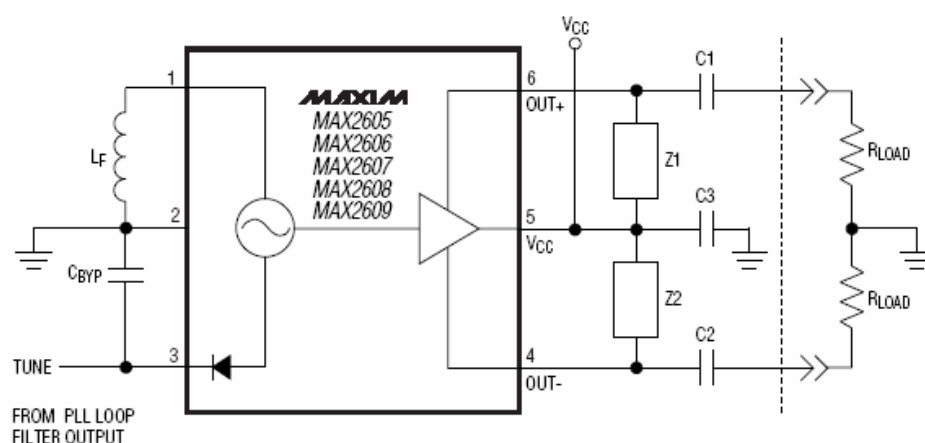
IND – Mezi vývody IND a GND se připojuje ladící cívka. Slouží pro nastavení středu využívající se frekvence. Využívá se kmitočet VCO od 200MHz – 240MHz. Z grafu v příloze A obr.1, je možné odečíst hodnotu této cívky, která je přibližně 75nH.

GND – zem napájecího napětí

TUNE – Vývod, na který se připojuje vstupní ladící napětí pro frekvenční ladění z obvodu LMX2335. Mezi vývody TUNE a GND se připojuje C_{BYP} . Jeho hodnota musí být $\geq 330\text{ pF}$, převzato z datasheetu

OUT₊ a OUT₋ - Vývody slouží jako výstup z VCO pro obvod LMX2335 a jsou mezi sebou komplementární. Mezi vývody OUT₊ a GND a také OUT₋ a GND se musejí připojit odpory $1\text{ k}\Omega$.

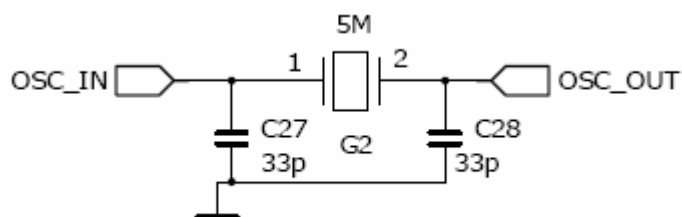
V_{CC} – připojení napájecího napětí



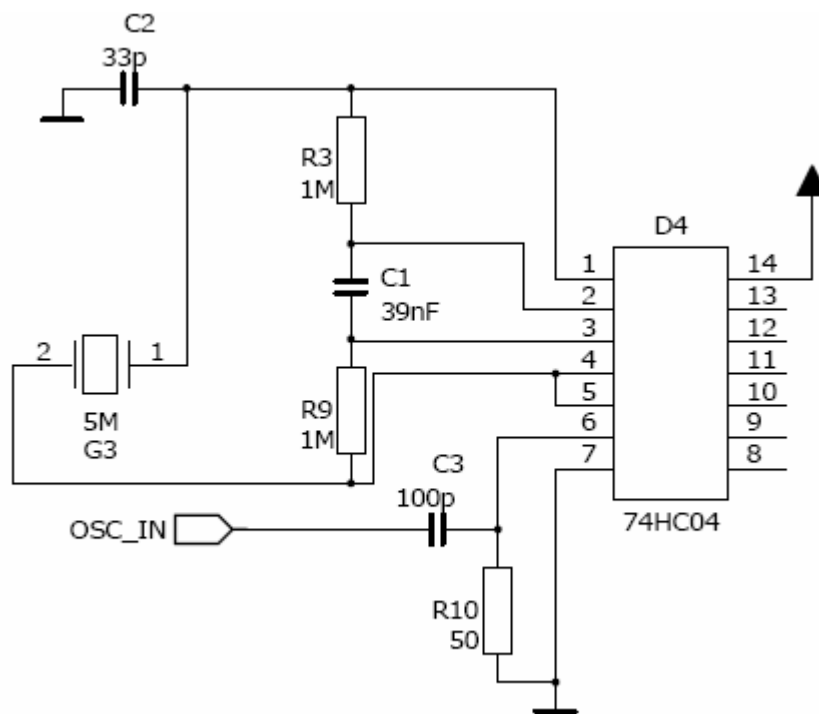
Obr.16 Standardní zapojení VCO [7]

7.1.3 Zdroj referenčního kmitočtu

Poslední obvod, který syntezátor potřebuje ke své činnosti je referenční zdroj kmitočtu. Z datasheetu syntezátoru není zcela jasné, zda stačí připojit pouhý krystal Obr.17, nebo zda je zapotřebí vyrobit plnohodnotný krystalový oscilátor s obvodem 74HC04 Obr.18. Proto jsou navrženy obě varianty a při ožívování se vybere jedna z nich.

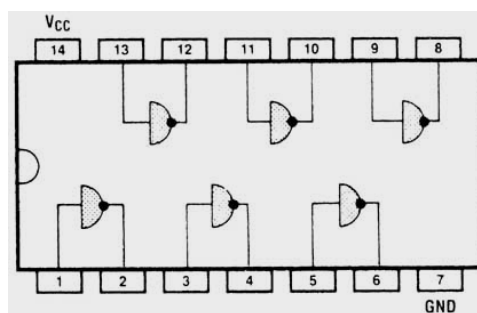


Obr.17 Připojení krystalu k syntezátoru



Obr.18 Připojení krystalového oscilátoru k syntezátoru

Integrovaný obvod 74HC04 obsahuje 6 NON hradel Obr.19. Ke své činnosti potřebuje napájení v rozmezí od 2V do 6V. Výkonová spotřeba se pohybuje okolo 10nW. Při napájení 5V je tedy odebíraný proud 2nA. Vyrábí se v pouzdech SO14.

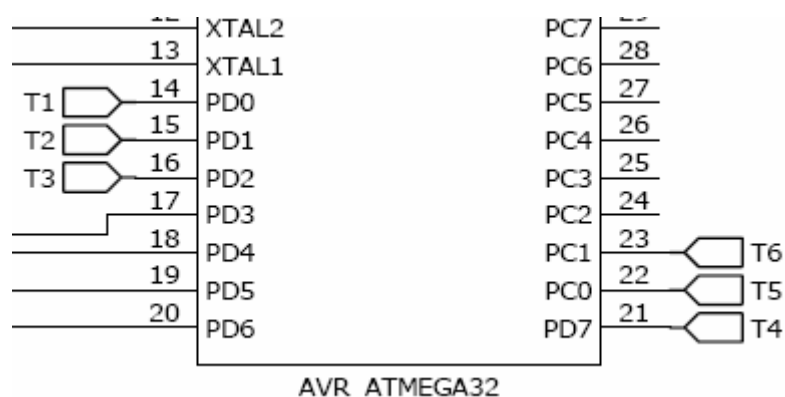


Obr.19 Vnitřní zapojení obvodu 74HC04 [6]

7.2 Periférie AVR ATmega 32

7.2.1 Ovládání

Pro ovládání celého generátoru je možno použít celkem 6 standardních tlačítek. Jsou připojeny na piny PD0, PD1, PD2, PD7, PC0 a PC1 Obr.20. Pro navržený program stačí 4 tlačítka. Když uP zaregistruje stisk tlačítka, podle algoritmu provede požadovanou operaci.



Obr.20 Připojení tlačítek na piny uP.

7.2.2 D/A převodník, dolní propust

Jak již bylo popisováno, pro převod binárních vzorků sinusovky na analogový signál je potřeba vybrat vhodný D/A převodník. Při návrhu byla zohledněna cena. Jako nejlacinější a zároveň postačující byla vybrána rezistorová R2R síť. (Příloha A Obr.3) Hodnota odporu R byla zvolena na 10kΩ. Pro fyzickou realizaci této sítě, byla vybrána součástka LC8002, která obsahuje 4 nezávislé zapouzdřené rezistory s tolerancí 10%. Zapojení vývodů a pouzdro této součástky je na Obr.4 v příloze A.

Výstupem z takového převodníku je signál, který obsahuje harmonické složky. Proto je zapotřebí tyto vyšší harmonické odfiltrovat dolní propustí, která bude tvořena vnitřním odporem rezistorové sítě a

kapacitou připojenou na zem. Mezní kmitočet dolní propusti je zvolen na 10kHz. Vnitřní odpor R2R sítě je 10kΩ. Z těchto hodnot se tedy spočítá kapacita podle vztahu (8). Dále je signál přiváděn na vstup nízkofrekvenčního zesilovače.

$$\tau = R \cdot C \quad [\text{s}]$$

$$\tau = \frac{1}{\omega_0} \quad [\text{s}]$$

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\tau} \quad [\text{Hz}]$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f_0 \cdot R} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^4 \cdot 10^4} = 15,9 \text{ pF} \quad (8)$$

7.2.3 LCD zobrazovač

Pro tuto aplikaci je možné vybrat jakýkoli 20 znakový dvouřádkový LCD display, bez podsvícení. Důvodem je proudová spotřeba, která se u LCD s podsvícením pohybuje okolo 300mA a bez podsvícení jsou to pouhé 2mA. Pro tento generátor byl vybrán LCD display s typovým označením mc2002e. Napájet ho lze od 2,7V do 5,5V. Blokové zapojení je na Obr.2, popis vývodů je v Tab.2 oboje v příloze A.

Lcd se bude provozovat ve čtyřvodičovém režimu. Piny DB0-DB3 jsou tedy uzemněny. Další informace o funkci LCD jsou v příloze na CD v příslušném datasheetu.

Jedním z požadavků na generátor je přehledné menu. Z LCD je tedy potřeba přečíst všechny potřebné informace. Na prvním řádku bude napsána vybraná oktáva. U posledních pěti oktáv se celé sousloví nepodaří vepsat do 19 znaků, bude tedy napsané jen přídavné jméno například „peticarkovana“ nebo „jednocarkovana“. Na druhém řádku bude napsán vybraný tón. Další informace z LCD je, který řádek se bude měnit, jestli oktáva nebo tón. Na tuto indikaci je vyhrazen poslední znak obou řádků. Příklad rozmístění znaků LCD je na Obr.21.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
			K	o	n	t	r	a		o	k	t	a	v	a				*
					T	o	n	:		c	i	s							

Obr.21 Příklad rozmístění znaků LCD displeje

7.3 Mikroprocesor AVR ATmega32

Při výběru uP, bylo nutno zjistit, kolik pinů je celkem potřeba pro ovládání všech částí generátoru. Pro řízení LCD je třeba 7 pinů, pro ovládání 6 pinů, pro obvod LMX2335 4 piny a pro rezistorovou síť je třeba celkem 8 pinů. Dohromady tedy musí mít procesor nejméně 25 datových pinů. Z nabídky dostupných uP je vybrán právě AVR ATmega32. Mikroprocesory typu ATmega16 a ATmega8 počtem pinů nepostačují. Napájení je od 4,5V do 5,5V. Proudový odběr je zhruba 1,1mA. Záleží na zvoleném kmitočtu krystalu, který je externě připojen k uP. V tomto případě je to 16MHz.

Mikroprocesor provádí čtyři hlavní funkce. Řídí pohyb v menu na žádost bloku ovládání. Nastavuje LCD podle daného výběru menu. Posílá potřebná data pro nastavení vybraného tónu frekvenčnímu syntezátoru (obvodu LMX2335). Dále musí umět vydělit tento kmitočet podle dané oktávy. Poslední činností je přivádění jednotlivých 8 bitových hodnot na piny uP v daném časovém okamžiku. Tyto funkce zajistí vhodný program pro uP.

7.3.1 Popis nejdůležitějších částí programu uP

Celá sestava bloků bude pracovat podle vývojového diagramu uvedeného a popsaného v příloze D.

Generování signálu bylo již vysvětleno. Jednotlivé 8 bitové vzorky sinusovky jsou tedy uloženy v paměti uP. Dále je třeba nastavit čítač.

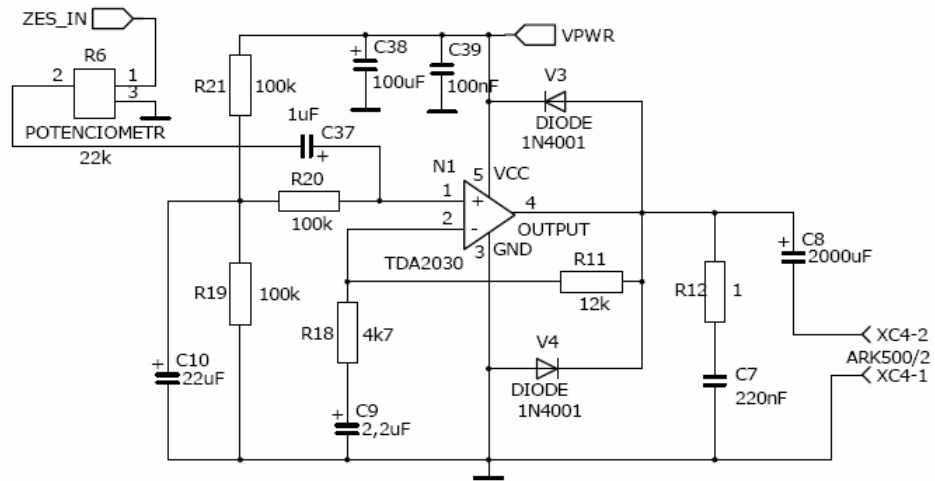
Prakticky je tvořen tak, že se při každém kroku inkrementuje ukazatel paměti jednotlivých vzorků. Když ukazatel ukazuje na poslední hodnotu vzorku, je opět nastaven na začátek. Tato část je realizována jako obsluha přerušení.

Další částí programu musí být nastavitelná dělička po oktávách. Ta je realizována pomocí čítače 0, který je součástí uP. Na pin T0 uP je přiveden signál z nastavitelného zdroje přesného kmitočtu.(Obr.3) Když je potřeba tento signál vydělit, nastaví se potřebná dělicí hodnota do registru OCR0. Při shodě s čítacím registrem TCNT0 vznikne přerušení a tím se změní hodnota vzorku. Při potřebě generování tónu nejvyšší oktávy, není třeba žádného dělení, nastaví se tedy přerušení přímo pro změnu pinu T0.

Způsob pohybu mezi jednotlivými tóny je vysvětlen v popisu vývojového diagramu v příloze D. Po vybrání požadovaného tónu a oktávy se vyšlou nastavovací sekvence bitů do obvodu LMX2335. Dále se vybere požadované přerušení (buď od T0 nebo od časovače0) a je-li to potřeba, nastaví se oktávový dělicí poměr. Generátor začne vyrábět požadovaný signál.

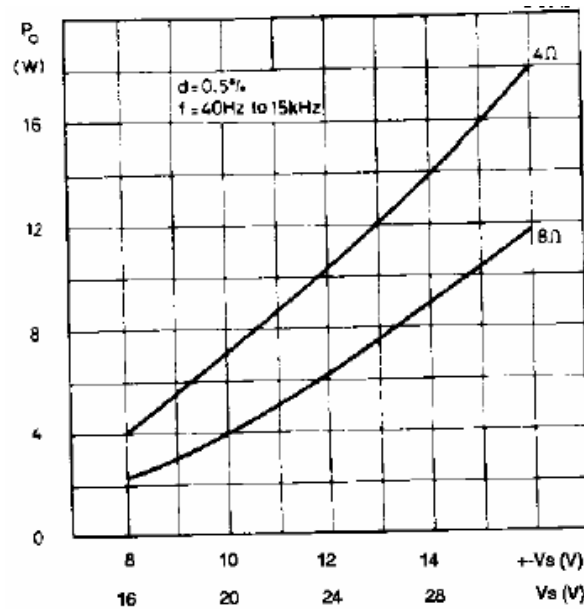
7.4 Nízkofrekvenční zesilovač TDA 2030

Signál, který projde dolní propustí se musí nadále výkonově zesílit. Podmínkou je minimální výkon do zátěže 4W. Tento výkon zajistí zapojení s operačním zesilovačem TDA 2030 Obr.22.



Obr.22 Schéma zapojení nízkofrekvenčního zesilovače

Schéma zapojení je převzato z datasheetu, proto se předpokládá správná funkce. Jak je vidět napájení je nesymetrické. Z grafu na Obr.23 tedy odečteme minimální napájecí napětí pro výstupní výkon 4W s maximálním zkreslením 0,5%, které je 16V. [5]

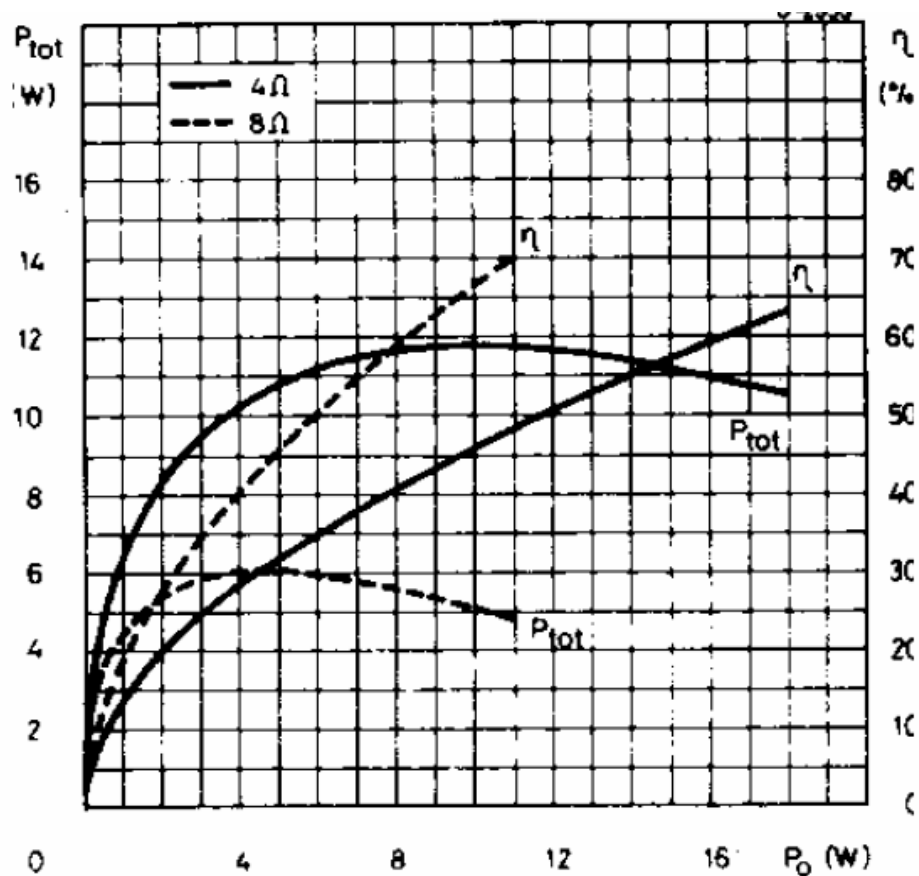


Obr.23 Graf výstupního výkonu v závislosti na napájecím napětí [5]

Při napájení nižším napětím, dochází ke zvyšování zkreslení. Už při 14V je zkreslení 10%. Maximální napájecí napětí je 36V.

Chlazení ztrátového výkonu

Důležité pro návrh je správně odhadnout chladiče pro operační zesilovač. Na Obr.24 je graf závislosti ztrátového výkonu na výstupním výkonu zesilovače. Je vidět, že maximální ztrátový výkon při výstupním výkonu 4W je 11W. [5]



Obr.24 Závislost ztrátového výkonu na výstupním výkonu zesilovače a závislost účinnosti na výstupním výkonu zesilovače [5]

Tepelný odpor chladiče spočítáme podle vztahu (9)

$$\vartheta_s - \vartheta_{okoli} = P \cdot (R_{THpouzdra} + R_{THchladiče} + R_{THpřechodu}) \quad (9)[3]$$

$$\frac{\vartheta_s - \vartheta_{okoli}}{P} - R_{THpouzdra} - R_{THpřechodu} = R_{THchladiče} [^{\circ}C/W]$$

Kde

ϑ_s - je maximální povolená teplota součástky (150°C), v datasheetu

ϑ_{okoli} - je teplota okolí (45°C), domluvená konstanta

P – průchozí tepelný výkon (max 11W), z grafu

$R_{THpouzdra}$ - tepelný odpor pouzdra (3 °C/W), v datasheetu

$R_{THchladiče}$ - tepelný odpor chladiče

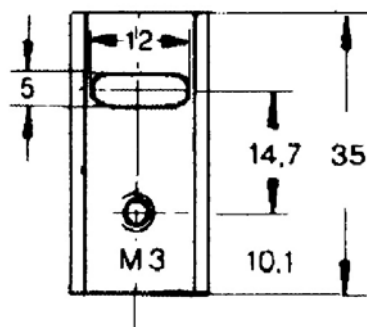
$R_{THpřechodu}$ - tepelný odpor přechodu (0,35), tab.12

Tepelný odpor mezi pouzdrem a chladičem závisí na způsobu montáže součástky na chladič. Velmi důležité jsou dokonalé stykové plochy bez ohybů a vrypů. Přítlačná síla musí být stálá i při změně teploty. Tepelný odpor lze snížit použitím vhodné pasty, nejčastěji silikonové vazelíny. [3]

Tab.12 Přehled tepelných odporů mezi pouzdrem a chladičem [3]

Přímá montáž na chladič leštěný styk	0,2 až 0,3 °C/W
Přímá montáž, leštěný styk, silikonová vazelína	0,1 až 0,2 °C/W
Slídová podložka 5um, silikonová vazelína	0,4 °C/W
Slídová podložka 50um, silikonová vazelína	1,0 °C/W
Elox 40um, silikonová vazelína	0,35 °C/W

Po dosazení do vztahu (30) pro výpočet tepelného odporu chladiče vyjde 6,2°C/W. Vybraný chladič na obr. 25 má tepelný odpor 3,5 °C/W a plně postačuje chlazení operačního zesilovače.



Obr.25 Chladič V5616x [10]

Odebíraný proud

Další důležitý parametr, který je třeba znát pro návrh zdroje je odebíraný výkon (proud) ze zdroje. Z grafu na obr.24 lze odečíst jaký celkový výkon je potřeba dodat do zesilovače pro daný výstupní výkon. Pro výstupní výkon 4W je celkový výkon 15W. Jak již víme z grafu na obr. 23, pro 4W výstupního výkonu je zapotřebí napájecí napětí 16V. Z toho vyplývá, že odebíraný proud je zhruba 0,94A. Při dalším zvyšování napájecího napětí, proudový odběr klesá.

Citlivost zesilovače

Citlivostí zesilovače se v tomto případě rozumí nastavení záporné zpětné vazby operačního zesilovače. Výstupní výkon je 4W do zátěže 4Ω. Podle vztahu (10) se spočítá potřebné efektivní napětí na zátěži:

$$P = \frac{u^2}{R} [W] \quad (10)$$

$$u = \sqrt{P \cdot R} = \sqrt{4 \cdot 4} = 4V$$

Maximální napěťový rozkmit je:

$$u_{ss} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot u_{ef} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 4 = 11,3V \quad (11)$$

Dále je třeba znát maximální napětí na vstupu zesilovače, které je dáno zapojením R2R sítě (příloha A obr.3) a potenciometrem R6, vliv R20 spolu s C10 se zanedbává. (obr.20) Spočítá se podle vztahu (12). Skutečná hodnota se však spočítané jen přibližuje.

$$U_{vstup} = \frac{2}{3} \cdot U_p = \frac{2}{3} \cdot 5 = 3,3V \quad (12)$$

Podle vztahu (13) pro výpočet zpětné vazby operačního zesilovače, je vypočítán odpor R11, který lze nalézt v elektrickém schéma na obr.20.

$$\frac{U_{výst}}{U_{vstp}} = 1 + \frac{R11}{R18} \quad (13)$$

$$R11 = \left(\frac{U_{výst}}{U_{vstp}} - 1 \right) \cdot R18 = \left(\frac{11,3}{3,3} - 1 \right) \cdot 4,7 \cdot 10^3 = 11394\Omega$$

Po zaokrouhlení je odpor vybrán z normalizované řady rezistorů s hodnotou $R11 = 12k\Omega$. Dále je třeba nastavit dolní mezní kmitočet zesilovače, který je stanoven na 15Hz. Dolní mezní kmitočet je nastaven pomocí součástek R18 a C9. Rezistorem R18 je už dáno zesílení, proto je spočítána hodnota C9 podle vztahu (14).

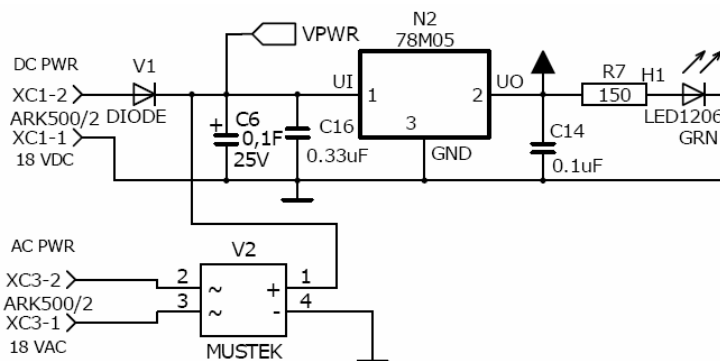
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi \cdot R18 \cdot C9} [Hz]$$

$$C9 = \frac{1}{2\pi \cdot R18 \cdot f_0} = \frac{1}{2\pi \cdot 4,7 \cdot 10^3 \cdot 15} = 2,26\mu F \quad (14)$$

Z normalizované řady kondenzátorů byla vybrána hodnota 2,2 μ F.

7.5 Napájecí zdroj

Aby mohly jednotlivé bloky správně pracovat, potřebují také správné napájení. Schéma napájecího zdroje pro generátor je na obr.26.



Obr.26 Schéma napájecího zdroje

Je možno napájet generátor ze střídavého nebo i stejnosměrného napětí. Zdroj dodává dvě stejnosměrná napájecí napětí. Vyfiltrované nestabilizované napětí pro nízkofrekvenční zesilovač a stabilizovaných 5V pro napájení všech ostatních obvodů generátoru.

Chlazení ztrátového výkonu

Součet proudů všech integrovaných obvodů bez nízkofrekvenčního zesilovače a s led diodou je 50mA. To znamená, že odebíraný proud ze 7805 nikdy nepřesáhne 100mA. Maximální napětí, které se smí přivést na vstup stabilizátoru je 35V. Ztrátový výkon je tedy:

$$P = (U_{\max} - U_{\text{stab}}) \cdot I_{\text{stab}} = (35 - 5) \cdot 100^{-3} = 3 \text{ W}$$

Hodnoty potřebné pro výpočet chladiče:

ϑ_s - (150°C), v datacheetu

$\vartheta_{\text{okolí}}$ - (45°C), domluvená konstanta

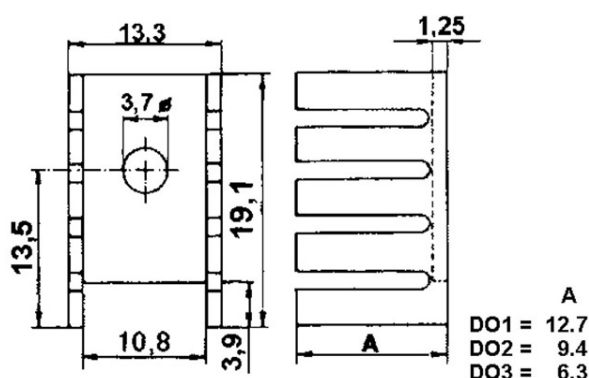
P – průchozí tepelný výkon (max 3W)

$R_{\text{THpouzdra}}$ - tepelný odpor pouzdra TO-220 (5 °C/W), v datasheetu

$R_{\text{THpřechodu}}$ - tepelný odpor přechodu (0,35), tab.12

Z těchto hodnot se tedy opět spočítá potřebný chladič. Po dosazení do vztahu (9) pro výpočet chladiče, vyjde tepelný odpor chladiče 29,6°C/W.

Vybraný chladič obr.27 má tepelný odpor 25°C/W a plně postačuje chlazení stabilizátoru



Obr.27 Chladič DO3A [3]

Maximální napájecí napětí generátoru

Maximální stejnosměrné napětí, které se může přivést na vstup svorek pro stejnosměrné napájení (DC PWR) je 35,7V, protože úbytek napětí na diodě je 0,7V a maximální napětí stabilizátoru je 35V. Maximální napětí nízkofrekvenčního zesilovače je vyšší, proto se v návrhu neuplatňuje. Nejvyšší střídavé napájecí napětí je 25,7V, spočítáno podle vztahu (15)

$$u_{ef} = \frac{U_{\max} + U_D}{\sqrt{2}} = \frac{35 + 1,4}{\sqrt{2}} = 25,7V \quad (15)$$

Počítá se s úbytkem napětí na diodách můstku, který je 1,4V.

Minimální napájecí napětí generátoru

Minimální napájecí napětí generátoru určuje nízkofrekvenční zesilovač, který potřebuje napětí od 16V. Pro stejnosměrné napájení je třeba ještě přičíst úbytek na diodě V1, který je zhruba 0,7V. Minimální stejnosměrné napětí, kterým lze napájet generátor je tedy 16,7V.

U minimálního střídavého napětí je třeba zohlednit zvlnění na filtračním kondenzátoru C6 (obr.26), které se spočítá podle vztahu (16).

$$C6 \cdot \Delta U = (I_{zes} + I_{IO}) \cdot t_p \quad (16)$$

$$\Delta U = \frac{(I_{zes} + I_{IO}) \cdot t_p}{C6} = \frac{(1 + 0,1) \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{0,1} = 1,1V$$

Kde:

C6 – kapacita filtračního kondenzátoru (100mF)

ΔU - napětí zvlnění

I – odebíraný proud (1,1A)

t_p - perioda (10mS - dvoucestné usměrnění)

Minimální efektivní napětí se spočítá podle vztahu (17)

$$u_{ef} = \frac{U_{min} + \Delta U + U_D}{\sqrt{2}} = \frac{16 + 1,1 + 1,4}{\sqrt{2}} = 13,1V \quad (17)$$

Kde:

U_{min} - minimální stejnosměrné napětí, v tomto případě 16, určuje nf zesilovač

ΔU – napětí zvlnění na filtračním kondenzátoru

U_D – úbytek napětí na diodách můstku

V tab.13 je přehled zaokrouhlených hodnot napájecích napětí generátoru.

Tab.13 Přehled zaokrouhlených napájecích napětí

	DC	AC
U_{min} [V]	17	14
U_{max} [V]	35	25

8 Závěr

Na závěr je potřeba porovnat zadané požadavky na generátor a výsledné vlastnosti navrženého generátoru. Pomocí 4 tlačítek, LCD displeje a vhodného programu do uP je splněna podmínka přehledného menu, nebo-li pohybu mezi tóny a oktávami. Pro přiblížení funkce menu je součástí přílohy E uživatelský vývojový diagram.

Další důležitá podmínka je přesnost generovaného tónu. V tab.11 je porovnání kmitočtů generátoru s kmitočty vycházejícími z temperovaného ladění. Přesnost je udávána na 10^{-2} Hz. Je vidět, že jsou totožné. Výjimku tvoří tóny „ais“ a „h“, které se liší o 10^{-2} Hz.. Díky obvodu LMX2335 je tedy možné docílit vysoké přesnosti generovaných kmitočtů, která závisí jen na stabilitě referenčního zdroje kmitočtu. Dalším požadavkem v zadání bylo minimální výkonové zesílení 4W do zátěže 4Ω . Nízkofrekvenční zesilovač je nastaven tak, že maximálně dodá výkon 4W do zátěže 4Ω , i když by mohl dodat větší výkon. Důvodem je minimální napájecí napětí generátoru.

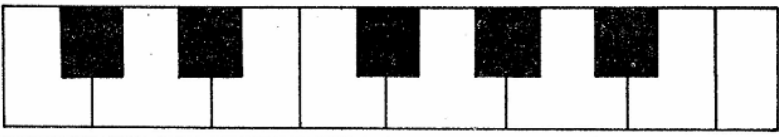
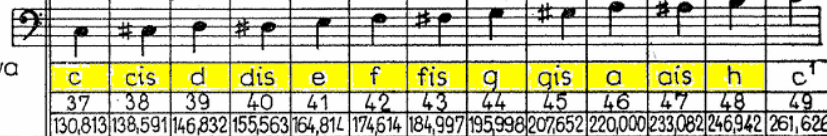
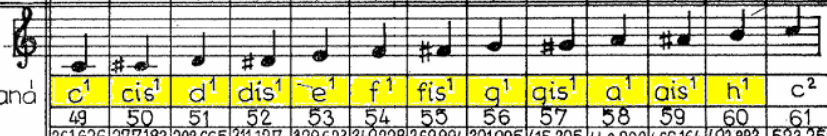
Posledním požadavkem je maximální zkreslení výstupního signálu, které by nemělo přesáhnout 10%. Na celkovém zkreslení se podílí například zkreslení od nízkofrekvenčního zesilovače nebo kvantizační zkreslení. Ty jsou však zanedbatelné vůči největší tvarové odchylce od sinusového signálu, způsobené malým počet vzorků. V kapitole 6.2 je spočítána procentuelní velikost výkonu chybového signálu vztaženého k výkonu sinusového signálu, která je 19,5%.

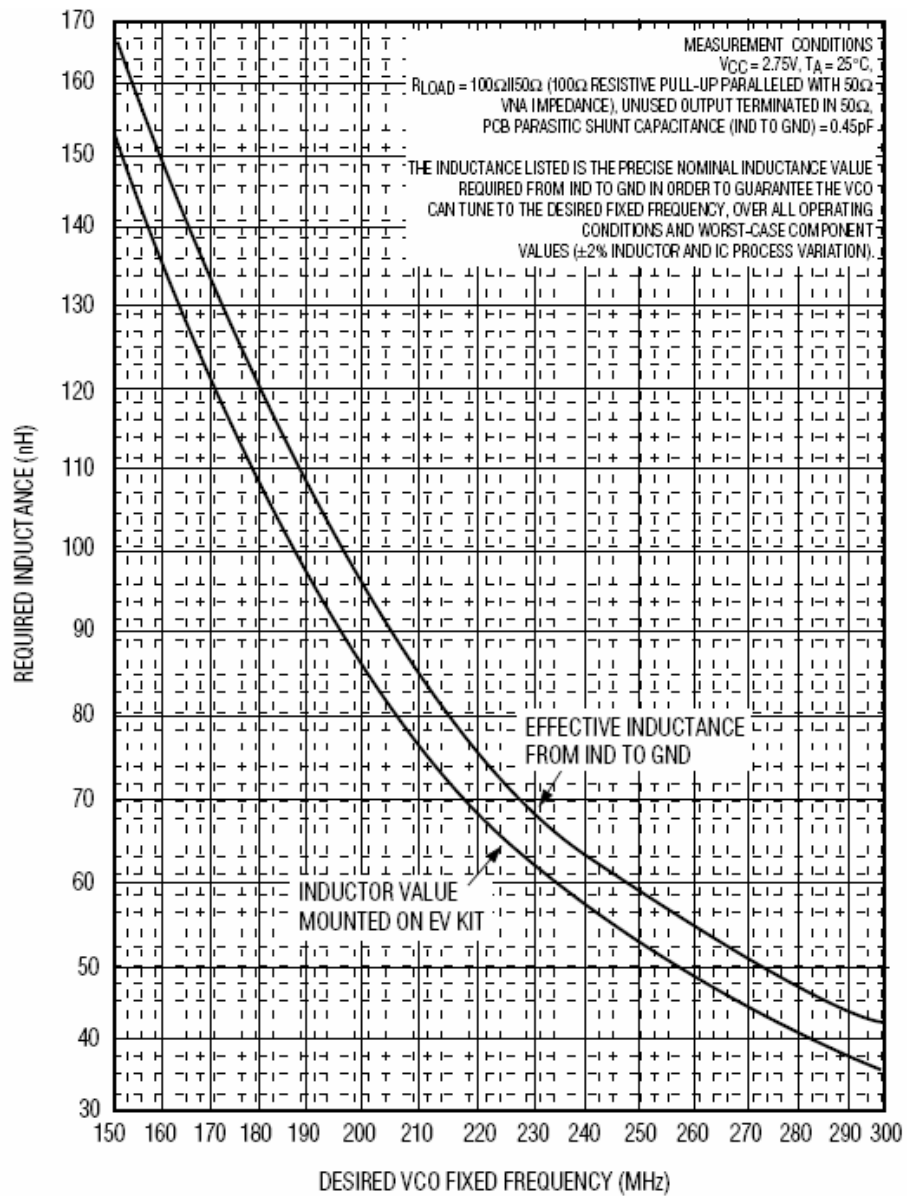
Použitá literatura

- [1] Sýkora, R., Včelař, J. *Elektronické hudební nástroje a jejich obvody*. Praha: SNTL, 1981
- [2] *Wikipedie:Ladění* [online]. 2006 [cit. 2007-23-08]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Ladění>
- [3] SOUE Plzeň: *Napáječe, stabilizátory, usměrňovače, násobiče* [online]. 2002 [cit. 2007-01-08]. Dostupný z WWW: http://www.edunet.souep1.cz/~weisz/dilna/ens2/t8/t2_8_2_0.php?tisk=yes
- [4] ST. *Datasheet L7400* [online]. [cit. 2007-01-08]. Dostupný z WWW: <http://www.ges.cz>
- [5] ST. *Datasheet TDA2030* [online]. [cit. 2007-01-08]. Dostupný z WWW: <http://www.ges.cz>
- [6] GES Electronics. *Sortiment* [online]. [cit. 2007-01-08]. Dostupný z WWW: <http://www.ges.cz>
- [7] Maxim. *Datasheet MAX2605 – MAX26009* [online]. [cit. 2007-01-08]. Dostupný z WWW: www.maxim-ic.com
- [8] Atmel. *Datasheet AVR ATmega32* [online]. [cit. 2007-01-08]. Dostupný z WWW: www.atmel.com
- [9] National Semikonduktor. *Datasheet LMX2335/ LMX2336/ LMX2337* [online]. [cit. 2007-01-08]. Dostupný z WWW: www.national.com
- [10] GM Electronic. *Chladiče* [online]. [cit. 2007-01-08]. Dostupný z WWW: <http://www.gme.cz>

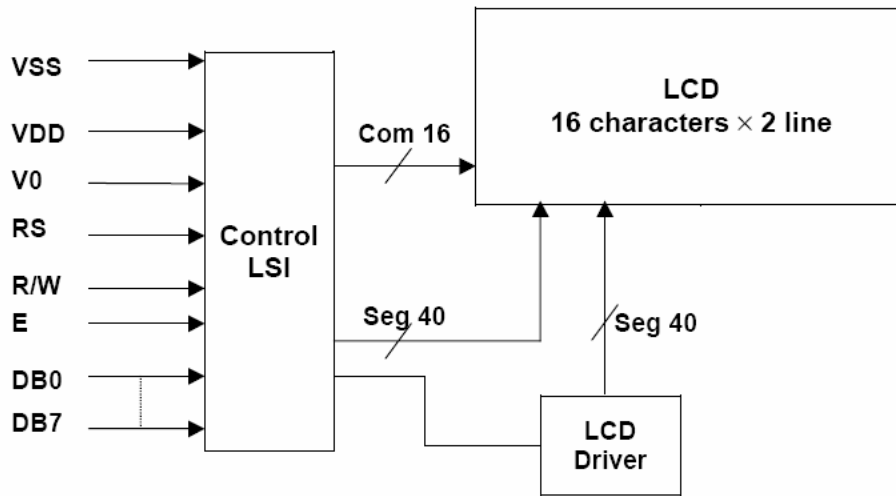
Příloha A

Tab.1 Základní vztahy a kmitočty všech tónů v rovnoměrně temperovaném ladění

1	kaviatura															
2a	název tónu	#	c	cis	d	dis	e	f	fis	g	gis	a	ais	h	c	
2b		b	c	des	d	es	e	f	ges	g	as	a	hes	h	c	
3	intervál (k primě)		čista prima	malá sekunda	velká sekunda	malá tercie	velká tercie	kvarta	čista kvarta	zvětšená kvarta	čista kvinta	malá sexta	velká sexta	malá septima	velká septima	čista oktáva
4a	půltóny (1/2)			1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
4b	celé tóny (1/1)															
4c	půltóny (centy)		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
5a	kmitočtové	q^0	q^1	q^2	q^3	q^4	q^5	q^6	q^7	q^8	q^9	q^{10}	q^{11}	q^{12}		
5b	intervaly (k primě)	q^n	$\sqrt[12]{2^0}$	$\sqrt[12]{2^1}$	$\sqrt[12]{2^2}$	$\sqrt[12]{2^3}$	$\sqrt[12]{2^4}$	$\sqrt[12]{2^5}$	$\sqrt[12]{2^6}$	$\sqrt[12]{2^7}$	$\sqrt[12]{2^8}$	$\sqrt[12]{2^9}$	$\sqrt[12]{2^{10}}$	$\sqrt[12]{2^{11}}$	$\sqrt[12]{2^{12}}$	
5c	centy (k primě)	q^n	1000000	105946	112246	118921	125992	133484	141421	149831	158740	168179	178180	188775	2000000	
5d	centy (k primě)		0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	
6	půltónový krok		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
7a	subkontraoktáva		C ₂	Cis ₂	D ₂	Dis ₂	E ₂	F ₂	Fis ₂	G ₂	gis ₂	A ₂	Ais ₂	H ₂	C ₁	
7b			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
7c			16,3516	17,3239	18,3540	19,4454	20,6017	21,8268	23,1247	24,4997	25,9569	27,5000	29,1352	30,8677	32,7032	
8a	kontraoktáva		C ₁	Cis ₁	D ₁	Dis ₁	E ₁	F ₁	Fis ₁	G ₁	gis ₁	A ₁	Ais ₁	H ₁	C	
8b			13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
8c			32,7032	34,6478	36,7081	38,8909	41,2031	43,6535	46,2493	48,9994	51,9131	55,0000	58,2705	61,7354	65,4064	
9a	velká oktáva		C	Cis	D	Dis	E	F	Fis	G	gis	A	Ais	H	c	
9b			25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	
9c			65,4064	69,2957	73,4162	77,7817	82,4063	87,3071	92,4986	97,9989	103,826	110,000	116,541	123,471	130,813	
10	malá oktáva		c	cis	d	dis	e	f	fis	g	gis	a	ais	h	c ¹	
10a			37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	
10b			130,813	138,591	146,832	155,563	164,814	174,614	184,997	195,998	207,652	220,000	233,082	246,942	261,626	
11	jednočárková oktáva		c ¹	cis ¹	d ¹	dis ¹	e ¹	f ¹	fis ¹	g ¹	gis ¹	a ¹	ais ¹	h ¹	c ²	
11a			49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	
11b			261,626	277,183	293,665	311,127	329,623	349,228	369,994	391,995	415,305	440,000	466,164	493,883	523,251	
12a	dvoučárková oktáva		c ²	cis ²	d ²	dis ²	e ²	f ²	fis ²	g ²	gis ²	a ²	ais ²	h ²	c ³	
12b			61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	
12c			523,251	554,365	587,330	622,254	659,255	698,456	739,989	783,991	830,609	880,000	932,328	987,767	1046,50	
13a	tříčárková oktáva		c ³	cis ³	d ³	dis ³	e ³	f ³	fis ³	g ³	gis ³	a ³	ais ³	h ³	c ⁴	
13b			73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	
13c			1046,50	1108,73	1174,66	1244,51	1318,51	1396,91	1479,98	1568,98	1661,22	1760,00	1864,66	1975,53	2093,00	
14a	čtyřčárková oktáva		c ⁴	cis ⁴	d ⁴	dis ⁴	e ⁴	f ⁴	fis ⁴	g ⁴	gis ⁴	a ⁴	ais ⁴	h ⁴	c ⁵	
14b			85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	
14c			2093,00	2217,46	2349,32	2489,02	2637,02	2793,83	2959,86	3135,96	3322,44	3520,00	3729,31	3951,07	4186,01	
15a	pětičárková oktáva		c ⁵	cis ⁵	d ⁵	dis ⁵	e ⁵	f ⁵	fis ⁵	g ⁵	gis ⁵	a ⁵	ais ⁵	h ⁵	c ⁶	
15b			97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	
15c			4186,01	4434,92	4698,64	4978,03	5274,04	5587,65	5919,91	6271,93	6644,88	7040,00	7458,62	7902,13	8372,02	
16a	šesticárková oktáva		c ⁶	cis ⁶	d ⁶	dis ⁶	e ⁶	f ⁶	fis ⁶	g ⁶	gis ⁶	a ⁶	ais ⁶	h ⁶	c ⁷	
16b			109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	
16c			8372,02	8869,84	9397,27	9956,06	10548,81	11175,3	11839,8	12543,9	13289,8	14080,0	14917,2	15804,3	16744,0	



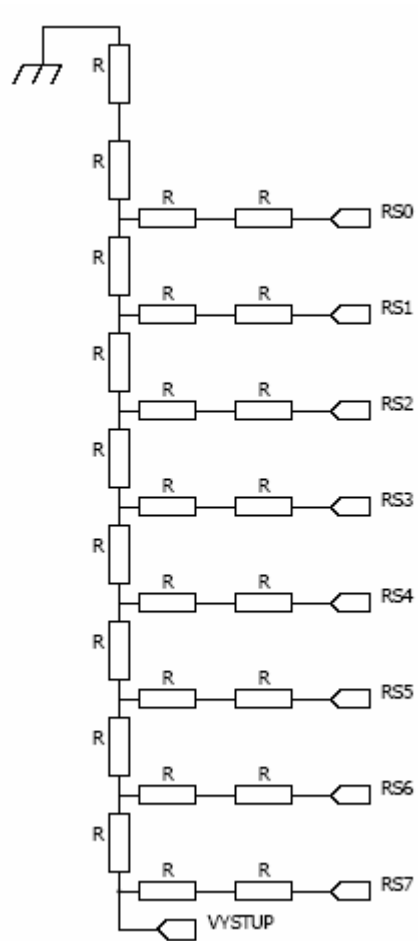
Obr.1 Zjištění přibližné indukce pro správnou funkci VCO



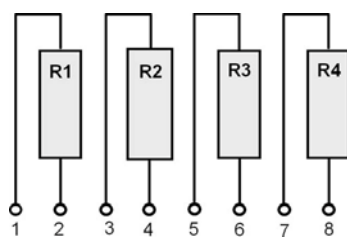
Obr.2 Blokové schéma mc2002e

Tab.2 Popis vývodů LCD

No.	Symbol	Function
1	VSS	Ground, 0V
2	VDD	Logic power supply, +5V
3	V0	Voltage for LCD drive
4	RS	Data / Instruction register select
5	R/W	Read / Write
6	E	Enable signal, start data read/write
7	DB0	Data Bus Line
8	DB1	
9	DB2	
10	DB3	
11	DB4	
12	DB5	
13	DB6	
14	DB7	
15	LED A	LED Anode, power supply +
16	LED K	LED Cathode, ground 0V



Obr.3 D/A převodník, R2R síť



Obr.4 Zapojení vývodů LC8002

Tabulky nastavení děličů

tón c	R1 – R15 (LSB první)		
RF2 R counter	3		
RF1 R counter	1000		
	N1–N7 (LSB první) A	N8–N18 (LSB první) B	N19
RF2 N counter	12	53	1
RF1 N counter	77	355	1

tón cis	R1 – R15 (LSB první)		
RF2 R counter	3		
RF1 R counter	1000		
	N1–N7 (LSB první) A	N8–N18 (LSB první) B	N19
RF2 N counter	30	52	1
RF1 N counter	83	370	1

tón d	R1 – R15 (LSB první)		
RF2 R counter	3		
RF1 R counter	1000		
	N1–N7 (LSB první) A	N8–N18 (LSB první) B	N19
RF2 N counter	10	42	1
RF1 N counter	43	316	1

tón dis	R1 – R15 (LSB první)		
RF2 R counter	3		
RF1 R counter	1000		
	N1–N7 (LSB první) A	N8–N18 (LSB první) B	N19
RF2 N counter	29	40	1
RF1 N counter	51	320	1

tón e	R1 – R15 (LSB první)		
RF2 R counter	3		
RF1 R counter	1000		
	N1–N7 (LSB první) A	N8–N18 (LSB první) B	N19
RF2 N counter	3	38	1
RF1 N counter	110	320	1

tón f	R1 – R15 (LSB první)		
RF2 R counter	3		
RF1 R counter	1000		
	N1–N7 (LSB první) A	N8–N18 (LSB první) B	N19
RF2 N counter	34	40	1
RF1 N counter	126	359	1

tón fis	R1 – R15 (LSB první)		
RF2 R counter	3		
RF1 R counter	1000		
	N1–N7 (LSB první) A	N8–N18 (LSB první) B	N19
RF2 N counter	18	39	1
RF1 N counter	94	370	1

tón g	R1 – R15 (LSB první)		
RF2 R counter	3		
RF1 R counter	1000		
	N1–N7 (LSB první) A	N8–N18 (LSB první) B	N19
RF2 N counter	9	36	1
RF1 N counter	124	361	1

tón gis	R1 – R15 (LSB první)		
RF2 R counter	3		
RF1 R counter	1000		
	N1–N7 (LSB první) A	N8–N18 (LSB první) B	N19
RF2 N counter	18	34	1
RF1 N counter	125	362	1

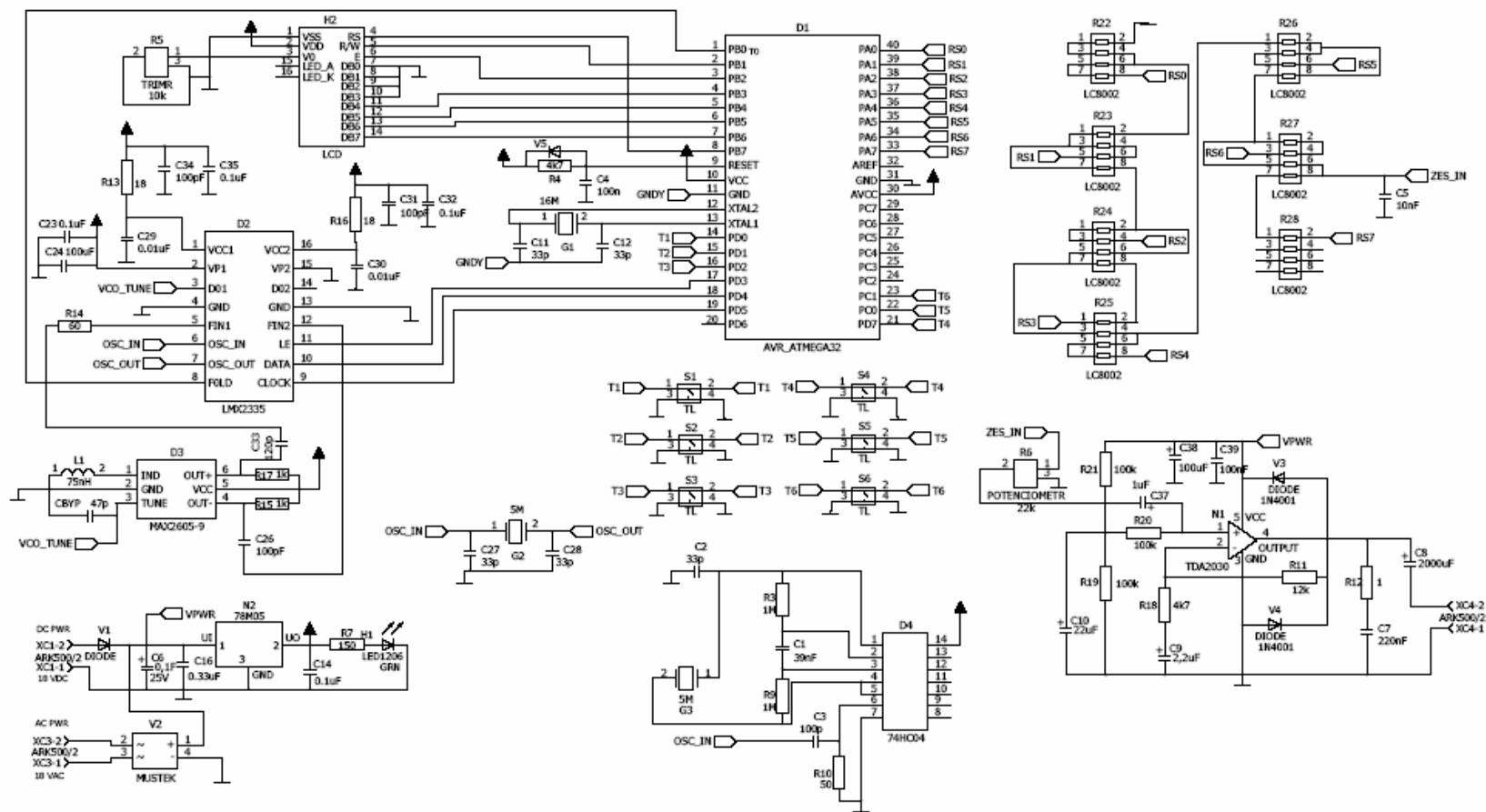
tón a	R1 – R15 (LSB první)		
RF2 R counter	3		
RF1 R counter	1000		
	N1–N7 (LSB první) A	N8–N18 (LSB první) B	N19
RF2 N counter	26	33	1
RF1 N counter	0	374	1

tón ais	R1 – R15 (LSB první)		
RF2 R counter	3		
RF1 R counter	1000		
	N1–N7 (LSB první) A	N8–N18 (LSB první) B	N19
RF2 N counter	25	26	1
RF1 N counter	78	312	1

tón h	R1 – R15 (LSB první)		
RF2 R counter	3		
RF1 R counter	1000		
	N1–N7 (LSB první) A	N8–N18 (LSB první) B	N19
RF2 N counter	28	28	1
RF1 N counter	100	356	1

Příloha C

Elektrické schéma generátoru

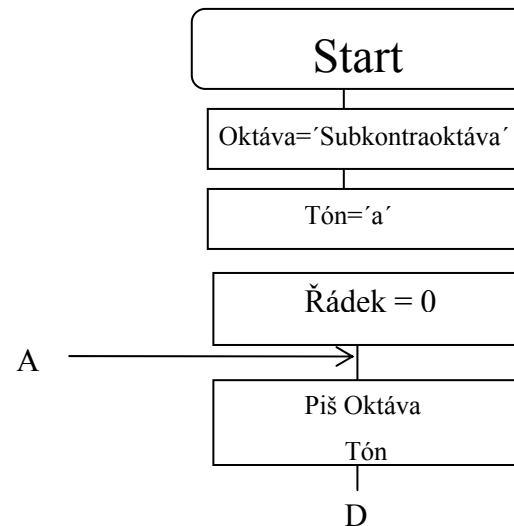


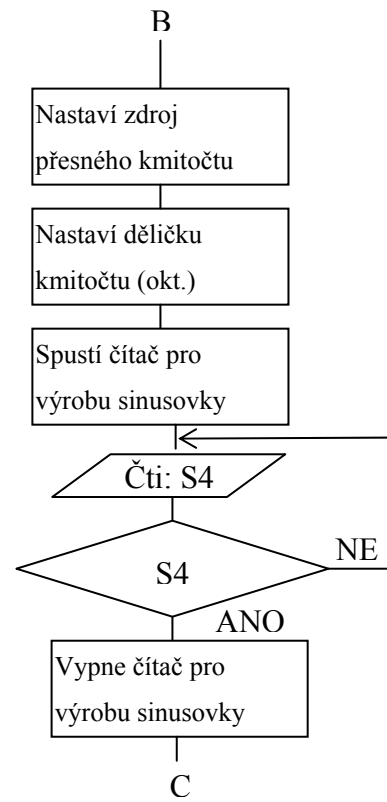
Programátorský vývojový diagram

Příloha D

Popis vývojového diagramu:

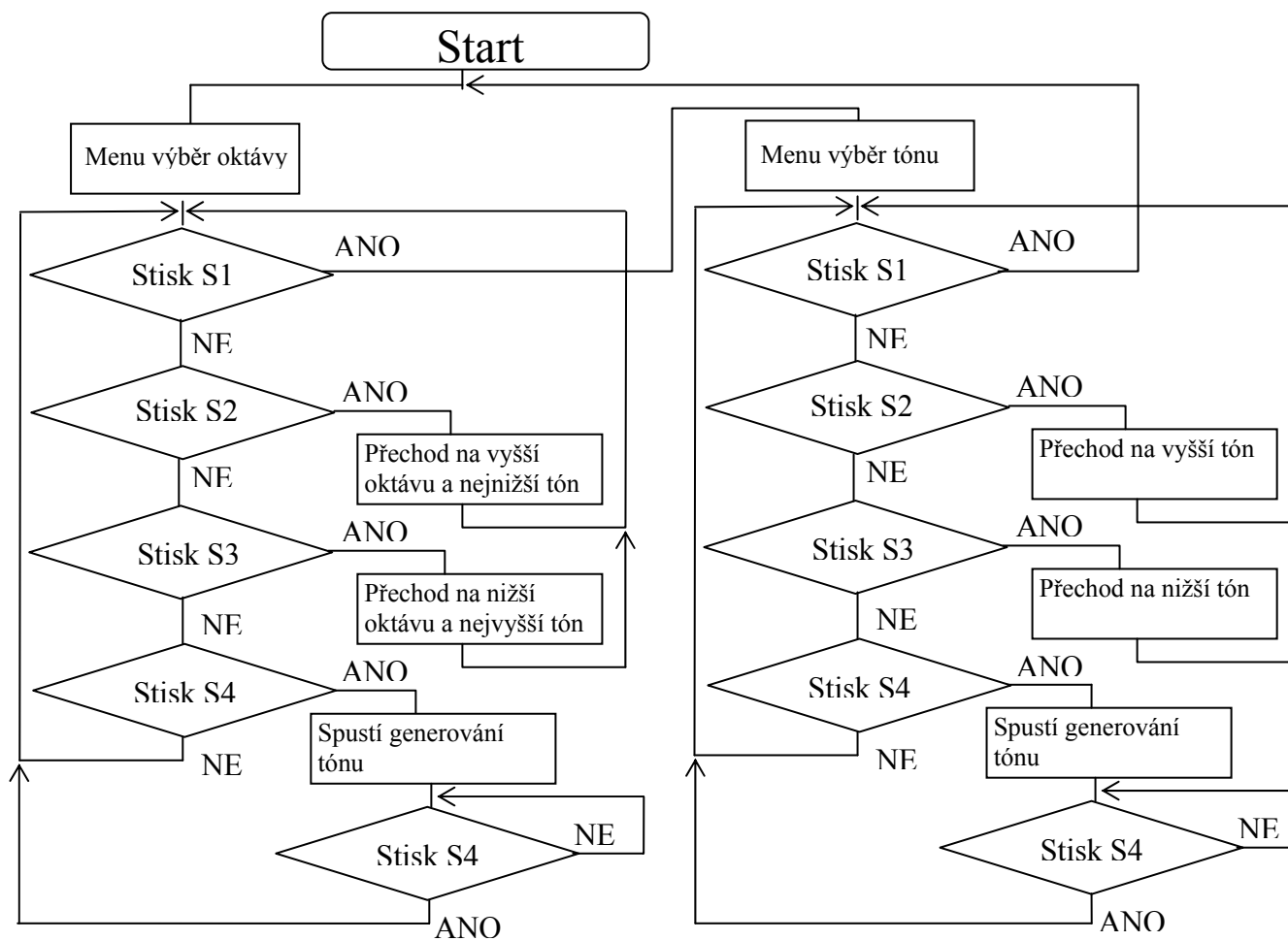
Po startu uP se uvedou jednotlivé proměnné do výchozího stavu. Oktáva se tedy nastaví na subkontra oktávu, tón se nastaví na A a proměnná řádek, která určuje co se bude měnit (oktáva nebo tón) se nastaví na 0 (tedy na horní řádek). Jak je vidět z vývojového diagramu jsou zapotřebí 4 tlačítka. Tlačítko S1 mění výběr z oktávy na tón a naopak. S2 a S3 slouží k pohybu mezi oktávami a nebo mezi tóny, podle toho co je zvoleno pomocí tlačítka S1. Při změně tónu mohou nastat 2 stavy. Přejít k vyšší oktávě, nastaví se nejnižší tón a oktáva se změní na vyšší sousední. Nebo přechod k nižší oktávě, nastaví se nejvyšší tón a oktáva se změní na nižší sousední. Při změně oktávy na vyšší se nastaví nejnižší tón a při změně oktávy na nižší se nastaví nejvyšší tón. Po stisku tlačítka S4 se spustí generování vybraného tónu. Tento tón bude generátor vyrábět po dobu, než se opět stiskne S4. Následně se program vrátí do menu nastavování tónu nebo oktávy, podle toho co je uloženo v proměnné řádek.





Uživatelský vývojový diagram

Příloha E



Údaje pro knihovnickou databázi

Název práce	Generátor signálu přesného kmitočtu
Autor práce	Jan Šafařík
Obor	Komunikační a mikroprocesorová technika
Rok obhajoby	2007
Vedoucí práce	Ing. Josef Marek, CSc
Anotace	Práce se zabývá popisem vlastností zvuku a ladění hudebních nástrojů. Praktická část se věnuje výběru vhodných komponent pro návrh generátoru, který bude generovat signál s přesným kmitočtem v rozsahu základní harmonické všech tónů kláves standardního pianina pro případ rovnoměrného ladění. Generátor bude mít možnost výběru požadované oktávy a tónu.
Klíčová slova	tón, ladění, ladička, ladění klavíru, generátor kmitočtu, zdroj přesného kmitočtu