

Generovanie harmonických a neharmonických signálov s využitím procesora ARM

¹Matej BEREŠ, ²Dobroslav KOVÁČ

^{1,2} Katedra teoretickej a priemyselnej elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky,
Technická Univerzita v Košiciach,
Slovenská republika

¹matej.beres@tuke.sk, ²dobroslav.kovac@tuke.sk

Abstrakt — Článok popisuje možný spôsob generovania harmonických a neharmonických signálov za pomoci D/A (Digitálno-analógového) prevodníka, ktorý je implementovaný v puzdre mikrokontroléra STM32F446RE. V skratke je popísaný princíp činnosti D/A prevodníka a jeho vlastnosti. Výsledky navrhovaného riešenia sú overené praktickým meraním. Cieľom článku je poukázať na to, že aj s použitím lacného mikrokontroléra je možné vytvoriť presný generátor signálov. V oblasti frekvencií počuteľnosti je možné tento spôsob vytvárania signálov použiť na generovanie hudobných tónov.

Kľúčové slová: — ARM, D/A prevodník, mikrokontrolér, sínusový signál

The generation of harmonic and non-harmonic signals using ARM processor

Abstract — The article describes a possible method for generating harmonic and non-harmonic signals with the help of D/A (Digital to Analog) converter, which is implemented in the microcontroller STM32F446RE. Further the article briefly described principle of operation of D/A converter and its features. The results of the proposed solutions are verified by practical measurements. The aim of the article is to point out that even with the use of inexpensive microcontroller an accurate signal generator can be created. In the frequency of audibility it is possible to use this method for generate musical tones.

Keywords — ARM, DAC, microcontroller, sine wave

I. ÚVOD

V dnešnej dobe je implementácia mikrokontrolérov do spotrebičov čoraz viac populárna. Je to najmä kvôli ich nízkej spotrebe, pomerne vysokému výkonu, spoľahlivosti a cenovej dostupnosti. Vďaka tomu, že dnešné mikrokontroléry disponujú rôznymi perifériami ako: programovateľná pamäť, operačná pamäť, A/D a D/A prevodníky, časovače a rôzne komunikačné periférie (SPI, I2C, UART), je ich využitie obmedzené iba na schopnostiach užívateľa.

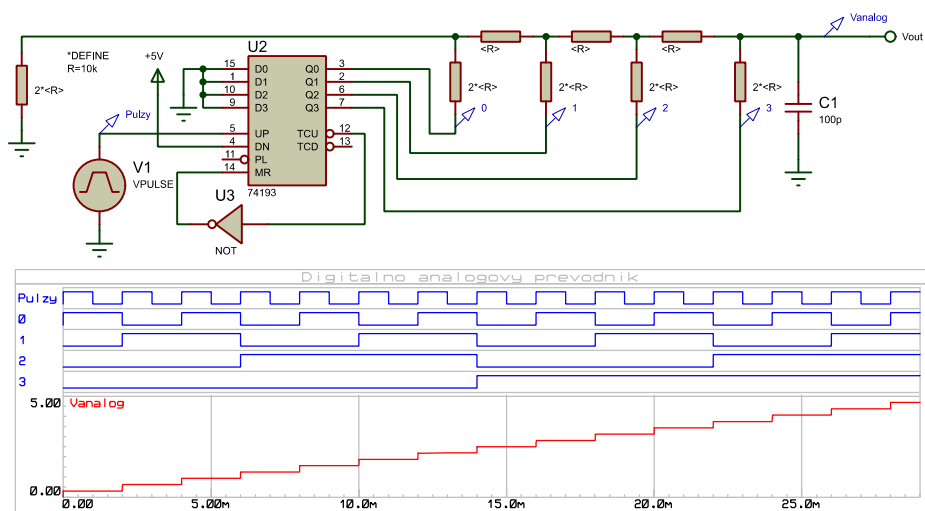
Čo sa týka popisu signálu, tak najjednoduchším typom signálu je periodický signál, inak nazvaný aj harmonický signál. Tento signál sa vyznačuje tým, že určitá vzorka signálu sa v čase opakuje. Vyjadrením sily signálu v čase, teda maximálna hodnota (max. odchýlka), je štandardne meraná a udávaná vo voltoch (V). Rýchlosť opakovania vzorky signálu za sekundu je udávaná v Hertzoch (Hz). Ekvivalentom k frekvencii je perióda označovaná písmenom T . Perióda vyjadruje časový

interval opakovania signálu. Medzi periódou a frekvenciou platí vzťah (1).

$$T = \frac{1}{f} \quad (1)$$

II. DIGITÁLNO-ANALÓGOVÝ PREVODNÍK

Na generovanie sínusových signálov je použitý D/A prevodník, ktorý je implementovaný vo vybranom mikrokontroléry. Skôr ako sa prejde k samotnému spôsobu generovania sínusového signálu je potrebné spomenúť niekoľko základných vecí o D/A prevodníkoch. D/A prevodník je elektrický obvod, ktorý dokáže previesť digitálny signál na analógový. Najjednoduchšie je to znázorniť na prevodníku typu R2R, pozri obrázok, Obr. 1.



Obr. 1 Princiálne zapojenie D/A prevodníka typu R2R bez impedančného meniča

Na obrázku, Obr. 1 je znázornený 4 bitový D/A prevodník, na ktorý je pripojený 4 bitový BCD (Binary Coded Decimal v preklade Binárne zakódované dekadické číslo) čítač. Najvýznamnejší bit je 3 a najmenej významný bit je 0, pozri obrázok, Obr. 1. To znamená, že najvýznamnejší bit urobí najväčšiu zmenu výstupného signálu. V závislosti od toho, ktorý bit je nastavený na logickú 1 a ktorý na logickú 0 bude hodnota výstupného napätia diskretne rozdelená v rozpätí 0 až U_{ref} mínus hodnota minimálneho napät'ového kroku, ktorá je daná najmenej významným bitom 0. U_{ref} je hodnota napätia logických úrovni. Následne je možné výstupné napätie R2R D/A prevodníka určiť pomocou vzťahu (2).

$$U_{výstup} = U_{ref} \frac{U_{dig}}{2^n} \quad (2)$$

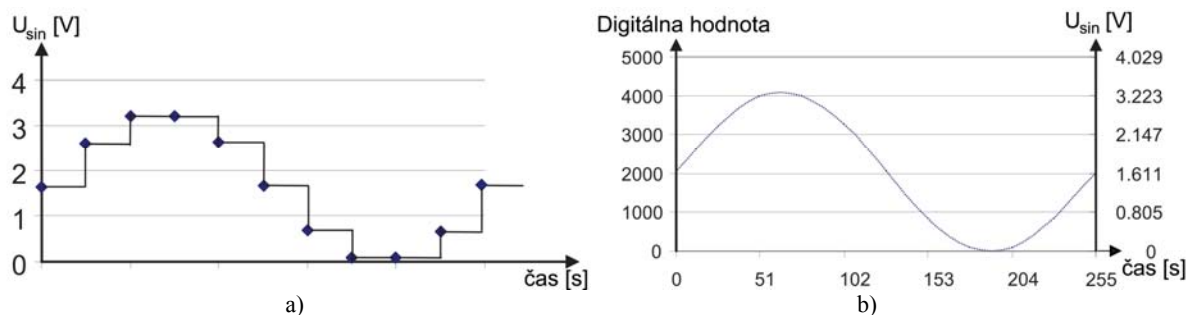
Kde U_{dig} je BCD hodnota v dekadickom tvare. Napríklad pre 4 bity je maximálna dekadická hodnota rovná 15. n je počet bitov. Podľa tohto vzťahu je možné ďalej určiť veľkosť napätia jedného kroku, ktoré je dané vzťahom (3).

$$\Delta U_{výstup} = U_{ref} \frac{1}{2^n} \quad (3)$$

Například ak referenčná hodnota t.j. hodnota napätia logických úrovni je rovná 5 V a je použitý 4 bitový prevodník, potom maximálne výstupné napätie prevodníka môže nadobúdať hodnotu 4,6875 V. Veľkosť kroku je potom rovná 0,3125 V. Presnosť tohto prevodníka je daná použitými rezistormi.

V prípade mikrokontroléra je zmena analógovej hodnoty volaná periodicky za pomoci časovača, alebo volaná cyklicky z programu. Následne sa výstupná hodnota D/A prevodníka nastaví podľa kombinácií vstupných digitálnych hodnôt. Preto je výsledný analógový signál D/A prevodníka daný

konečným počtom hodnôt. Z toho vyplýva, že čím je vyšší počet vzorkovania na 1 periódu signálu, tým je výsledný signál vyhladenejší, ako to je možné vidieť na obrázku, Obr. 2.



Obr. 2 Generovanie sínusového signálu, a) s 10 vzorkami, b) s 255 vzorkami

Ďalší parameter, ktorý významne vplýva na kvalitu výsledného signálu je rozlíšenie prevodníka. Rozlíšenie D/A prevodníka určuje koľko napät'ových úrovní je schopný nastaviť. V prípade 12-bitového D/A prevodníka je možné nastaviť až 4095 napät'ových úrovní. Následne rýchlosť prevodníka je daná maximálnym počtom vzoriek, ktoré je schopný zmeniť za jednotku času. V súčasnosti však existujú prevodníky so vzorkovacou prekračujúcou GHz. Napríklad literatúra [1] popisuje 4 bitový D/A prevodník s rýchlosťou 10 Gsps (Giga sample per second v preklade $G(10^9)$ vzoriek za 1 sekundu). Použitý mikrokontrolér disponuje 12-bitovým D/A prevodníkom s napät'ovou úrovňou v rozsahu od 0 V do 3,3 V.

III. GENEROVANIE SIGNÁLU POMOCOU MIKROKONTROLÉRA STM32F446RE

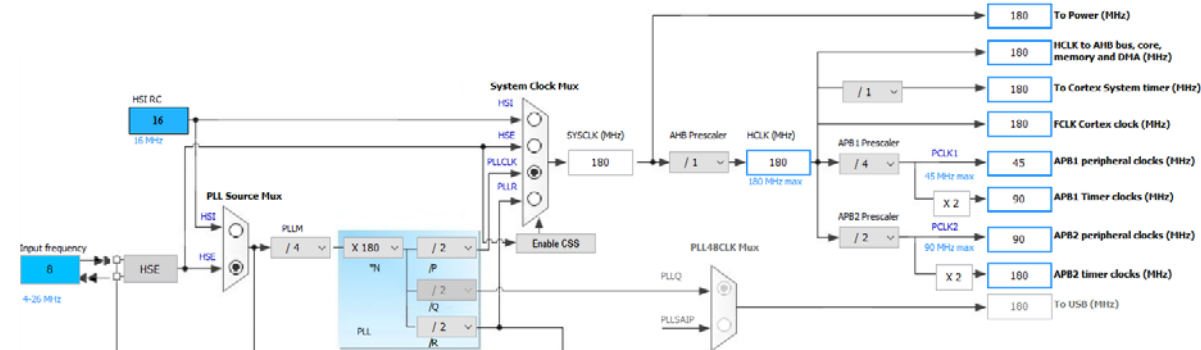
Generátory signálov, ktoré sú schopné meniť tvar a frekvenciu signálov sú v dnešnej dobe ľahko dostupné. Problém je, že tieto prístroje sú pomerne drahé. Z toho dôvodu je možné použiť navrhovaný spôsob generovania signálu, za pomoci mikrokontroléra.

Mikrokontrolér typu STM32F446RE ďalej iba mikrokontrolér je možné nájsť osadený na vývojových doskách NUCLEO 64. Nucleo 64 patrí medzi vývojové dosky od spoločnosti STMicroelectronics. Taktovacia frekvencia procesora u tohto typu je 180 MHz. Jadro mikrokontroléra je tvorené 32 bitovým ARM Cortex-M4 mikroprocesorom. Procesor ARM Cortes-M4 je vysoko výkonný procesor so vstavanými DSP (Digital Signal Procesing v preklade Digitálne spracovávanie signálu) inštrukciami. Procesor je vysoko konfigurovateľný a umožňuje širokú škálu implementácií. V jednoduchosti Cortex-M4 značí, že je možné tento mikroprocesor použiť na generovanie a digitálne spracovávanie signálov. Viac informácií o tomto jadre je v [2].

Konfigurácia mikrokontroléra

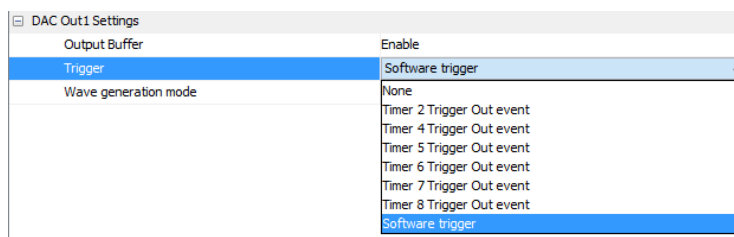
Skôr ako je možné používať zvolený D/A prevodník je potrebné správne nakonfigurovať mikrokontrolér. To je možné urobiť dvojakým spôsobom. Prvý spôsob je taký, ktorý si vyžaduje znalosti s nastavovaním registrov. Tento spôsob je pomerne zdĺhavý aj pre skúseného programátora. Druhý spôsob vďaka tomu, že STMicroelectronics poskytuje pre svoje mikrokontroléry grafické nastavovanie registrov, je možné omnoho efektívnejšie a rýchlejšie pristupovať k samotnému programovaniu vlastnej aplikácie. Tento spôsob používa nízko úrovňové ovládače tzv. HAL (Hardware Abstraction Layer) a LL (Low level). Nízkoúrovňové znamená, že je možné pristupovať ku všetkým perifériám a vlastnostiam procesora. Pričom je možné nastavovať jednotlivé registre mikrokontroléra jednoduchšie. V prípade ak sa programátor rozhodne pre druhú možnosť je potom možné zadávať jednotlivé príkazy s prefixom HAL alebo LL. Napríklad pre zapísanie hodnoty do registra časovača, pre zmenu hodnoty do kedy má časovač počítať je možné vykonať nasledovným príkazom: `__HAL_TIM_SET_AUTORELOAD(&htim1, 5000);` Tento riadok kódu nastaví to, aby sa časovač 1 po napočítaní hodnoty 5000 vyresetoval. Bližšie informácie o ovládačoch HAL je možné nájsť v [3].

V tomto prípade bol zvolený jednoduchší a efektívnejší spôsob konfigurácie mikrokontroléra. Program ktorý to umožňuje má názov STM32 CubeMX. Tento program ako už bolo spomenuté umožňuje grafické nastavenie základných registrov a následne vygeneruje základný program do programového prostredia určeného programátorom. Potom je možné začať programovať vlastné funkcie v jazyku C. Bližšie informácie k programu CubeMX je možné nájsť v [4]. Príklad zvoleného nastavenia pre základne nastavenia mikrokontroléra je znázornený na obrázku, Obr. 3.



Obr. 3 Nastavenie frekvencií pre procesor a periférie pomocou grafického rozhrania

Rovnako ako v prípade nastavenia frekvencií procesora je možné v rovnakom programe nastaviť spôsob, akým sa bude spúšťať konverzia D/A prevodníka, pozri obrázok, Obr. 4. Spustenie konverzie môže byť vykonané interne, alebo externe. Interne znamená, že príkaz k spusteniu konverzie je vykonávaný softvérom. Na druhej strane externý spôsob spúšťa konverziu buď prostredníctvom príslušného pinu, alebo pomocou časovača.



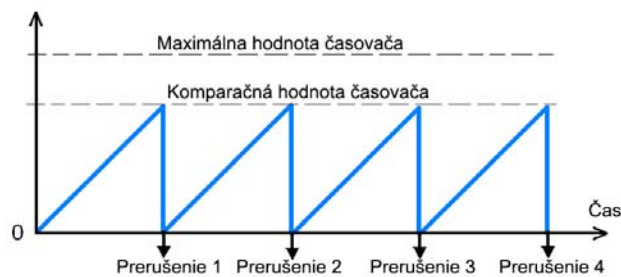
Obr. 4 Možnosti nastavenia spúšťača konverzie D/A prevodníka

Pre generovanie jedného sínusového signálu je postup jednoduchý. Predpokladajme, že sínusový signál je rozdelený na 100 hodnôt. To znamená, že každá hodnota reprezentuje určitú napätovú úroveň sínusového signálu. V prípade ak sa v pravidelných intervaloch aplikujú postupne jednotlivé hodnoty, výsledný signál bude sínusový. Samozrejme, je potrebné správne zvoliť každú hodnotu. Sínusový signál rozdelený na 100 hodnôt môže v programe vyzeráť ako na obrázku, Obr. 5.

```
static const uint16_t sine_wave_1[100] = {
250, 266, 281, 297, 312, 327, 342, 356, 370, 384, 397, 409, 421, 432, 443, 452, 461, 469, 476, 482, 488, 492, 496, 498, 500, 500, 498, 496, 492,
488, 482, 476, 469, 461, 452, 443, 432, 421, 409, 397, 384, 370, 356, 342, 327, 312, 297, 281, 266, 250, 234, 219, 203, 188, 173, 158, 144, 130, 116,
103, 91, 79, 68, 57, 48, 39, 31, 24, 18, 12, 8, 4, 2, 0, 0, 0, 2, 4, 8, 12, 18, 24, 31, 39, 48, 57, 68, 79, 91,
103, 116, 130, 144, 158, 173, 188, 203, 219, 234,
};
```

Obr. 5 Príklad sínusového signálu v poli čísel s veľkosťou poľa 100

V prípade mikrokontroléra je možné periodicky volať zmenu hodnoty pomocou časovej základne. Ale najskôr je potrebné nastaviť časovú základňu. Časová základňa bude určovať frekvenciu výsledného signálu. V tomto prípade je pre časovú základňu použitý časovač s číslom 6. Maximálna frekvencia zvoleného časovača je 90 MHz, čo je viac než postačujúce. Táto časová základňa je nastavená tak, aby sa vyresetovala po nadobudnutí komparačnej hodnoty, pozri obrázok, Obr. 5. V čase vyresetovania časovača nastane prerušenie systému. Na základe tohto prerušenia sa vykoná funkcia, ktorá spustí konverziu D/A prevodníka a aplikuje sa nová napätová úroveň. To znamená, že zmenou komparačnej hodnoty sa zmení časový interval generovania prerušenia a tým časový interval spúšťania konverzie prevodníka, čo ma za následok zmenu frekvencie.



Obr. 5 Princíp činnosti časovej základne s prerušeniami

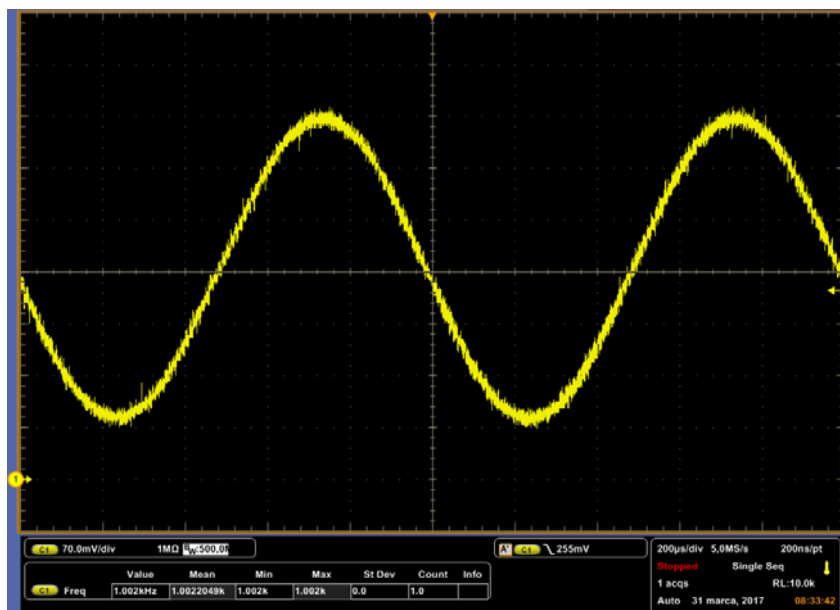
Keďže je tento časovač 16 bitový, môže nadobúdať maximálnu hodnotu 65 535. V prípade potreby pomalšieho prerušenia je potrebné nastaviť hodnotu v deliči. Výslednú frekvenciu je potom možné vypočítať podľa vzťahu (4).

$$f = \frac{APB1}{ARR \cdot Div \cdot a} \quad (4)$$

kde APB1 je maximálna frekvencia časovačov, ARR (AutoReload Register) je komparačná hodnota pri ktorej sa vyresetuje časovač, Div je hodnota deliča a a je počet vzoriek z ktorých je zložený signál. Napríklad ak je potrebné generovať 1 KHz sínusový signál s počtom vzoriek 100 je možné po aplikácii vzťahu (4) vypočítať komparačnú hodnotu pre časovač podľa vzťahu (5).

$$ARR = \frac{APB1}{f \cdot Div \cdot a} = \frac{90 \cdot 10^6}{1000 \cdot 1 \cdot 100} = 900 \quad (5)$$

Oscilogram potvrdzujúci správnosť vzťahu je znázornený na obrázku, Obr. 6.



Obr. 6 1 KHz sínusový signál generovaný pomocou D/A prevodníka mikrokontroléra STM32F446RE

Takýmto jednoduchým spôsobom je možné vygenerovať sínusový signál s veľmi presnou frekvenciou a ľubovoľnou amplitúdou v rozsahu 0 až U_{ref} . Samozrejme pri generovaní jedného signálu je možné použiť DMA (Direct Memory Access v preklade Priamy prístup do pamäte), ktorý uľahčí prácu procesora. To znamená, že perióda signálu, ktorá je uložená v pamäti napríklad sínusový priebeh s počtom hodnôt 100 sa pomocou DMA preniesie priamo na prevodník. Pri tomto spôsobe je možné generovať ľubovoľný periodický signál bez toho, aby bola potrebná asistancia procesora. Ibaže čo ak je potrebné namodulovať na frekvenciu 500 Hz ďalší signál s frekvenciou 1,2 KHz. Touto problematikou sa venuje nasledujúca kapitola.

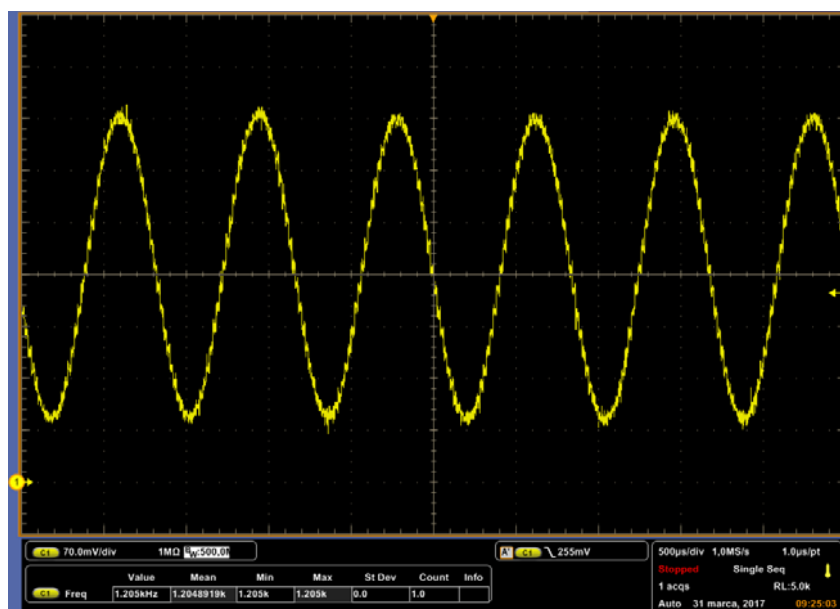
IV. GENEROVANIE NEHARMONICKÝCH SIGNÁLOV

V predchádzajúcej kapitole bol uvedený možný spôsob generovania sínusového signálu s možnosťou zmeny frekvencie. V prípade zmiešavania viacerých signálov s rôznou frekvenciou je možné využiť nasledujúci spôsob.

Podľa vzorca (5) platí, že pre 500 Hz signál s počtom vzoriek 100 je potrebné nastaviť komparačnú hodnotu časovača na 1800. Pre frekvenciu 1,2 KHz je potrebné vytvoriť nové pole čísel s nižším počtom vzoriek. Pretože ak sa zmení komparačná hodnota časovača, následne sa zmení pôvodná frekvencia. Z toho vyplýva, že na generovanie 1,2 KHz pri nezmenenej komparačnej hodnote je potrebné rozdeliť celú periódu na 42 hodnôt. Túto hodnotu je možné vypočítať upravením (4) na vzťah (6).

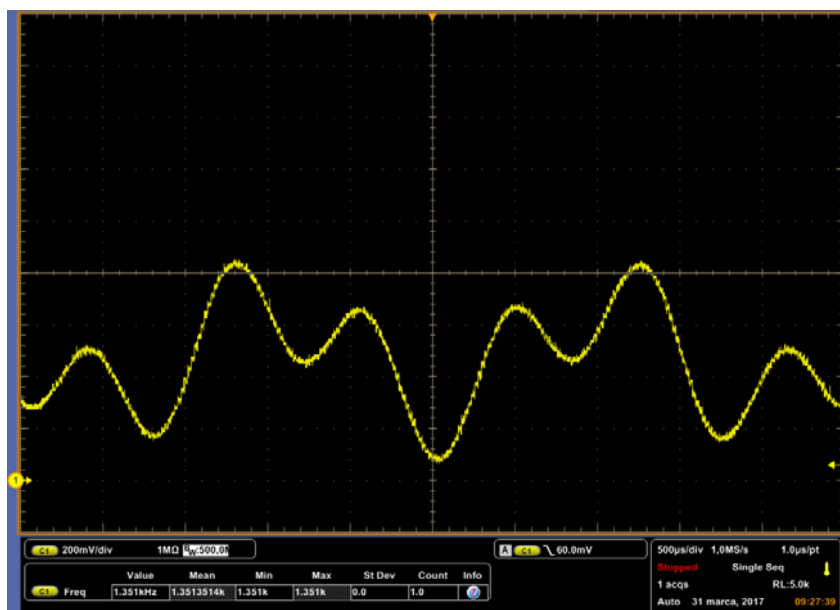
$$a = \frac{APB1}{f \cdot Div \cdot ARR} = \frac{90 \cdot 10^6}{1200 \cdot 1 \cdot 1800} \square 42 \quad (6)$$

Týmto sa dosiahne požadovaná frekvencia druhého signálu pri nezmenenej frekvencii pôvodného signálu. Priebeh druhého signálu je znázornený na obrázku, Obr. 7.



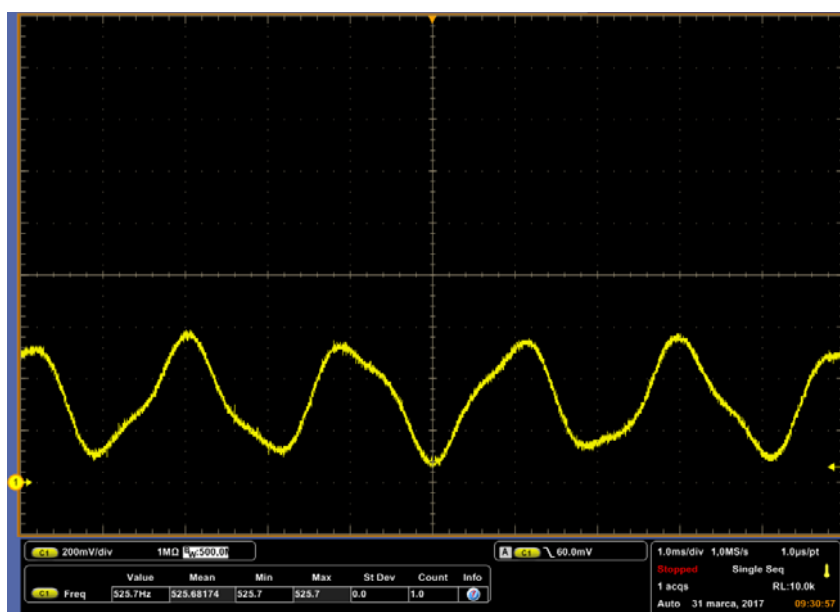
Obr. 7 sínusový signál s frekvenciou 1,2 KHz s počtom vzoriek 42

Následné je možné pomocou programu upraviť signály tak, aby sa po každom prerušení spočítali a následne sa upravený priebeh aplikuje na výstup, pozri Obrázok, Obr. 8. Keďže obe signály sú rozdielne v počte hodnôt, je potrebné vyresetovať jednotlivé premenné ktoré určujú pozíciu čísla v danom poli po načítaní poslednej hodnoty. Týmto sa zabezpečí generovanie modulovaného signálu bez rušenia.



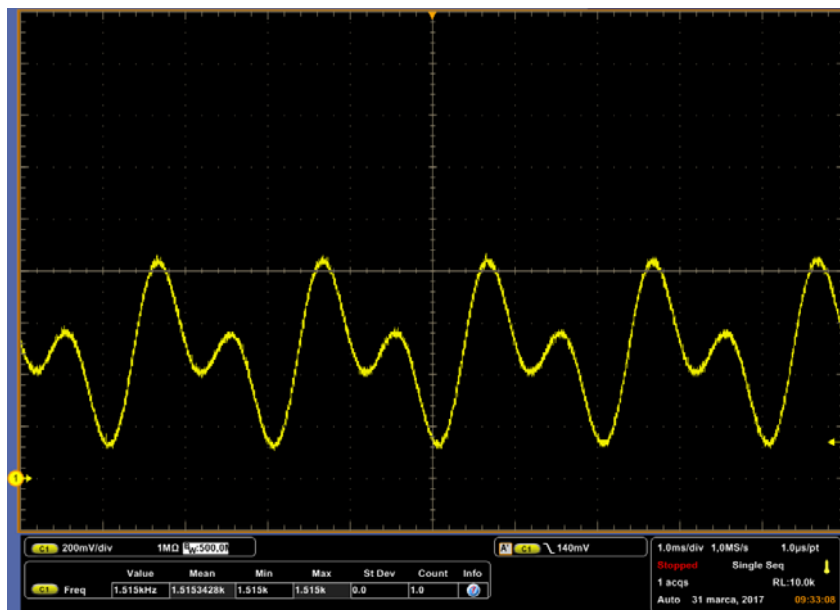
Obr. 8 Oscilogram neharmonického signálu tvoreného súčtom dvoch harmonických s rovnakou hodnotou amplitúd

Na obrázku, Obr. 8 je znázornený oscilogram dvoch sčítaných harmonických signálov s rôznou frekvenciou pri rovnakej amplitúde. Nasledujúci obrázok, Obr. 9, znázorňuje sčítanie dvoch harmonických signálov s rôznou frekvenciou aj amplitúdou. Takto je možné pomocou mikrokontroléra generovať neharmonický signál.



Obr. 9 Oscilogram neharmonického signálu tvoreného súčtom dvoch harmonických s rôznou hodnotou amplitúd

Premenné určujúce pozíciu poľa sa inkrementujú o jednu hodnotu každým prerušením. V momente ak sa splní podmienka, ktorá vyhodnocuje kedy sa hodnota premennej rovná poslednej pozície poľa, daná premenná sa vyresetuje. Následne sa ďalším prerušením premenná určujúca číslo vzorky daného signálu začne inkrementovať od nuly. Neharmonický signál tvorený 500 Hz a 1 KHz s rovnakými hodnotami amplitúdy je znázornený na obrázku, Obr. 10.



Obr. 10 Oscilogram neharmonického priebehu generovaného sčítaním dvoch harmonických signálov s frekvenciami 500 Hz a 1 KHz.

Rovnakým spôsobom je možné pridať ďalšie signály čím sa dosiahne výsledný signál s vyšším počtom harmonických. Hodnota amplitúdy každého signálu môže byť zvolená ľubovoľne v rozsahu 0 až U_{ref} . Keďže U_{ref} je maximálna hodnota ktorá je daná D/A prevodníkom nie je možné k tejto hodnote pripočítat ďalšiu. Podľa toho je potom potrebné upravovať amplitúdy jednotlivých signálov tak, aby nedošlo k deformácii výsledného signálu.

Týmto spôsobom je možné vytvoriť celú oktávu tónov s tým, že všetky tóny môžu byť generované naraz cez jeden výstup D/A prevodníka.

V. ZÁVER

Ako je možné spozorovať v článku, tak na vytváranie a modulovanie sínusových signálov sa použil iba zlomok toho aké možnosti poskytuje mikrokontrolér s danými funkciami. Týmto spôsobom je možné jednoducho a lacno vytvoriť generátor akéhokoľvek signálu. Samozrejme v rozsahu frekvencií ktoré sú obmedzené parametrami mikrokontroléra.

Na základe tohto návrhu generovania a modulovania signálov je možné vytvoriť elektronické zariadenie, ktoré by generovalo hudobné tóny podľa toho, ktorá svetelná bariéra je prerušená. To znamená, že je možné vytvoriť napríklad bezdotykovú harfu. Keďže zvolený typ mikrokontroléra disponuje dostatočným množstvom vstupov aj výstupov.

POĎAKOVANIE



Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku/ Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ. Tento článok bol vypracovaný v rámci projektu "Centrum excelentnosti integrovaného výskumu a využitia progresívnych materiálov a technológií v oblasti automobilovej elektroniky", ITMS 26220120055.

LITERATÚRA

- [1] F. N. U. Juanda, W. Shu and J. S. Chang, "A 10-GS/s 4-Bit Single-Core Digital-to-Analog Converter for Cognitive Ultrawidebands," in IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 64, no. 1, pp. 16-20, Jan. 2017. doi: 10.1109/TCSII.2016.2551544
- [2] STMicroelectronics: STM32F446xC/E. [online]. Datasheet. 2016. Dostupné z <<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/65/cb/75/50/53/d6/48/24/DM00141306.pdf/files/DM00141306.pdf/jcr:content/translations/en.DM00141306.pdf>>

- [3] STMicroelectronics: Description of STM32F4 HAL and LL drivers. [online]. UM1725 User Manual. 2016. Dostupné z <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/2f/71/ba/b8/75/54/47/cf/DM00105879.pdf/files/DM00105879.pdf/jcr:content/translations/en.DM00105879.pdf>
- [4] STMicroelectronics: STM32CubeMX for STM32 configuration and initialization C code generation. [online]. UM1718 User Manual. 2016. Dostupné z <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/10/c5/1a/43/3a/70/43/7d/DM00104712.pdf/files/DM00104712.pdf/jcr:content/translations/en.DM00104712.pdf>
- [5] P. Jacko, J. Molnár, Riadenie krokového motora na báze mikrokontroléra In: SSIEE 2015 : Proceeding of scientific and student's works in the field of Industrial Electrical Engineering : Volume 4. - Košice : TU, 2015 S. 49-52. - ISBN 978-80-553-2151-6
- [6] D. Schweiner, I. Kováčová, Bipolárny tranzistor vo funkcii zosilňovača. In: SSIEE 2014 : Proceeding of scientific and student's works in the field of Industrial Electrical Engineering : Volume 3, Košice, May 2014. - Košice : TU, 2014 S. 125-127. - ISBN 978-80-553-1711-3
- [7] M. I. Musyafani, F. Ardilla and M. M. Bachtiar, "Architecture design of low level control omni directional robot with RTOS-RTX arm cortex-M4," 2016 International Electronics Symposium (IES), Denpasar, 2016, pp. 191-196. doi: 10.1109/ELECSYM.2016.7861000
- [8] M. A. Wickert, "Using the ARM Cortex-M4 and the CMSIS-DSP library for teaching real-time DSP," 2015 IEEE Signal Processing and Signal Processing Education Workshop (SP/SPE), Salt Lake City, UT, 2015, pp. 283-288. doi: 10.1109/DSP-SPE.2015.7369567
- [9] D. S. Reay, "Hands-on real-time DSP teaching using inexpensive arm cortex M4 development systems," 2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Florence, 2014, pp. 2224-2227. doi: 10.1109/ICASSP.2014.6853994
- [10] R. Antão, A. Mota and R. E. Martins, "Adaptive control of a buck converter with an ARM Cortex-M4," 2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, Antalya, 2014, pp. 359-364. doi: 10.1109/EPEPEMC.2014.6980519
- [11] Zhan Shi and Honglin Liu, "STM32F4 based real-time peak detection of FBG," 2016 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), Hangzhou, 2016, pp. 1-3. doi: 10.1109/ICOON.2016.7875808
- [12] K. Rao, D. J. Vaghela and M. V. Gojiya, "Implementation of SPWM technique for 3- Φ VSI using STM32F4 discovery board interfaced with MATLAB," 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), Delhi, 2016, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853658