**Členové týmu**

* Vít Jánoš (zodpovědný za obsluhu sedmisegmentového displeje)
* Vojtěch Kudela (zodpovědný za obsluhu maticové klávesnice a správu GitHub)
* David Matějček (zodpovědný za komparátor a testování)
* Antonín Putala (zodpovědný za generátory, PWM modulátor a demo nahrávky)

**Teoretický popis a vysvětlení**

**Zvuk** je podélné mechanické vlnění. Zvuková vlna působí výchylku od atmosférického tlaku. Aby byl zvuk pro člověka slyšitelný, musí být o kmitočtu 20 Hz až 20 kHz a větší výchylku než práh slyšení *P*0 = 2·10-5 Pa. Dlužno podotknout, že citlivost lidského sluchu je frekvenčně závislé, práh slyšení i kmitočtový rozsah se liší dle jednotlivce. Lidské ucho vnímá hlasitost logaritmicky, proto se hlasitost vyjadřuje v decibelové míře.

*L*P je hladina akustického tlaku.

Periodické zvukové signály se nazývají **tóny**. Tyto tóny mají svou základní frekvenci, která je označovaná jako výška. Podle výšky také nese tón název. V hudební teorii se používá označení oktáva pro zdvojnásobení kmitočtu. Pokud zdvojnásobíme kmitočet tónu, ponese stejný název pouze bude ležet ve vyšší oktávě. Jako základní tón se užívá komorní A s kmitočtem *f* = 440 Hz. Oktáva se v evropské hudební teorii rozděluje na 12 dílů. Ty se nazývají půltóny. Každému půltónu je přiřazen kmitočet. Tento kmitočet se určí jako součin základního kmitočtu a poměru pro konkrétní půltón. Pokud změníme frekvenci základního tónu, změní se kmitočty všech půltónů.

Princip, podle kterého jsou přiřazovány poměry k půltónům nazýváme **ladění**. V minulosti byl užívány různé typy ladění, které měly své výhody i neduhy (např.: Pythagorejské, Středotónové, Parejovo…). V současném době se používá téměř výhradně rovnoměrně temperované ladění. V rovnoměrně temperovaném ladění je poměr mezi dvěma po sobě jdoucími půltóny .

Z tónu A se tedy získá A# vynásobením .

A tímto způsobem by bylo pokračováno pro zbývající půltóny.

**Tab. 1 Tabulka kmitočtů jednotlivých tónů**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Název | Kmitočet [Hz] | Název | Kmitočet [Hz] | Název | Kmitočet [Hz] |
| A | 440,0 | C# | 554,4 | F | 698,5 |
| A# | 466,2 | D | 587,3 | F# | 740,0 |
| B\* | 493,9 | D# | 622,3 | G | 784,0 |
| C | 523,3 | E | 659,3 | G# | 830,6 |

\* V českých a německých zemích je zvykem nazývat tento tón H. Oproti tomu jako B je označován tón A#. Zde je uváděné pojmenování obvyklé v anglosaských zemích.

Bylo by samozřejmě možné pokračovat dál, nicméně následoval by kmitočet přesně dvojnásobný oproti základnímu tónu, tedy bylo dosaženo celé oktávy.

Hudební tón není tvořen pouze základním kmitočtem, nýbrž též vyššími harmonickými složkami (alikvótními tóny), což jsou celistvé násobky základního kmitočtu. Tóny stejné výšky s odlišným obsahem vyšších harmonických složek se liší co do **barvy tónu**. To lze demonstrovat na rozdílném zvuku jednotlivých hudebních nástrojů. Vhodnou kombinací vyšších harmonických lze věrně napodobit libovolný hudební nástroj. Odlišná barva tónu je demonstrována na třech základních průbězích: obdélníkovém, trojúhelníkovém a pilovém.

Generace zvukových signálů pomocí FPGA působí problém, protože zvukový signál je spojitý, zatímco FPGA má pouze dvoustavové výstupy. Řešením je užití **pulzně šířkové modulace** (PWM). PWM je modulace, při které se střída výstupního obdélníkového signálu mění v závislosti na okamžité hodnotě modulovaného signálu. Velká výchylka okamžitého signálu se projeví větší střídou, menší výchylka menší střídou. Hlavním benefitem je 1bitový výstup, který může být přímo zaveden do reproduktoru, Pokud je potřeba získat původní signál stačí užít dolní propust.

PWM modulátor je v principu komparátor. Jako referenční průběh je nutné použít pilový průběh. Je nutné, aby byl kmitočet referenčního byl alespoň o řád větší než nejvyšší kmitočet modulačního signálu. Aby zařízení bezchybně fungovalo je nutné, aby měl v každém čase referenční průběh větší maximální hodnotu a menší minimální hodnotu než modulační signál. Jinak by měl výstup střídu 100 %, respektive 0 %, což není možno. Kmitočet použitého je pouhých 10 kHz, což je nicméně v této konkrétní aplikaci postačující, avšak nebylo by, pakliže by byl rozsah rozšířen směrem k vyšším tónům.

Obsah obrázku text, diagram, řada/pruh, Písmo

Popis byl vytvořen automaticky

**Obr. 1 Princip PWM modulátoru – převzato z 2**

Je pochopitelné, že modulační i referenční průběh je nutné uvnitř FPGA vyjádřit pomocí číslicových hodnot. Signál je vyjádřen vzorky, jímž je přiřazena 8bitová číselná hodnota. Protože tyto průběhy mohou nabývat též záporných hodnot, je hodnota 127 (x“7F“) užívána coby nulová úroveň, vyšší hodnoty jsou kladné, nižší záporné.

**Hardwarový popis a demo aplikace**

Popiš co umí periferie atd co ukazují.

**Softwarový popis**

1. **Blok** [**DISPLAY\_AND\_GEN**](https://github.com/VojtaKudela/BPC-DE1-topic_4/blob/main/Complete/display_and_gen.vhd)

Obsah obrázku text, diagram, řada/pruh, Vykreslený graf

Popis byl vytvořen automaticky

**Obr. 2 Schéma zapojení DISPLAY\_AND\_GEN**

Blok DISPLAY\_AND\_GEN zastřešuje dva velké bloky SOUND\_GENERATOR a DISP\_CON Mimo to obsahuje logiku, která nastavuje reset komparátoru. Komparátor je resetován, pokud není nic stisknuto a zařízení nehraje demo nahrávku nebo pokud je reset komparátoru nařízen blokem DISP\_CON.

**2. Blok** [**SOUND\_GENERATOR**](https://github.com/VojtaKudela/BPC-DE1-topic_4/blob/main/Complete/sound_generator.vhd)

Úkolem SOUND\_GENERATOR je generovat PWM modulovaný signál, který obsahuje zvukovou informaci. Tento signál je buďto vygenerován uvnitř tohoto bloku nebo brán zvenčí vstupy pro dema.

Obsah obrázku diagram, text, Plán, Technický výkres

Popis byl vytvořen automaticky

**Obr. 3 Schéma zapojení SOUND\_GENERATOR**

Blok obsahuje tři generátory, které generují jednotlivé průběhy, [osmikanálový multiplexer](https://github.com/VojtaKudela/BPC-DE1-topic_4/blob/main/Complete/mux3bit.vhd), převodník [boot\_to\_freq](https://github.com/VojtaKudela/BPC-DE1-topic_4/blob/main/Complete/boot_to_freq.vhd), generátor pulzů [clock\_enable](https://github.com/VojtaKudela/BPC-DE1-topic_4/blob/main/Complete/clock_enable.vhd) a samotný [PWM modulátor](https://github.com/VojtaKudela/BPC-DE1-topic_4/blob/main/Complete/PWM_mod.vhd). **Osmikanálový multiplexer** umožňuje přepínání vstup PWM modulátoru mezi třemi střídavými průběhy a třemi demo nahrávkami. Je adresován signálem mode. 4bitový signál freq obsahuje informaci o frekvenci, nicméně v této podobě s ním nemohou generátory pracovat, proto je tato hodnota **převodníkem boot\_to\_freq** převedena na číselnou hodnotu, která odpovídá desetinásobku frekvence v Herzích. Protože tlačítka maticové klávesnice nejdou po sobě, bylo nutné zajistit jejich uspořádání softwarově, a to plní tento převodník. Převádí 4bitovou vstupní hodnotu na 16bitový výstup dle následující tabulky.

**Tab. 2 Převodní tabulka boot\_to\_freq**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **inpu (hex)** | **output** | **odpovídá** |
| 0 | x"0898" | A |
| 1 | x"09A5" | B |
| 2 | x"0A38" | C1 |
| 3 | x"0B78" | D1 |
| 4 | x"0E74" | F#1 |
| 5 | x"091B" | A# |
| 6 | x"0AD4" | C#1 |
| 7 | x"0C27" | D#1 |
| 8 | x"1235" | A#1 |
| 9 | x"1039" | G#1 |
| A | x"0DA4" | F1 |
| B | x"0CE0" | E1 |
| C | x"1470" | C2 |
| D | x"134B" | B1 |
| E | x"0F50" | G1 |
| F | x"1130" | A1 |

**Simulace komponentů**

Write descriptive text and put simulation screenshots of your components.

**Instrukční list**

Write an instruction manual for your application, including photos and a link to a short app video.

**Reference**

1. [Online VHDL Testbench Template Generator (lapinoo.net)](https://vhdl.lapinoo.net/testbench/)
2. Analogová elektronika 2 – doc. Ing Roman Šotner, PhD.
3. [Pulsně šířková modulace (dhservis.cz)](http://www.dhservis.cz/psm.htm)
4. [František Fuka: Hudba z geekovsko-matematického hlediska - DevFest Praha 2012 (youtube.com)](https://www.youtube.com/watch?v=RQuRFCE5NzI)
5. Do you hear a people sing? – Claude-Michel Schönberg
6. Für Elise – Ludwig van Beethoven
7. Entertainer – Scott Joplin
8. [Microsoft PowerPoint - aud\_prednaska\_1 [režim kompatibility] (vut.cz)](https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/827361/mod_resource/content/3/aud_prednaska_1.pdf)