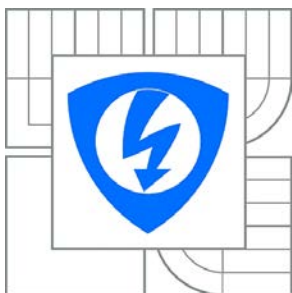




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

AUDIO SYNTETIZÉR V OBVODU FPGA

AUDIO SYNTHESIZER IN FPGA CHIP

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAKUB TOMKO

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MAREK BOHRN

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Jakub Tomko

ID: 125674

Ročník: 3

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Audio syntetizér v obvodu FPGA

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte možnosti digitální syntézy zvuku. Navrhněte a zrealizujte audio syntetizér s obvodem FPGA. Syntetizér bude pracovat na principu aditivní syntézy. Řízen bude pomocí klávesnice připojené přes rozhraní PS2. Syntetizér bude využívat vývojovou desku s obvodem FPGA Spartan-3, chybějící periferie budou realizovány na rozšiřující desce.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 31.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Marek Bohrn

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

Prezident oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva těchto osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení druhé části druhé hlavy VI. dílu 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Táto práca sa zaoberá metódami zvukovej syntézy. Opísané sú výhody a nevýhody použitia jednotlivých metód v hudobných syntetizátoroch. Na základe analýzy zvuku klavíra bola vybraná najvhodnejšia metóda pre návrh syntetizátora. Syntetizátor bol implementovaný do obvodu FPGA vývojovej dosky s obvodom Spartan-3.

Abstract

This thesis analyses methods of sound synthesis. Advantages and disadvantages of application of individual methods in music synthesizers are evaluated. Based on piano sound analysis, the suitable method for synthesizer's design is chosen. Synthesizer has been implemented in FPGA of Spartan-3 Development Board.

Kľúčové slová

syntéza zvuku, spektrum, klavír, syntetizátor, obálka zvuku, DA prevodník, flash pamäť, VHDL, FPGA, Spartan-3

Keywords

sound synthesis, spectrum, piano, synthesizer, envelope, DA converter, flash memory, VHDL, FPGA, Spartan-3

Bibliografická citácia

TOMKO, J. *Audio syntetizér v obvodech FPGA*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 56 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marek Bohrn.

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Vyhlasujem, že som túto vysokoškolskú kvalifikačnú prácu vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce, s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry. Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, predovšetkým som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a následujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávnych dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia § 152 trestného zákona č. 140/1961 Sb.

V Brne dňa 30. 5. 2012

.....

PodĎakovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Bohrnovi za pomoc a prínosné rady pri vypracovávaní práce. Taktiež mu ďakujem za čas venovaný konzultáciám.

Obsah

Úvod	8
1 Tón klavíra	9
1.1 Obálka zvuku	9
1.2 Zvuk klavíra	11
2 Metódy zvukovej syntézy	15
2.1 Aditívna syntéza	15
2.2 Walshova funkčná syntéza	16
2.3 Subtraktívna syntéza	16
2.4 Granulačná syntéza	17
2.5 Modulačná syntéza	18
2.5.1 AM syntéza	18
2.5.2 RM syntéza	18
2.5.3 FM syntéza	19
2.6 Tabuľková syntéza	20
2.7 Sampling	21
2.8 Syntéza fyzikálnym modelovaním	22
3 Výber metódy syntézy	23
4 Realizácia syntetizátora v obvode FPGA	27
4.1 Vývojový kit Spartan-3	29
4.2 Vzorok harmonických frekvencií tónov	30
4.3 Signálové toky syntetizátora	30
4.4 Generovanie hodinových signálov	31
4.5 Klávesnica PS/2	32
4.6 Syntéza tónov	34
4.7 Generátor obálky zvuku	36
4.8 Riadiaca logika komunikácie obvodu FPGA s flash pamäťou	38
4.9 Prenos dát medzi obvodom FPGA a flash pamäťou	41
4.9.1 Čítanie obsahu flash pamäte	41
4.9.2 Zápis dát a vymazávanie obsahu flash pamäte	44
4.10 Prenos dát medzi obvodom FPGA a DA prevodníkom	46
5 Rozširujúce periférie	48
5.1 Flash pamäť S25FL032K	49
5.2 Digitálno-analógový prevodník CS4334	49
6 Vyhodnotenie výsledkov	50
Záver	52
Literatúra	53
Zoznam veličín, symbolov a skratiek	55
Zoznam príloh	56

Zoznam obrázkov

obr. 1.1	Priebeh tónu C3	10
obr. 1.2	Priebeh obálky klavírneho tónu	10
obr. 1.3	Časový priebeh spektra tónu klavíra	11
obr. 1.4	Spektrum tónu A4 pri silnom údere kladivka	12
obr. 1.5	Spektrum tónu A4 pri slabom údere kladivka	12
obr. 1.6	Spektrum tónu C3	13
obr. 2.1	Aditívna syntéza.	15
obr. 2.2	Walshova funkčná syntéza	16
obr. 2.3	Granulačná syntéza	18
obr. 2.4	AM syntéza	19
obr. 2.5	Spektrum signálov FM syntézy	20
obr. 2.6	Proces tabuľkovej syntézy	21
obr. 3.1	Priebeh tónu A4, vytvorenom v programe Matlab	25
obr. 3.2	Priebeh tónu A4 skutočného klavíra	25
obr. 3.3	Závislosť maximálnej amplitúdy na rastúcom počte sčítaných tónov	26
obr. 4.1	Bloková schéma obvodu syntetizátora	28
obr. 4.2	Bloková schéma vývojového kitu Spartan-3	29
obr. 4.3	Diagram signálových tokov syntetizátora	31
obr. 4.4	Bloková schéma generátora hodinových signálov	31
obr. 4.5	Rozloženie kláves na klávesnici	32
obr. 4.6	Bloková schéma klávesnice	33
obr. 4.7	Bloková schéma syntézy tónu	35
obr. 4.8	Podoblasti obálky zvuku klavíra	37
obr. 4.9	Bloková schéma generátora obálky	37
obr. 4.10	Bloková schéma riadiacej logiky	39
obr. 4.11	Bloková schéma kontroléra adres.	40
obr. 4.12	Prenos dát pomocou zbernice SPI pre režim <i>Fast read</i>	42
obr. 4.13	Bloková schéma <i>r_SPI</i>	42
obr. 4.14	Stavový diagram bloku <i>r_SPI</i>	43
obr. 4.15	Bloková schéma bloku <i>Flash_filler</i>	44
obr. 4.16	Stavový diagram bloku <i>we_SPI</i>	46
obr. 4.17	Prenos dát pomocou zbernice I ² S	47
obr. 4.18	Bloková schéma <i>i2s</i>	47
obr. 5.1	Bloková schéma rozširujúcej dosky	48
obr. 5.2	Fotografia rozširujúcej dosky (vrchná strana)	48
obr. 6.1	Spektrum klavírneho tónu A4 a tónu A4 vytvorenom syntetizátorom	50
obr. 6.2	Priebeh syntetizovaného tónu A4	51
obr. B.1	Schéma zapojenia rozširujúcej dosky	58
obr. B.2	Predloha rozširujúcej dosky	59

Zoznam tabuliek

tab. 3.1	Základné frekvencie tónov 3., 4. a 5. oktávy	23
tab. 3.2	Veľkosť potrebnej pamäte pri použití aditívnej, FM a tabuľkovej syntézy	24
tab. 4.1	Vzorky harmonických frekvencií prepočítané do formátu Q0.15	30
tab. 4.2	Rozdelenie 21-bitovej adresy podľa oktávy tónu.	34
tab. 4.3	Amplitúdy podoblastí obálky zvuku	38
tab. 4.4	Prehľad stavov stavového automatu bloku <i>r_SPI</i>	43
tab. 4.5	Prehľad stavov stavového automatu bloku <i>we_SPI</i>	45
tab. 5.1	Prehľad frekvencií signálu <i>MCLK</i>	49
tab. A.1	Amplitúdy prvých 10 harmonických frekvencií tónov 3., 4. a 5. oktávy	57

Úvod

Hudba je súčasťou každodenného života a preto bolo len otázkou času, kým ľudia začali komponovať hudbu pomocou nových, nekonvenčných hudobných nástrojov. Prvé hudobné syntetizátory sa začali objavovať už začiatkom 20. storočia. Za zmienku stojí legendárny analógový syntetizátor Hammond Novachord, ktorý bol prvým komerčne predávaným syntetizátorom.

Skutočný zlom v hudobnej syntéze nastal s príchodom výpočtovej techniky. Na prelome 60. a 70. rokov 20. storočia sa začali vyrábať prenosné syntetizátory na čele so známym syntetizátorom Minimoog. V tomto období sa na hudobnej scéne objavili skladatelia, ako Francúz Jean Michel Jarre, ktorí komponovali svoje diela pomocou týchto novovyvíjaných hudobných nástrojov. Syntetizátory prešli od vtedy významným vývojom a stali sa nepostrádateľnou súčasťou hudobnej produkcie.

Zadaním bakalárskej práce je naštudovať metódy syntézy zvuku a na základe tejto štúdie navrhnuť syntetizátor, ktorý bude implementovaný do obvodu FPGA Spartan-3 na vývojovej doske od spoločnosti Digilent.

Práca je rozčlenená do dvoch častí. Prvá časť sa venuje teoretickým podkladom potrebným pre návrh syntetizátora a je zložená z troch kapitol. Prvá kapitola sa venuje analýze klavírneho tónu a jeho charakteristickým vlastnostiam. Druhá kapitola opisuje najčastejšie používané metódy syntézy zvuku. Tretia kapitola sa venuje výberu vhodnej metódy pre praktickú realizáciu syntetizátora.

Druhá časť práce opisuje praktickú realizáciu syntetizátora a je zložená z troch kapitol. Prvá kapitola opisuje návrh syntetizátora v jazyku VHDL. Druhá kapitola sa venuje doske s rozširujúcimi perifériami. V poslednej kapitole sú vyhodnotené výsledky praktickej realizácie syntetizátora.

1 Tón klavíra

Na úvod kapitoly je potrebné zdefinovať pojmy, ako je zvuk, tón a farba zvuku. Zvuk je mechanické vlnenie, ktorého frekvencia patrí do rozsahu počuteľného ľudským sluchom. Rozsah frekvencií vnímateľných ľudským sluchom je od 20 Hz do 20 kHz [14]. Za tón sa považuje zvuk so stálou frekvenciou.

V hudobnej terminológii sa používa sedem základných tónov (C, D, E, F, G, A a H) a päť poltónov (C#, D#, F#, G#, A#/B). Tóny a poltóny sú rozdelené do oktáv. Oktáva je interval medzi dvomi tónmi, z ktorých druhý má, buď polovičnú frekvenciu (tón je o oktávu nižší), alebo dvojnásobnú frekvenciu (tón je o oktávu vyšší) [15].

Tóny hudobných nástrojov obsahujú, okrem základnej, aj harmonické frekvencie tónu. Harmonické frekvencie sú celočíselné násobky základnej frekvencie tónu. V opačnom prípade, pokiaľ zvuk obsahuje aj neceločíselné násobky základnej frekvencie, nejde o tón, ale o šum [15].

Každý hudobný nástroj má svoju špecifickú farbu zvuku, ktorá je daná počtom harmonických frekvencií obsiahnutých v jeho tóne a ich hlasitosťou. Výsledná farba zvuku je ovplyvnená zmenami hlasitosti a počtu obsiahnutých harmonických frekvencií počas trvania tónu [15].

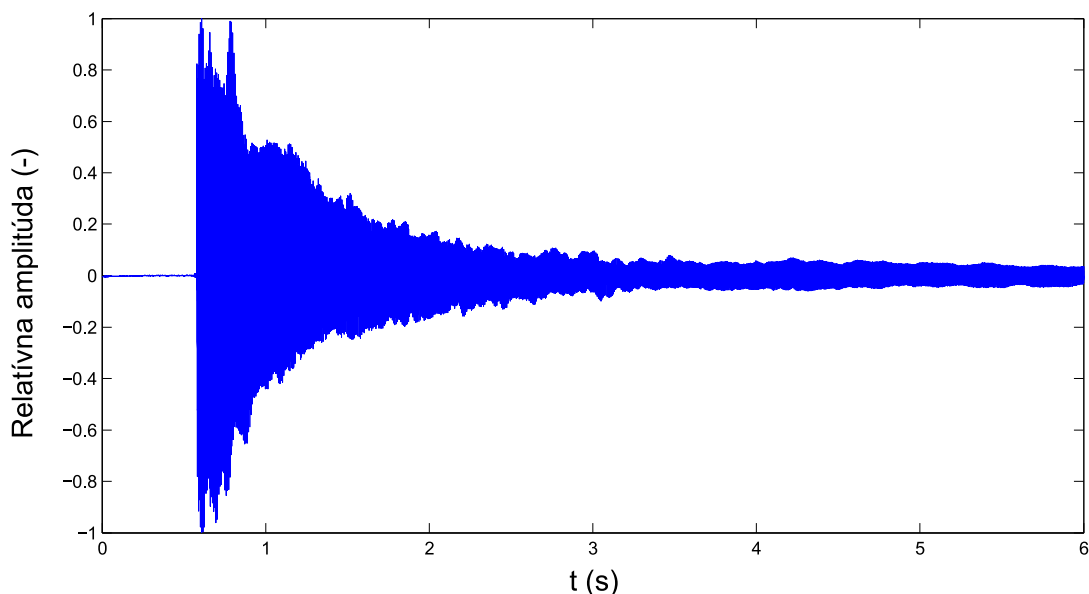
Rozsah klavíra zahŕňa sedem oktáv. Oktávam zodpovedá rozsah základných frekvencií tónu, čo predstavuje 32,7 až 4186,01 Hz [15]. Na jeho pokrytie sa používa 88 kláves klaviatúry. Tón vzniká rozozvučaním jednej až troch strún. Je ťažké určiť, pre ktoré tóny sa používa aký počet strún, keďže každý výrobca konštruje klavír iným spôsobom. V zásade platí, že menší počet strún prislúcha nízkym a väčší počet vysokým tónom. Viac strún zaistí hlasnejší nábeh tónu a jeho dlhšie doznievanie [9].

Úspešná realizácia syntézy klavírnych tónov je založená na správnom pochopení vzniku tónov v skutočnom klavíri. Analýzou vzoriek tónov je možné zistiť zloženie jednotlivých tónov, zmeny v ich vlastnostiach počas znenia tónu a ďalšie charakteristické črty, ktoré môžu viesť k zjednodušeniu realizovanej metódy syntézy zvuku.

1.1 Obálka zvuku

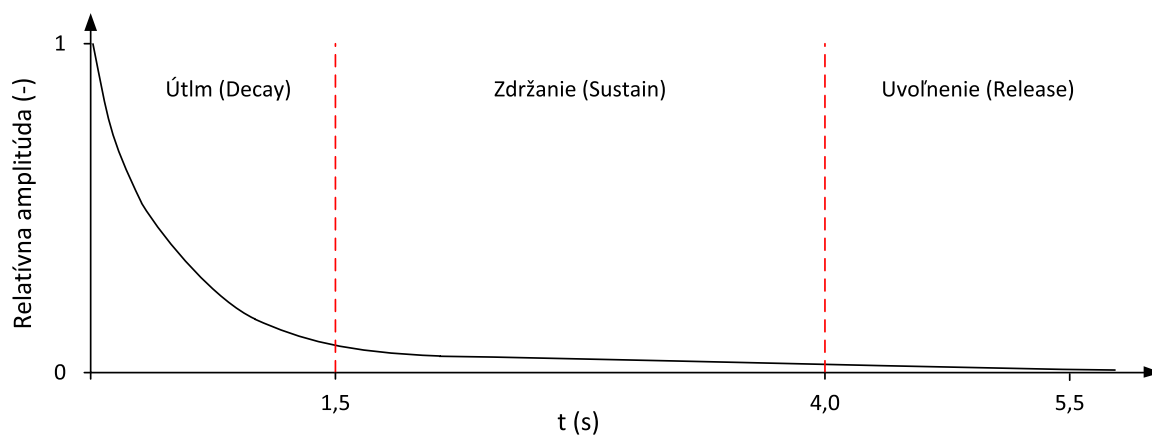
Pojem obálka zvuku bol vo zvukovej syntéze zavedený v snahe doceliť väčšiu podobnosť syntetického zvuku a zvuku skutočných hudobných nástrojov. Obálka zvuku opisuje zmeny hlasitosti zvuku počas jeho znenia. Základné rozdelenie priebehu obálky zvuku sa nazýva ADSR (Attack-Decay-Sustain-Release) a obsahuje štyri oblasti. Prvou je nábeh (attack) trvajúci

od začiatku znenia zvuku po jeho maximálnu hodnotu hlasitosti. Zmenu medzi maximálnou a ustálenou hodnotou hlasitosti opisuje oblasť útlmu (decay). Ustálená oblasť sa nazýva zdržanie (sustain). Spravidla býva najdlhšie trvajúcou časťou obálky zvuku a má konštantný (dychové nástroje), alebo mierne klesajúci priebeh (klavír). Poslednou oblasťou je uvoľnenie (release), kedy hlasitosť zvuku rýchlo klesá k nulovej hodnote [15].



obr. 1.1: Priebeh tónu C3

Oblasť nábehu trvá u klavíra okolo 7 ms, čo je podstatne kratší časový interval než v prípade oblasti útlmu (1,5 s), alebo oblasti zdržania (1,5 s a viac). Oblasť uvoľnenia klavíra klesá porovnateľne s oblasťou zdržania. Na obr. 1.1 je uvedený priebeh tónu C3 klavíra pri silnom údere na klávesu. V tomto prípade trvá oblasť útlmu 1,5 s. Zjednodušený priebeh obálky klavíra je uvedený na obr. 1.2 a neobsahuje oblasť nábehu.

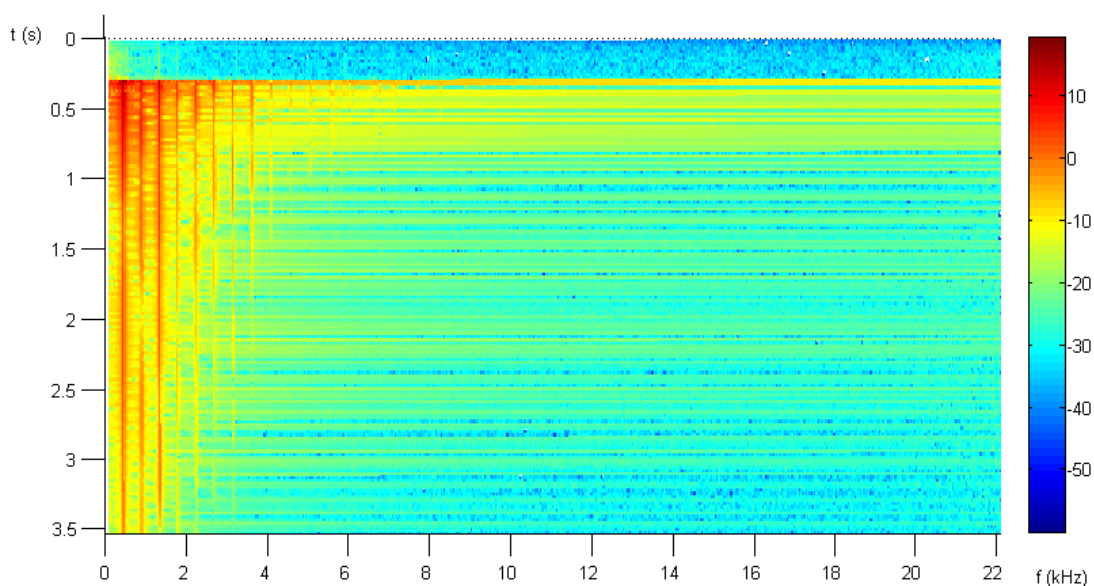


obr. 1.2: Priebeh obálky klavírneho tónu

K opisu zmien hlasitosti reálnych hudobných nástrojov nestačia len štyri oblasti. Preto sa tieto oblasti delia na menšie podoblasti, čím sa dosiahne vyššia presnosť zmien. Napr. v prípade známeho syntetizátora Yamaha DX7 sa na vznikajúci signál pri syntéze aplikuje obálka so siedmimi oblasťami [15].

1.2 Zvuk klavíra

Spektrálna analýza ukázala, že počet harmonických frekvencií obsiahnutých v tóne klavíra je počas jeho znenia rozdielny. Priebeh spektra „komorného A“ (tón A4, alebo A⁴) počas prvých štyroch sekúnd je znázornený na obr. 1.3. Maximálny počet harmonických frekvencií sa vyskytuje počas prvej sekundy tónu, čo zodpovedá oblasti nábehu a útlmu obálky tónu. Po uplynutí prvej sekundy sa počet zníži na šesť harmonických frekvencií vrátane základnej frekvencie.

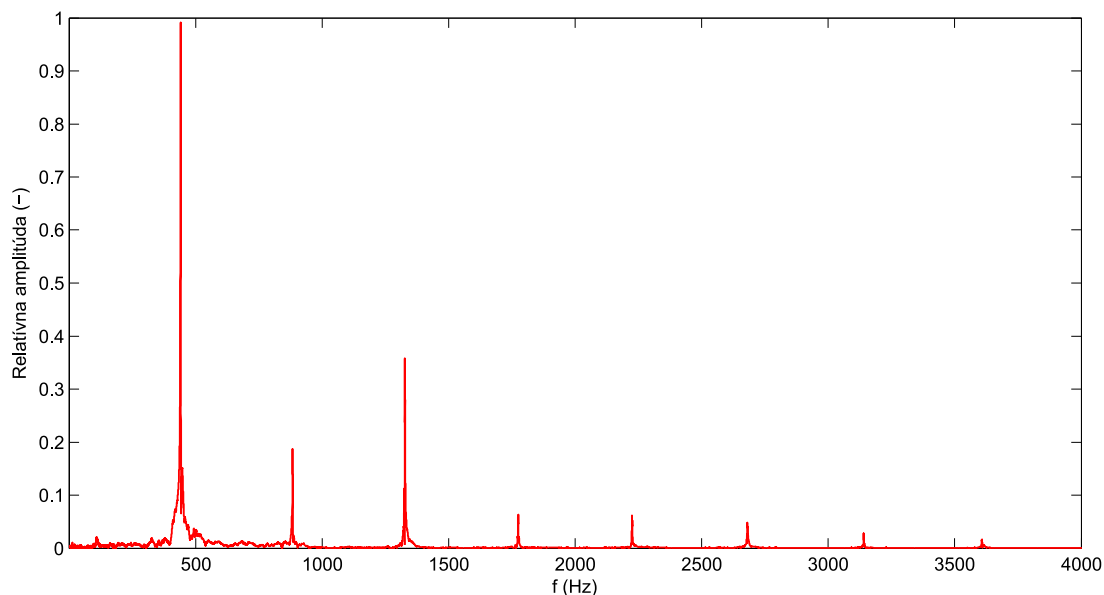


obr. 1.3: Časový priebeh spektra tónu klavíra

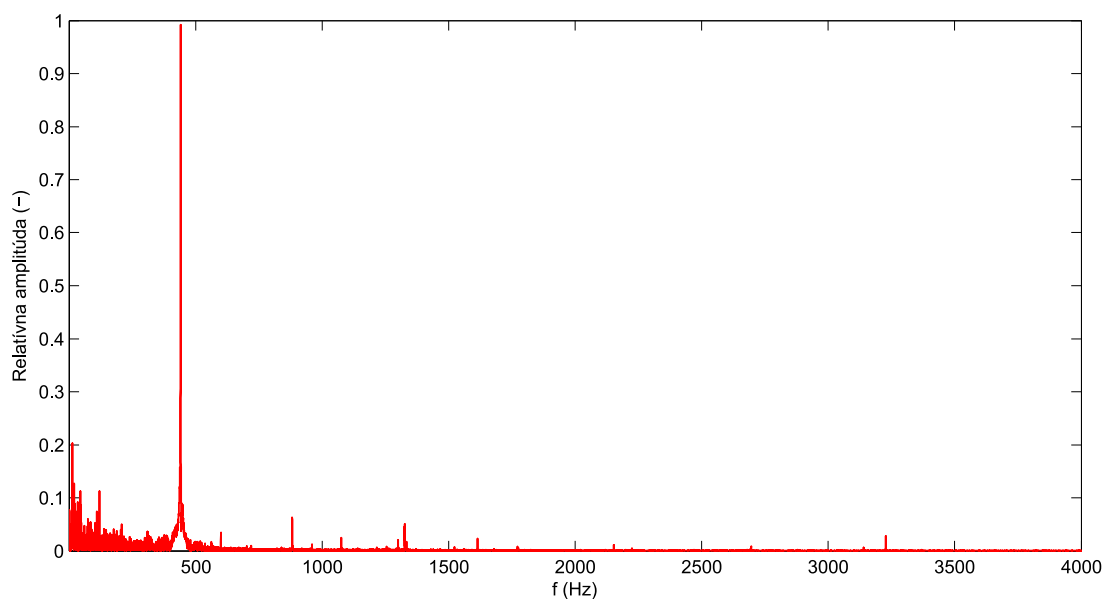
Spektrum tónu klavíra je ovplyvnené silou úderu kladivka na strunu. Pri údere sa v spektre tónu objavujú okrem základnej frekvencie a harmonických frekvencií aj parazitné frekvencie. Na obr. 1.4 je znázornené spektrum tónu A4 pri silnom údere kladivka, ktoré obsahuje okrem základnej aj sedem harmonických frekvencií. Spektrum tónu A4 pri slabom údere na strunu obsahuje okrem základnej len dve harmonické frekvencie s malou amplitúdou (obr. 1.5).

Parazitné frekvencie sú spôsobené silou samotného úderu, materiálom kladivka, rezonanciou okolitých strún ako aj rezonančnej skrine klavíra a pod. Práve tieto poznatky

využíva syntéza fyzikálneho modelovania (kap. 2.8). Okrem počtu je silou úderu ovplyvnená aj amplitúda jednotlivých frekvencií [16].



obr. 1.4: Spektrum tónu A4 pri silnom údere kladivka

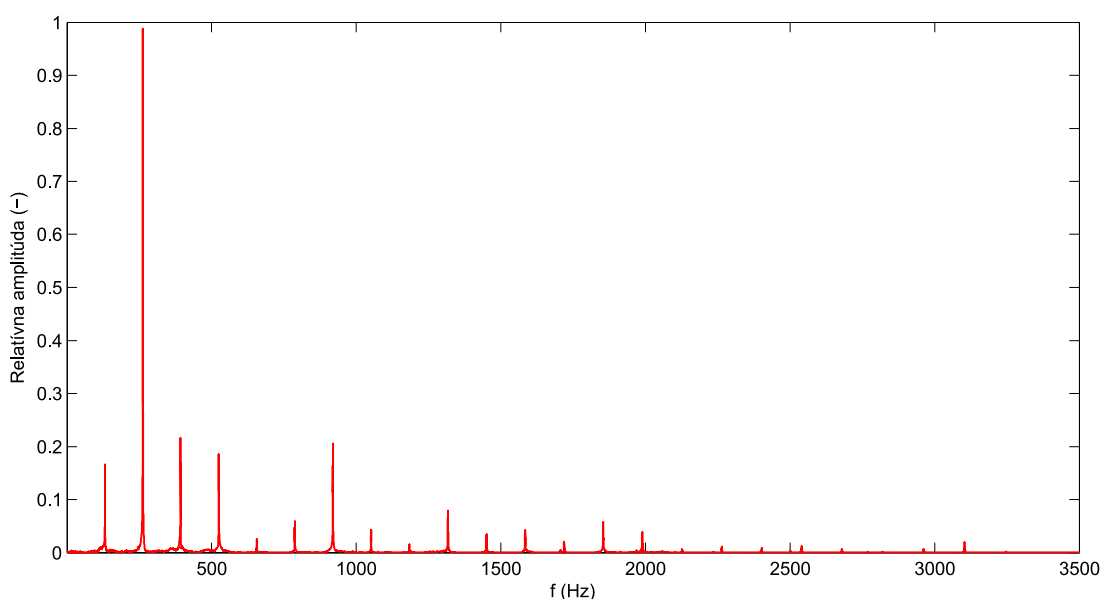


obr. 1.5: Spektrum tónu A4 pri slabom údere kladivka

Pri spektrálnej analýze boli použité tóny nahrané pri silnom údere kladivka. Tým sa zaistila prítomnosť väčšieho počtu harmonických frekvencií v spektre tónov. Tieto nahrávky tónov boli získané z webovej stránky uvedenej v [1]. Analýza bola vykonaná pre tretiu, štvrtú a piatu oktávu

(v hudobníckej terminológii malá, jednočiarková a dvojčiarková), čo zodpovedá 36 tónom, vrátane poltónov. Získané hodnoty amplitúd harmonických frekvencií sú uvedené v prílohe v tab. A.1. Tab. A.1 obsahuje amplitúdy prvých 10 harmonických frekvencií, ktorých amplitúdy boli nad úrovňou šumu. Amplitúdy sú vyjadrené relatívne k najväčšej amplitúde prítomnej v tóne. Z hodnôt v tab. A.1 vyplýva, že amplitúda harmonických frekvencií so zvyšujúcou frekvenciou klesá. Na obr. 1.6 je znázornené spektrum tónu C3 s vyznačenými hodnotami amplitúd jednotlivých harmonických frekvencií.

Zo spektra tónu C3 je zrejmé, že šestnásta a vyššie harmonické frekvencie majú malú amplitúdu, ktorá je na úrovni šumu. Tento jav sa vyskytuje pri všetkých analyzovaných tónoch s tým rozdielom, že vyššie tóny obsahujú menší počet harmonických frekvencií s amplitúdou nad úrovňou šumu. Napr. tón H5 obsahuje len dve vyššie harmonické frekvencie, z ktorých jedna má amplitúdu nad úrovňou šumu. V priemere je zrejmé, že amplitúdy harmonických frekvencií vyšších ako dvanásť harmonická frekvencia sú na úrovni šumu.



obr. 1.6: Spektrum tónu C3

Na základe predošlého poznatku je možné pri syntéze pracovať s približne prvými dvanástimi harmonickými frekvenciami a docieľiť tak zjednodušenie celého procesu syntézy. Je potrebné uvedomiť si, že počet harmonických frekvencií získaných analýzou sa v spektre tónu vyskytuje len chvíľu po údere kladivka na strunu. Ako sa uvádza na začiatku kapitoly, táto časť priebehu tónu zodpovedá oblastiam nábehu a útlmu obálky zvuku. Po uplynutí týchto oblastí poklesne počet harmonických frekvencií v spektre tónu na podstatne menšiu hodnotu.

Predošlé tvrdenie možno ilustrovať na príklade klavírneho tónu C3. Začiatok znenia tónu obsahuje 15 harmonických frekvencií. Po uplynutí 1,5 s (zodpovedá oblasti nábehu a útlmu obálky zvuku) klesne počet harmonických frekvencií tónu na hodnotu 6. To značí, že na syntézu väčšej časti trvania tónu stačí minimálny počet harmonických frekvencií.

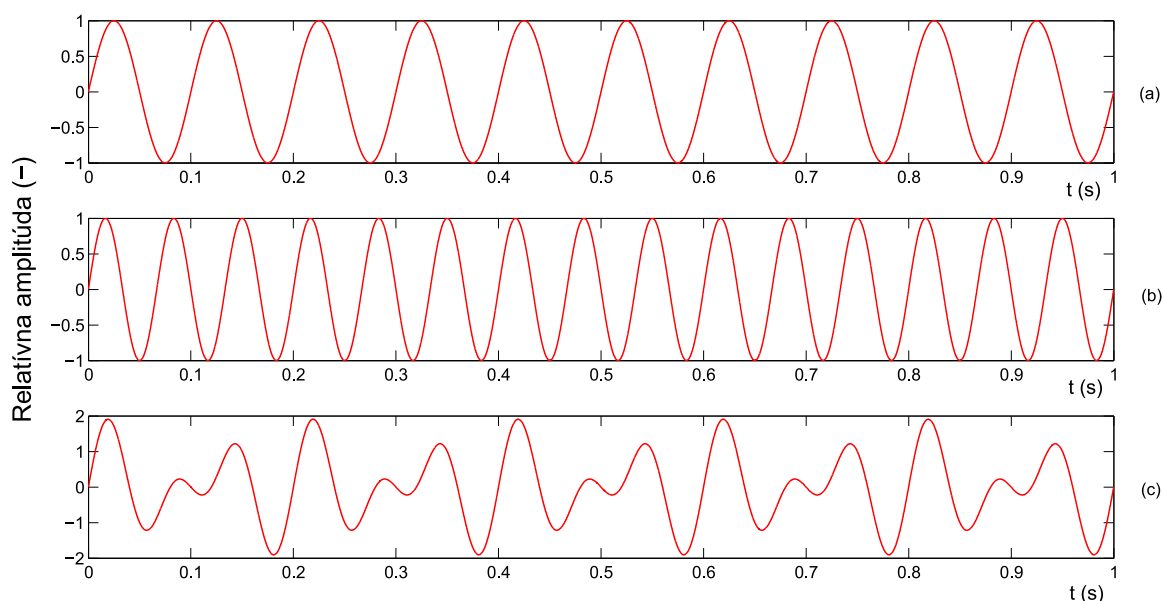
Pri syntéze zvuku možno využiť vlastnosti ľudského sluchu. Ľudský sluch nerozlišuje zmeny počiatocnej fázy zvukových signálov [14], a preto pri použití aditívnej syntézy (viď. kap. 2.1 na nasledujúcej strane) nie je potrebné rozlišovať počiatocnú fázu jednotlivých harmonických signálov.

2 Metódy zvukovej syntézy

Zvuk možno vytvárať rôznymi metódami. Tieto metódy vychádzajú z rôznych postupov, ako je sčítanie harmonických signálov, alebo fyzikálne modelovanie pomocou matematických rovníc. Táto kapitola sa zaoberá najčastejšie používanými metódami digitálnej a analógovej syntézy zvuku.

2.1 Aditívna syntéza

Aditívna syntéza je založená na objave francúzskeho matematika F. B. J. Fouriera, ktorý zistil, že komplexné signály sú zložené z viacerých základných harmonických signálov. Na obr. 2.1 je znázornený princíp aditívnej syntézy, kedy výsledný signál (c) vzniká sčítaním harmonických signálov (a) a (b).



obr. 2.1: Aditívna syntéza. (a), (b) základné harmonické signály, (c) výsledný signál

Princíp aditívnej syntézy možno definovať vzťahom (2.1), kde $f(t)$ je výsledný signál, A_k je amplitúda signálov, f_k je ich frekvencia, φ_k je ich počiatková fáza a t zodpovedá času [19]:

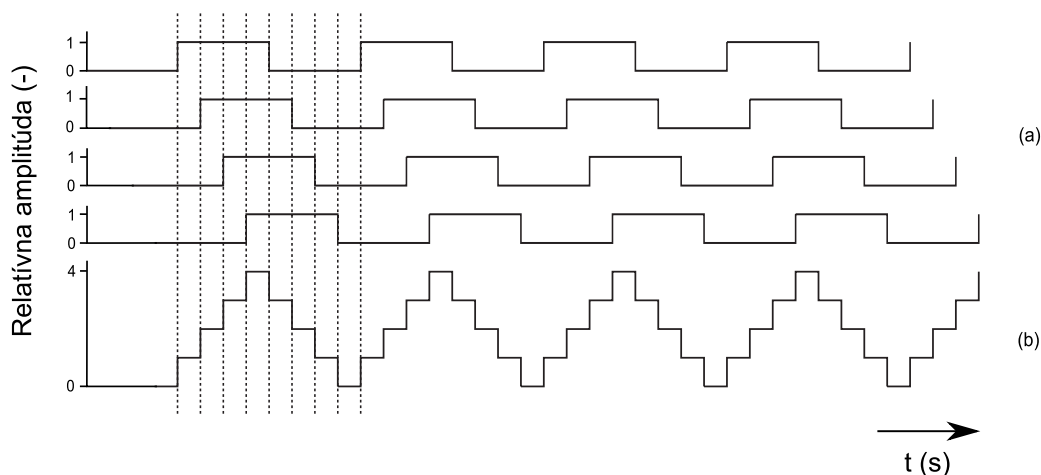
$$f(t) = \sum_{k=1}^N A_k \sin(2\pi f_k t + \varphi_k) \quad (2.1)$$

Príkladom hudobného nástroja fungujúceho na tomto princípe je organ, u ktorého dochádza ku vzniku tónov vpustením vzduchu do viacerých píšťal naraz [14].

Popri harmonickom signále môže byť základným signálom syntézy trojuholníkový, alebo pílový signál [13]. Na rozdiel od reálnych hudobných nástrojov obsahuje výsledný tón rovnaký počet harmonických frekvencií počas celého znenia [14]. Aditívna syntéza sa považuje za jednu z najdokonalejších metód zvukovej syntézy. Umožňuje úplnú kontrolu nad jednotlivými základnými harmonickými signálmi počas syntézy [14].

2.2 Walshova funkčná syntéza

Walshova funkčná syntéza funguje na rovnakom princípe, ako aditívna syntéza. Je založená na použití Walshových funkcií, namiesto harmonických signálov (Obr. 2.2 podľa [15]). Funkcie nadobúdajú hodnoty 0 a 1, čo umožňuje jednoduchšie spracovanie v digitálnych obvodoch, než pri aditívnej syntéze [14]. Na rozdiel od aditívnej syntézy použité Walshove funkcie nezodpovedajú harmonickým zložkám spektra tónu. Walshové funkcie sú dané počtom priesečníkov s nulovou hodnotou za sekundu. Na určenie funkcií je najprv potrebné podrobiť zvukový signál Walsh–Hadamardovej transformácii (FWHT), ktorá je dôvodom, že sa Walshova syntéza nerozšírila v praxi [11].



obr. 2.2: Walshova funkčná syntéza. (a) základné signály (b) výsledný signál.

2.3 Subtraktívna syntéza

Táto metóda zvukovej syntézy sa najviac využíva v analógových syntetizátoroch. Princíp spočíva v úprave vstupného signálu, bohatého na harmonické zložky, pomocou filtrov. Názorným príkladom je ľudský hlas. Prvotný zvuk sa vytvára chvením hlasiviek. Zvuk potom prejde filtrom v podobe ľudských úst [15].

Zdrojový signál

Zdrojový signál obsahuje všetky harmonické frekvencie potrebné na vznik výsledného signálu. Zdrojovým signálom môže byť šum, pílový, pravouhlý, pulzný, alebo trojuholníkový signál [15, 14]. V prípade analógovej syntézy sa signál generuje oscilátorom riadeným napätím (VCO), ktorý umožňuje nastavovať frekvenciu základného signálu s presnosťou na stotiny tónu [15].

Modifikátor signálu

Modifikátor signálu je časť syntetizátora, ktorá upravuje spektrum, alebo hlasitosť základného signálu, bohatého na harmonické frekvencie. Na úpravu spektra sa využívajú filtre a na úpravu hlasitosti obálka zvuku. V analógových syntetizátoroch sa používajú filtre ovládané napätím (VCF), čo umožňuje nastavenie ich medznej frekvencie f_0 [14].

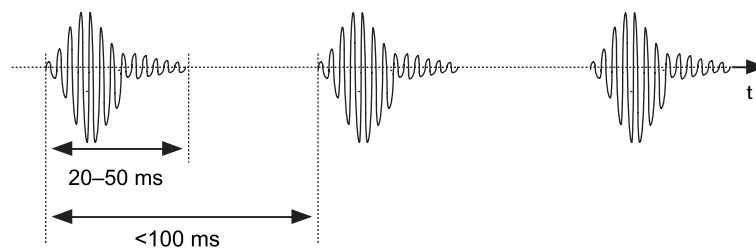
Typy filtrov [15]:

- *Dolná priepust'* - prepúšťa frekvencie nižšie, ako je hodnota f_0 . Výsledný tón má „hlbšiu“ farbu zvuku.
- *Horná priepust'* - prepúšťa frekvencie vyššie ako f_0 . Môže dôjsť k filtrácii základnej harmonickej frekvencie, čo zapríčini zmenu tónu. Výsledný tón má „prenikavejšiu“ farbu zvuku.
- *Pásmová priepust'* - prepúšťa frekvencie v rozmedzí hornej a dolnej medznej frekvencie.
- *Pásmová zádrž* - prepúšťa frekvencie nižšie ako dolná a vyššie ako horná medzná frekvencia.

Rovnaká kvalita nízkych aj vysokých tónov sa zaistí nastavením medznej frekvencie filtra na hodnotu základnej harmonickej frekvencie tónu [15].

2.4 Granulačná syntéza

Granulačná syntéza sa využíva pri softvérovej syntéze zvuku pomocou počítačových programov a dosahuje výborné výsledky [15]. Pri granulačnej syntéze sa využívajú malé časti harmonických signálov, trvajúce 20 až 50 ms, ktoré za sebou nasledujú každých 100 ms (obr. 2.3). Poslucháč vtedy vníma výsledný zvukový signál ako spojitý [14]. Nastavenie periódy, amplitúdy a frekvencie je pri použití tejto metódy syntézy zvuku problematické. Pre každú časť harmonického signálu sa nastavujú všetky parametre zvlášť, čím narastá počet kontrolných dát. Na časti harmonických signálov sa aplikuje obálka zvuku (kap. 1.1 na strane 9) tak, aby amplitúda mala na začiatku aj na konci týchto častí nulovú hodnotu.



obr. 2.3: Granulačná syntéza [15]

2.5 Modulačná syntéza

Modulácia je zmena vlastností nosného signálu pôsobením modulačného signálu, pričom vznikajú vedľajšie frekvenčné zložky okolo nosnej frekvencie, obohacujúce spektrum modulovaného signálu. Modulačná syntéza je založená na teórii amplitúdovej (AM), kruhovej (RM) a frekvenčnej (FM) modulácie. Pri syntéze sa používajú signály v počuteľnom pásme frekvencií (20 Hz až 20kHz). Obvykle sa k modulačnej syntéze využíva dva až šesť signálov, zastupujúcich funkciu viacerých nosných i modulačných signálov naraz [14].

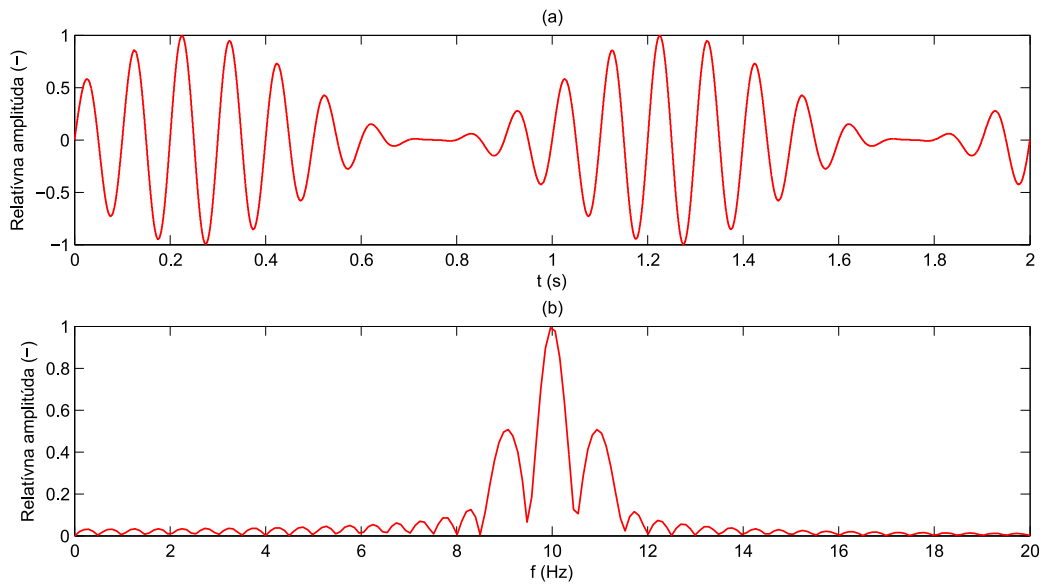
2.5.1 AM syntéza

AM syntéza využíva na syntézu zvuku amplitúdovú moduláciu. Moduláciou sa mení amplitúda nosného signálu. Najčastejšie sa moduluje jeden bipolárny signál pomocou jedného unipolárneho signálu. Bipolárny signál nadobúda kladné aj záporné hodnoty, na rozdiel od unipolárneho nadobúdajúceho len kladné hodnoty [14].

Príklad signálu získaného amplitúdovou moduláciou je uvedený na obr. 2.4, vytvorenom programom Matlab. Spektrum výsledného signálu obsahuje nosnú frekvenciu a frekvencie rovné súčtu a rozdielu hodnôt nosnej a modulačnej frekvencie. Frekvencia modulačného signálu nie je prítomná v spektre výsledného signálu. Pri 100 % modulácii má amplitúda každej vzniknutej zložky polovičnú hodnotu amplitúdy nosného signálu [15].

2.5.2 RM syntéza

Syntéza kruhovou moduláciou (RM) sa líši od AM syntézy použitím dvoch bipolárnych signálov (u AM syntézy sa využíva jeden unipolárny a jeden bipolárny signál). Výsledné spektrum obsahuje s výnimkou nosnej a modulačnej frekvencie, len frekvencie rovné súčtu a rozdielu ich hodnôt [15].



obr. 2.4: AM syntéza. (c) výsledný signál, (d) spektrum výsledného signálu

2.5.3 FM syntéza

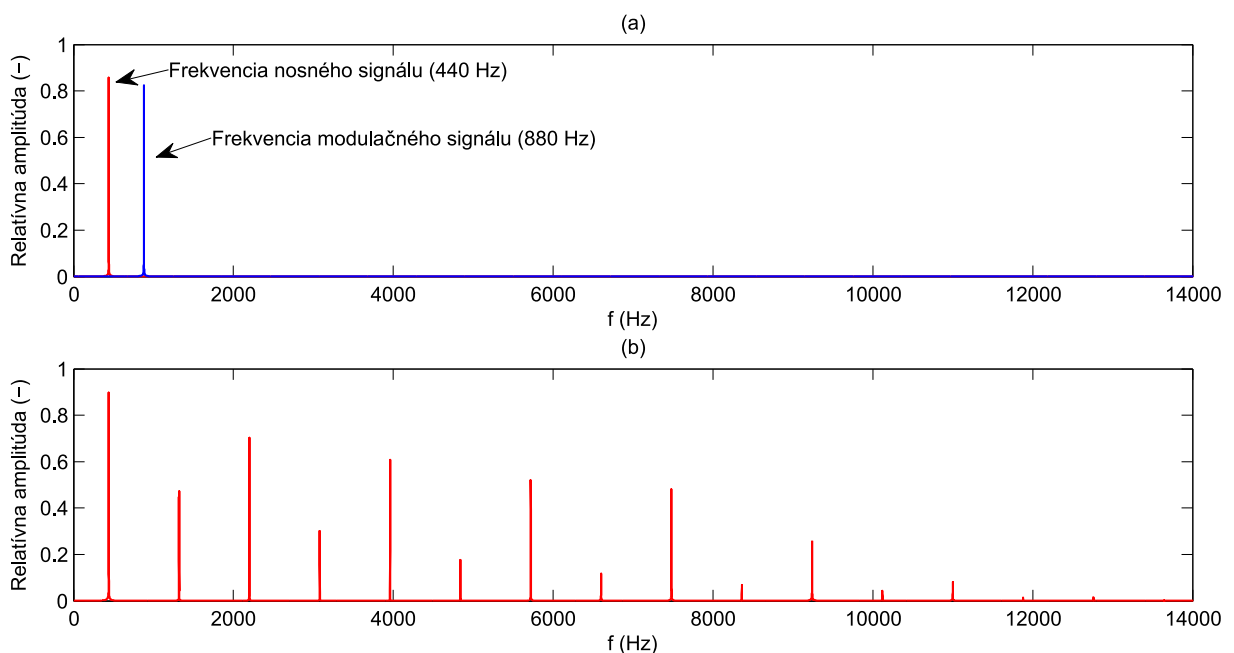
Pri FM syntéze je nosný signál modulovaný najčastejšie harmonickým signálom s frekvenciou vyššou ako je hodnota nosnej frekvencie. Spektrum výsledného signálu obsahuje nosnú frekvenciu a ďalšie frekvencie, ktorých hodnota je daná súčtom nosnej frekvencie s celočíselným násobkom modulačnej frekvencie (obr. 2.5). Pre FM syntézu platí vzťah (2.2), kde $s(t)$ je výsledný modulovaný signál, t čas, A obálka signálu, MI modulačný index, f_c frekvencia nosného a f_m frekvencia modulačného signálu [4].

$$s(t) = A \cdot \sin(f_c \cdot t + MI \cdot \sin(f_m \cdot t)) \quad (2.2)$$

Modulačný index (MI) udáva počet vzniknutých frekvencií a je daný vzťahom (2.3), kde δf_c je frekvenčný zdvih a f_m je frekvencia modulačného signálu[15].

$$MI = \frac{\delta f_c}{f_m} \quad (2.3)$$

Modulačný index je odvodený z frekvenčného zdvihu modulácie, ktorý udáva zmenu frekvencie pri modulácii. Amplitúda pridaných frekvencií je daná Besselovými funkciami [4, 15].



obr. 2.5: Spektrum signálov FM syntézy. (a) spektrum nosného a modulačného signálu, (b) spektrum výsledného signálu

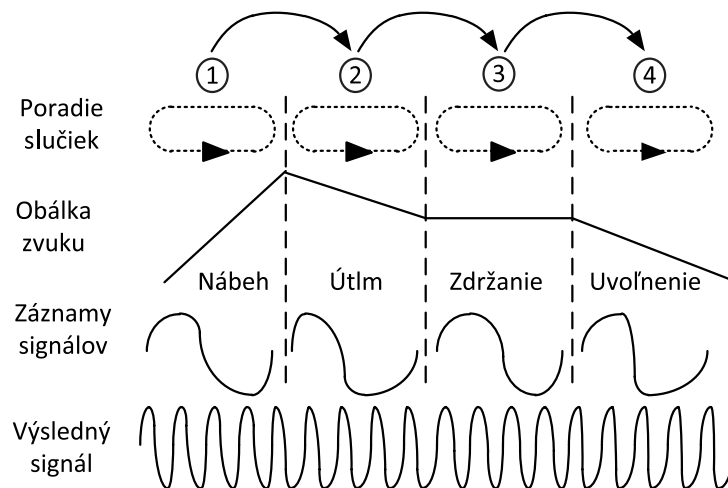
Tvar výsledného spektra závisí na hodnote MI:

- *Celočíselná hodnota:* výsledné spektrum je zložené z nosnej frekvencie a harmonických frekvencií.
- *Neceločíselná hodnota:* výsledné spektrum obsahuje nosnú frekvenciu a frekvencie nižšie a vyššie ako harmonické frekvencie. V zvuku získanom moduláciou je prítomný šum.

FM syntéza sa často používa v komerčných syntetizátoroch. Jej výhodou je prítomnosť veľkého počtu harmonických frekvencií získaných moduláciou malého počtu signálov. Na porovnanie, AM syntéza pri použití dvoch signálov docieli obohatenie spektra nosného signálu o dve harmonické frekvencie. Zásluhy na jej rozšírení má najmä firma Yamaha, vďaka populárnemu syntetizátoru Yamaha DX7 [15].

2.6 Tabuľková syntéza

Tabuľková syntéza využíva cyklické čítanie krátkych záznamov synteticky získaných hodnôt signálov uložených v pamäti. Výsledný signál sa skladá z viacerých úsekov (obr. 2.6), obvykle zodpovedajúcich oblastiam obálky zvuku (kap. 1.1 na strane 9). K syntéze jednotlivých úsekov sa vždy využíva iný záznam signálu [14, 3].



obr. 2.6: Proces tabuľkovej syntézy [15]

Používané metódy čítania z pamäte [14]:

- *Swept* - dáta sú čítané v poradí, v akom boli do pamäte zapísané. Záznamy hodnôt podobných signálov bývajú zapísané pri sebe. Dochádza tak k jemnej zmene výsledného signálu a docieľajú sa realistickejší zvuk. Pri čítaní nedochádza ku skokom medzi jednotlivými miestami pamäte. Pri veľkom počte údajov sa swept metóda približuje syntéze samplíngom, ktorej je venovaná pozornosť v nasledujúcej podkapitole [15].
- *Random-access* - čítanie dát prebieha skokmi medzi jednotlivými oblasťami pamäte. Je menej náročná na veľkosť pamäte.

2.7 Sampling

Sampling býva často chybné považovaný za tabuľkovú syntézu. Namiesto krátkych, synteticky získaných úsekov signálov, využíva dlhšie časti zvukov uložené v pamäti, nahrané skutočnými nástrojmi. Zvuky sa opakovane načítavajú z pamäte a posielajú na výstup. Výhodou je prítomnosť oblastí obálky zvuku priamo v uloženej vzorke. Každý reálny signál prevedený do digitálnej oblasti zodpovedá veľkému množstvu dát zapísaných do pamäte. Syntéza samplíngom je náročnejšia na veľkosť pamäte než tabuľková syntéza [14].

Vyššie tóny sa získavajú zvýšením vzorkovacej frekvencie. Nevýhodou tohto postupu, je kratšia doba trvania jednotlivých oblastí obálky. Riešením je uloženie viacerých vzoriek toho istého zvuku s rôznou dĺžkou týchto oblastí [15].

Sampling nie je skutočnou metódou syntézy zvuku. Ide o prehrávanie vzoriek hudobných nástrojov namiesto umelého vytvárania zvuku pomocou iných signálov. Syntetizátory fungujúce na princípe samplingu vytvárajú zvuk najbližší zvuku skutočných hudobných nástrojov.

2.8 Syntéza fyzikálnym modelovaním

Metóda čerpá z poznatku, že za výsledný zvuk sú okrem oscilátoru zodpovedné aj ostatné časti hudobného nástroja ako napr. rezonančná skriňa, okolité struny a pod. Výsledný zvuk je riešením diferenciálnych rovníc opisujúcich vibračné správanie fyzikálnych objektov a zmenu signálu v čase. Úprava výsledného zvuku je tak možná zmenou niekoľkých parametrov. Silnou stránkou je schopnosť extrapolovať model. Jedným modelom možno vytvoriť napr. zvuk bubna s priemerom 3 cm, ale aj 5 m [14].

Pri vytváraní modelov sa používa jeden z piatich možných postupov [15]:

- Modelovanie parciálnymi diferenciálnymi rovnicami
- Modelovanie zdroj-filter
- Modelovanie siete vibračných más a strún
- Modálne modelovanie
- Modelovanie vln a ukazovateľov

Modelovanie vln a ukazovateľov je najrozšírenejším postupom. Pre nízku náročnosť pri modelovaní jednorozmerných vlnových systémov je vhodným postupom modelovania pre digitálne spracovanie signálov (DSP). Modelovanie zdroj-filter sa používa pri modelovaní ľudskej reči, kedy sa modelujú hlasivky, hrdlo a ústna dutina [18]. Samotné modely sa delia na spojité a impulzné.

Spojité modely sa aplikujú na situácie, keď ide o spojitý prenos energie medzi jej zdrojom a hudobným nástrojom. Zvuk vzniká dovtedy, pokiaľ sa nástroju dodáva energia. Typickým príkladom sú dychové nástroje. V prípade impulzných modelov vzniká zvuk dodaním impulzu energie, na ktorý nástroj reaguje. Výsledný zvuk počas jeho trvania pomaly utícha. Impulzné modelovanie sa využíva pri syntéze nástrojov fungujúcich na princípe strún, ako sú napr. klavír a ostatné strunové nástroje [15].

3 Výber metódy syntézy

Na základe postupu, ktorým jednotlivé metódy vytvárajú zvuk (kap. 2) boli vybrané tri najvhodnejšie metódy pre realizáciu syntetizátora: aditívna, tabuľková a FM syntéza. Od ostatných metód sa líšia dosiahnutím kvalitného výsledku pri menšej náročnosti na pamäť, alebo menšom počte potrebných operácií pri syntéze zvuku.

Za frekvenčný rozsah syntetizátora bola zvolená 3. až 5. oktáva (v hudobnej terminológii malá až dvojčiarková oktáva). Tóny týchto troch oktáv obsahujú v priemere 10 harmonických frekvencií s amplitúdou nad úrovňou šumu (kap. 1.2 a tab. A.1 v prílohe A). Práve tento počet harmonických frekvencií zabezpečí „príjemnú“ farbu zvuku. Tóny vyšších frekvencií obsahujú menší počet harmonických frekvencií v rozsahu počuteľnosti ľudského sluchu, a tak majú tieto tóny „ostrejší“ zvuk [15]. Naopak hlbšie tóny obsahujú väčší počet harmonických frekvencií, ktorý by zvýšil nároky syntetizátora na kapacitu pamäte. Základné frekvencie tónov 3. až 5. oktávy sú uvedené v tab. 3.1.

tab. 3.1: Základné frekvencie tónov 3., 4. a 5. oktávy

Oktáva	Základná frekvencia tónu (Hz)											
	C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	B (A#)	H
3.	130,81	138,59	146,83	155,56	164,81	174,61	185,00	196,00	207,65	220,00	233,08	246,94
4.	261,62	277,18	293,66	311,12	329,62	349,22	370,00	392,00	415,30	440,00	466,16	493,88
5.	523,24	554,36	587,32	622,24	659,24	698,44	740,00	784,00	830,60	880,00	932,32	987,76

Pre aditívnu, tabuľkovú a FM syntézu bola vypočítaná kapacita potrebnej pamäte. Zaplnenie pamäte bolo vypočítané pre frekvenčný rozsah 3. až 5. oktávy. Počítalo sa so vzorkovacou frekvenciou 44100 Hz a 16-bitovým rozlíšením, čo zodpovedá kvalite hudobného CD. Vo výpočte je zahrnutý minimálny počet signálov potrebných k syntéze jedného tónu a priemerná dĺžka vzorky v pamäti. Vypočítaná hodnota priemernej dĺžky vzorky je 0,00433 s (hodnota zodpovedá priemernej perióde tónov z 3. až 5. oktávy). Príklad výpočtu pre aditívnu syntézu je uvedený vo vzťahu 3.1, kde T_{AVG} je priemerná dĺžka vzorky frekvencie, N_f je počet potrebných frekvencií na syntézu jedného tónu, N_t je počet tónov v celom rozsahu syntetizátora, f_{vz} je vzorkovacia frekvencia a N_{bit} je počet bitov potrebných na vyjadrenie jednej vzorky frekvencie. V tab. 3.2 sú uvedené nároky na kapacitu pamäte pre uvažované metódy syntézy zvuku.

$$Potrebná\ veľkosť\ pamäte = T_{AVG} \cdot N_f \cdot N_t \cdot f_{vz} \cdot N_{bit} = \quad (3.1)$$

$$= 0,00433\ s \cdot 10 \cdot 36 \cdot 44100\ Hz \cdot 16 = 1,099516\ Mb$$

tab. 3.2: Veľkosť potrebnej pamäte pri použití aditívnej, FM a tabuľkovej syntézy

	Syntéza		
	Aditívna	FM	Tabuľková
Potrebná pamäť (Mb)	1,099516	0,219978	6,599335
Počet signálov potrebných na syntézu tónu	10	2	60*

* 6 oblastí na opísanie obálky tónu (10 frekvencií na jednu oblasť)

Kvôli veľkosti využitej pamäte je tabuľková syntéza najmenej vhodná metóda na realizáciu. Na FM syntézu jedného tónu stačia dva signály (kap. 2.5.3), ale pri modulácii vyžaduje použitie funkcií sínus a kosínus.

Jednou z možností ako získať hodnoty funkcií sínus a kosínus je použitie CORDIC (Coordinate Rotation Digital Computer) algoritmu. CORDIC algoritmus používa k výpočtom trigonometrických funkcií sčítanie, odčítanie a bitový posun. Postupnou iteráciou sa získa hodnota s požadovanou presnosťou. Výhodou CORDIC algoritmu je minimum zabranej pamäte, ale za cenu dlhšej doby potrebnej na výpočet, ktorá sa predlžuje so zvyšujúcou sa presnosťou výpočtu [2].

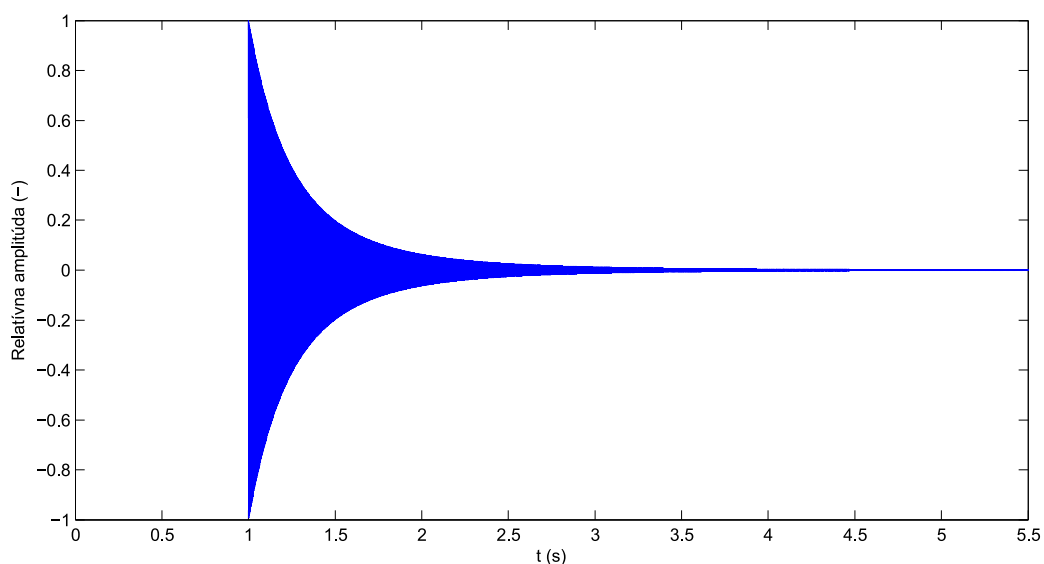
Druhou možnosťou je použitie náhľadových tabuliek, kedy sa hodnoty trigonometrických funkcií vypočítajú vopred napr. programom Matlab, a potom sa uložia do pamäti. Čítanie hodnôt z pamäte je rýchle. Zníženie nárokov na pamäť sa dá docieľiť uložením hodnôt iba prvej štvrtperiódy harmonického signálu a pomocou internej logiky získať jeho zvyšné hodnoty zrkadlením [20].

Z troch vyššie uvedených metód syntézy zvuku (aditívna, tabuľková a FM syntéza) bola pre návrh syntetizátora zvolená aditívna syntéza. Na rozdiel od FM syntézy vystačí aditívna syntéza so sčítaním vzoriek harmonických frekvencií. Návrh obvodu podporujúceho frekvenčnú moduláciu by bol náročný. V porovnaní s tabuľkovou syntézou potrebuje aditívna syntéza uložiť menej dát do pamäte.

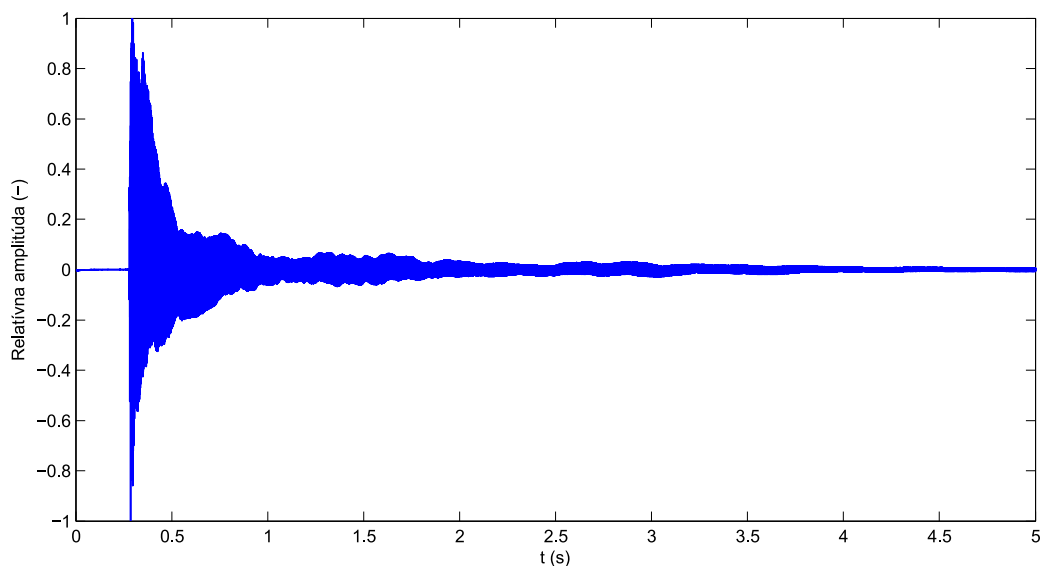
Výsledná metóda syntézy zvuku je kombináciou aditívnej a tabuľkovej syntézy. Pri vzniku tónov sa využíva jedna perióda harmonických frekvencií, ktorá je uložená v pamäti vo forme náhľadovej tabuľky.

Princíp aditívnej syntézy bol simulovaný pomocou programu Matlab. Pri simulácii bolo použitých prvých 10 harmonických frekvencií tónu. Amplitúdy týchto harmonických frekvencií boli vo vzájomnom pomere podľa výsledkov spektrálnej analýzy (tab. A.1 v prílohe A).

Výsledky simulácie boli uspokojivé. Tóny zvukom vierohodne pripomínali zvuk klavíra. Na obr. 3.1 je znázornený priebeh tónu A4 („komorné A”) vytvorenom v programe Matlab a na obr. 3.2 priebeh toho istého tónu nahraného skutočným klavírom. Porovnaním oboch tónov možno dôjsť k záveru, že obálka zvuku tónu vytvoreného programom Matlab pripomína zmeny hlasitosti skutočného tónu.

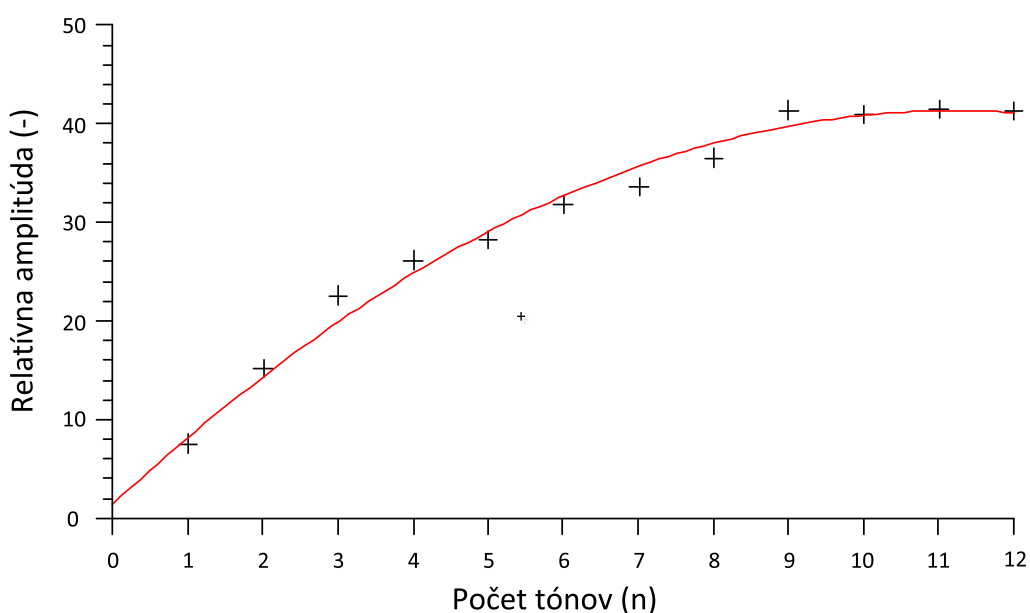


obr. 3.1: Priebeh tónu A4, vytvorenom v programe Matlab



obr. 3.2: Priebeh tónu A4 skutočného klavíra

Výpočty v programe Matlab overili, že maximálna amplitúda s narastajúcim počtom signálov sčítaných aditívnou syntézou narastá. Pri výpočtoch sa sčítavali tóny 4. oktávy, ktorých počet postupne narastal od jedného po 12 sčítaných tónov. Tóny boli vytvorené aditívnou syntézou z harmonických signálov s nulovou počiatočnou fázou v programe Matlab. Na obr. 3.3 je znázornená závislosť maximálnej amplitúdy na počte sčítaných tónov. Pri viac ako deviatich sčítaných tónoch sa hodnota maximálnej amplitúdy ustáli päťnásobku hodnoty maximálnej amplitúdy jedného tónu. Pri návrhu výsledného syntetizátora je potrebné zaistiť, aby nedošlo k orezaniu amplitúd výsledných tónov pred poslaním dát do digitálno-analógového (DA) prevodníka. V opačnom prípade dôjde k nežiadúcim defektom výsledných tónov.



obr. 3.3: Závislosť maximálnej amplitúdy na rastúcom počte sčítaných signálov

4 Realizácia syntetizátora v obvode FPGA

Táto časť práce sa venuje detailnému opisu riešenia obvodu syntetizátora opísaného v jazyku VHDL (VHSIC Hardware Description Language). Syntetizátor podporuje frekvenčný rozsah tretej až piatej oktávy (v hudobnej terminológii rozsah od C malé po H²). Frekvencie v tomto rozsahu sú veľmi dobre rozlíšiteľné ľudským sluchom. Syntetizátor podporuje štvortónovú polyfóniu, ktorá hudobníkovi umožňuje hrať základné akordy (súčasné znenie troch tónov).

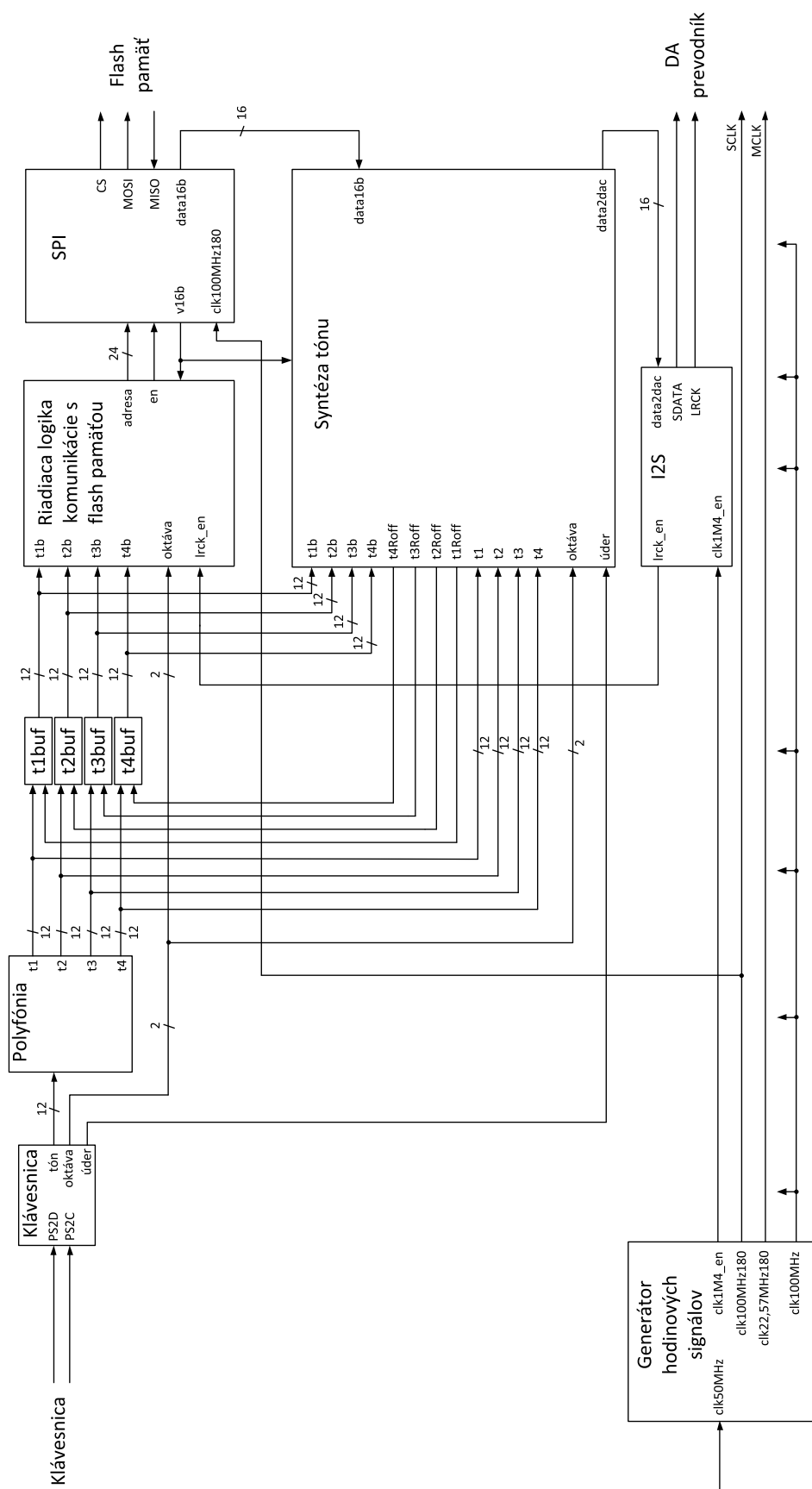
Na základe poznatkov uvedených v teoretickej časti práce (kap. 1 až 3), bola pre realizáciu syntetizátora vybraná metóda aditívnej syntézy zvuku. Pri syntéze tónov sa využíva ich prvých 10 harmonických frekvencií. Spektrálna analýza klavírnych tónov ukázala, že tento počet by mal byť dostatočný k syntéze vierohodných tónov.

Na obr. 4.1 je uvedená bloková schéma obvodu syntetizátora. Celý obvod je rozdelený do piatich funkčných blokov. Prvý blok zodpovedá za ovládanie syntetizátora. Pozostáva z blokov *Klávesnica*, *Polyfónia*, *t1buf*, *t2buf*, *t3buf* a *t4buf*. Jeho úlohou je prijímať dáta prenášané z klávesnice a generovať signály, ktoré informujú zvyšok obvodu o hraných tónoch, oktáve a o sile úderu na klávesu.

Druhý blok sprostredkúva komunikáciu obvodu FPGA (Field-Programmable Gate Array) s flash pamäťou. Jeho súčasťou sú bloky *SPI* a blok riadiacej logiky. Blok *SPI* riadi prenos dát cez zbernicu SPI (Serial Peripheral Interface). Blok riadiacej logiky rozhoduje, ktoré dáta je potrebné načítať z pamäte.

Úlohou tretieho bloku je syntéza tónu. Blok upravuje a sčítava vzorky frekvencií získaných z pamäte. Súčasťou tohto bloku je generátor obálky zvuku, ktorý upravuje výsledný zvuk tak, aby pripomínal zvuk skutočného klavíra.

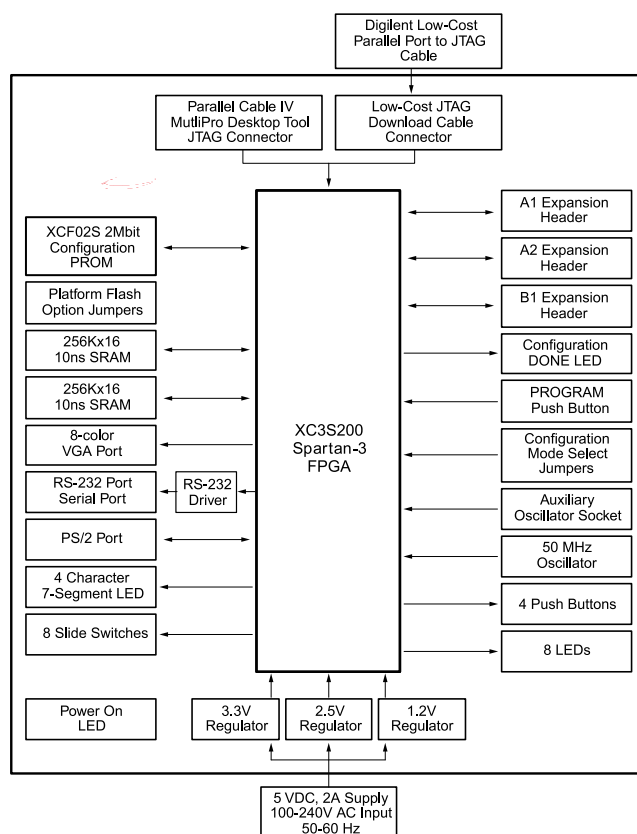
Štvrtý blok riadi komunikáciu obvodu FPGA s DA prevodníkom. Prenos dát prebieha pomocou zbernice I²S. Posledný funkčný blok zaisťuje potrebné hodinové signály. K tomu využíva 50 MHz hodinový signál z oscilátora a DCM (Digital Clock Manager), ktoré sú súčasťou obvodu FPGA. Nasledujúce podkapitoly sa detailne venujú opisu týchto blokov.



obr. 4.1: Bloková schéma obvodu syntetizátora

4.1 Vývojový kit Spartan-3

Zadaním práce je opísať hudobný syntetizátor v jazyku VHDL a implementovať ho do obvodu FPGA. Obvod syntetizátora je opísaný s ohľadom na implementáciu do obvodu FPGA Spartan-3 XC3S200, ktorý je súčasťou vývojového kitu od spoločnosti Digilent. Vývojový kit obsahuje viacero periférií, ktoré sú uvedené na obr. 4.2.



obr. 4.2: Bloková schéma vývojového kitu Spartan-3 [21]

Obvod FPGA Spartan-3 XC3S200 od spoločnosti Xilinx obsahuje 200 000 logických hradiel, 12 blokových RAM pamätí s kapacitou 18 kbit, 12 hardvérových 18×18 bit násobičiek a štyri bloky DCM (Digital Clock Manager), ktoré násobením a delením vstupného hodinového signálu vytvárajú nový hodinový signál v rozmedzí 18 až 280 MHz [22]. Hardvérové násobičky sa nachádzajú v blízkosti blokových RAM pamätí. Týmto umiestnením sú zaručené krátke signálové cesty, vďaka čomu je tento obvod FPGA vhodný pre aplikácie orientované na DSP (Digital Signal Processing) [21].

Z periférií vývojového kitu je pri realizácii syntetizátora využitý PS/2 konektor a 40-pinový konektor B1, cez ktorý je ku vývojovému kitu pripojená rozširujúca doska s doplnujúcimi perifériami potrebnými na realizáciu syntetizátora (kap. 5).

4.2 Vzorky harmonických frekvencií tónov

Na syntézu tónov sa využívajú harmonické signály s frekvenciami zodpovedajúcimi harmonickým frekvenciám syntetizovaných tónov. V analógovej aditívnej syntéze sa k tomu používajú oscilátory. V digitálnej syntéze je potrebné priebehy týchto harmonických signálov vyjadriť číselne a uložiť do pamäte, odkiaľ sa pri syntéze budú čítať.

Pre syntézu sa využívajú periódy harmonických frekvencií jednotlivých tónov, ktoré sú navzorkované pri vzorkovacej frekvencii 44,1 kHz. Vzorkovanie periód harmonických signálov prebehlo v softvérovom prostredí programu Matlab. Vzorky harmonických signálov môžu nadobúdať hodnotu od -1 po 1 a sú vyjadrené s 16-bitovou presnosťou v číselnom formáte Q0.15. Prvý bit tohto formátu označuje kladnú, alebo zápornú hodnotu. Zvyšných 15 bitov reprezentuje hodnotu čísla za desatinnou čiarkou. Jednotlivé bity vyjadrujú hodnoty 2^{-1} až 2^{-15} [10]. Ukážka vzoriek harmonických frekvencií prepočítaných do formátu Q0.15 je uvedená v tab. 4.1.

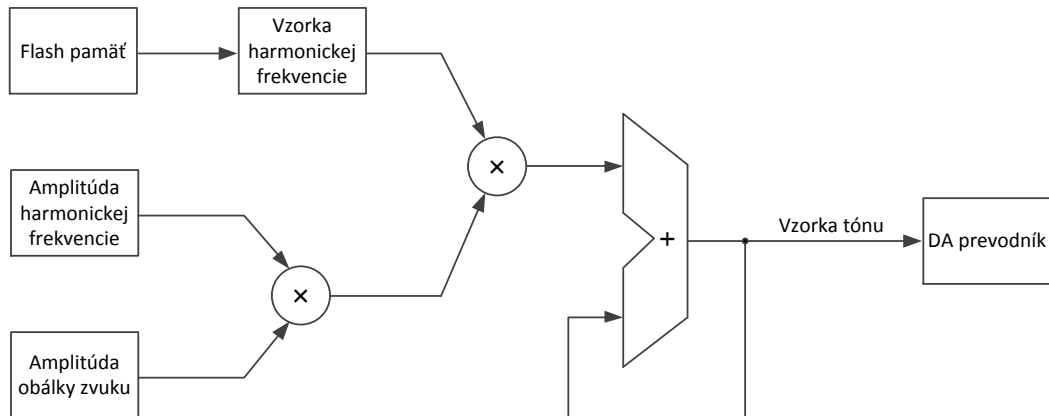
tab. 4.1: Vzorky harmonických frekvencií prepočítané do formátu Q0.15

Hodnota vzorky harmonickej frekvencie	Najbližšia číselná hodnota vyjadriteľná vo formáte Q0.15	Binárne vyjadrenie číselnej hodnoty vo formáte Q0.15
0,95	0,949980	0b0111100110011000
	0,950011	0b0111100110011001
-0,46	-0,459975	0b1100010100100000
	-0,460005	0b1100010100011111

Amplitúdy harmonických frekvencií a amplitúdy obálky zvuku sa rovnakým postupom prepočítali do formátu Q0.7 (jeden znamienkový bit a sedem bitov vyjadrujúcich desatinnú hodnotu). Súbory obsahujúce vzorky harmonických frekvencií tónov v číselnom formáte Q0.15 sú uvedené v prílohe C.

4.3 Signálové toky syntetizátora

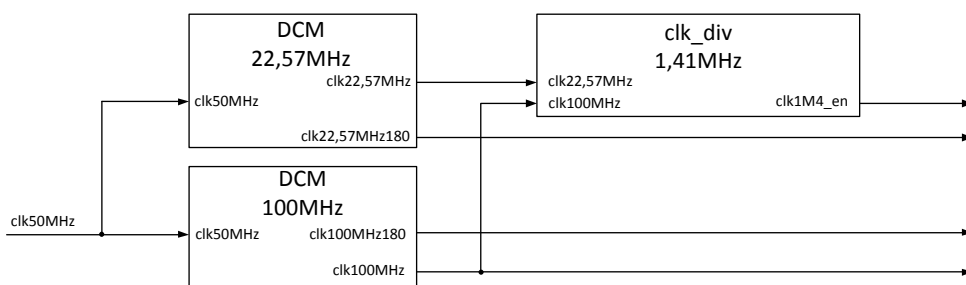
Pred detailným opisom jednotlivých blokov syntetizátora je potrebné naznačiť postup spracúvania signálov pri syntéze tónov. Najprv sa načíta vzorka harmonickej frekvencie z pamäte. Počas prenášania dát z pamäte sa vynásobí amplitúda harmonickej frekvencie amplitúdou obálky zvuku. Výsledok násobenia amplitúd je vynásobený vzorkou harmonickej frekvencie, ktorá je získaná z pamäte. Takto upravená vzorka harmonickej frekvencie sa posiela do akumulátora. Akumulátor slúži na sčítanie vzoriek 40-tich harmonických frekvencií, čo zodpovedá sčítaniu štyroch tónov. Dáta z akumulátora sa posielajú do DA prevodníka. Postup pri spracúvaní dát v syntetizátore je naznačený na obr. 4.3.



obr. 4.3: Diagram signálových tokov syntetizátora

4.4 Generovanie hodinových signálov

Táto kapitola opisuje spôsob generovania hodinových signálov, ktoré sa používajú v obvode syntetizátora. Súčasťou vývojového kitu je oscilátor Epson SG-8002JF, ktorý je pripojený k pinu T9 obvodu FPGA. Oscilátor generuje hodinový signál s frekvenciou 50 MHz. Signál s touto frekvenciou však nepostačuje na realizáciu syntetizátora, ktorý musí vykonať syntézu jednej vzorky štyroch tónov v rámci jednej periódy vzorkovacej frekvencie f_S . Hodnota frekvencie f_S je zhodná so vzorkovacou frekvenciou audio súborov v CD kvalite, a to predstavuje 44,1 kHz.



obr. 4.4: Bloková schéma generátora hodinových signálov

Obvod syntetizátora riadi hodinový signál $clk100MHz$ s frekvenciou 100 MHz. Táto frekvencia je zhodná s maximálnou frekvenciou, pri ktorej je zaručená správna funkčnosť použitej flash pamäte (kap. 5.1). Hodinový signál $clk100MHz$ je generovaný pomocou jedného zo štyroch blokov DCM. Rovnaký blok DCM sa použil aj k syntéze hodinového signálu

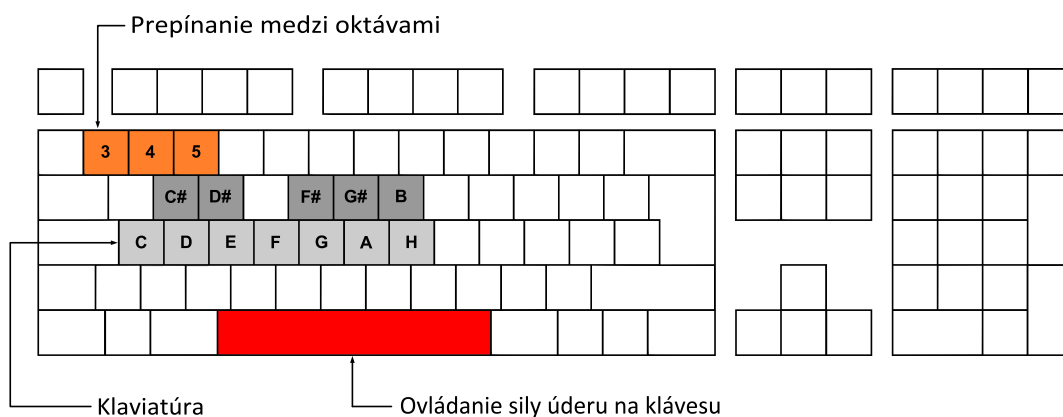
clk100MHz180, ktorý je oproti signálu *clk100MHz* fázovo posunutý o 180°. Signál *clk100MHz180* sa používa pri obsluhu flash pamäte ako signál *SCLK* (kap. 4.9.1).

Okrem hodinového signálu s frekvenciou 100 MHz, syntetizátor potrebuje tiež hodinový signál s frekvenciou 22,57 MHz a signál oproti nemu fázovo posunutý o 180°. Tieto signály slúžia na obsluhu DA prevodníka (kap. 4.10) a sú rovnako ako signály *clk100MHz* a *clk100MHz180* generované pomocou DCM.

Okrem vyššie uvedených signálov sa v syntetizátore používa signál s frekvenciou 1,41 MHz. Tento signál sa využíva pri prenose dát medzi DA prevodníkom a obvodom FPGA (kap. 4.10). Signál sa získava deličkou z frekvencie 22,57 MHz a to tak, že signál sa delí číslom 16, čím je získaná frekvencia 1,41 MHz. Signál *clk1M4_en* slúži k synchronizácii so signálom s frekvenciou 1,41 MHz. Na obr. 4.4 je znázornené prepojenie jednotlivých blokov DCM a deličky generujúcej signál *clk1M4_en*.

4.5 Klávesnica PS/2

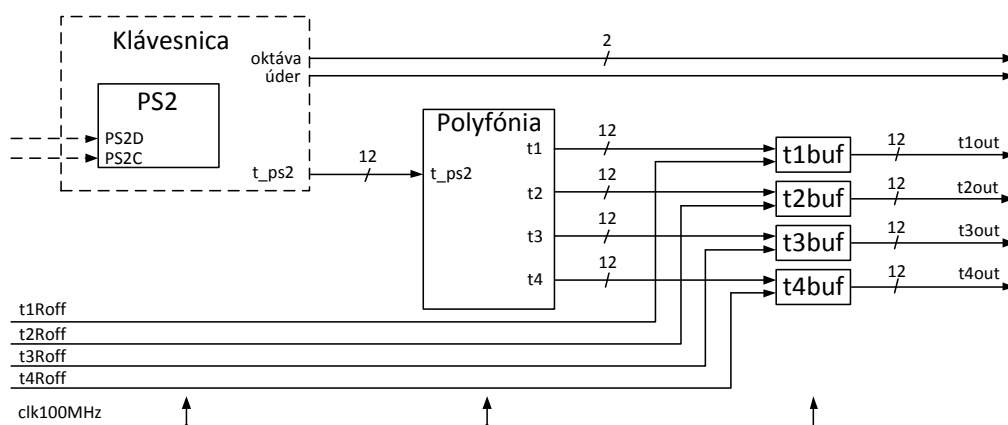
Syntetizátor sa ovláda pomocou klávesnice pripojenej cez PS/2 rozhranie. Rozloženie kláves pri hre na syntetizátore je uvedené na obr. 4.5. Na prepínanie medzi 3. až 5. oktávou slúžia klávesy 1 až 3. Úlohu klaviatúry klavíra zastupuje 1. a 2. rad písmen klávesnice. Stlačenie medzerníka simuluje silu úderu na klávesu, ktorá sa prejaví na priebehu obálky výsledného zvuku (kap. 4.7).



obr. 4.5: Rozloženie kláves na klávesnici

Bloková schéma obvodu spracúvajúceho dáta prenášané z klávesnice je znázornená na obr. 4.6. Sériovo prenášané dáta, ako aj hodinový signál klávesnice sa prijímajú blokom *PS2*. Tento blok po prijatí 11 bitov odošle kód stlačenej klávesy do bloku *Klávesnica*. Z bloku *Klávesnica* vystupuje 12-bitový signál *ton_ps2*, ktorý informuje zvyšné časti obvodu

o hraných tónoch. Signál *ton_ps2* reprezentuje rozsah jednej oktávy od tónu C po tón H. Tóny sú radené vzostupne od MSB bitu, ktorému je priradený tón C, po LSB bit, ktorému je priradený tón H. Tón je aktívny, ak príslušný bit má hodnotu log. 1. V bloku *Klávesnica* je tiež generovaný 2-bitový signál *oktáva* a *úder*. Tieto signály informujú zvyšné časti obvodu o hranej oktáve a sile úderu na klávesu.



obr. 4.6: Bloková schéma klávesnice

Signál *ton_ps2* je privedený do bloku *Polyfónia*. Tento blok na základe signálu *ton_ps2* generuje štyri 12-bitové signály *t1*, *t2*, *t3* a *t4*. Každý z týchto signálov predstavuje jeden z hraných tónov. Práve tieto štyri signály sú základom štvortónovej polyfónie syntetizátora. Štvortónová polyfónia bola zvolená po otestovaní klávesnice, kedy sa potvrdilo, že nie je schopná prenášať kódy viac ako štyroch súčasne stlačených kláves.

Signály *t1* až *t4* sú privedené do blokov *t1buf*, *t2buf*, *t3buf* a *t4buf*. Úlohou týchto blokov je zaistiť pokračovanie syntézy tónu aj po uvoľnení klávesy tak, aby tón mohol doznieť. Bloky *t1buf* až *t4buf* obsahujú stavový automat s dvomi stavmi – *normal* a *adsr_R*. Po uvoľnení klávesy sa do jedného zo signálov *t1* až *t4* zapíše hodnota 0x000. Stavový automat príslušného bloku nadobudne stav *adsr_R*. Počas tohto stavu si signál *t1out*, *t2out*, *t3out*, alebo *t4out* privedený do zvyšných častí obvodu naďalej ponecháva svoju pôvodnú hodnotu. Stav *R* trvá do momentu, kým sa do signálov *t1Roff* až *t4Roff* privedených z generátora obálky zvuku, nezapíše hodnota log. 1 (kap. 4.7). Generátor obálky týmito signálmi informuje, že tón doznel a môže nastať syntéza nového tónu. Stavový automat prechádza do stavu *normal* a do zvyšných častí syntetizátora je privedená nová hodnota signálu *t1*, *t2*, *t3*, alebo *t4*. Toto opatrenie je nevyhnutné, aby pokračoval príjem dát z flash pamäte aj po uvoľnení klávesy (kap. 4.8).

4.6 Syntéza tónov

Tóny sa syntetizujú v časti syntetizátora nazvanej *Syntéza tónu*. Tóny vznikajú zo 16-bitových vzoriek frekvencií získaných z flash pamäte. Obvod možno rozdeliť na menšie časti podľa blokovej schémy, ktorá je uvedená na obr. 4.7. Súčasťou obvodu sú nasledujúce bloky následovne – *tone_counter*, multiplexor *t12mux*, dekodér vstupných signálov, dve blokove pamäte RAM (jedna obsahuje adresy, druhá amplitúdy frekvencií), demultiplexor adres, dve hardvérové 18×18 bit násobičky, akumulátor a generátor obálky zvuku. Obvod je opísaný s ohľadom na signálové cesty uvedené v blokovej schéme.

Obvod začína svoju činnosť, keď sa signál *v16b* privedený z bloku *SPI* (kap. 4.9), nastaví na log. 1. Signál túto hodnotu nadobudne na jednu periódu 100 MHz hodinového signálu vždy po prijatí 16-bitovej vzorky frekvencie z flash pamäte. Signál povolí činnosť blokovým RAM pamätiam, násobičkám a akumulátoru. Impulz tohto signálu je omeškaný pomocou registrov (tzv. *pipelining*) tak, aby impulz aktivoval jednotlivé časti obvodu v správnom okamihu.

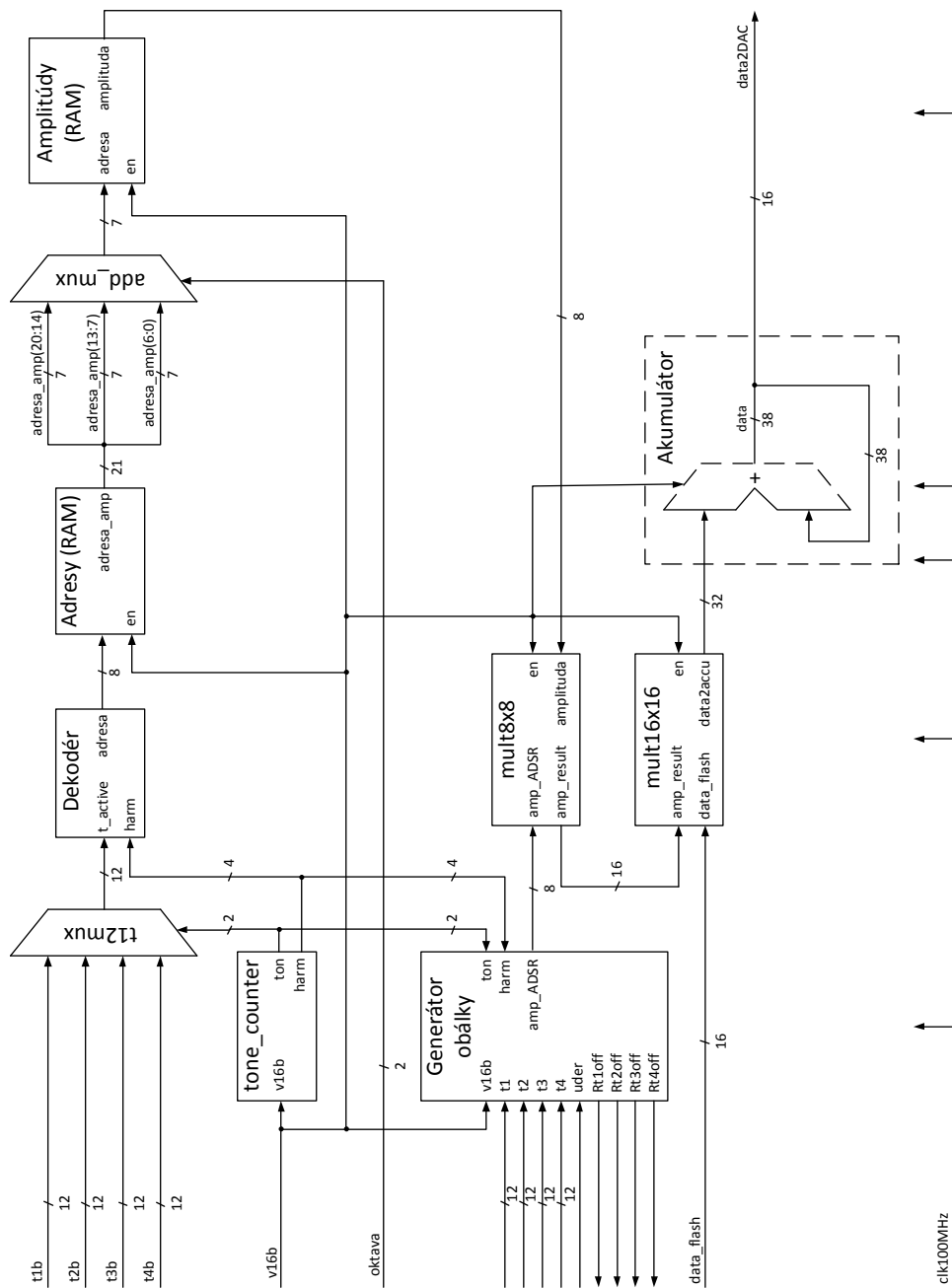
Blok *tone_counter* generuje signály *ton* a *harm* pomocou dvoch čítačov (jeden 4-bitový a jeden 2-bitový). Tieto signály informujú ďalšie časti obvodu o tom, ktorá harmonická frekvencia sa spracúva, a ktorému tónu v rámci polyfónie táto frekvencia patrí. Hodnota signálu *harm* sa inkrementuje vždy po prijatí 16-bitovej vzorky frekvencie z pamäte (signál *v16b* nadobudne hodnotu log. 1). Signál *ton* sa inkrementuje, ak je pri prijatí 16-bitovej vzorky hodnota signálu *harm* rovná 0b1001. Vtedy prebieha syntéza 10. harmonickej frekvencie.

Vstupné 12-bitové signály *t1b*, *t2b*, *t3b* a *t4b* sa multiplexujú signálom *ton* na vstup dekodéra. Každý z týchto signálov obsahuje informáciu o jednom hranom tóne. Dekodér prevádza 12-bitový signál na signál 4-bitový. Prevod na 4-bitový signál je potrebný kvôli správne adresovaniu obsahu pamäte. Tento 4-bitový signál spolu s privedeným signálom *harm* vytvára 8-bitovú adresu, ktorá sa posielá do prvej blokovej pamäte RAM. Pamäť obsahuje 21-bitové adresy pre druhú blokove RAM pamäť.

V druhej blokovej pamäti RAM sú uložené amplitúdy harmonických frekvencií tónov. Každú z týchto 21-bitových adres možno rozdeliť na tri časti po sedem bitov, predstavujú adresu amplitúdy harmonickej frekvencie tónu 3., 4., alebo 5. oktávy. Napr. jedna 21-bitová adresa obsahuje adresu amplitúdy 10. harmonickej frekvencie tónov C3, C4 a C5. Rozdelenie 21-bitovej adresy je uvedené v tab. 4.2.

tab. 4.2: Rozdelenie 21-bitovej adresy podľa oktávy tónu.

Bit adresy	20.	19.	18.	17.	16.	15.	14.	13.	12.	11.	10.	9.	8.	7.	6.	5.	4.	3.	2.	1.	0.
oktáva	3. (malá)							4. (jednočiarková)							5. (dvojiarková)						



obr. 4.7: Bloková schéma syntézy tónu

Adresu delí na časti demultiplexor, ktorý na základe hodnoty signálu *oktava* posiela na adresový vstup druhej blokovej RAM pamäte prvú, druhú, alebo tretiu časť 21-bitovej adresy. Amplitúdy harmonických frekvencií, aj amplitúda obálky zvuku sú pre vyššiu presnosť vyjadrené ôsmimi bitmi vrátane znamienkového bitu vo formáte Q0.7.

Amplitúda harmonickej frekvencie sa z blokovej RAM pamäte posielala do 8×8 bit násobičky. Po aktivovaní násobičky (signál *v16b* sa rovná $\log. 1$) sa vynásobí amplitúda harmonickej frekvencie s amplitúdou získanou z generátora obálky zvuku. Riešenie generátora obálky je opísané v kap. 4.7.

Výsledok násobenia sa odovzdá do 16×16 bit násobičky, ktorá ho vynásobí 16-bitovou vzorkou frekvencie. Obe násobičky využívajú hardvérové 18×18 bit násobičky, ktoré sú súčasťou obvodu FPGA. Použitie hardvérových násobičiek urýchľuje celý proces násobenia tak, že trvá jednu periódu hodinového signálu.

Výsledné 32-bitové číslo je privedené do akumulátora. Pred zapísaním 32-bitového výsledku do interného registra akumulátora sa k tomuto číslu najprv pripočíta pôvodná hodnota tohto interného registra. Šírka registra akumulátora je 38 bitov a je dostatočná na sčítanie štyroch tónov, čo sa rovná 40 harmonickým frekvenciám. Po prijatí štyridsať 32-bitových výsledkov z 16×16 bit násobičky je 16 MSB bitov hodnoty interného registra akumulátora vystavených na výstup akumulátora. Týchto 16 bitov predstavuje štyri syntetizované tóny. Použitie 16 MSB bitov zaručí, že nedôjde k nežiadúcim defektom na výsledných tónoch (napr. orezanie špičiek tónov). Obsah interného registra akumulátora sa vynuluje o jeden takt neskôr, čo zaisťuje, že na výstupe akumulátora je výsledok sčítania 40 a nie len 39 harmonických frekvencií.

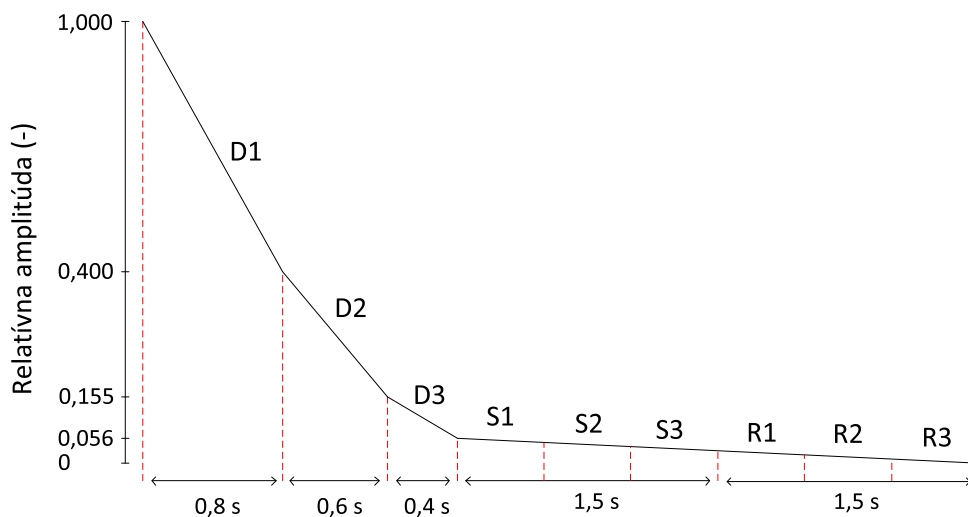
4.7 Generátor obálky zvuku

Na základe priebehu obálky zvuku klavíra uvedeného v kap. 1.1 boli oblasti útlmu, zdržania a uvoľnenia, rozdelené na podoblasti. Cieľom rozdelenia na podoblasti je vystihnúť zmeny hlasitosti tak, ako sa vyvíjajú pri hre na skutočnom klavíri. Rozdelenie oblastí je znázornené na obr. 4.8 (amplitúda je vyjadrená relatívne k maximálnej hlasitosti tónu).

Priebeh obálky neobsahuje oblasť nábehu, ktorá trvá 7 ms (kap. 1.1), nakoľko ľudský sluch nie je schopný zaznamenať zmeny hlasitosti v tak krátkom čase. Zvyšné oblasti (útlm, zdržanie, uvoľnenie) sú rozdelené na tri časti. Oblasti *D1*, *D2*, a *D3* opisujú oblasť útlmu, *S1*, *S2* a *S3* oblasť zdržania a *R1*, *R2*, a *R3* oblasť uvoľnenia. Spomínané oblasti sú ďalej rozdelené na podoblasti trvajúce vždy 0,1 s. Toto rozdelenie zaisťuje plynulé zmeny hlasitosti pri hre na syntetizátore.

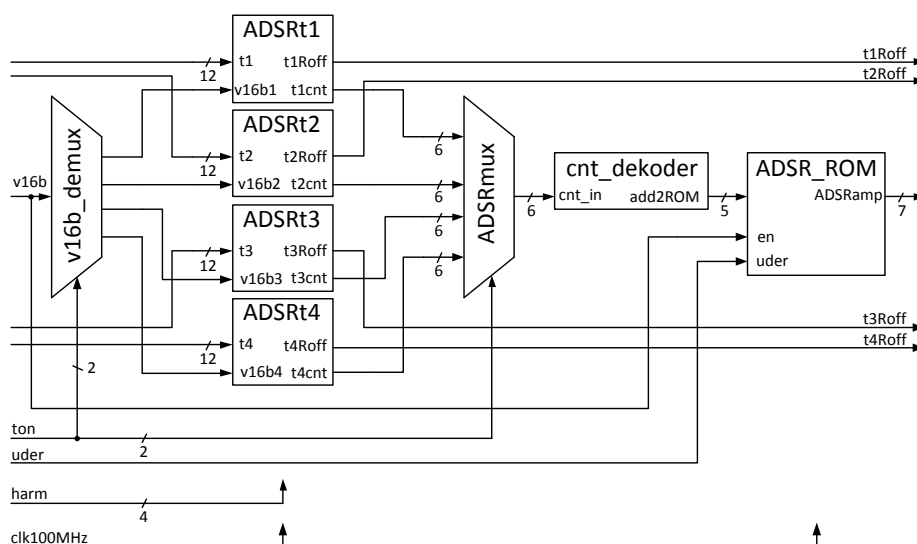
Bloková schéma generátora obálky je uvedená na obr. 4.9. Generátor pozostáva zo štyroch blokov – *ADSRt1*, *ADSRt2*, *ADSRt3* a *ADSRt4*, z ktorých každý generuje priebeh obálky pre jednotlivé tóny polyfónie. V každom z blokov sa nachádza 13-bitový čítač *counter* a 6-bitový čítač *cnt*. Čítač *counter* určuje uplynutie jednej podoblasti. Hodnota čítača *counter* sa zvyšuje, ak je hodnota signálu *v16b* $\log. 1$ a hodnota signálu *harm* je 0b1001. Táto situácia nastáva

pri spracúvaní vzorky 10. harmonickej frekvencie tónu. Hodnota čítača *cnt* určuje, ktorá oblasť vývoja tónu práve prebieha.



obr. 4.8: Podoblasti obálky zvuku klavíra

Pri zmene tónu sa čítače vynulujú a obálka zvuku začína od oblasti *D1*. Táto situácia nastáva ak je generátoru obálky zvuku pridelený nový tón z klávesnice. Po uvoľnení klávesy začína oblasť *R1* a do čítača *cnt* sa zapíše hodnota tejto oblasti. Po doznení tónu sa do signálov *t1Roff*, *t2Roff*, *t3Roff*, a *t4Roff* zapíše na jeden hodinový takt log. 1. Tieto signály sú privedené do blokov *t1buf*, *t2buf*, *t3buf* a *t4buf* (kap. 4.5).



obr. 4.9: Bloková schéma generátora obálky

Signály s hodnotou čítača *cnt* z jednotlivých blokov (*ADSRt1* až *ADSRt4*) sa multiplexujú do bloku *cnt_dekoder* pomocou signálu *ton*. Signál *ton* obsahuje informáciu o tom, ktorý tón je práve syntetizovaný. Rovnaký signál demultiplexuje signál *v16b* do blokov *ADSRt1*, *ADSRt2*, *ADSRt3* a *ADSRt4*. Hodnota čítača *cnt* určuje adresu amplitúdy uloženej v blokovej RAM pamäti (kap. 4.1). Amplitúdy podoblastí sa vyjadrujú ôsmymi bitmi vrátane znamienkového bitu vo formáte Q0.7. Prehľad amplitúd jednotlivých podoblastí je uvedený v tab. 4.3. Signál *uder* prepína medzi priebehom obálky pri silnom (log. 0) a slabom (log. 1) údere na klávesu. Pri slabom údere majú amplitúdy polovičnú hodnotu v porovnaní so silným úderom.

tab. 4.3: Amplitúdy podoblastí obálky zvuku

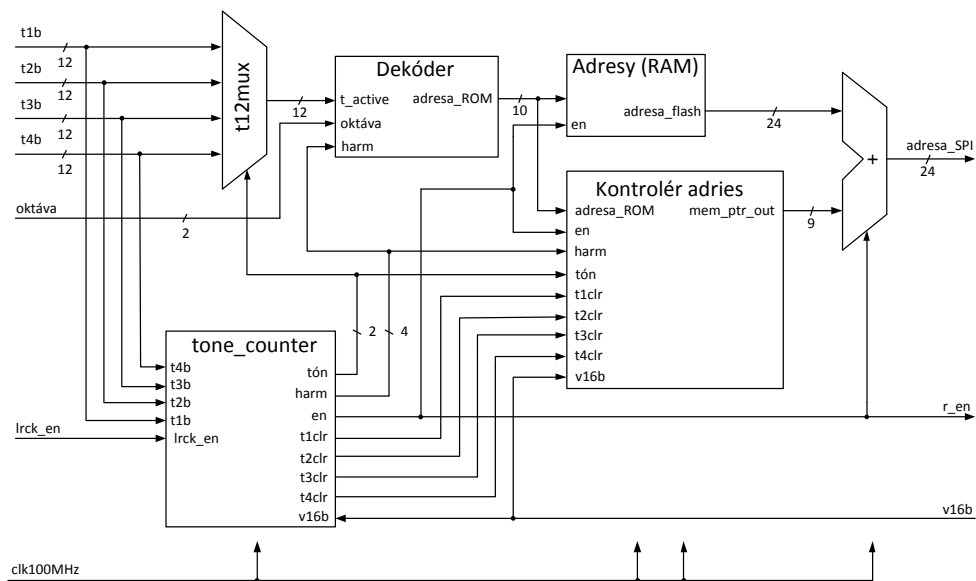
Amplitúda	Oblasť	Podoblasť							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Formát Q0.7	D1	0b01111111	0b01110110	0b01101101	0b01100100	0b01011011	0b01010010	0b01001001	0b01000000
	D2	0b00110111	0b00110001	0b00101011	0b00100101	0b00011111	0b00011001	-	-
	D3	0b00010011	0b00010000	0b00001101	0b00001010	-	-	-	-
	S1	0b00000111	0b00000111	0b00000111	0b00000111	0b00000111	-	-	-
	S2	0b00000110	0b00000110	0b00000110	0b00000110	0b00000110	-	-	-
	S3	0b00000101	0b00000101	0b00000101	0b00000101	0b00000101	-	-	-
	R1	0b00000100	0b00000100	0b00000100	0b00000100	0b00000100	-	-	-
	R2	0b00000011	0b00000011	0b00000011	0b00000011	0b00000011	-	-	-
	R3	0b00000010	0b00000010	0b00000010	0b00000010	0b00000010	-	-	-
Hodnota vyjadrená relatívne k max. hodnote	D1	1,0000	0,9291	0,8583	0,7874	0,7165	0,6457	0,5748	0,5039
	D2	0,4331	0,3858	0,3386	0,2913	0,2441	0,1968	-	-
	D3	0,1496	0,1259	0,1024	0,0787	-	-	-	-
	S1	0,0551	0,0551	0,0551	0,0551	0,0551	-	-	-
	S2	0,0472	0,0472	0,0472	0,0472	0,0472	-	-	-
	S3	0,0394	0,0394	0,0394	0,0394	0,0394	-	-	-
	R1	0,0315	0,0315	0,0315	0,0315	0,0315	-	-	-
	R2	0,0236	0,0236	0,0236	0,0236	0,0236	-	-	-
	R3	0,0157	0,0157	0,0157	0,0157	0,0157	-	-	-

4.8 Riadiaca logika komunikácie obvodu FPGA s flash pamäťou

Základom syntézy tónov sú ich harmonické frekvencie, ktoré sú uložené vo flash pamäti. Pri syntéze tónov je potrebné tieto frekvencie načítať z pamäte a dodať ich do syntetizačnej časti obvodu syntetizátora. Príjem dát riadi blok riadiacej logiky, ktorý na základe podnetov prichádzajúcich z klávesnice rozhoduje, ktoré frekvencie je potrebné získať z pamäte. Túto funkčnú časť syntetizátora možno rozdeliť do podblokov vykonávajúcich konkrétne operácie. Blokovaná schéma je znázornená na obr. 4.10.

Blok riadiacej logiky obsahuje multiplexor vstupných signálov (*t1b*, *t2b*, *t3b* a *t4b*), dekodér vstupných signálov, blokovanú pamäť RAM s uloženými adresami, blok *tone_counter*, kontrolér adres a sčítačku.

Blok riadiacej logiky začína svoju činnosť pri zostupnej hrane signálu *LRCK*, ktorý sa generuje v bloku *i2s* (kap. 4.10). Vtedy je počas trvania jedného taktu vstupný signál *lrck_en*



obr. 4.10: Bloková schéma riadiacej logiky

nastavený na hodnotu log. 1. Signál sa privádza do bloku *tone_counter*, ktorý generuje 2-bitový signál *ton*, 4-bitový signál *harm* a 1-bitové signály *en*, *t1clr*, *t2clr*, *t3clr*, *t4clr*. Signály *ton* a *harm* informujú zvyšné časti bloku riadiacej logiky o tom, ktorý tón sa syntetizuje, a ktorú harmonickú frekvenciu syntetizovaného tónu treba načítať z pamäte. Signál *en* uvádza do činnosti blokovú pamäť RAM, kontrolér adries a sčítačku.

Funkcia bloku *tone_counter* sa riadi jednoduchým stavovým automatom s dvoma stavmi – *Idle* a *Play*. Počiatočným stavom je stav *Idle*, v ktorom stavový automat zotrvá do momentu, kedy signál *lrck_en* nadobudne hodnotu log. 1 a súčasne nemá vstupný signál *t1* nulovú hodnotu. Pri prechode stavového automatu do stavu *Play* je signál *en* po dobu jedného taktu nastavený na log. 1. Stavový automat zotrváva v stave *Play*, kým sa načíta štyridsať 16-bitových vzoriek harmonických frekvencií. Počas stavu *Play* sa signály *ton* a *harm* inkrementujú v prípade, že hodnota vstupného signálu *v16b* je log. 1. Po prijatí vzorky 40-tich harmonických frekvencií prechádza stavový automat do stavu *Idle*.

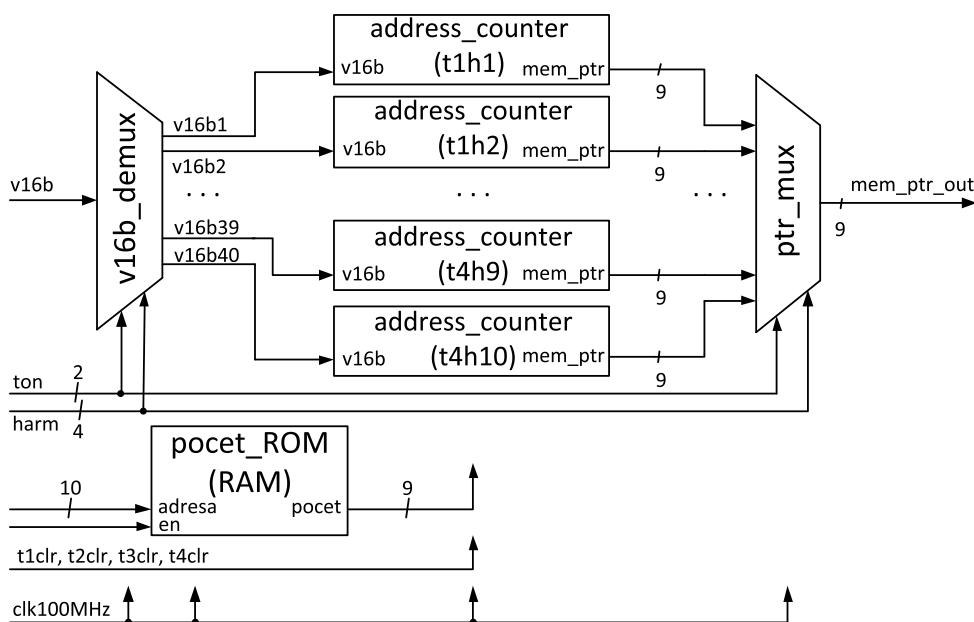
Vstupné signály *t1b*, *t2b*, *t3b* a *t4b* sa multiplexujú signálom *ton* na vstup dekodéra. Dekodér prevádza 12-bitový signál na signál 4-bitový, ktorý spolu so signálmi *oktáva* a *harm* vytvára 10-bitovú adresu. Signály *t1*, *t2*, *t3* a *t4* sa prevádzajú na 4-bitový signál kvôli správne adresovaniu obsahu pamäte RAM. Táto 10-bitová adresa sa posieľa na vstup pamäte RAM, obsahujúcej 24-bitové adresy jednotlivých harmonických frekvencií uložených vo flash pamäti. Na uloženie vzoriek harmonických frekvencií sa využívajú adresy flash pamäte

0x000000 až 0x037E00. Na adrese 0x037E00 sú uložené nuly. Táto adresa sa používa, ak syntetizovaný tón obsahuje menej ako 10 harmonických frekvencií. Vtedy sa pri požiadavke na načítanie vzorky neexistujúcej harmonickej frekvencie tónu načíta 16 núl. Mechanizmus riadiacej logiky by sa skomplikoval, ak by sa počet vzoriek harmonických frekvencií načítaných z flash pamäte menil vzhľadom na počet harmonických frekvencií prítomných v práve syntetizovanom tóne.

Po nastavení signálu *en* na hodnotu log. 1 sa adresa požadovanej harmonickej frekvencie vystaví na výstupe pamäte RAM. Signál *mem_ptr_out*, vystupujúci z kontroléra adres, obsahuje informáciu o tom, ktorú vzorku harmonickej frekvencie je potrebné načítať z flash pamäte. Výsledná adresa vzorky harmonickej frekvencie sa získa sčítaním 24-bitovej adresy získanej z pamäte RAM a 9-bitového signálu *mem_ptr_out*.

Kontrolér adres

Úložný priestor flash pamäte sa rozdeľuje na bloky obsahujúce tri strany (angl. page) pamäte (kap. 5.1). Do týchto blokov sú zapísané vzorky harmonických frekvencií tak, že jeden trojstranový blok obsahuje jednu periódu harmonickej frekvencie. V pamäti RAM sú uložené počiatočné adresy trojstranových blokov. Harmonické frekvencie sa z pamäte čítajú postupne po jednej 16-bitovej vzorke pre všetky štyri tóny. Kontrolér adres udržiava informáciu o tom, ktorá vzorka príslušnej harmonickej frekvencie bola načítaná naposled. Bloková schéma kontroléra je znázornená na obr. 4.11.



obr. 4.11: Bloková schéma kontroléra adres.

Pozíciu vzorky frekvencie v rámci trojstranového bloku vyjadruje hodnota 9-bitového čítača, ktorý sa inkrementuje vždy po načítaní tejto vzorky frekvencie (signál *v16b* je nastavený na log. 1). Čítač sa vynuluje po načítaní poslednej vzorky jednej periódy harmonickej frekvencie tónu. Informácia o počte vzoriek jednej periódy harmonickej frekvencie, to znamená o počte vzoriek tejto frekvencie uložených vo flash pamäti, je uložená v blokovej pamäti RAM (*pocet_ROM*). Každá zo 40-tich harmonických frekvencií (štyri tóny s 10 harmonickými frekvenciami) má svoj čítač. Hodnota čítačov sa multiplexuje vstupným signálom *ton* na výstup kontroléra adries.

Vstupné signály *t1clr*, *t2clr*, *t3clr* a *t4clr* vynulujú čítače v prípade, že došlo ku zmene tónu. Ku zmene tónu dochádza pri doznení tónu, alebo pokiaľ je 12-bitovým signálom *t1b*, *t2b*, *t3b* a *t4b* vstupujúcim do riadiacej logiky pridelená nová hodnota z klávesnice.

4.9 Prenos dát medzi obvodom FPGA a flash pamäťou

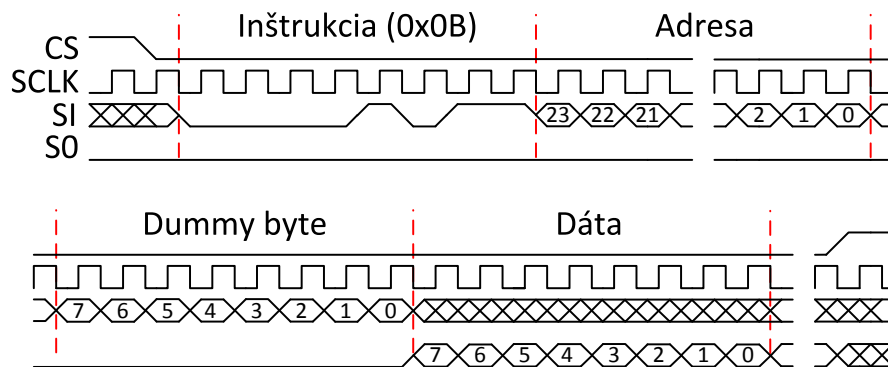
Pri syntéze tónov sa používajú vzorky frekvencií, ktoré sú uložené vo flash pamäti S25FL032K od spoločnosti Spansion. Prenos medzi pamäťou a obvodom FPGA prebieha pomocou sériovej zbernice SPI (Serial Peripheral Interface). Na prenos dát zbernica využíva štyri vodiče. Prvý vodič prislúcha hodinovému signálu *SCLK*, druhý signálu *CS* a na zvyšných dvoch vodičoch sa prenášajú dáta. Nastavením signálu *CS* na hodnotu log. 0 sa zariadenie aktivuje, čo sa využíva pri zapojeniach s viacerými zariadeniami *slave*. Dáta zo zariadenia *slave* sa do zariadenia *master* prenášajú cez vodič *SO*, v tomto prípade z pamäte do obvodu FPGA. Cez vodič *SI* sa dáta prenášajú z obvodu FPGA do pamäte. Na obsluhu pamäte sa používajú tri režimy - *Fast read*, *Page program*, *Chip erase* [17].

Prenos dát cez zbernicu SPI je znázornený na obr. 4.12. Obrázok ukazuje prenos dát pri čítaní obsahu pamäte v režime *Fast read*. V nasledujúcich podkapitolách je popísaný spôsob zápisu, čítania a mazania dát uložených v pamäti.

4.9.1 Čítanie obsahu flash pamäte

Na čítanie dát z pamäte slúži režim *Fast read*, ktorý umožňuje prenos dát na frekvencii do 100 MHz, to umožňuje vloženie tzv. *dummy bytu* medzi posledným bitom zaslanej adresy a prvým prijatým bitom z pamäte. *Dummy byte* vymedzí čas potrebný na spracovanie prijatej adresy internými obvody pamäte [17].

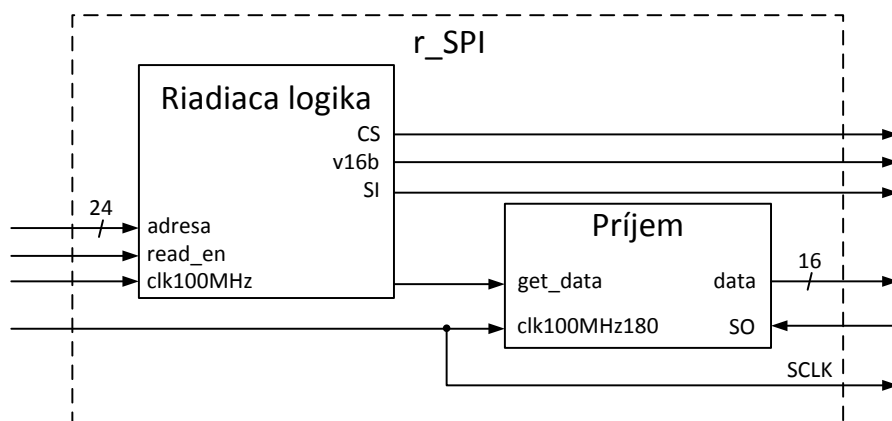
Bloková schéma *r_SPI*, ktorý sprostredkúva komunikáciu s pamäťou, je uvedená na obr. 4.13. Riadiaca logika sa realizuje pomocou stavového automatu, ktorý postupne nadobúda



obr. 4.12: Prenos dát pomocou zbernice SPI pre režim *Fast read*

päť stavov – *Idle*, *Address1*, *Address2*, *Dummy_byte* a *Read_data*. Stavov sú aj s popisom ich funkcií uvedené v tab. 4.4. Stavový diagram je znázornený na obr. 4.14.

Prenos dát začína nastavením signálu *CS* na log. 0 a zaslaním inštrukcie 0x0B, ktorá je nasledovaná 24 bitmi adresy. Po *dummy byte* nasleduje príjem dát z pamäte. Interný čítač pamäte sa inkrementuje vždy po zaslaní jedného bytu, čo umožňuje načítať celý obsah pamäte pomocou jednej adresy. Prenos končí nastavením signálu *CS* na log. 1. Dátové bity sú vystavované na zostupnej hrane signálu *SCLK*. Preto musí byť blok *Príjem*, ktorý je zodpovedný za príjem dát, riadený hodinovým signálom *clk100MHz180*. Pretože blok riadiacej logiky aj blok *Príjem* pracujú v rôznych časových doménach, je potrebné, aby boli synchronizované pomocným signálom. K tomu slúži signál *get_data*, ktorý je nastavený na hodnotu log. 1, keď je potrebné, aby blok *Príjem* ukladal prichádzajúce bity do registra *data*.

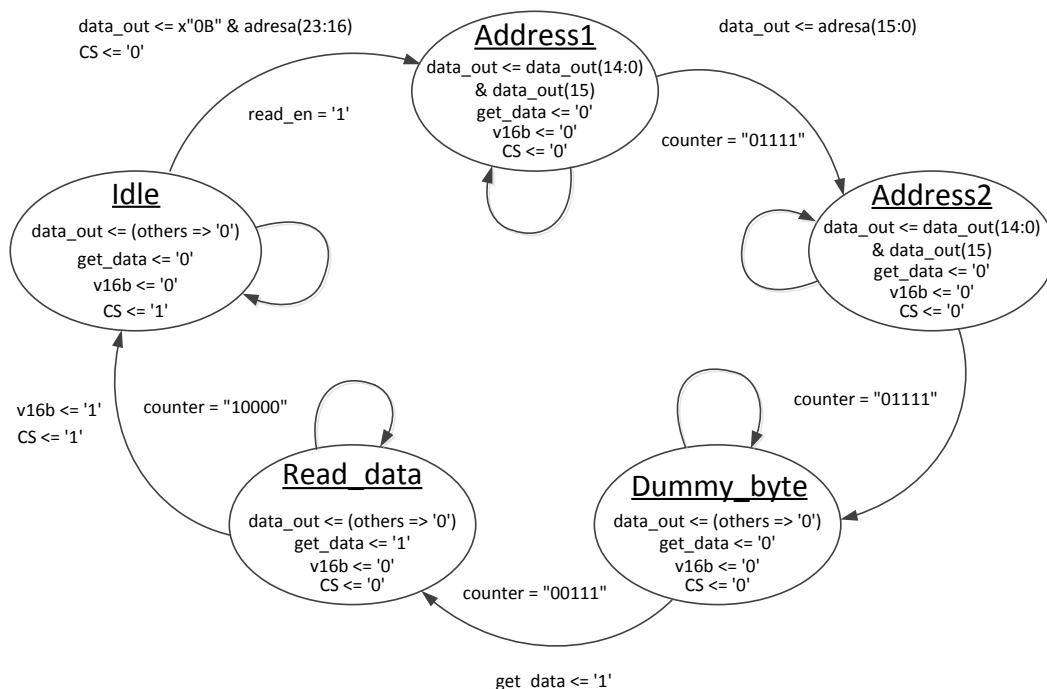


obr. 4.13: Bloková schéma *r_SPI*

tab. 4.4: Prehľad stavov stavového automatu bloku *r_SPI*

Stav	Funkcia stavu
Idle	Počiatočný stav - čaká na príkaz k čítaniu dát
Address1	Do pamäte sa posiela inštrukcia a 8 bit. adresy
Address2	Do pamäte sa posiela zvyšných 16 bit. adresy
Dummy_byte	Pamäť spracúva prijatú adresu (8 taktov)
Read_data	Príjem dát z pamäte

Stavový automat prechádza zo stavu *Idle* do stavu *Address1*, po prijatí požiadavky na načítanie vzorky frekvencie. Pritom je signál *CS* nastavený na hodnotu log. 0 a do posuvného registra *data_out* je uložená 8-bitová inštrukcia spolu s ôsmimi MSB bitmi adresy. MSB bit posuvného registra *data_out* sa do pamäte posiela pomocou signálu *SI*. Stavový automat prechádza do nasledujúceho stavu *Address2*, keď čítač *counter* dosiahne hodnotu 0b01111. Čítač sa pri zmene stavu vynuluje. Pri prechode medzi stavmi sa do posuvného registra uloží zvyšných 16 bitov adresy. Po ich poslaní nasleduje stav *Dummy_byte*, ktorý trvá osem taktov hodinového signálu *SCLK*.



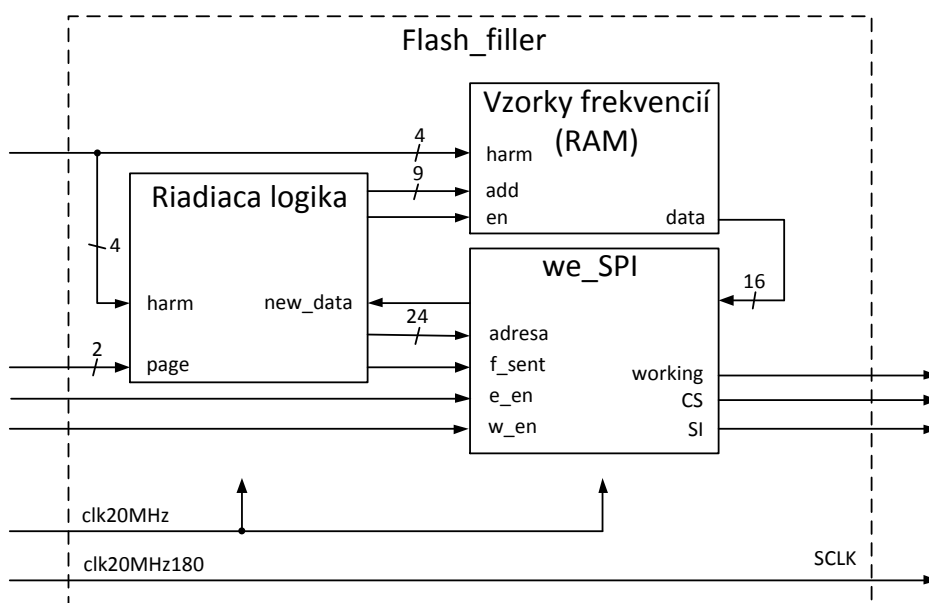
obr. 4.14: Stavový diagram bloku *r_SPI*

Posledným stavom je *Read_data* keď sa dátové bity posielané z pamäte ukladajú do posuvného registra. Pri prechode do stavu *Read_data* je signál *get_data* nastavený

na hodnotu log. 1. Bity sa ukladajú do posuvného registra *data* v bloku *Príjem*, pokiaľ hodnota signálu *get_data* je log. 1. Po prijatí 16 bitov prechádza stavový automat do stavu *Idle*, signál *get_data* je nastavený na log. 0 a signál *v16b* na log.1. Signál *v16b* informuje ostatné bloky obvodu syntetizátora o prijatí jednej 16-bitovej vzorky frekvencie.

4.9.2 Zápis dát a vymazávanie obsahu flash pamäte

Vzorky frekvencií boli do pamäte nahrané pomocou jednoduchého obvodu opísaného v jazyku VHDL. Pri zápise sa využívajú blokové RAM pamäte obvodu FPGA, z ktorých sa dáta zapíšu do pamäte. Bloková schéma tohto obvodu je uvedená na obr. 4.15. Blok *Flash_filler* riadi hodinový signál s frekvenciou 20 MHz. Hodinový signál je generovaný pomocou DCM rovnakým spôsobom, ako v prípade ostatných hodinových signálov (kap. 4.4). Frekvencia 20 MHz bola zvolená preto, aby sa medzi nastavením *WEL* bitu a začiatkom zápisu dát dosiahol časový interval 40 ns, potrebný na spracovanie prijatej inštrukcie [17].



obr. 4.15: Bloková schéma bloku *Flash_filler*

Obvod komunikuje s pamäťou pomocou jej dvoch režimov - *Page program* pre zápis dát a *Chip erase* pre vymazávanie obsahu pamäte. Zápis a vymazávanie dát sa vykonáva pomocou stavového automatu, ktorý nadobúda sedem stavov - *Idle*, *Write_en*, *Wait_inst*, *Erase*, *Address1*, *Address2* a *Write_data*. Stavý sú aj s opisom ich funkcií uvedené v tab. 4.5. Stavový diagram je uvedený na obr. 4.16.

tab. 4.5: Prehľad stavov stavového automatu bloku *w_e_SPI*

Stav	Funkcia stavu
Idle	Počiatočný stav - čaká na príkaz k zápisu dát, alebo vymazaniu obsahu pamäte
Write_en	Do pamäte sa posiela inštrukcia na nastavenie <i>WEL</i> bitu
Wait_inst	Pamäť nastavuje <i>WEL</i> bit na hodnotu log. 1 (1 takt)
Address1	Do pamäte sa posiela inštrukcia k zápisu a 8 bit. adresy
Address2	Do pamäte sa posiela zvyšných 16 bit. adresy
Write_data	Do pamäte sa zapisujú dáta (8 taktov)
Erase	Do pamäte sa posiela inštrukcia na vymazanie obsahu pamäte

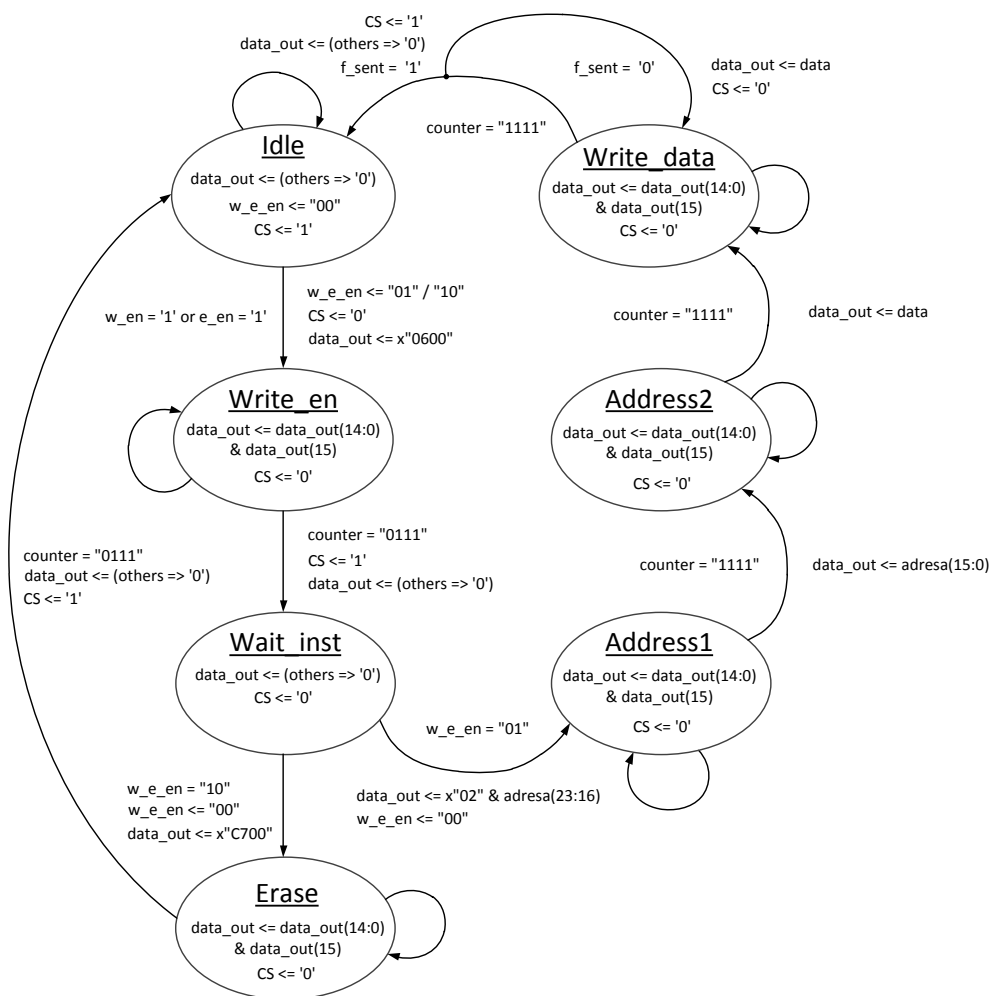
Pred každým zápisom do pamäte, alebo mazaním jej obsahu je potrebné nastaviť *WEL* bit status registra pamäte na hodnotu log. 1, k čomu slúži inštrukcia 0x06. *WEL* bit sa po skončení zápisu, alebo vymazávania automaticky nastaví na hodnotu log. 0.

Úložný priestor pamäte je rozdelený do tzv. strán (anglicky *page*), do ktorých možno zapísať 256 bytov dát. Navzorkované frekvencie však svojím počtom presahujú kapacitu jednej strany. Preto každej frekvencii prislúchajú tri strany pamäte. Pri zápise je potrebné prepínať medzi jednotlivými stranami, aby nedošlo k prepísaniu už uložených dát. Na to slúži signál *Page*, ktorý je pripojený k bloku riadiacej logiky.

Stavový automat prechádza zo stavu *Idle* do nasledujúceho stavu *Write_en* po prijatí požiadavky k zápisu, alebo vymazávaniu dát. Pritom sa signál *CS* nastaví na hodnotu log. 0 a do posuvného registra *data_out* sa uloží inštrukcia 0x06. Pri zápise dát sa do registra *w_e_en* zapíše hodnota 0b01 a naopak pri vymazávaní dát sa zapíše 0b10. Po poslaní inštrukcie prechádza stavový automat do stavu *Wait_inst* a signál *CS* sa nastaví na log. 1. V tomto stave zotrvá stavový automat po dobu jedného taktu hodinového signálu, aby mala pamäť dost' času spracovať zaslanú inštrukciu a nastaviť *WEL* bit na log. 1. Nasledujúci stav závisí na hodnote signálu *w_e_en* a je ním buď *Address1*, alebo *Erase*. Pri prechode do stavu *Erase* sa do posuvného registra *data_out* zapíše inštrukcia 0xC700. Pokiaľ nasleduje stav *Address1*, tak do registra *data_out* je zapísaná inštrukcia 0x02 a osem MSB bitov adresy. Po stave *Address1* nasleduje stav *Address2*, počas ktorého je do pamäte zaslaných zvyšných 16 bitov adresy.

Zápis dát prebieha počas stavu *Write_data*. Pri prechode do tohto stavu sa do posuvného registra *data_out* zapíše obsah registra *data*, ktorý obsahuje dáta poslané z blokovej RAM pamäte. Po poslaní 16 bitov do flash pamäte sa do posuvného registra zapíšu nové dáta

z RAM pamäte. Prenos pokračuje, do momentu, keď signál *f_sent* z riadiacej logiky nadobudne hodnotu log. 1. Zápis dát a vymazávanie obsahu pamäte sa končí pri prechode stavového automatu do stavu *idle*, kedy je signál *CS* opätovne nastavený na hodnotu log. 1.

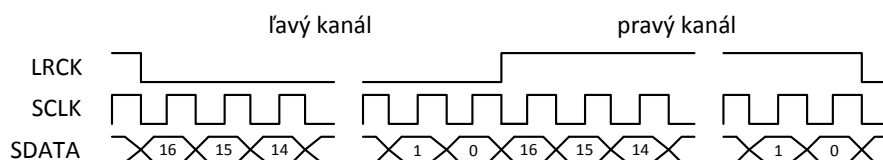


obr. 4.16: Stavový diagram bloku *we_SPI*

4.10 Prenos dát medzi obvodom FPGA a DA prevodníkom

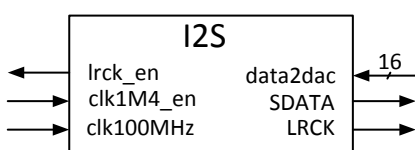
Pre audio výstup syntetizátora bol použitý DA prevodník CS4334 od spoločnosti Cirrus Logic (kap. 5.2). Prevodník komunikuje s ostatnými zariadeniami pomocou sériovej zbernice I²S (Inter-IC Sound), ktorá obvykle využíva na prenos dát tri vodiče – *LRCK*, *SDATA* a *SCLK*. Okrem uvedených vodičov sa niekedy vyskytuje aj štvrtý vodič *MCLK*. Vodič *LRCK*, ktorý sa tiež uvádza ako *Word select* prepína medzi ľavým a pravým audio kanálom.

Vodič *SDATA* slúži na prenos dát, pričom MSB bit sa posiela ako prvý. Sériový hodinový signál je DA prevodníku privedený cez vodič *SCLK*. Hodinový signál slúži k načítaniu dát do interného zásobníka [12]. DA prevodník si môže signál *SCLK* generovať aj samostatne pomocou signála *MCLK* (kap. 5.2). Prenos dát pomocou zbernice I²S je znázornený na obr. 4.17.



obr. 4.17: Prenos dát pomocou zbernice I²S

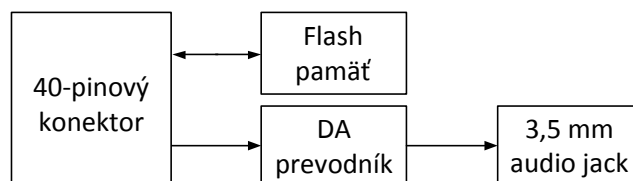
Blok *i2s* zodpovedá za komunikáciu obvodu syntetizátora s DA prevodníkom (obr. 4.18) a generuje signál *LRCK*, ktorý má frekvenciu zhodnú so vzorkovacou frekvenciou. Zároveň popri generovaní signálu *LRCK* sa posielajú dáta z posuvného registra *data*. MSB bit registra *data* sa vystavuje pri náběžnej hrane signálu s frekvenciou 1,41 MHz (kap. 4.4). Na to slúži signál *clk1M4en*, ktorý sa nastaví na hodnotu log. 1 pri nástupnej hrane signálu 1,41 MHz. Pri zostupnej hrane signálu *LRCK* sa do posuvného registra *data* zapisuje obsah registra *data2dac*, ktorý obsahuje vzorku syntetizovaného tónu. Frekvencia signálu *MCLK* DA prevodníka je 22,57 MHz, ktorá je generovaná pomocou DCM (kap. 4.4).



obr. 4.18: Blokovaná schéma *i2s*

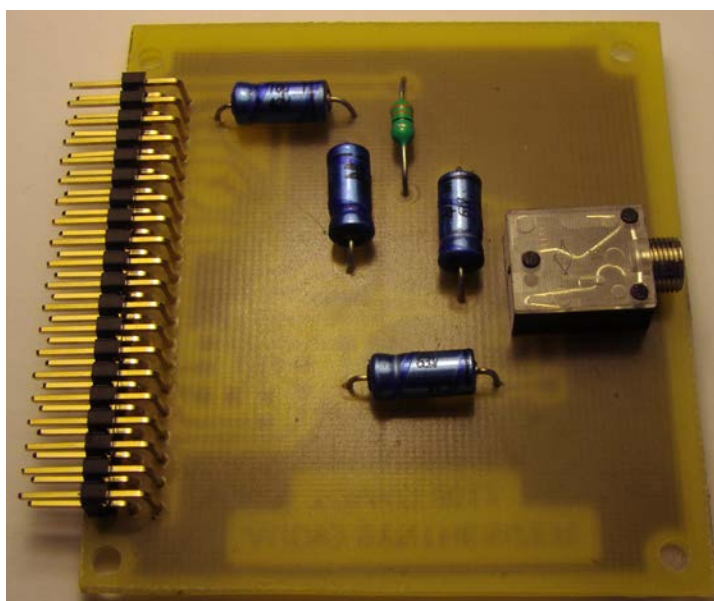
5 Rozširujúce periférie

Táto kapitola sa venuje perifériám rozširujúcej dosky. Rozširujúce periférie sú tie súčasti syntetizátora, ktoré neposkytuje použitý vývojový kit. Doska obsahuje 32 Mbit flash pamäť a DA prevodník. Doska je pripojená k vývojovému kitu Spartan-3 pomocou 40-pinového konektoru (obr. 5.2).



obr. 5.1: Bloková schéma rozširujúcej dosky

Rozširujúcu dosku možno rozdeliť na dva funkčné bloky. Prvý slúži na ukladanie dát potrebných k syntéze tónov. Nachádza sa v ňom flash pamäť S25FL032K. Druhý blok sprostredkúva prevod digitálnych dát na analógový audio signál, pričom využíva DA prevodník CS4334. Výstup ľavého aj pravého kanála je pripojený cez pasívny filter k 3,5 mm jack konektoru. Bloková schéma rozširujúcej dosky je uvedená na obr. 5.1. Návrh obvodu DPS vychádzal zo schémy zapojenia uvedenej v [6], [8] a [7]. Schéma zapojenia a predloha na výrobu DPS sú uvedené v prílohe B.



obr. 5.2: Fotografia rozširujúcej dosky (vrchná strana)

5.1 Flash pamäť S25FL032K

Flash pamäť S25FL032K od spoločnosti Spansion slúži na ukladanie vzoriek frekvencií. Pamäť je vyrobená 90 nm technológiou a umožňuje zápis a čítanie dát pri frekvenciách až do 104 MHz. Kapacita pamäte je 32 Mbit organizovaných do 16 384 stránok (angl. page) po 256 bytov. Komunikácia s ostatnými zariadeniami prebieha pomocou sériovej zbernice SPI. Pri realizácii obvodu syntetizátora sa z dostupných režimov používajú režimy *Fast read*, *Page program* a *Chip erase*. Spôsob komunikácie s pamäťou v týchto režimoch je detailne opísaný v kap. 4.9.

5.2 Digitálno-analógový prevodník CS4334

Prevod digitálnych vzoriek tónov na analógový audio signál zaisťuje DA prevodník CS4334 od spoločnosti Cirrus Logic. Prevodník je špeciálne navrhnutý pre použitie v audio a video zariadeniach. Súčasťou obvodu je kompletný stereo systém pre digitálno-analógový prevod, ktorý zahŕňa digitálnu interpoláciu, $\Sigma\Delta$ moduláciu štvrtého rádu, DA prevodník a analógový filter typu dolná priepusť. Prevodník poskytuje vysokú toleranciu voči rozkolísaniu vstupného hodinového signálu (angl. jitter). Rozsah podporovaných vzorkovacích frekvencií je 2 až 100 kHz [5]. Prevodník podporuje až 24-bitový digitálno-analógový prevod pri použití externého hodinového signálu a až 16-bitový prevod pri použití interného hodinového signálu.

Komunikácia s ostatnými zariadeniami prebieha pomocou sériovej zbernice I²S (kap. 4.10). Sériový hodinový signál *SCLK* slúži na načítanie dátových bitov do interného zásobníka. Hodinový signál *SCLK* možno prevodníku dodať dvomi spôsobmi. Prvou možnosťou je priviesť externý signál cez vstupný pin. Druhou možnosťou je nechať DA prevodník, aby generoval signál samostatne. Frekvencia výsledného signálu závisí na pomere frekvencií signálov *LRCK* a *MCLK*. Prevodník vyhodnotí frekvencie týchto signálov a pomocou interných deličiek vygeneruje potrebný signál *SCLK* [5]. V tab. 5.1 je uvedený prehľad možných frekvencií signálu *MCLK* a im zodpovedajúce vzorkovacie frekvencie.

tab. 5.1: Prehľad frekvencií signálu *MCLK* [5]

f_s (kHz)	MCLK (MHz)				
	128 x f_s	192 x f_s	256 x f_s	384 x f_s	512 x f_s
32	4,0960	6,1440	8,1920	12,2880	16,3840
44,1	5,6448	8,4672	11,2896	16,9344	22,5792
48	6,1440	9,2160	12,2880	18,4320	24,5760
64	8,1920	12,2880	-	-	-
88,2	11,2896	16,9344	-	-	-
96	12,2880	18,4320	-	-	-

6 Vyhodnotenie výsledkov

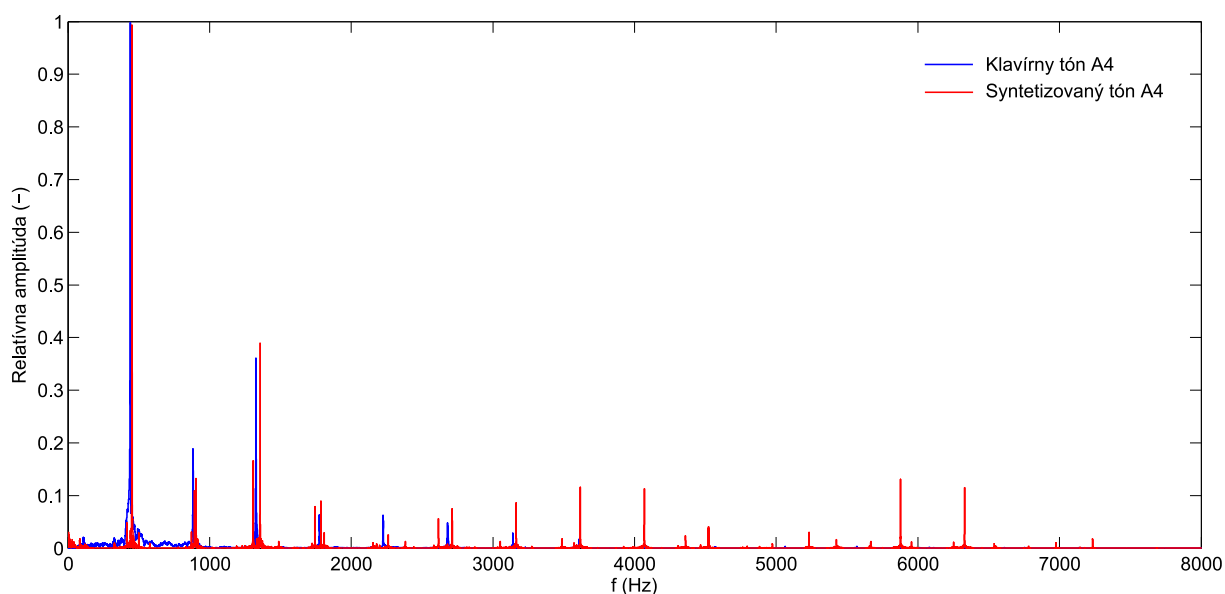
Cieľom práce bolo preskúmať používané metódy syntézy zvuku a na základe prieskumu zvoliť vhodnú metódu pre návrh hudobného syntetizátora. Simulácie vykonané v programe Matlab naznačovali dosiahnutie vierohodných tónov pri použití aditívnej syntézy zvuku.

Návrh obvodu syntetizátora bol opísaný v jazyku VHDL a otestovaný vo vývojovom kite Spartan-3. Rozsah syntetizátora zahŕňa tóny 3. až 5. oktávy. Syntetizátor podporuje štvortónovú polyfóniu, ktorá umožňuje hrať základné akordy.

Na rozdiel od tónov získaných syntézou v programe Matlab sa farba tónov vytváraných syntetizátorom menej približuje skutočnej farbe klavírnych tónov. Tóny farbou zvuku pripomínajú prvý komerčný syntetizátor Hammond Novachord (vyrobený v roku 1942), ktorý fungoval na princípe analógovej aditívnej syntézy [14].

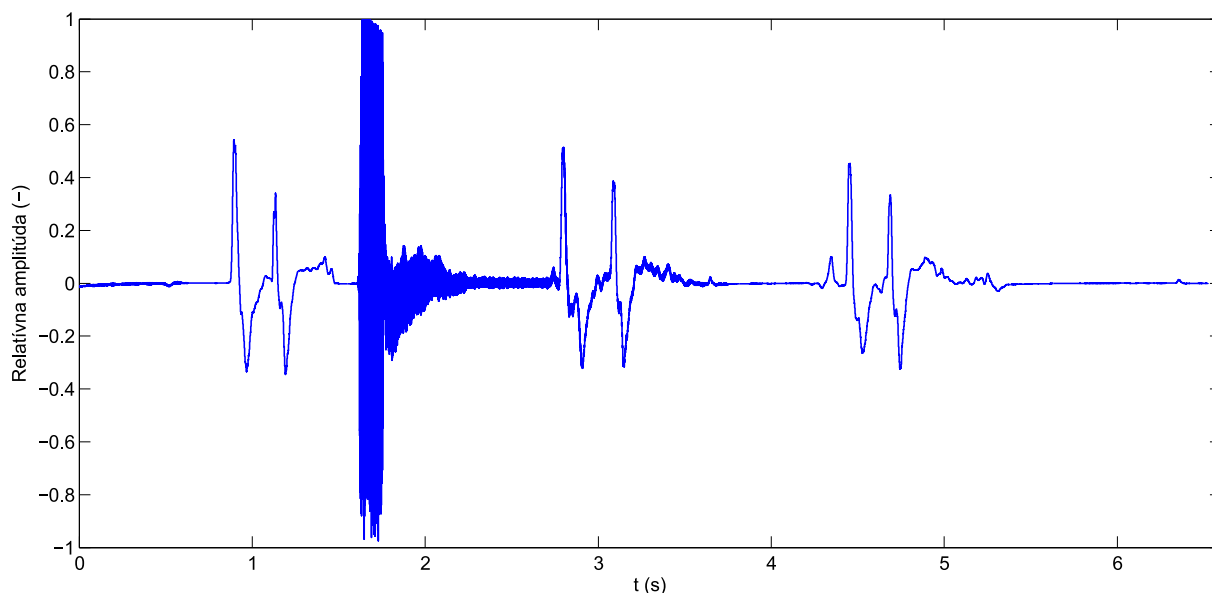
Rozdiel medzi výsledkami simulácie a výsledkami získanými zo syntetizátora spôsobuje rôzna presnosť výpočtov. Syntetizátor pri výpočtoch využíva čísla s pevnou desatinnou čiarkou vyjadrené 16-timi bitmi. Program Matlab počíta s pohyblivou desatinnou čiarkou, a preto dosahuje vysokú presnosť výsledkov.

Vo výslednom zvuku syntetizátora sa vyskytuje „pískanie“. K „pískaniu“ dochádza pri hraní tónov 3. oktávy, alebo pri súčasnom hraní dvoch až štyroch tónov. Vtedy súčasne znie viac harmonických frekvencií a dochádza tak k interakcii harmonických signálov s rovnakou fázou. Na obr. 6.1 je znázornené spektrum klavírneho tónu A4 a tónu A4 vytvoreného syntetizátorom.



obr. 6.1: Spektrum klavírneho tónu A4 a tónu A4 vytvorenom syntetizátorom

Odlišnosť spektra syntetizovaného tónu a klavírneho tónu je spôsobená šumom, ktorý je prítomný v syntetizovanom tóne. Na obr. 6.2 je znázornený priebeh syntetizovaného tónu A4. Syntetizované tóny boli nahrané pomocou zvukovej karty počítača.



obr. 6.2: Priebeh syntetizovaného tónu A4

Konečná verzia návrhu syntetizátora používa signál *MCLK* s frekvenciou 18,75 MHz, namiesto pôvodne uvažovanej frekvencie 22,57 MHz. Dôvodom tejto zmeny je doba potrebná na syntézu jednej vzorky štyroch tónov. Syntéza pri použití frekvencie 100 MHz trvá 26,8 μ s, čo zodpovedá perióde frekvencie 37,313 kHz, a tak najbližšia možná vzorkovacia frekvencia, ktorú možno vygenerovať pomocou DCM a deličky frekvencie je 36,621 kHz ($T = 27,3 \mu$ s).

Návrh syntetizátora využíva väčšinu obvodu FPGA Spartan-3 XC3S200. Využitých je 1899 (98%) z dostupných 1920 programovateľných logických blokov, deväť (75%) z 12-tich blokových pamätí RAM, dva zo štyroch blokov DCM a dve (16%) z 12-tich hardvérových 18×18 bit násobičiek. Syntetizátor ďalej využíva 14 zo 173 vstupno-výstupných blokov (IOB). Pri syntéze bol kladený dôraz na rýchlosť výsledného obvodu tak, aby bola dosiahnutá frekvencia 100 MHz. Maximálna frekvencia syntetizátora je podľa analýzy vývojového prostredia Xilinx Design Suite 111,921 MHz.

Záver

V rámci tejto bakalárskej práce bol navrhnutý jednoduchý hudobný syntetizátor fungujúci na princípe aditívnej syntézy. Syntetizátor bol opísaný v jazyku VHDL a implementovaný v obvode FPGA Spartan-3 na vývojovej doske od spoločnosti Digilent.

Zámerom bolo doceliť farbu zvuku blížiacu sa farbe skutočného klavíra. Výsledná farba zvuku syntetizátora pripomína prvý komerčný syntetizátor Hammond Novachord, ktorý fungoval na princípe analógovej aditívnej syntézy. Syntetizátor podporuje štvortónovú polyfóniu a rozsah 3. až 5. oktávy. Na ovládanie sa používa počítačová klávesnica, ktorá je pripojená ku vývojovej doske Spartan-3 cez PS/2 rozhranie.

Pri riešení zadania tejto bakalárskej práce bolo potrebné vytvoriť dosku s perifériami, ktoré neboli súčasťou použitej vývojovej dosky s obvodom FPGA. Doska s doplnujúcimi perifériami obsahuje DA prevodník a flash pamäť.

Použitou metódou aditívnej syntézy zvuku sa dosiahli uspokojivé výsledky. Avšak na dosiahnutie plne funkčného syntetizátora by bolo potrebné doceliť absolútnu polyfóniu (súčasné znenie tónov všetkých dostupných kláves) a použiť pri syntéze tónov väčší počet harmonických frekvencií. Po splnení týchto predpokladov by však výsledný návrh syntetizátora prekračoval možnosti použitého obvodu FPGA Spartan-3 XC3S200.

Výsledný návrh syntetizátora podporujúceho štvortónovú polyfóniu a syntézu použitím 10-tich harmonických frekvencií využíva väčšinu obvodu FPGA. V budúcnosti by pre ďalší postup bolo vhodné zvážiť použitie odlišnej metódy syntézy zvuku, pomocou ktorej by sa dali dosiahnuť lepšie výsledky pri menšej náročnosti na realizáciu.

Literatúra

- [1] University of Iowa Electronic Music Studios. *Musical Instrument Samples* [online]. [cit. 2011-11-01]. Dostupné z: <http://theremin.music.uiowa.edu/MISpiano.html>.
- [2] ANDRAKA, Ray: A survey of CORDIC algorithms for FPGA based computers. In *Proceedings of the 1998 ACM/SIGDA sixth international symposium on Field programmable gate arrays, FPGA '98*, New York, NY, USA: ACM, 1998, ISBN 0-89791-978-5, s. 191–200, doi:10.1145/275107.275139.
- [3] Bristow-Johnson, R.: Wavetable Synthesis 101, A Fundamental Perspective. In *Audio Engineering Society Convention 101*, 11 1996.
- [4] CHOWNING, J. M.: The Synthesis of Complex Audio Spectra by Means of Frequency Modulation. *J. Audio Eng. Soc.*, ročník 21, č. 7, 1973: s. 526–534.
- [5] Cirrus Logic, Inc.: *CS4334/5/8/9 Product Data Sheet* [online]. 2008, [cit. 2011-12-06]. Dostupné z: http://www.cirrus.com/en/pubs/proDatashet/CS4334-35-38-39_F5.pdf.
- [6] Cirrus Logic, Inc.: *Evaluation Board for CS4334/8/9 Family of Products* [online]. 1998, [cit. 2012-05-07]. Dostupné z: <http://www.cirrus.com/en/pubs/rdDatashet/cs4334eb.pdf>.
- [7] FENG, Liu: *S25FL-P SPI Flash Family PCB Layout Guide* [online]. 2009, [cit. 2012-05-07]. Dostupné z: http://www.spansion.com/Support/Application%20Notes/S25FL-P_PCB_Layout_AN.pdf.
- [8] HEJTMÁNEK, Vladimír: Převodník DA pro audio. *Praktická elektronika - Amatérské rádio*. 2003, č. 4, s. 5.
- [9] Historical Piano Study Center: How a piano works [online]. 2009-03-16 [cit. 2011-12-03]. Dostupné z: <http://www.frederickcollection.org/works.html>.
- [10] HYEOKHO, Choi: *Fixed Point Arithmetic* [online]. 2003, s. 6 [cit. 2012-05-10]. Dostupné z: http://www.cpplab.net/web/dsp/Choi_Fixed-Point.pdf.
- [11] MIRANDA, Eduardo Reck: *Computer sound design: synthesis techniques and programming*. Boston, Mass.: Focal Press, 2002, ISBN 9780240516936.
- [12] Philips Semiconductors: *I2S bus specification* [online]. 1986, rev. 1996-06-05, [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: http://www.classic.nxp.com/acrobat_download2/various/I2SBUS.pdf.

- [13] REID, Gordon: *Synth Secrets, Part 14: An Introduction To Additive Synthesis* [online]. 2000 [cit. 2011-11-02]. Dostupné z: <http://www.soundonsound.com/sos/jun00/articles/synthsec.htm>.
- [14] ROADS, Curtis: *The Computer Music Tutorial*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1996, ISBN 02-626-8082-3, 1234 s.
- [15] RUSS, Martin: *Sound Synthesis and Sampling*. Oxford: Focal, 2009, ISBN 978-0-240-52105-3.
- [16] RUSSELL, Daniel: *Hammer nonlinearity, dynamics and the piano sound* [online]. 1997, [cit. 2011-12-04]. Dostupné z: <http://www.kettering.edu/physics/drussell/Piano/Dynamics.html>.
- [17] Spansion, Inc.: *S25FL032K, 32-Mbit CMOS 3.0 Volt Flash Memory with 104-MHz SPI (Serial Peripheral Interface) Multi I/O Bus Data Sheet* [online]. 2010, [cit. 2012-05-06]. Dostupné z: http://www.spansion.com/Support/Datasheets/S25FL032K_00.pdf.
- [18] TOLONEN, Tero, Vesa VÄLIMÄKI a Matti KARJALAINEN: Evaluation of Modern Sound Synthesis Methods Table of Contents. *Synthesis*. Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing, Dept. of Electrical and Communications Engineering, Helsinki University of Technology, 1998, č. 3, s. 126. Dostupné z: http://www.acoustics.hut.fi/publications/reports/sound_synth_report.html.
- [19] URBAN, Jiří : Electronic Music Old-School. *Metody zvukové syntézy* [online]. 2009 [cit. 2011-11-02]. Dostupné z: <http://elektronicka-hudba.telotone.cz/clanky/metody-zvukove-syntezy/souctove>.
- [20] Xilinx, Inc.: *Sine/Cosine Look-Up Table v5.0* [online]. 2005, [cit. 2011-12-05]. Dostupné z: http://www.xilinx.com/support/documentation/ip_documentation/sincos.pdf.
- [21] Xilinx, Inc.: *Spartan-3 FPGA Starter Kit Board User Guide* [online]. 2008, [cit. 2011-12-06]. Dostupné z: http://www.xilinx.com/support/documentation/boards_and_kits/ug130.pdf.
- [22] Xilinx, Inc.: *Spartan-3 Generation FPGA User Guide* [online]. 2011, [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: www.xilinx.com/support/documentation/user_guides/ug331.pdf.

Zoznam veličín, symbolov a skratiek

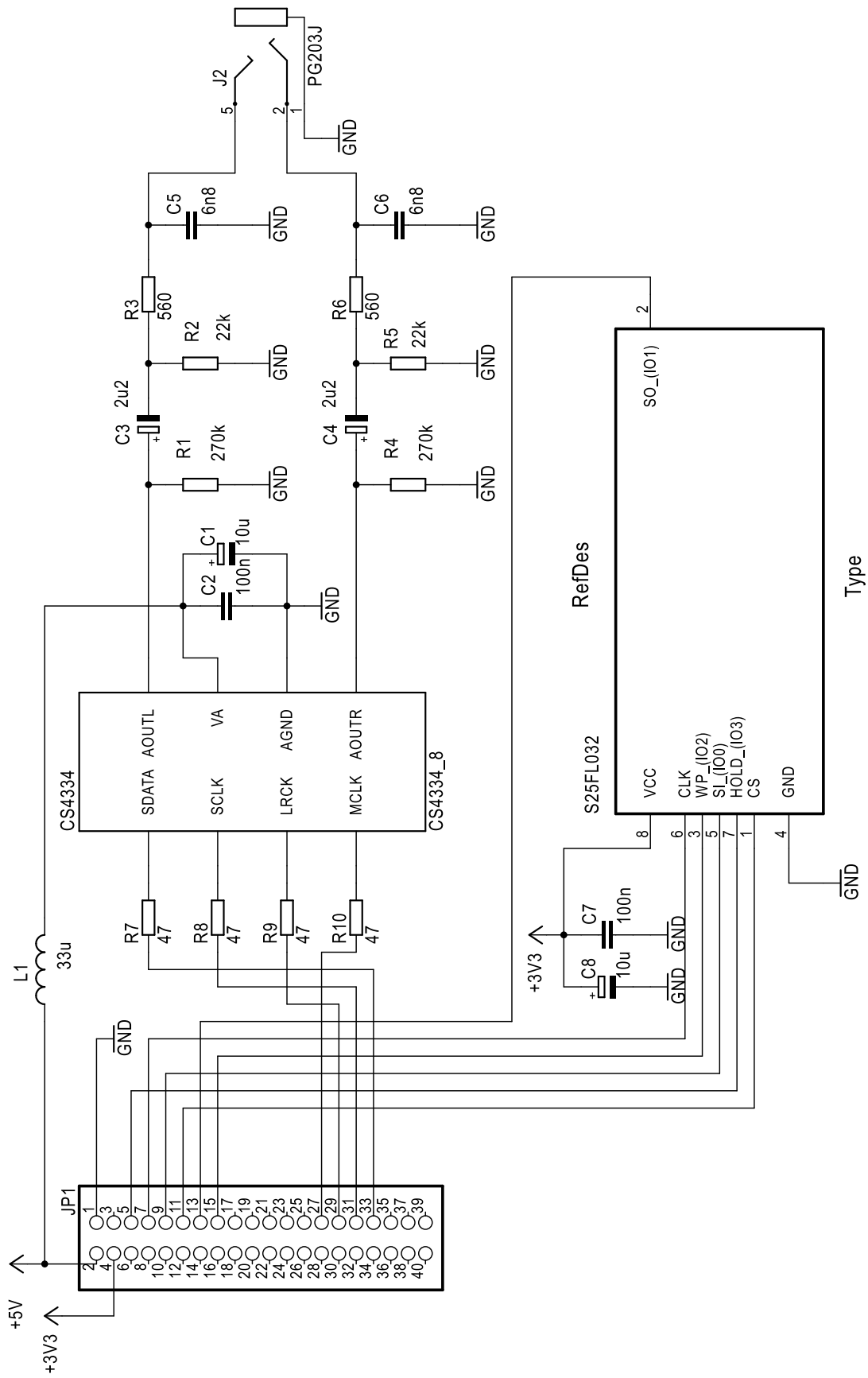
ADSR	Obálka zvuku typu Attack-Decay-Sustain-Release
AM	Amplitude modulation (Amplitúdová modulácia)
CORDIC	Coordinate Rotation Digital Computer
DAC	Digital-to-Analog Converter (Digitálno-analógový prevodník)
DCM	Digital Clock Manager
DPS	Doska plošných spojov
DSP	Digital Signal Processing (Digitálne spracovanie signálov)
f_0	Medzná frekvencia
f_s	Vzorkovacia frekvencia
FM	Frequency modulation (Frekvenčná modulácia)
FPGA	Field-Programmable Gate Array
FWHT	Fast Walsh–Hadamard Transform (Rýchla Walsh–Hadamardova transformácia)
MCLK	Master Clock
SCLK	Serial Clock
MI	Modulačný index
PS/2	Personal System/2
RM	Ring modulation (Kruhová modulácia)
VCO	Voltage Controlled Oscillator (Oscilátor ovládaný napätím)
VCF	Voltage Controlled Filter (Filter ovládaný napätím)
VHDL	Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language

Zoznam príloh

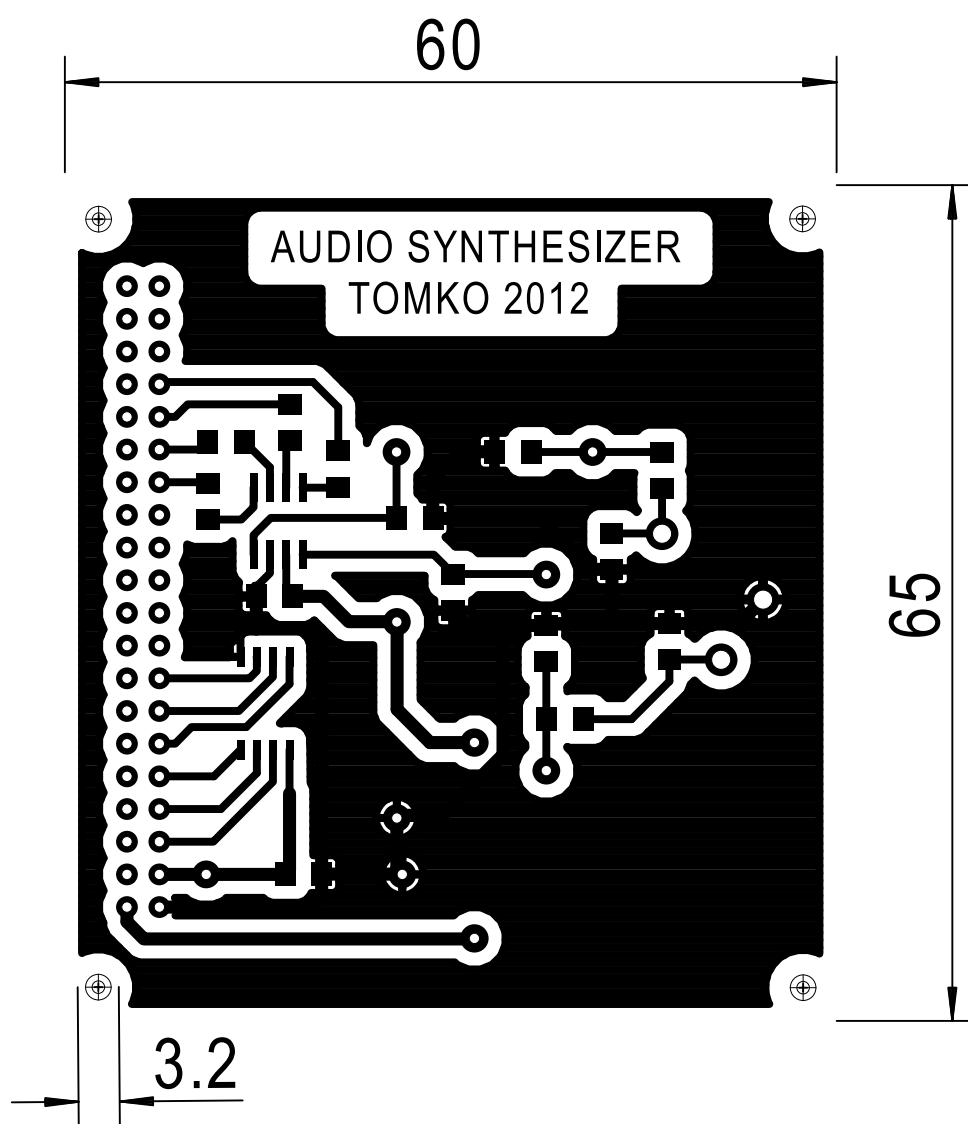
- A. Tabuľky
- B. Schéma zapojenia a predloha k výrobe DPS
- C. Súbory so vzorkami harmonických frekvencií tónov v číselnom formáte Q0.15
- D. Zdrojový kód projektu *Synthesizer* v jazyku VHDL (CD)
- E. Zdrojový kód projektu *Flash filler* v jazyku VHDL (CD)
- F. Elektronická verzia bakalárskej práce (CD)

tab. A.1: Amplitúdy prvých 10 harmonických frekvencií tónov 3., 4. a 5. oktávy (amplitúdy sú vyjadrené relatívne k najväčšej amplitúde prítomnej v tóne)

Tón	Základná frekvencia (Hz)	Amplitúda harmonickej frekvencie (-)									
		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
c3	131,1	0,1683	1,0000	0,2193	0,1879	0,0258	0,0601	0,2082	0,0433	0,0158	0,0805
C#3	139,2	0,3232	1,0000	0,4401	0,6346	0,2961	0,3023	0,2376	0,0083	0,1210	0,0881
D3	147,1	0,6670	1,0000	0,8682	0,1027	0,4030	0,1632	0,4287	0,0258	0,1612	0,0524
D#3	155,9	0,6395	1,0000	0,5973	0,4740	0,2181	0,2717	0,3967	0,0324	0,1606	0,1531
E3	165,2	0,9240	1,0000	0,4890	0,2345	0,3693	0,2297	0,3412	0,0570	0,2088	0,0935
F3	174,9	0,5796	1,0000	0,1337	0,1946	0,1435	0,1472	0,1254	0,0146	0,0350	0,0445
F#3	185,6	0,3242	1,0000	0,2076	0,0395	0,2046	0,0251	0,3043	0,0034	0,0892	0,0313
G3	196,7	1,0000	0,2865	0,3367	0,1000	0,1860	0,1017	0,1272	0,0116	0,1083	0,0458
G#3	208,4	0,8226	1,0000	0,2683	0,4117	0,3376	0,1129	0,0562	0,0232	0,0586	0,0217
A3	220,3	1,0000	0,5804	0,1821	0,3790	0,0772	0,1311	0,0969	0,0509	0,0771	0,0274
B3	233,5	1,0000	0,3703	0,0762	0,0345	0,0427	0,0122	0,0492	0,0122	0,0187	0,0043
H3	247,3	1,0000	0,9724	0,2833	0,3781	0,3566	0,0658	0,0781	0,0573	0,0314	0,0201
c4	261,9	1,0000	0,6564	0,1158	0,2364	0,2363	0,0422	0,0829	0,0295	0,0292	0,0151
C#4	278,3	1,0000	0,2556	0,0666	0,1652	0,0988	0,0295	0,0462	0,0197	0,0188	0,0232
D4	294,1	0,4346	1,0000	0,0895	0,0635	0,1099	0,0681	0,0991	0,0216	0,0132	0,0142
D#4	311,8	0,3501	1,0000	0,3476	0,4255	0,1787	0,1871	0,0262	0,1197	0,0132	0,0335
E4	330,4	1,0000	0,4436	0,7330	0,4122	0,2256	0,1830	0,1028	0,0701	0,0200	0,0392
F4	350,0	1,0000	0,2999	0,2857	0,0820	0,0401	0,0853	0,0382	0,0238	0,0065	0,0040
F#4	370,5	1,0000	0,3922	0,1489	0,1290	0,0878	0,0230	0,0199	0,0310	0,0037	0,0056
G4	392,7	1,0000	0,5672	0,1450	0,1149	0,1006	0,0528	0,0501	0,0403	0,0027	0,0052
G#4	417,1	1,0000	0,1756	0,1227	0,0343	0,0400	0,0938	0,0145	0,0175	0,0067	0,0055
A4	440,7	1,0000	0,1857	0,3612	0,0633	0,0621	0,0483	0,0284	0,0168	-	-
B4	467,3	1,0000	0,2161	0,1715	0,1398	0,1092	0,0825	0,0184	0,0317	-	-
H4	494,7	1,0000	0,1094	0,1027	0,0193	0,0297	0,0340	0,0169	0,0133	-	-
c5	524,1	1,0000	0,0992	0,0893	0,0168	0,0336	0,0071	0,0025	0,0056	-	-
C#5	555,4	1,0000	0,2460	0,0747	0,0646	0,0597	0,0150	0,0174	0,0087	-	-
D5	589,0	1,0000	0,0998	0,0556	0,0474	0,0445	0,0123	0,0167	0,0049	-	-
D#5	622,6	1,0000	0,2558	0,1426	0,0664	0,0354	0,0174	0,0096	-	-	-
E5	662,0	1,0000	0,1399	0,0232	0,0122	0,0096	0,0067	0,0054	-	-	-
F5	701,8	1,0000	0,1862	0,0768	0,0436	0,0396	0,0071	0,0098	0,0041	-	-
F#5	740,7	1,0000	0,0843	0,0377	0,0188	0,0230	0,0074	-	-	-	-
G5	786,1	1,0000	0,1522	0,0306	0,0185	0,0070	-	-	-	-	-
G#5	833,9	1,0000	0,0672	0,0181	0,0111	-	-	-	-	-	-
A5	883,6	1,0000	0,1298	0,0158	0,0086	0,0043	-	-	-	-	-
B5	934,8	1,0000	0,1619	0,0393	0,0157	-	-	-	-	-	-
H5	994,6	1,0000	0,0731	0,0084	-	-	-	-	-	-	-



obr. B.1: Schéma zapojenia rozširujúcej dosky



obr. B.2: Predloha rozširujúcej dosky