

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

AKTIVNÍ VÝHYBKA REPROSOUSTAVY S VYUŽITÍM DSP

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Mgr. Jiří Václavík

VEDOUCÍ

SUPERVISOR

PRÁCE

Ing. Aleš Povalač, Ph.D.

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**
Ústav radioelektroniky

Student: Mgr. Jiří Václavík

ID: 133145

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Aktivní výhybka reprosoustavy s využitím DSP

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vytvořte zařízení pro zpracování audio signálu a rozdělení frekvenčního spektra pro vícepásmové reproduktory. Zařízení bude podporovat funkci USB zvukové karty. Na základní desce bude obsahovat vhodné audio převodníky a realizovat číslicové zpracování signálu. Pro konfiguraci zařízení vytvořte obslužný software v jazyce C.

Implementujte reproduktorovou výhybku a kompenzační filtry pro reprosoustavu s otevřenou ozvučnicí. Software doplňte o obsluhu všech potřebných periférií. Celé zařízení otestujte a proveďte základní měření jeho parametrů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SCHIMMEL, J. Elektroakustika. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013.

[2] Models for a dipole loudspeaker design [online]. [cit. 2017-02-14]. Dostupné z: <http://www.linkwitzlab.com/models.htm>.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 17.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Aleš Povalač, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích 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 článek 43a, 43b, 43c, 43d, 43e, 43f, 43g, 43h, 43i, 43j, 43k, 43l, 43m, 43n, 43o, 43p, 43q, 43r, 43s, 43t, 43u, 43v, 43w, 43x, 43y, 43z, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 385, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 430, 431, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 453, 454, 455, 456, 457, 458, 459, 460, 461, 462, 463, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 480, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 518, 519, 520, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540, 541, 542, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549, 550, 551, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 561, 562, 563, 564, 565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579, 580, 581, 582, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 598, 599, 600, 601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 628, 629, 630, 631, 632, 633, 634, 635, 636, 637, 638, 639, 640, 641, 642, 643, 644, 645, 646, 647, 648, 649, 650, 651, 652, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 660, 661, 662, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669, 670, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 679, 680, 681, 682, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690, 691, 692, 693, 694, 695, 696, 697, 698, 699, 700, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 710, 711, 712, 713, 714, 715, 716, 717, 718, 719, 720, 721, 722, 723, 724, 725, 726, 727, 728, 729, 730, 731, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 738, 739, 740, 741, 742, 743, 744, 745, 746, 747, 748, 749, 750, 751, 752, 753, 754, 755, 756, 757, 758, 759, 760, 761, 762, 763, 764, 765, 766, 767, 768, 769, 770, 771, 772, 773, 774, 775, 776, 777, 778, 779, 780, 781, 782, 783, 784, 785, 786, 787, 788, 789, 790, 791, 792, 793, 794, 795, 796, 797, 798, 799, 800, 801, 802, 803, 804, 805, 806, 807, 808, 809, 810, 811, 812, 813, 814, 815, 816, 817, 818, 819, 820, 821, 822, 823, 824, 825, 826, 827, 828, 829, 830, 831, 832, 833, 834, 835, 836, 837, 838, 839, 840, 841, 842, 843, 844, 845, 846, 847, 848, 849, 850, 851, 852, 853, 854, 855, 856, 857, 858, 859, 860, 861, 862, 863, 864, 865, 866, 867, 868, 869, 870, 871, 872, 873, 874, 875, 876, 877, 878, 879, 880, 881, 882, 883, 884, 885, 886, 887, 888, 889, 890, 891, 892, 893, 894, 895, 896, 897, 898, 899, 900, 901, 902, 903, 904, 905, 906, 907, 908, 909, 910, 911, 912, 913, 914, 915, 916, 917, 918, 919, 920, 921, 922, 923, 924, 925, 926, 927, 928, 929, 930, 931, 932, 933, 934, 935, 936, 937, 938, 939, 940, 941, 942, 943, 944, 945, 946, 947, 948, 949, 950, 951, 952, 953, 954, 955, 956, 957, 958, 959, 960, 961, 962, 963, 964, 965, 966, 967, 968, 969, 970, 971, 972, 973, 974, 975, 976, 977, 978, 979, 980, 981, 982, 983, 984, 985, 986, 987, 988, 989, 990, 991, 992, 993, 994, 995, 996, 997, 998, 999, 1000.

ABSTRAKT

Diplomová práce se věnuje vytvoření zařízení pro zpracování a rozdělení frekvenčního spektra pro vícepásmové reproduktory. Zařízení zároveň slouží jako USB zvuková karta a frekvenční spektrum je zpracováno pomocí signálových procesorů DSP. V zařízení je implementována reproduktorová výhybka a kompenzační filtry pro reprosoustavu s otevřenou ozvučnicí.

KLÍČOVÁ SLOVA

DSP, USB audio, reproduktor, výhybka

ABSTRACT

Diploma thesis dealing with construction of active loudspeaker device crossover and it is also used for frequency equalization. Device also serves as USB soundcard and signal processing is done using DSP. Device implements active crossover unit for open baffle loudspeakers.

KEYWORDS

USB, USB audio, loudspeaker, crossover

Václavík, J. Aktivní výhybka s využitím DSP. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2018. 35 s., 8 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Aleš Povalač, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Aktivní výhybka s využitím DSP jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce Ing. Alešovi Povalačovi Ph.D. za trpělivé vedení a cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072
Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

Seznam obrázků	1
Úvod	3
1 ČÍSLICOVÉ ZPARCOVÁNÍ SIGNÁLU	4
1.1 Číslicové zpracování audio signálů	4
1.1.1 Antialiasing filtr	5
1.1.2 Analogově číslicový převodník	5
1.1.3 Číslicové zpracování signálu	7
1.1.4 Číslicově analogový převodník	8
1.1.5 Rekonstrukční filtr	9
2 SIGNÁLOVÉ PROCESORY A SBĚRNICE	11
2.1 Procesory Texas Instruments	11
2.2 Procesory Analog Devices	12
2.3 USB sběrnice	13
2.4 USB Audio	14
2.5 I2S sběrnice	14
2.6 I2C sběrnice	15
3 NÁVRH ZAŘÍZENÍ	16
3.1 Blokové schéma	16
3.1.1 Obvod PCM2706	17
3.1.2 Obvod PCM5142	19
3.1.3 Obvod napájecího zdroje TPS79333	20
3.1.4 Mikrokontrolér MSP430	21
3.2 Vývojové prostředí a knihovny	22
3.3 Vývojové prostředí Purepath Studio	23
3.4 Návrh základní desky	24
3.5 Mechanická konstrukce	26
3.6 Otevřená ozvučnice	26
3.7 Výběr reproduktorů pro reprosoustavu s otevřenou - dipólovou ozvučnicí	27

3.7.1	Středo basový reproduktor SM-212.....	28
3.7.2	Výškový reproduktor AMTPRO-4 Air Motion Transformer	29
3.8	Návrh a simulace otevřené ozvučnice	30
3.9	Měření reálných přenosových charakteristik reproduktorů v použité ozvučnici	32
3.10	Návrh kmitočtové výhybky a kompenzace středobasového reproduktoru	34
4	Závěr	37
5	Citovaná literatura	38
	Seznam příloh	39

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1-1 Blokové schéma zpracování signálu pomocí DSP.....	4
Obrázek 1-2 Ukázka tvarování šumového spektra podle řádu modulátoru [2]	6
Obrázek 1-3 Delta sigma modulátor 2. řádu [2]	6
Obrázek 1-4 Architektura R2R DA převodníku	8
Obrázek 1-5 Obvodové schéma pro simulaci vlastností rekonstrukčních filtrů	9
Obrázek 1-6 Amplitudové spektrum rekonstrukčních filtrů Sallen-Key modře a RC filtr 1. řádu červeně	10
Obrázek 2-1 Blokové schéma DA převodníku [3]	11
Obrázek 2-2 Ukázka pracovního okna PurePath Studia	12
Obrázek 2-3 Blokové schéma ADAU1542 (4).....	13
Obrázek 3-10 Formát datového přenosu po I2S sběrnici [3].....	15
Obrázek 3-1 Blokové schéma konstruovaného zařízení	16
Obrázek 3-2 Blokové schéma obvodu PCM 2707 [5].....	18
Obrázek 3-3 Typické zapojení obvodu doporučené výrobcem [5].....	19
Obrázek 3-4 Blokové schéma použitého regulátoru [6]	21
Obrázek 3-5 Blokové schéma vnitřní architektury použitého mikrokontroléru [7]	21
Obrázek 3-6 Ukázka okna vývojového prostředí s hlavičkovým souborem obsahujícím konfigurační data pro miniDSP	22
Obrázek 3-7 MSP430 Launchpad - MSP-EXP430G2.....	23
Obrázek 3-8 Graf výhybky pro jedno pásmo.....	24
Obrázek 3-11 3D model základní desky	25
Obrázek 3-12 Praktické provedení základní desky.....	25
Obrázek 3-13 Mechanické provedení celé konstrukce	26
Obrázek 3-14 Přenosová charakteristika dvoubodového zářiče [9]	27
Obrázek 3-15 Středo basový reproduktor SM-212.....	28
Obrázek 3-16 AMTPRO-4 Air Motion Transformer	30
Obrázek 3-17 Simulovaná přenosová charakteristika středobasového reproduktoru.....	31
Obrázek 3-18 Simulovaná přenosová charakteristika výškového reproduktoru	31
Obrázek 3-19 Fotografie prototypu otevřené ozvučnice osazená reproduktory	32
Obrázek 3-20 Změřená kmitočtová charakteristika výškového reproduktoru 200 Hz – 20 kHz	33
Obrázek 3-21 Změřená kmitočtová charakteristika středobasového reproduktoru 20 Hz	

– 20 kHz.....	33
Obrázek 3-22 Přenosová charakteristika filtru pro výškový reproduktor.....	34
Obrázek 3-23 Přenosová charakteristika filtru pro středobasový reproduktor	34
Obrázek 3-24 Změřené přenosová charakteristika výškového reproduktoru s použitým filtrem.....	35
Obrázek 3-25 Změřené přenosová charakteristika středobasového reproduktoru s použitým filtrem	35
Obrázek 3-26 Změřené přenosová charakteristika celé reproduktorové soustavy	36

ÚVOD

Cílem této diplomové práce je realizace reproduktorové výhybky s využitím DSP, která zároveň slouží jako USB zvuková karta.

Práce je rozdělena do 4 částí. V první části přináší stručný teoretický přehled procesu číslicového zpracování signálu a požadavky na jednotlivé části řetězce při zpracování analogových dat. Druhá část se zaměřuje na přehled a výběr signálových procesorů, které jsou v současnosti k dispozici na trhu a také přináší přehled o jednotlivých sběrnicích použitých k přenosu dat v rámci tohoto projektu. Třetí kapitola se zabývá vlastním návrhem zařízení od celkového konceptu přes návrh plošného spoje a mechanického řešení k praktické realizaci reproduktorové výhybky. Zároveň jsou zde uvedeny výsledky měření reproduktorů v otevřené ozvučnici, které byly potřebné k vlastnímu návrhu použitých číslicových filtrů výhybky. Závěrečná kapitola přináší shrnutí dosažených výsledků.

1 ČÍSLICOVÉ ZPARCOVÁNÍ SIGNÁLU

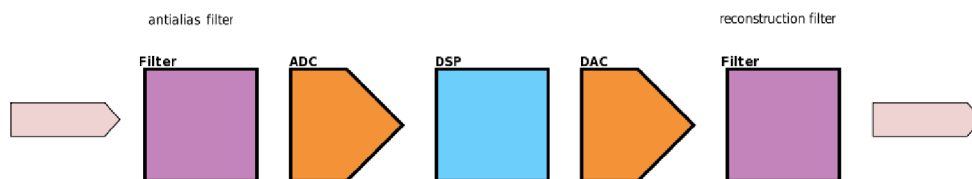
Číslicové zpracování signálu DSP (z angl. Digital Signal Processing) představuje jeden z nejvýznamnějších technologií, která zásadním způsobem ovlivnila současnou vědu a inženýrství. Zásadním způsobem ovlivnila široké pole oborů, například komunikaci, reprodukci hudby, medicínu, geologii a mnoho dalších. Každý z těchto oborů potřebuje svůj vlastní matematický aparát a svoje vlastní algoritmy. Číslicové zpracování signálu se tak odlišuje od dalších oborů informačních technologií tím, že zpracovává nasbíraná data sensorů z reálného světa, ať již to jsou přímo elektrické veličiny nebo na elektrické veličiny pomocí sensorů převedené neelektrické veličiny.[1]

1.1 Číslicové zpracování audio signálů

Člověk má dva hlavní smysly, které mu slouží k prozkoumávání okolního světa, tedy zrak a sluch. Ve zpracování obrazových a audio hraje dnes DSP velkou roli.

Číslicové zpracování audio signálu umožňuje záznam dat bez ztráty kvality záznamu spojené s analogovým záznamem. Umožňuje produkci, tedy mixování, editaci, filtraci, zvukové efekty. Dále umožňuje rozpoznávání mluvené řeči, tedy rozpoznávání jazyka mluvčího a významu jednotlivých slov. Nebo naopak syntézu řeči.

Zjednodušený model zpracování pak může představovat následující schéma analogově digitální převod, zpracování dat v DSP, případný záznam a následný převod digitálně analogovým převodníkem zpět na analogové veličiny.[1]



Obrázek 1-1 Blokové schéma zpracování signálu pomocí DSP

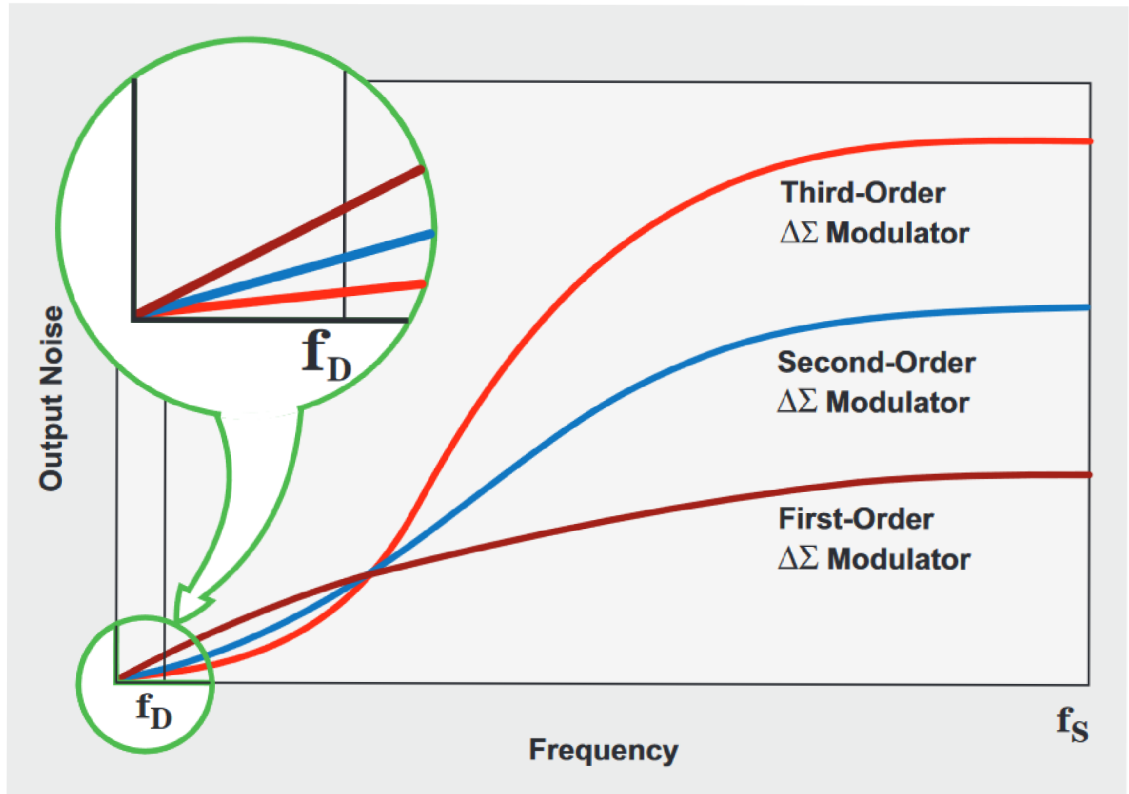
1.1.1 Antialiasing filtr

Vstupní filtr slouží k omezení spektra přivedeného na vstup AD převodníku. Jen nutný pro splnění podmínky Nyquist-Shannonova teorému, který říká, že maximální zpracováváný kmitočet diskrétního systému může být maximálně polovinou vzorkovacího kmitočtu. V případě přivedení vyšších by docházelo k překládání spektra a vzniku do zpracováváného pásma a vzniku aliasů. [1]

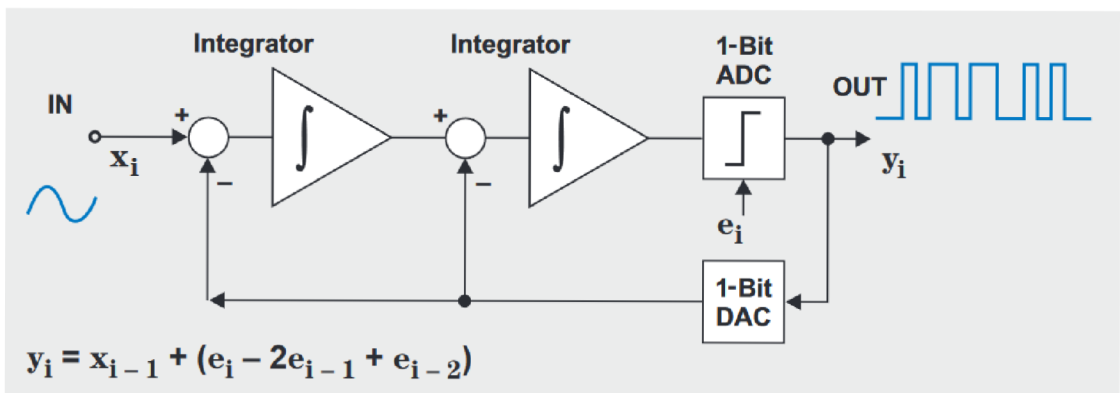
Pro maximální využití šířky pásma vzorkovacího systému by měl mít filtr co největší šířku užitečného pásma a naopak s určitou rezervou co největší potlačení signálu nad polovinou vzorkovacího kmitočtu. Čistě analogový filtr by musel být vysokého řádu s velkou složitostí a velkými nároky na toleranci součástek. S výhodou se proto používá tzv. převzorkování, kdy je použit vyšší vzorkovací kmitočet s následným číslicovým filtrem, který je zodpovědný za dosažení potřebné strmosti filtru a potlačení nežádoucích vysokofrekvenčních signálů. Následuje decimace vzorků na požadovaný vzorkovací kmitočet. Samotný analogový filtr pak může být jednoduchý nízkého řádu. Moderní AD převodníky používají často pro dosažení maximálního dynamického rozsahu symetrické vstupy a v tomto případě lze s výhodou použít operační zesilovače s diferenčním vstupem i výstupem. [2]

1.1.2 Analogově číslicový převodník

Analogově číslicový převodník zajišťuje převod analogového signálu na číslicový. Pro audio signály se nejčastěji používají převodníky založené na delta-sigma modulaci. Výhodou těchto převodníků je výborná linearita a velký dynamický rozsah, zajištěný analogovou zpětnou vazbou. Částečná nevýhoda, která se při zpracování audio signálů neuplatní, je omezený kmitočtový rozsah. Další výhodou těchto převodníků je tvarování šumového spektra, kdy je šum z užitečného pásma potlačen za cenu zvýšení šumu nad zpracovávaným pásmem. Tvarování šumového spektra vytváří smyčka zpětné vazby zavedením kvantizační chyby zpět na vstup. Zpětná vazba zde působí jako filtr pro kvantizační chybu a kvantizační chyba může být filtrována podle potřeby aplikace. Účinnost tohoto mechanismu závisí na řádu modulátoru, tedy počtu kaskádně řazených integrátorů uzavřené do zpětné vazby modulátoru. Z hlediska šumu je tedy žádoucí co nejvyšší řád, nicméně integrátor vyššího než druhého řádu je nestabilní a pokud jej výrobce používá, pak musí stabilitu zajistit lokálními zpětnými vazbami. Detailní řešení zpravidla výrobce nezveřejňuje. [2]



Obrázek 1-2 Ukázka tvarování šumového spektra podle řádu modulátoru [2]



Obrázek 1-3 Delta sigma modulátor 2. řádu [2]

Součástí AD převodníku bývá i číslicová část antialiasingového filtru. Data filtrovaného signálu jsou poté decimována na obvyklý vzorkovací kmitočet. Pro hudební nosiče a produkci to bývá 44,1 kHz nebo 48 kHz. Pro formáty s vysokým rozlišením jsou to pak násobky těchto kmitočetů až do 192 kHz (348 kHz).

Záznam na nosičích DSD (z angl. Direct Stream Digital) naopak následnou decimaci signálu nepoužívá a výstup delta-sigma modulátoru je zaznamenán přímo na nosiči. Nicméně jednobitové signály tohoto formátu jsou bez decimace a filtrace obtížně zpracovatelné běžnými signálovými procesory.

1.1.3 Číslicové zpracování signálu

Číslicové zpracování signálu může být prováděno v běžném mikroprocesoru nebo pro tento účel speciálně navrženými signálovými procesory a v neposlední řadě pomocí FPGA (z angl. Field Programmable Gate Array).

Signálové procesory využívají nejčastěji harvardskou architekturu, kdy je oddělena paměť pro program a zpracovávaná data. Tato architektura především zvyšuje datovou propustnost systému. Dále tyto specializované procesory používají speciální DSP instrukce například MAC (z angl. Multiply accumulate), kdy je po vynásobení dvou hodnot následně výsledek ještě akumulován k hodnotě v cílovém registru. Postup je možné zapsat vztahem:

$$a \leftarrow a + (b * c)$$

Tato instrukce umožňuje například realizaci jednoho stupně FIR filtru v jediné instrukci. Jedno jádro může obsahovat více ALU a také dalších jednotek pro přenos dat a pro speciální módy adresování, které umožní vytvořit například kruhový registr nebo adresovat permutace FFT prováděné in-place. Instrukce pro těchto několik bývá organizována do VLIW (z angl. Very Long Instruction Word) a všechny instrukce různých jednotek jsou provedeny v jediném instrukčním cyklu. VLIW architektura se pak ještě často kombinuje s architekturou SIMD (z angl. Single Instruction Multiple Data) kdy v jedné instrukci jsou zpracovávána zároveň různá nezávislá data, často 2,4,8.

Z hlediska použité aritmetiky je možné DSP dělit na procesory pracující:

- v celočíselné aritmetice
- v aritmetice s pevnou řádovou čárkou
- v aritmetice s plovoucí řádovou čárkou

Procesory s celočíselnou aritmetikou případně s aritmetikou v pevné řádové čárce jsou levnější. Na druhou stranu mají nevýhodu v náročnějším vývoji vlastního softwaru, protože je potřeba neustále po každé operaci hlídat přetečení a proměnné je potřeba neustále upravovat normalizacemi.

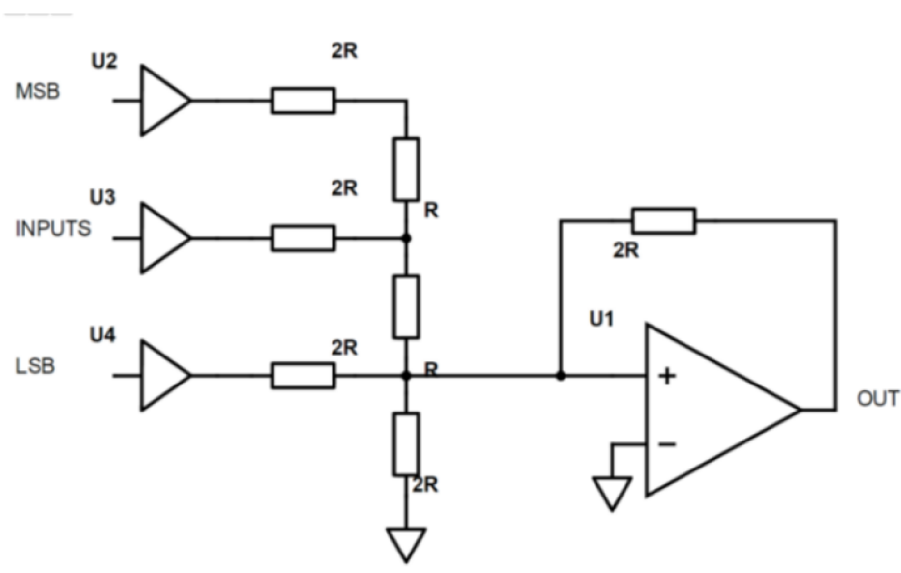
Procesory s plovoucí řádovou čárkou jsou pak jednodušší z programátorského hlediska, ale bývají dražší a náročnější na spotřebu energie.

Běžné mikroprocesory mívají zpravidla Von Neumanovu architekturu, sdílejí tedy jednu paměť pro program i data. Pro urychlení zpracování signálu mají některé implementované speciální instrukce, například SIMD architektura ARM DSP & SIMD případně x86-64 SSE nebo nově AVX. Rovněž mohou implementovat instrukce MAC.

Další skupinou procesorů, které je možné využít pro zpracování signálu, jsou mikrokontroléry. Ty jsou potom doplněny o periferie potřebné pro spolupráci se svým okolím. Mohou obsahovat AD i DA převodníky, a pokud jsou určeny pro zpracování audio dat tak i rozhraními jako I2S nebo S/PDIF.

1.1.4 Číslicově analogový převodník

Číslicově analogový převodník převádí zpracovaná data z číslicové podoby na analogový signál. Používané architektury DA převodníku pro audio aplikace bývají typu R2R nebo opět delta sigma. Architektura R2R je dnes již na ústupu, pravděpodobně kvůli náročné technologii, kdy bylo nutné vyrobit rezistorovou síť na čipu s velkou přesností.



Obrázek 1-4 Architektura R2R DA převodníku

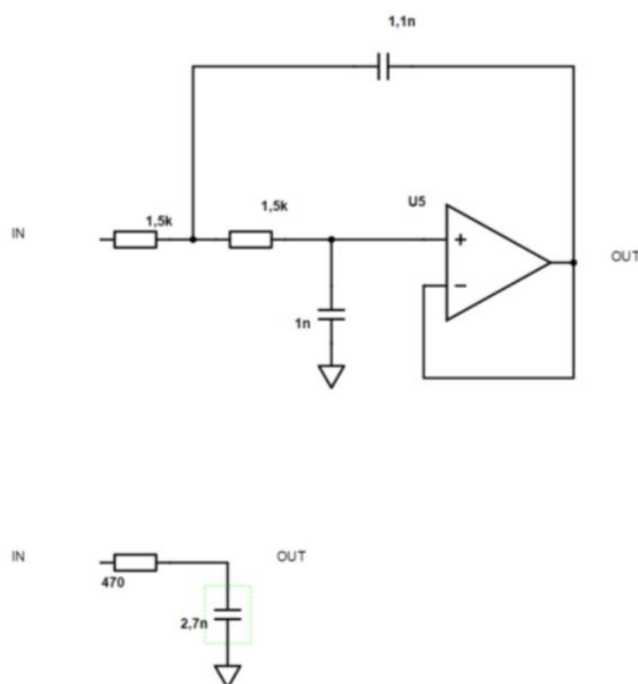
DA převodník na principu delta sigma modulace je v principu velmi podobný AD převodníku. Potřebné členy jsou realizovány číslicovými bloky, sčítačkou, posuvným registrem a komparátorem. DA převodníky s velkým dynamickým rozsahem užívají víceúrovňovou konverzi, kdy kvantizér není jednobitový pro dosažení lepšího

dynamického rozsahu a snížení citlivosti na fázovou nejistotu hodinového signálu (JITTER). Obvod bývá například řešen jako paralelně spínané proudové segmenty, detail technologie výrobce zpravidla nezveřejňuje. Výstup může být napěťový nebo proudový.

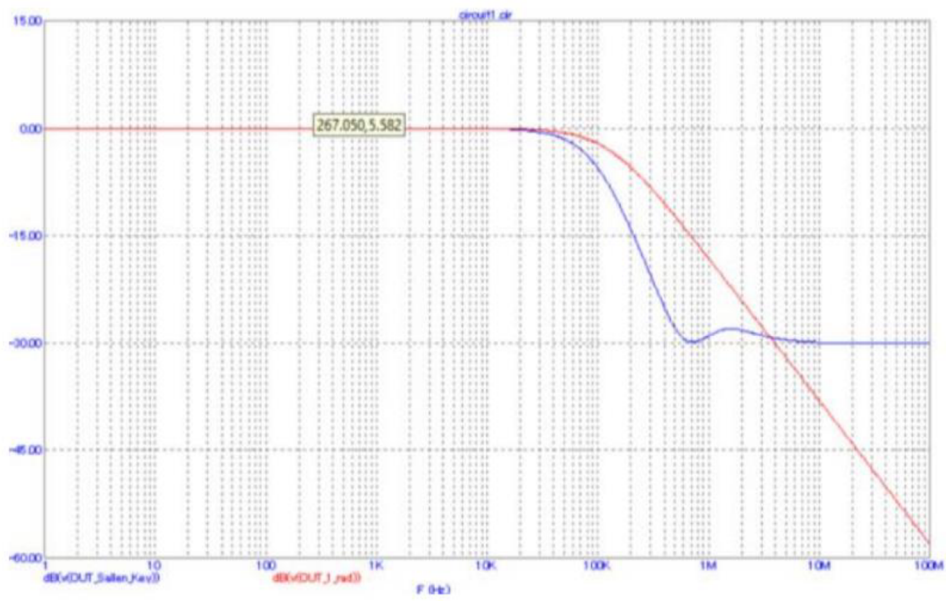
Tak, jako v AD převodníku, bývá před převodem nejprve převzorkován a následně filtrován číslicovým filtrem zajišťující potřebnou strmost filtru a pro zjednodušení návrhu rekonstrukčního filtru. [1]

1.1.5 Rekonstrukční filtr

Rekonstrukční filtr zajišťuje odfiltrování vzorkovacího kmitočtu. Pro R2R DAC převodníky bývá doporučený analogový filtr vyššího řádu a strmější. Delta sigma DA převodníky, v důsledku vyššího převzorkování mohou používat filtry s nižší strmostí. Výrobce často doporučuje pouze jednoduchý RC filtr 1. řádu. Na následujícím obrázku je vidět, že výrobcem doporučený složitější filtr s topologií Sallen-Key a NE5532 nenabízí na tak vysokých kmitočtech výrazně lepší vlastnosti.



Obrázek 1-5 Obvodové schéma pro simulaci vlastností rekonstrukčních filtrů



Obrázek 1-6 Amplitudové spektrum rekonstrukčních filtrů Sallen-Key modře a RC filtr 1. řádu červeně

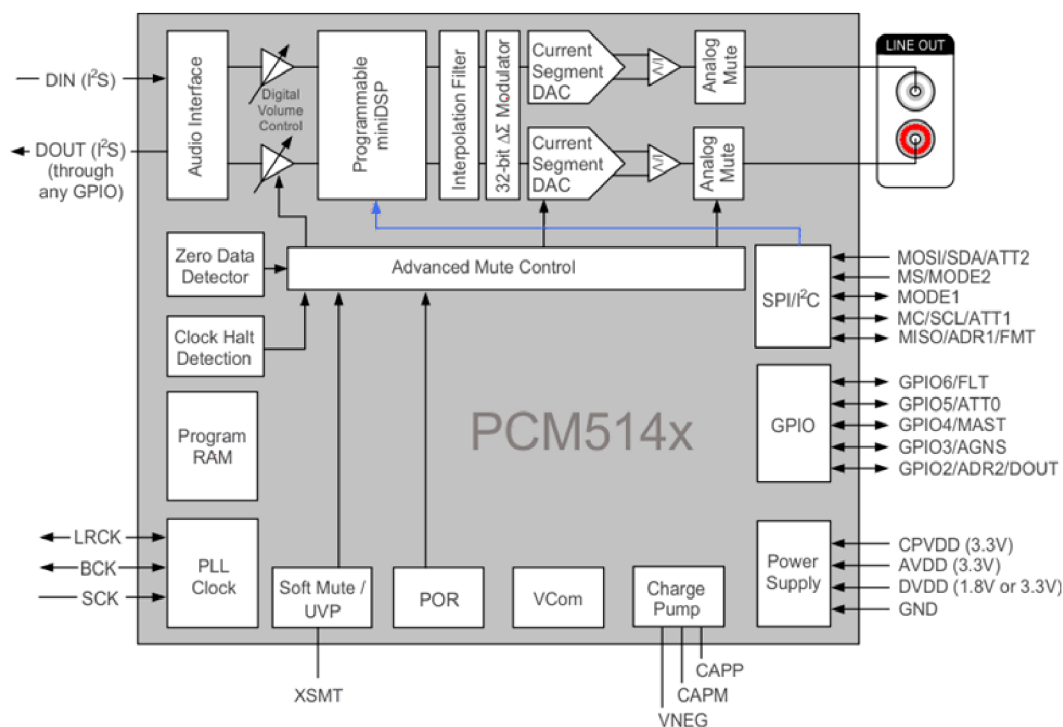
2 SIGNÁLOVÉ PROCESORY A SBĚRNICE

Tato kapitola přináší stručný přehled výrobků na trhu, které byly zvažovány pro tuto práci. Kapitola zmiňuje procesory od firem Texas Instruments a Analog Devices. Obě tyto firmy nabízejí specializované procesorové řady pro zpracování audio signálu, které se odlišují od hlavních řad těchto výrobců. Hlavní rozdíl je ve způsobu programování pomocí přehledného grafického rozhraní. Hlavní řady procesorů vyžadují nákladný proprietární integrovaný vývojový software, což omezuje jejich použití pro malé projekty. Dále pak kapitola přináší stručný přehled použitých sběrnic.

2.1 Procesory Texas Instruments

Texas Instruments, kromě svých hlavních řad procesorů C5000 DSP a C6000 DSP, ještě implementuje blok miniDSP, do vybraných převodníků pro zpracování audio signálů. Blok miniDSP může být plně programovatelný nebo mít fixně nastavenou funkci a pak lze měnit pouze koeficienty filtrů v registrech obvodu.

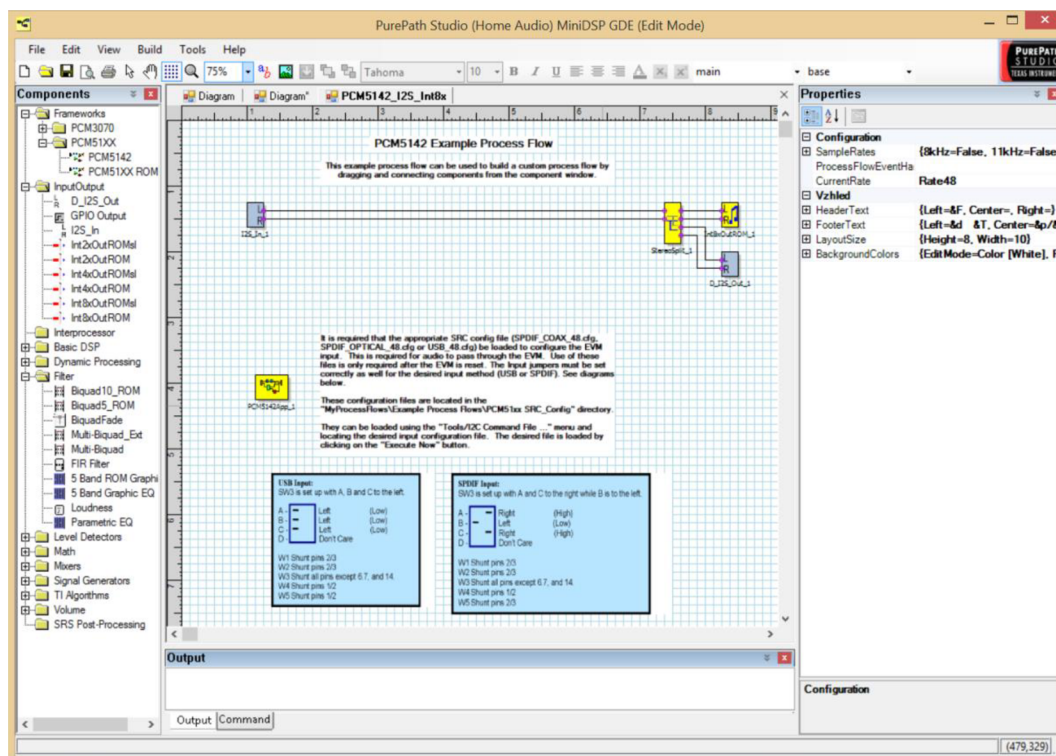
Jako příklad plně programovatelného obvodu je možno uvést například dvoukanálový DA převodník PCM5142.



Obrázek 2-1 Blokové schéma DA převodníku [3]

Procesory obsahující blok miniDSP mají zcela uzavřený kód, k dispozici není ani instrukční sada ani kompilátor. Blok miniDSP se programuje pomocí grafického prostředí PurePath™, které je sice zdarma, ale není volně dostupný ke stažení pro jednotlivce. Pro zpracování diplomové práce bylo prostředí laskavě poskytnuto.

Výstupem grafického rozhraní jsou konfigurační data pro procesor, do kterého se nahrají pomocí I2C sběrnice. Konfigurační data lze rovněž generovat ve formátu hlavičkového souboru v jazyce C a je možné tento soubor přilinkovat do projektu pro řídicí mikrokontrolér a vytvořit tak samostatnou aplikaci.

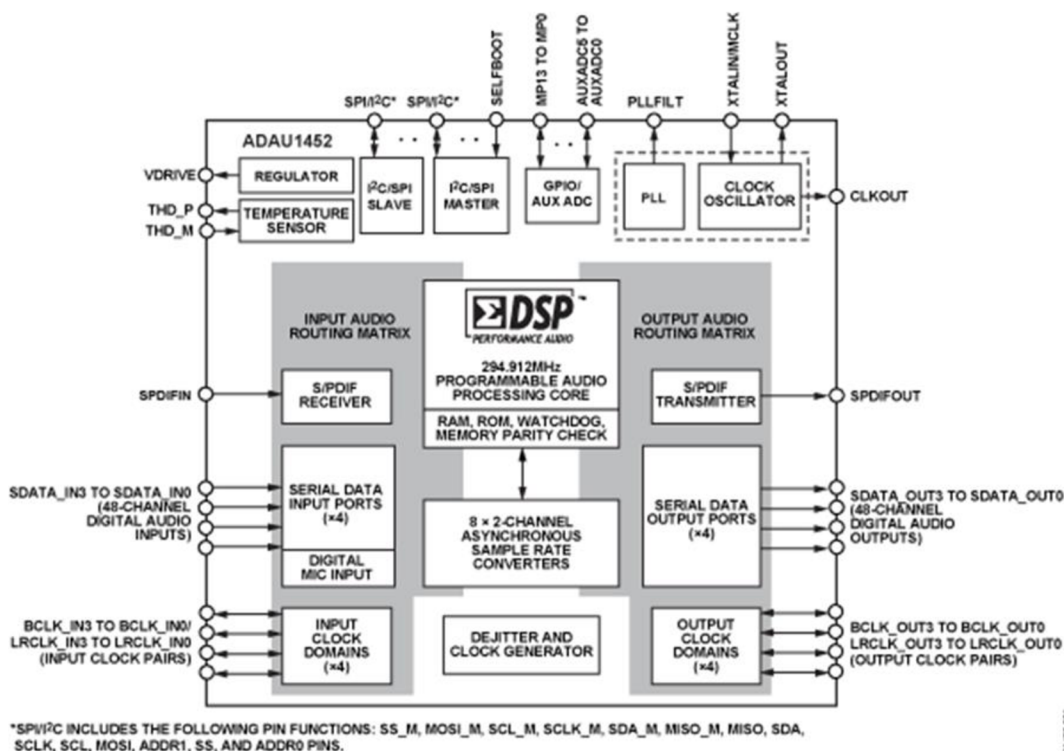


Obrázek 2-2 Ukázka pracovního okna PurePath Studia

2.2 Procesory Analog Devices

Analog Devices má pro zpracování audio signálů ucelenou řadu signálových procesorů SigmaDSP. Jedná se buď o samostatné procesory, nebo o procesory s integrovaným kodekem. Jako příklad je možné uvést ADAU1452, který v sobě implementuje celou řadu funkcí, jako S/PDIF receiver i transmitter, asynchronní obvody pro převzorkování vstupních i výstupních dat. Procesory se opět programují jako graf pomocí grafického rozhraní SigmaStudio, které je v principu podobné řešení od Texas Instruments.

Firma dále vyrábí několik ucelených řad signálových procesorů pro zpracování audia by byla vhodná například řada SHARC.



Obrázek 2-3 Blokové schéma ADAU1452 (4)

2.3 USB sběrnice

USB (z angl. Universal Serial Bus) je průmyslový standard pro sériovou komunikaci. USB se vyskytuje v několika specifikacích :

- USB 1.0 přenosová rychlost low - speed 1, 5Mbit / s a full - speed 12 Mbit / s
- USB 2.0 zpětná kompatibilita s USB 1.0 a přenosová rychlost high - speed 480 Mbit / s
- USB 3.0 přenosová rychlost super - speed 5 Gbit / s

Pro přenos audio dat se používá především full - speed komunikace. Komunikace probíhá na krouceném páru vodičů označené D + a D - v poloduplexním módu, signál je symetrický a používá linkový kód NRZI. Dále umožňuje USB sběrnice napájet cílové zařízení, maximální proud pro verzi USB 2.0 je limitován na 500 mA

2.4 USB Audio

USB-Audiou využívá isochronní přenos dat s využitím přerušení. Veškerá audio data jsou přenášena isochronními přenosy. Přerušení je použito pro kontrolní přenosy, jako nastavení hlasitosti a vzorkovacího kmitočtu.

Požadavky na datový tok závisí na konkrétním USB-Audio systému. Bude se lišit v závislosti na počtu použitých kanálů, vzorkovacím kmitočtu a bitové hloubce audio dat. Obvyklá bitová hloubka je 16, 24 nebo 32 bitů. Vzorkovací kmitočty mohou být 32, 44,1, 48, 96, 192 kHz v závislosti na kvalitě záznamu. Počet kanálů bývá typicky 2 nebo 6.

Při vzorkovacím kmitočtu 44,1 kHz přenos přepíná mezi přenosem pěti a šesti vzorky audio signálu protože USB může přenést 48 nebo 40 bytů v přenosu. To v průměru dává přenos 44,1 kHz.

Jeden isochronní přenos může přenést maximálně 1024 bitů tedy asi 256 vzorků při 24 bitové hloubce. Full Speed USB dokáže přenést jen jeden pár stereo signálu při vzorkování 48 kHz. Pro vyšší rozlišení a více kanálů je potřeba High Speed USB.

Full Speed USB přináší latenci asi 2ms, protože data jsou přenášena v 1 ms oknech.

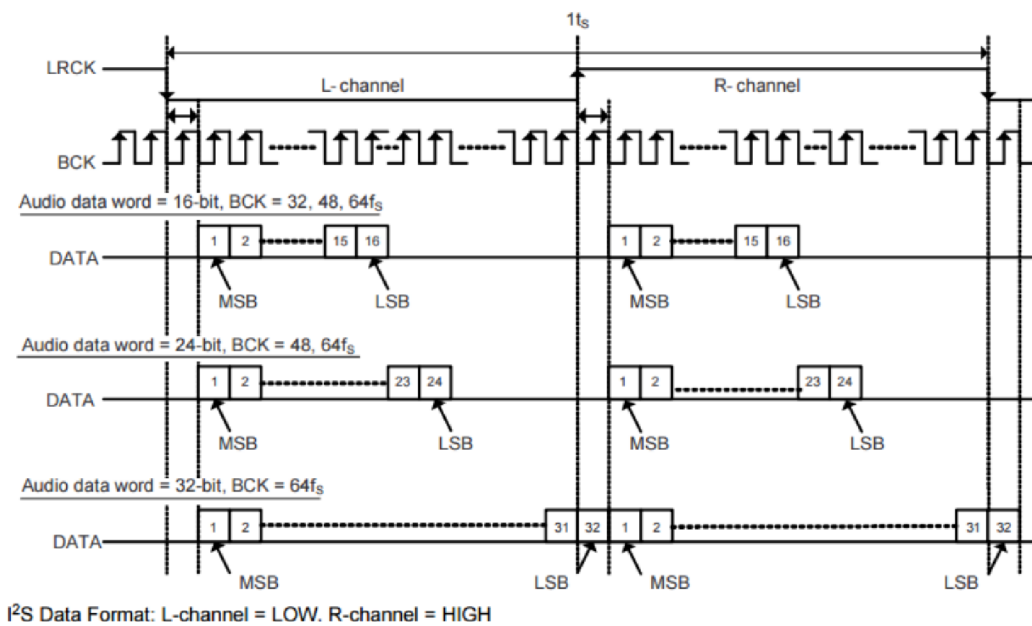
Konstruované zařízení přenáší stereofonní 16 bitová data.

2.5 I2S sběrnice

I2S sběrnice (z angl. Inter-IC Sound) je sériová sběrnice využívaná k propojování obvodů pro zpracování audio dat v rámci jednoho zařízení. Rozhraní musí obsahovat tři linky:

- Hodinový signál sériových dat bit clock (BCLK)
- Hodinový signál datových rámců left-right clock (LRCK)
- Sériová data (SD)

Alternativně ještě může obsahovat hodinový signál master clock (MCLK) o typické frekvenci $256 * LRCK$. Používá se pro synchronizaci DA převodníku, ale některé obvody si jej generují pomocí PLL.



Obrázek 2-4 Formát datového přenosu po I2S sběrnici [3]

2.6 I2C sběrnice

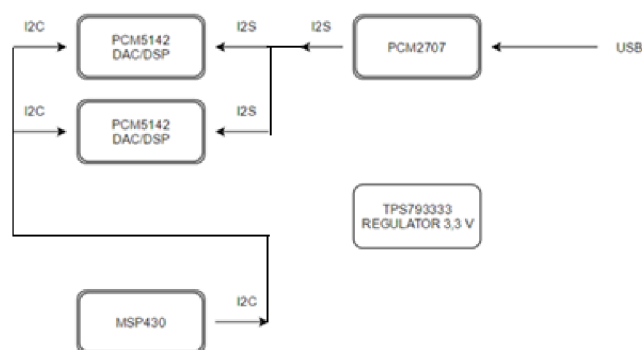
I2C sběrnice z angličtiny inter integrated circuit je počítačová sériová sběrnice vyvinutá firmou Philips sloužící k připojení nízko rychlostních periférií a jejich konfiguraci na základní desce. Sběrnice je tvořena dvěma vodiči, SCL tvoří hodinový signál a SDA tvoří druhý datový kanál. Oba signály jsou připojeny obvody typu otevřený kolektor a vyžadují pull-up rezistory, jejichž hodnota je závislá na kapacitě připojených vodičů a použité rychlosti linky. Obvody MSP 430 obsahují na čipu softwarově připojitelné pull-up rezistory s hodnotou v řádu desítek kilo ohmů. Při této velikosti rezistorů už byly signály při připojení obvodů na základní desce a logického analyzátoru nečitelné a tak byly na základní desce použity rezistory o velikosti 1,5 kilo ohmů.

3 NÁVRH ZAŘÍZENÍ

Pro použité zařízení byla zvolena jednoduchá jednodesková konstrukce s rozměry pro použití v přístrojové krabici Hammond. Obvodové řešení pak používá čipovou sadu od firmy Texas Instruments. Na místě USB rozhraní je použit obvod PSM 2706, jako DAC převodníky a zároveň signálové procesory slouží obvody PCM 5142. Řídící funkci zastává mikro kontrolér z řady MSP 430. Výhodou řešení od jednoho výrobce je především celková rychlost návrhu.

3.1 Blokové schéma

Na základní desce jsou umístěny veškeré potřebné součástky a funkce zařízení - jedno desková konstrukce. Zařízení umožňuje rozdělit nízko frekvenční audio spektrum na jednotlivá pásma pro jednotlivé reproduktory v číslicové podobě a také kompenzovat reálné vlastnosti reproduktorů.



Obrázek 3-1 Blokové schéma konstruovaného zařízení

Obvodově jsou DSP funkce, funkce DAC a USB rozhraní realizováno pomocí několika integrovaných obvodů. Pro zajištění funkce audio USB rozhraní slouží obvod PCM2707 od firmy Texas Instruments a převádí datový tok z USB rozhraní na sběrnici I2S.

Sběrnice I2S slouží pro přenos číslicových audio dat mezi jednotlivými obvody desky. Obvod dále obsahuje digitálně analogový převodník, který ale zůstává nevyužit. Pro řídicí funkce a konfiguraci DSP bloků umístěných v jednotlivých digitálně analogových převodnicích je deska osazena procesorem MSP430 od firmy Texas Instruments, komunikace řídicích funkcí probíhá po sběrnici I2C.

Pro číslicové zpracování signálu jsou využity DSP bloky umístěné na čipu spolu s digitálně analogovým převodníkem v obvodu PCM5142 rovněž od firmy Texas

Instruments. Dále deska obsahuje stabilizátor napájecího napětí pro jednotlivé obvody a je napájena z USB rozhraní.

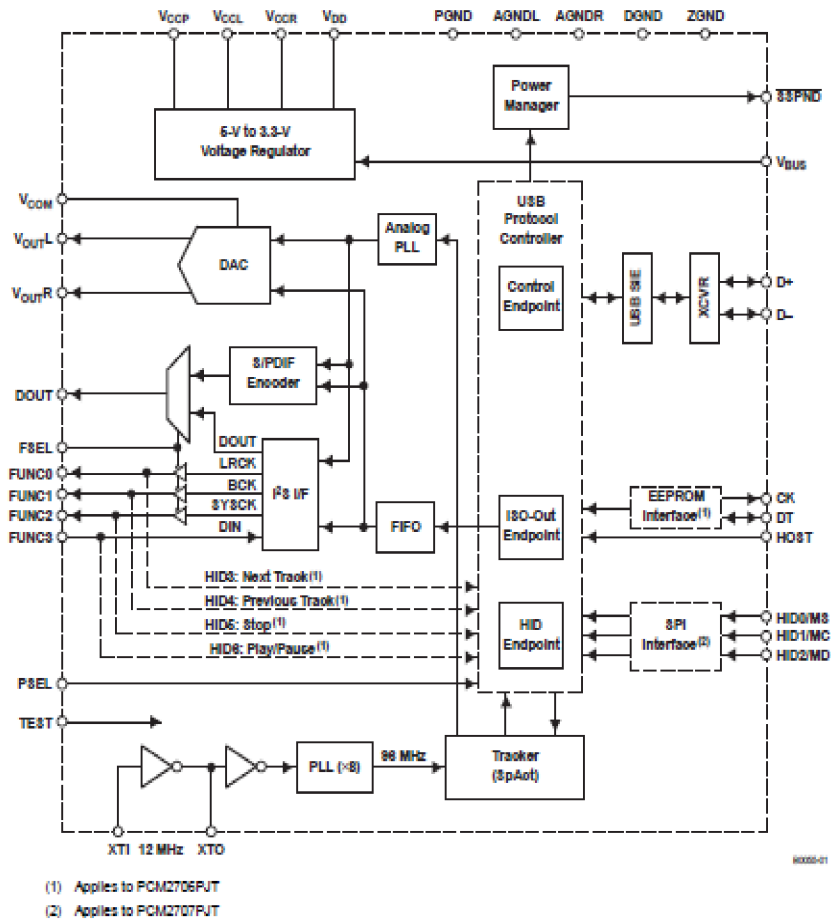
3.1.1 Obvod PCM2706

PCM2706 sdružuje funkci USB audio rozhraní, digitálně analogového převodníku a obsahuje rozhraní I2S a S/PDIF. Hodinové signály pro audio rozhraní jsou generovány pomocí vnitřního fázového závěsu.

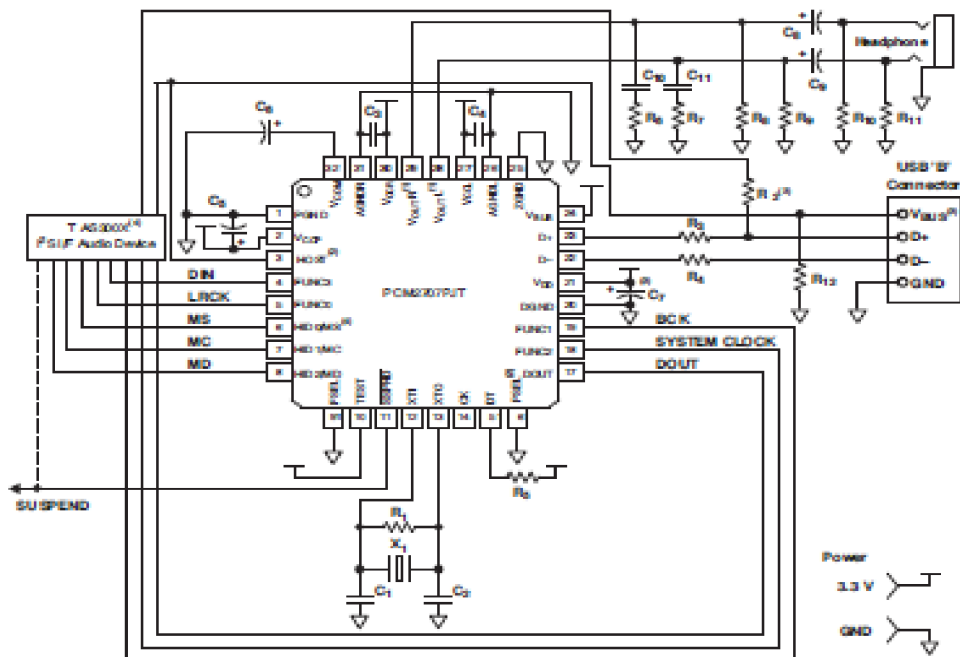
Základní vlastnosti obvodu:

- Nevyžaduje speciální ovladač, je součástí operačního systému
- Je plně kompatibilní se specifikací USB 1.1
- Je certifikováno USB-IF
- Zajišťuje isochronní přenos audio dat
- Podporuje vzorkovací frekvence 32, 44,1 a 48 kHz
- Obsahuje generátor hodinového signálu 12 MHz
- Obsahuje 16 Bitový delta sigma převodník
- V závislosti na nastavení má výstup dat na sběrnici I2S případně S/PDIF
- Je zapouzdřen v pouzdře 32TQFP

Obvod velmi zjednodušuje celkový návrh zařízení, protože veškeré funkce nutné pro realizaci USB audio rozhraní jsou realizovány hardwarově a není nutné další programování. Další velkou výhodou je, že s pomocí PLL zajišťuje generování hodinového signálu synchronizovaného s daty z USB sběrnice.



Obrázek 3-2 Blokové schéma obvodu PCM 2707 [5]



Obrázek 3-3 Typické zapojení obvodu doporučené výrobcem [5]

Tabulka 3-1 Nastavení pinů obvodu PCM2707

PIN	ÚROVEŇ	FUNKCE
FSEL	LOW	I2S DATA OUTPUT
HOST	HIGH	VBUS - 500mA
PSEL	HIGH	BUS POWERED
TEST	HIGH	

3.1.2 Obvod PCM5142

Jako digitálně analogový převodník je použit PCM5142. PCM5142 je monolitický CMOS integrovaný obvod v pouzdře TSSOP obsahuje digitálně analogový převodník s firemní architekturou firmy Texas Instruments Advanced Segment-DAC. Dále na čipu integruje programovatelné miniDSP jádro. Které je využíváno pro číslicové zpracování signálu. Při vzorkovacím kmitočtu do 48 kHz je k dispozici 1024 instrukcí miniDSP jádra na jeden vzorek.

V programu je možné využít celou řadu před programovaných algoritmů dostupných v grafickém prostředí Purepath Studia.

Základní vlastnosti obvodu:

- Programovatelné miniDSP
- Nízké rušivé napětí v nadakustickém pásmu umožňující použití jednoduchého RC filtru na výstupu
- Nevyžaduje kondenzátor pro odstranění stejnosměrné složky
- Pro generování záporného napětí vnitřních analogových obvodů má integrovanou nábojovou pumpu
- Vstupní data mohou mít formát I2S a další
- Obvod je konfigurovatelný pomocí sběrnice I2C

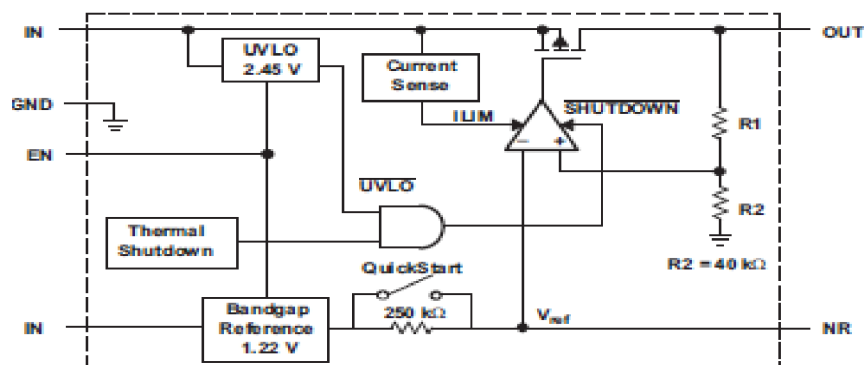
Blokové schéma je uvedeno na obrázku v předchozí kapitole.

Tabulka 3-2 Nastavení pinů obvodu PCM5142

PIN	ÚROVEŇ	FUNKCE
MODE1	LOW	I2C MODE
MODE2	HIGH	I2C MODE
XSMT	RIZENO SUSPEND	SOFT MUTE
ADR1	LOW/HIGH	I2C adresa
ADR2	LOW/HIGH	I2C adresa

3.1.3 Obvod napájecího zdroje TPS79333

S ohledem na požadavek napájení z USB sběrnice a zpracování audio signálu byl zvolen nízkošumový regulátor s malým úbytkem v pouzdře SOT23. Při proudu 200 mA je úbytek na regulátoru jen 112 mV. Šum je možné dále snížit použitím kondenzátoru na pinu NR. A je tedy velmi výhodný pro danou aplikaci, kdy úbytek na regulátoru vyháží v závislosti na napětí na USB sběrnici asi na 1,7 V. Celé zařízení je konstruováno pokud možno pro malý odběr proudu s ohledem na možné použití ve spojení malého jednodeskového počítače jako jednoduchého AV serveru, například Raspberry PI.



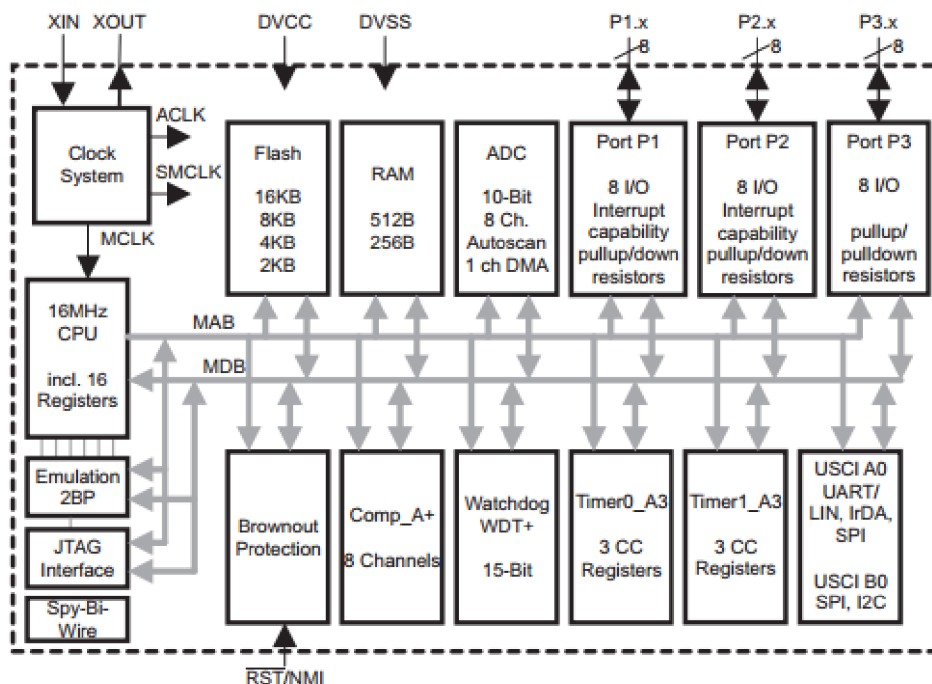
Obrázek 3-4 Blokové schéma použitého regulátoru [6]

3.1.4 Mikrokontrolér MSP430

Do funkce řídicího obvodu celé desky byl zvolen mikrokontrolér MSP430G2553IN20, který je zapouzdřen v pouzdře DIP20 a po naprogramování je zasunut do patice v základní desce.

MSP430 je rodina mikrokontrolérů s 16 bitovou architekturou RISC určenou pro aplikace s velmi nízkou spotřebou, relativně nízký výkon není v tomto případě na závadu. Díky internímu oscilátoru ke své funkci potřebuje prakticky jen blokovací kondenzátor na napájecích vývodech a ošetření přerušení po zapnutí.

Úkolem tohoto obvodu je jen iniciace miniDSP jader po sběrnici I2C použitých PCM5142 a po té přechází do režimu snížené spotřeby.

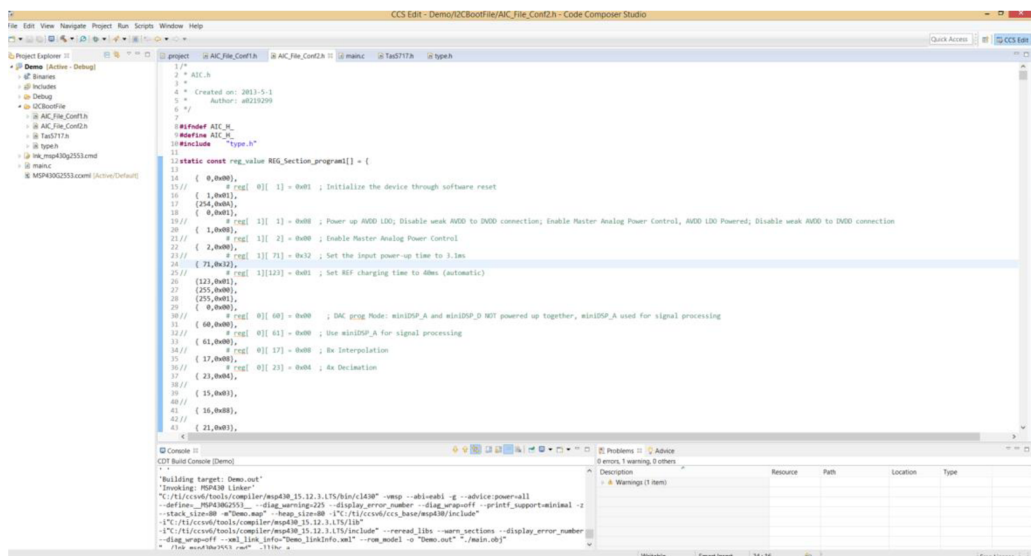


Obrázek 3-5 Blokové schéma vnitřní architektury použitého mikrokontroléru [7]

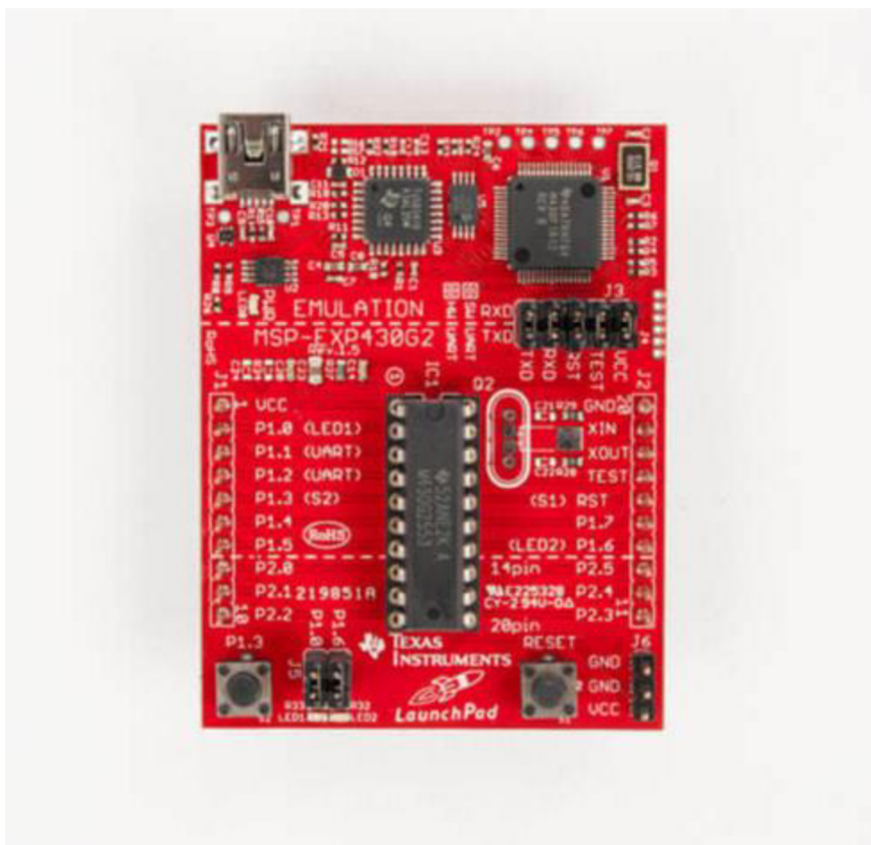
3.2 Vývojové prostředí a knihovny

Pro vývoj a kompilaci firmwaru pro použitý mikrokontrolér bylo využito, prostředí Code Composer Studio™, které ke svým produktům dodává firma Texas Instruments. Jde o integrované vývojové prostředí založené na Eclipse IDE.

Vlastní obslužný program vychází z dokumentace Texas Instruments. Dokument SLAA605A (8) poskytuje návod jak využít vývojovou desku MSP 430 Launchpad pro zavedení softwaru do obvodů miniDSP. MSP 430 Launchpad umožňuje programovat obvody v patici DIP20. Naprogramovaný obvod je pak možné následně použít v aplikaci. Hlavičkový soubor je generovaný pomocí Purepath Studia a slouží jako ovladač pro použité DSP v obvodech DA převodníku. Kód ovladače je uvede



```
1 /*
2 * AIC_B
3 * Created on: 2013-5-1
4 * Author: a823299
5 */
6
7 #ifndef AIC_M
8 #define AIC_M
9 #include "Type.h"
10 #endif
11
12 static const reg_value REG_Section_program[] = {
13     { 0,0x00},
14     { 1,0x01},
15     { 2,0x01},
16     { 3,0x01},
17     { 4,0x01},
18     { 5,0x01},
19     { 6,0x01},
20     { 7,0x01},
21     { 8,0x01},
22     { 9,0x01},
23     { 10,0x01},
24     { 11,0x01},
25     { 12,0x01},
26     { 13,0x01},
27     { 14,0x01},
28     { 15,0x01},
29     { 16,0x01},
30     { 17,0x01},
31     { 18,0x01},
32     { 19,0x01},
33     { 20,0x01},
34     { 21,0x01},
35     { 22,0x01},
36     { 23,0x01},
37     { 24,0x01},
38     { 25,0x01},
39     { 26,0x01},
40     { 27,0x01},
41     { 28,0x01},
42     { 29,0x01},
43     { 30,0x01},
44     { 31,0x01},
45     { 32,0x01},
46     { 33,0x01},
47     { 34,0x01},
48     { 35,0x01},
49     { 36,0x01},
50     { 37,0x01},
51     { 38,0x01},
52     { 39,0x01},
53     { 40,0x01},
54     { 41,0x01},
55     { 42,0x01},
56     { 43,0x01},
57     { 44,0x01},
58     { 45,0x01},
59     { 46,0x01},
60     { 47,0x01},
61     { 48,0x01},
62     { 49,0x01},
63     { 50,0x01},
64     { 51,0x01},
65     { 52,0x01},
66     { 53,0x01},
67     { 54,0x01},
68     { 55,0x01},
69     { 56,0x01},
70     { 57,0x01},
71     { 58,0x01},
72     { 59,0x01},
73     { 60,0x01},
74     { 61,0x01},
75     { 62,0x01},
76     { 63,0x01},
77     { 64,0x01},
78     { 65,0x01},
79     { 66,0x01},
80     { 67,0x01},
81     { 68,0x01},
82     { 69,0x01},
83     { 70,0x01},
84     { 71,0x01},
85     { 72,0x01},
86     { 73,0x01},
87     { 74,0x01},
88     { 75,0x01},
89     { 76,0x01},
90     { 77,0x01},
91     { 78,0x01},
92     { 79,0x01},
93     { 80,0x01},
94     { 81,0x01},
95     { 82,0x01},
96     { 83,0x01},
97     { 84,0x01},
98     { 85,0x01},
99     { 86,0x01},
100    { 87,0x01},
101    { 88,0x01},
102    { 89,0x01},
103    { 90,0x01},
104    { 91,0x01},
105    { 92,0x01},
106    { 93,0x01},
107    { 94,0x01},
108    { 95,0x01},
109    { 96,0x01},
110    { 97,0x01},
111    { 98,0x01},
112    { 99,0x01},
113    { 100,0x01},
114    { 101,0x01},
115    { 102,0x01},
116    { 103,0x01},
117    { 104,0x01},
118    { 105,0x01},
119    { 106,0x01},
120    { 107,0x01},
121    { 108,0x01},
122    { 109,0x01},
123    { 110,0x01},
124    { 111,0x01},
125    { 112,0x01},
126    { 113,0x01},
127    { 114,0x01},
128    { 115,0x01},
129    { 116,0x01},
130    { 117,0x01},
131    { 118,0x01},
132    { 119,0x01},
133    { 120,0x01},
134    { 121,0x01},
135    { 122,0x01},
136    { 123,0x01},
137    { 124,0x01},
138    { 125,0x01},
139    { 126,0x01},
140    { 127,0x01},
141    { 128,0x01},
142    { 129,0x01},
143    { 130,0x01},
144    { 131,0x01},
145    { 132,0x01},
146    { 133,0x01},
147    { 134,0x01},
148    { 135,0x01},
149    { 136,0x01},
150    { 137,0x01},
151    { 138,0x01},
152    { 139,0x01},
153    { 140,0x01},
154    { 141,0x01},
155    { 142,0x01},
156    { 143,0x01},
157    { 144,0x01},
158    { 145,0x01},
159    { 146,0x01},
160    { 147,0x01},
161    { 148,0x01},
162    { 149,0x01},
163    { 150,0x01},
164    { 151,0x01},
165    { 152,0x01},
166    { 153,0x01},
167    { 154,0x01},
168    { 155,0x01},
169    { 156,0x01},
170    { 157,0x01},
171    { 158,0x01},
172    { 159,0x01},
173    { 160,0x01},
174    { 161,0x01},
175    { 162,0x01},
176    { 163,0x01},
177    { 164,0x01},
178    { 165,0x01},
179    { 166,0x01},
180    { 167,0x01},
181    { 168,0x01},
182    { 169,0x01},
183    { 170,0x01},
184    { 171,0x01},
185    { 172,0x01},
186    { 173,0x01},
187    { 174,0x01},
188    { 175,0x01},
189    { 176,0x01},
190    { 177,0x01},
191    { 178,0x01},
192    { 179,0x01},
193    { 180,0x01},
194    { 181,0x01},
195    { 182,0x01},
196    { 183,0x01},
197    { 184,0x01},
198    { 185,0x01},
199    { 186,0x01},
200    { 187,0x01},
201    { 188,0x01},
202    { 189,0x01},
203    { 190,0x01},
204    { 191,0x01},
205    { 192,0x01},
206    { 193,0x01},
207    { 194,0x01},
208    { 195,0x01},
209    { 196,0x01},
210    { 197,0x01},
211    { 198,0x01},
212    { 199,0x01},
213    { 200,0x01},
214    { 201,0x01},
215    { 202,0x01},
216    { 203,0x01},
217    { 204,0x01},
218    { 205,0x01},
219    { 206,0x01},
220    { 207,0x01},
221    { 208,0x01},
222    { 209,0x01},
223    { 210,0x01},
224    { 211,0x01},
225    { 212,0x01},
226    { 213,0x01},
227    { 214,0x01},
228    { 215,0x01},
229    { 216,0x01},
230    { 217,0x01},
231    { 218,0x01},
232    { 219,0x01},
233    { 220,0x01},
234    { 221,0x01},
235    { 222,0x01},
236    { 223,0x01},
237    { 224,0x01},
238    { 225,0x01},
239    { 226,0x01},
240    { 227,0x01},
241    { 228,0x01},
242    { 229,0x01},
243    { 230,0x01},
244    { 231,0x01},
245    { 232,0x01},
246    { 233,0x01},
247    { 234,0x01},
248    { 235,0x01},
249    { 236,0x01},
250    { 237,0x01},
251    { 238,0x01},
252    { 239,0x01},
253    { 240,0x01},
254    { 241,0x01},
255    { 242,0x01},
256    { 243,0x01},
257    { 244,0x01},
258    { 245,0x01},
259    { 246,0x01},
260    { 247,0x01},
261    { 248,0x01},
262    { 249,0x01},
263    { 250,0x01},
264    { 251,0x01},
265    { 252,0x01},
266    { 253,0x01},
267    { 254,0x01},
268    { 255,0x01},
269    { 256,0x01},
270    { 257,0x01},
271    { 258,0x01},
272    { 259,0x01},
273    { 260,0x01},
274    { 261,0x01},
275    { 262,0x01},
276    { 263,0x01},
277    { 264,0x01},
278    { 265,0x01},
279    { 266,0x01},
280    { 267,0x01},
281    { 268,0x01},
282    { 269,0x01},
283    { 270,0x01},
284    { 271,0x01},
285    { 272,0x01},
286    { 273,0x01},
287    { 274,0x01},
288    { 275,0x01},
289    { 276,0x01},
290    { 277,0x01},
291    { 278,0x01},
292    { 279,0x01},
293    { 280,0x01},
294    { 281,0x01},
295    { 282,0x01},
296    { 283,0x01},
297    { 284,0x01},
298    { 285,0x01},
299    { 286,0x01},
300    { 287,0x01},
301    { 288,0x01},
302    { 289,0x01},
303    { 290,0x01},
304    { 291,0x01},
305    { 292,0x01},
306    { 293,0x01},
307    { 294,0x01},
308    { 295,0x01},
309    { 296,0x01},
310    { 297,0x01},
311    { 298,0x01},
312    { 299,0x01},
313    { 300,0x01},
314    { 301,0x01},
315    { 302,0x01},
316    { 303,0x01},
317    { 304,0x01},
318    { 305,0x01},
319    { 306,0x01},
320    { 307,0x01},
321    { 308,0x01},
322    { 309,0x01},
323    { 310,0x01},
324    { 311,0x01},
325    { 312,0x01},
326    { 313,0x01},
327    { 314,0x01},
328    { 315,0x01},
329    { 316,0x01},
330    { 317,0x01},
331    { 318,0x01},
332    { 319,0x01},
333    { 320,0x01},
334    { 321,0x01},
335    { 322,0x01},
336    { 323,0x01},
337    { 324,0x01},
338    { 325,0x01},
339    { 326,0x01},
340    { 327,0x01},
341    { 328,0x01},
342    { 329,0x01},
343    { 330,0x01},
344    { 331,0x01},
345    { 332,0x01},
346    { 333,0x01},
347    { 334,0x01},
348    { 335,0x01},
349    { 336,0x01},
350    { 337,0x01},
351    { 338,0x01},
352    { 339,0x01},
353    { 340,0x01},
354    { 341,0x01},
355    { 342,0x01},
356    { 343,0x01},
357    { 344,0x01},
358    { 345,0x01},
359    { 346,0x01},
360    { 347,0x01},
361    { 348,0x01},
362    { 349,0x01},
363    { 350,0x01},
364    { 351,0x01},
365    { 352,0x01},
366    { 353,0x01},
367    { 354,0x01},
368    { 355,0x01},
369    { 356,0x01},
370    { 357,0x01},
371    { 358,0x01},
372    { 359,0x01},
373    { 360,0x01},
374    { 361,0x01},
375    { 362,0x01},
376    { 363,0x01},
377    { 364,0x01},
378    { 365,0x01},
379    { 366,0x01},
380    { 367,0x01},
381    { 368,0x01},
382    { 369,0x01},
383    { 370,0x01},
384    { 371,0x01},
385    { 372,0x01},
386    { 373,0x01},
387    { 374,0x01},
388    { 375,0x01},
389    { 376,0x01},
390    { 377,0x01},
391    { 378,0x01},
392    { 379,0x01},
393    { 380,0x01},
394    { 381,0x01},
395    { 382,0x01},
396    { 383,0x01},
397    { 384,0x01},
398    { 385,0x01},
399    { 386,0x01},
400    { 387,0x01},
401    { 388,0x01},
402    { 389,0x01},
403    { 390,0x01},
404    { 391,0x01},
405    { 392,0x01},
406    { 393,0x01},
407    { 394,0x01},
408    { 395,0x01},
409    { 396,0x01},
410    { 397,0x01},
411    { 398,0x01},
412    { 399,0x01},
413    { 400,0x01},
414    { 401,0x01},
415    { 402,0x01},
416    { 403,0x01},
417    { 404,0x01},
418    { 405,0x01},
419    { 406,0x01},
420    { 407,0x01},
421    { 408,0x01},
422    { 409,0x01},
423    { 410,0x01},
424    { 411,0x01},
425    { 412,0x01},
426    { 413,0x01},
427    { 414,0x01},
428    { 415,0x01},
429    { 416,0x01},
430    { 417,0x01},
431    { 418,0x01},
432    { 419,0x01},
433    { 420,0x01},
434    { 421,0x01},
435    { 422,0x01},
436    { 423,0x01},
437    { 424,0x01},
438    { 425,0x01},
439    { 426,0x01},
440    { 427,0x01},
441    { 428,0x01},
442    { 429,0x01},
443    { 430,0x01},
444    { 431,0x01},
445    { 432,0x01},
446    { 433,0x01},
447    { 434,0x01},
448    { 435,0x01},
449    { 436,0x01},
450    { 437,0x01},
451    { 438,0x01},
452    { 439,0x01},
453    { 440,0x01},
454    { 441,0x01},
455    { 442,0x01},
456    { 443,0x01},
457    { 444,0x01},
458    { 445,0x01},
459    { 446,0x01},
460    { 447,0x01},
461    { 448,0x01},
462    { 449,0x01},
463    { 450,0x01},
464    { 451,0x01},
465    { 452,0x01},
466    { 453,0x01},
467    { 454,0x01},
468    { 455,0x01},
469    { 456,0x01},
470    { 457,0x01},
471    { 458,0x01},
472    { 459,0x01},
473    { 460,0x01},
474    { 461,0x01},
475    { 462,0x01},
476    { 463,0x01},
477    { 464,0x01},
478    { 465,0x01},
479    { 466,0x01},
480    { 467,0x01},
481    { 468,0x01},
482    { 469,0x01},
483    { 470,0x01},
484    { 471,0x01},
485    { 472,0x01},
486    { 473,0x01},
487    { 474,0x01},
488    { 475,0x01},
489    { 476,0x01},
490    { 477,0x01},
491    { 478,0x01},
492    { 479,0x01},
493    { 480,0x01},
494    { 481,0x01},
495    { 482,0x01},
496    { 483,0x01},
497    { 484,0x01},
498    { 485,0x01},
499    { 486,0x01},
500    { 487,0x01},
501    { 488,0x01},
502    { 489,0x01},
503    { 490,0x01},
504    { 491,0x01},
505    { 492,0x01},
506    { 493,0x01},
507    { 494,0x01},
508    { 495,0x01},
509    { 496,0x01},
510    { 497,0x01},
511    { 498,0x01},
512    { 499,0x01},
513    { 500,0x01},
514    { 501,0x01},
515    { 502,0x01},
516    { 503,0x01},
517    { 504,0x01},
518    { 505,0x01},
519    { 506,0x01},
520    { 507,0x01},
521    { 508,0x01},
522    { 509,0x01},
523    { 510,0x01},
524    { 511,0x01},
525    { 512,0x01},
526    { 513,0x01},
527    { 514,0x01},
528    { 515,0x01},
529    { 516,0x01},
530    { 517,0x01},
531    { 518,0x01},
532    { 519,0x01},
533    { 520,0x01},
534    { 521,0x01},
535    { 522,0x01},
536    { 523,0x01},
537    { 524,0x01},
538    { 525,0x01},
539    { 526,0x01},
540    { 527,0x01},
541    { 528,0x01},
542    { 529,0x01},
543    { 530,0x01},
544    { 531,0x01},
545    { 532,0x01},
546    { 533,0x01},
547    { 534,0x01},
548    { 535,0x01},
549    { 536,0x01},
550    { 537,0x01},
551    { 538,0x01},
552    { 539,0x01},
553    { 540,0x01},
554    { 541,0x01},
555    { 542,0x01},
556    { 543,0x01},
557    { 544,0x01},
558    { 545,0x01},
559    { 546,0x01},
560    { 547,0x01},
561    { 548,0x01},
562    { 549,0x01},
563    { 550,0x01},
564    { 551,0x01},
565    { 552,0x01},
566    { 553,0x01},
567    { 554,0x01},
568    { 555,0x01},
569    { 556,0x01},
570    { 557,0x01},
571    { 558,0x01},
572    { 559,0x01},
573    { 560,0x01},
574    { 561,0x01},
575    { 562,0x01},
576    { 563,0x01},
577    { 564,0x01},
578    { 565,0x01},
579    { 566,0x01},
580    { 567,0x01},
581    { 568,0x01},
582    { 569,0x01},
583    { 570,0x01},
584    { 571,0x01},
585    { 572,0x01},
586    { 573,0x01},
587    { 574,0x01},
588    { 575,0x01},
589    { 576,0x01},
590    { 577,0x01},
591    { 578,0x01},
592    { 579,0x01},
593    { 580,0x01},
594    { 581,0x01},
595    { 582,0x01},
596    { 583,0x01},
597    { 584,0x01},
598    { 585,0x01},
599    { 586,0x01},
600    { 587,0x01},
601    { 588,0x01},
602    { 589,0x01},
603    { 590,0x01},
604    { 591,0x01},
605    { 592,0x01},
606    { 593,0x01},
607    { 594,0x01},
608    { 595,0x01},
609    { 596,0x01},
610    { 597,0x01},
611    { 598,0x01},
612    { 599,0x01},
613    { 600,0x01},
614    { 601,0x01},
615    { 602,0x01},
616    { 603,0x01},
617    { 604,0x01},
618    { 605,0x01},
619    { 606,0x01},
620    { 607,0x01},
621    { 608,0x01},
622    { 609,0x01},
623    { 610,0x01},
624    { 611,0x01},
625    { 612,0x01},
626    { 613,0x01},
627    { 614,0x01},
628    { 615,0x01},
629    { 616,0x01},
630    { 617,0x01},
631    { 618,0x01},
632    { 619,0x01},
633    { 620,0x01},
634    { 621,0x01},
635    { 622,0x01},
636    { 623,0x01},
637    { 624,0x01},
638    { 625,0x01},
639    { 626,0x01},
640    { 627,0x01},
641    { 628,0x01},
642    { 629,0x01},
643    { 630,0x01},
644    { 631,0x01},
645    { 632,0x01},
646    { 633,0x01},
647    { 634,0x01},
648    { 635,0x01},
649    { 636,0x01},
650    { 637,0x01},
651    { 638,0x01},
652    { 639,0x01},
653    { 640,0x01},
654    { 641,0x01},
655    { 642,0x01},
656    { 643,0x01},
657    { 644,0x01},
658    { 645,0x01},
659    { 646,0x01},
660    { 647,0x01},
661    { 648,0x01},
662    { 649,0x01},
663    { 650,0x01},
664    { 651,0x01},
665    { 652,0x01},
666    { 653,0x01},
667    { 654,0x01},
668    { 655,0x01},
669    { 656,0x01},
670    { 657,0x01},
671    { 658,0x01},
672    { 659,0x01},
673    { 660,0x01},
674    { 661,0x01},
675    { 662,0x01},
676    { 663,0x01},
677    { 664,0x01},
678    { 665,0x01},
679    { 666,0x01},
680    { 667,0x01},
681    { 668,0x01},
682    { 669,0x01},
683    { 670,0x01},
684    { 671,0x01},
685    { 672,0x01},
686    { 673,0x01},
687    { 674,0x01},
688    { 675,0x01},
689    { 676,0x01},
690    { 677,0x01},
691    { 678,0x01},
692    { 679,0x01},
693    { 680,0x01},
694    { 681,0x01},
695    { 682,0x01},
696    { 683,0x01},
697    { 684,0x01},
698    { 685,0x01},
699    { 686,0x01},
700    { 687,0x01},
701    { 688,0x01},
702    { 689,0x01},
703    { 690,0x01},
704    { 691,0x01},
705    { 692,0x01},
706    { 693,0x01},
707    { 694,0x01},
708    { 695,0x01},
709    { 696,0x01},
710    { 697,0x01},
711    { 698,0x01},
712    { 699,0x01},
713    { 700,0x01},
714    { 701,0x01},
715    { 702,0x01},
716    { 703,0x01},
717    { 704,0x01},
718    { 705,0x01},
719    { 706,0x01},
720    { 707,0x01},
721    { 708,0x01},
722    { 709,0x01},
723    { 710,0x01},
724    { 711,0x01},
725    { 712,0x01},
726    { 713,0x01},
727    { 714,0x01},
728    { 715,0x01},
729    { 716,0x01},
730    { 717,0x01},
731    { 718,0x01},
732    { 719,0x01},
733    { 720,0x01},
734    { 721,0x01},
735    { 722,0x01},
736    { 723,0x01},
737    { 724,0x01},
738    { 725,0x01},
739    { 726,0x01},
740    { 727,0x01},
741    { 728,0x01},
742    { 729,0x01},
743    { 730,0x01},
744    { 731,0x01},
745    { 732,0x01},
746    { 733,0x01},
747    { 734,0x01},
748    { 735,0x01},
749    { 736,0x01},
750    { 737,0x01},
751    { 738,0x01},
752    { 739,0x01},
753    { 740,0x01},
754    { 741,0x01},
755    { 742,0x01},
756    { 743,0x01},
757    { 744,0x01},
758    { 745,0x01},
759    { 746,0x01},
760    { 747,0x01},
761    { 748,0x01},
762    { 749,0x01},
763    { 750,0x01},
764    { 751,0x01},
765    { 752,0x01},
766    { 753,0x01},
767    { 754,0x01
```



Obrázek 3-7 MSP430 Launchpad - MSP-EXP430G2

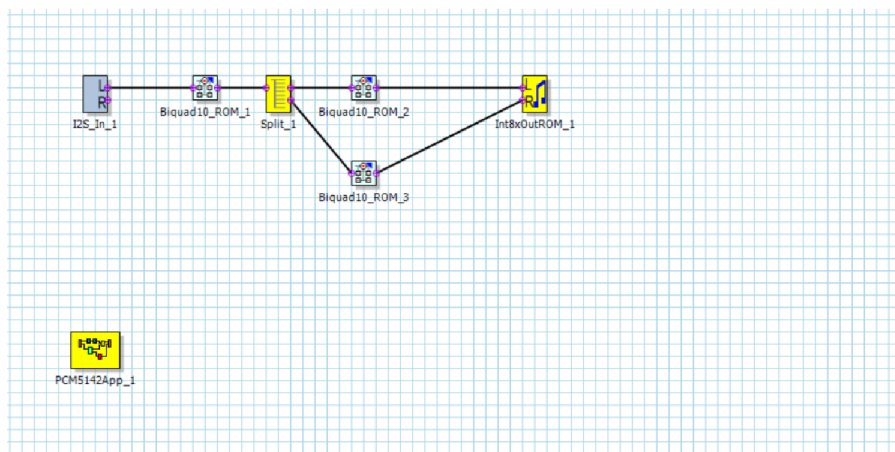
3.3 Vývojové prostředí Purepath Studio

Jak již bylo řečeno Purepath Studio slouží ke generování kódu pro DSP jádra miniDSP. Procesor se v tomto prostředí programuje pomocí grafu a graf je potom kompilován do kódu cílového procesoru.

Prostředí v sobě obsahuje velké množství před programovaných stavebních bloků, ze kterých je možné vytvořit graf procesu pro zpracování audio dat. Ze stavebních bloků lze například jmenovat splittery a multiplexery, detektory, ovládání hlasitosti, generování tónů a šumu, filtry FIR a IIR.

Filtry FIR mohou být implementovány maximálně 128 řádu, což je nedostatečné pro realizaci reproduktorové výhybky, protože řád FIR filtru musí mít srovnatelný řád s počtem vzorku na periodu zpracovávané frekvence a tato podmínka při běžném vzorkovacím kmitočtu 48 kHz a 128 řádu není na nízkých kmitočtech splnitelná.

Pro praktickou realizaci byly tedy použity filtry IIR, které odpovídají běžným analogovým filtrům používaným v elektroakustice. Hlavní výhodou je možnost rychlé změny použitého filtru a tím rychlý vývoj aplikace.



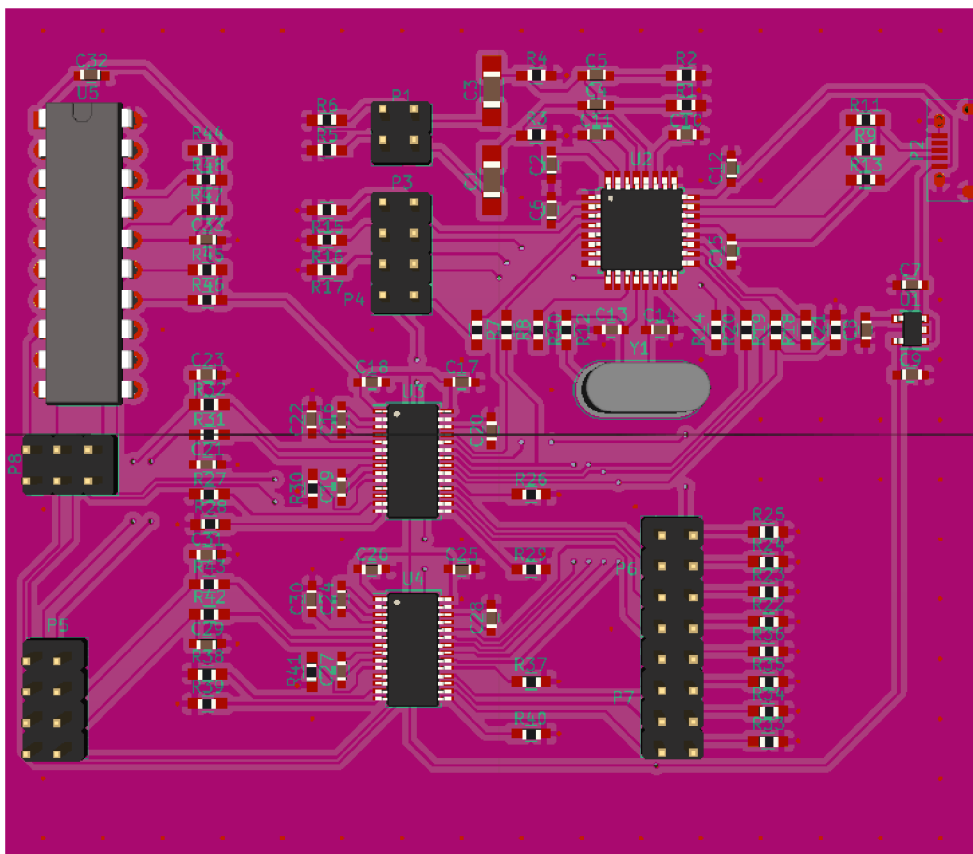
Obrázek 3-8 Graf výhybky pro jedno pásmo

3.4 Návrh základní desky

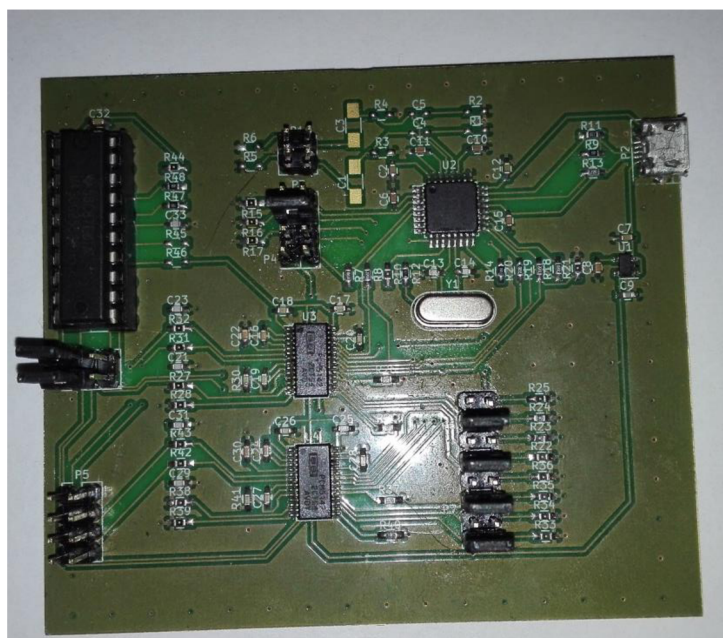
Základní deska je navržena na dvouvrstevném plošném spoji. Deska je navržena převážně s většinou spojů na horní vrstvě se zemnicí plochou na vrstvě spodní s minimem propojek. Deska obsahuje větší množství pinových lišt s případnými propojkami pro nastavení funkcí jednotlivých obvodů. Tato koncepce byla zvolena kvůli snazší možnosti hledat případné hardwarové chyby. Této funkce nebylo nutné využít, deska pracuje správně.

Protože keramické kondenzátory s kapacitou 10 μF se vyrábějí i v pouzdře 0603, tak na desce nebyly použity žádné elektrolytické kondenzátory. Veškeré pasivní prvky jsou v pouzdře 0603.

Pasivní součástky v pouzdrech 0603 byly pájeny s použitím pájecí pasty a přetavení horkým vzduchem. Veškeré ostatní prvky byly pájeny ručně. Tato koncepce byla zvolena, protože při pájení s pájecí pastou bez použití nanášecí šablony s pouzdry 32TQFP a TSSOP28 zůstávají pod pouzdrem zbytky pájecí pasty, které časem výrazně zhoršují elektrické vlastnosti obvodu.



Obrázek 3-9 3D model základní desky



Obrázek 3-10 Praktické provedení základní desky

3.5 Mechanická konstrukce

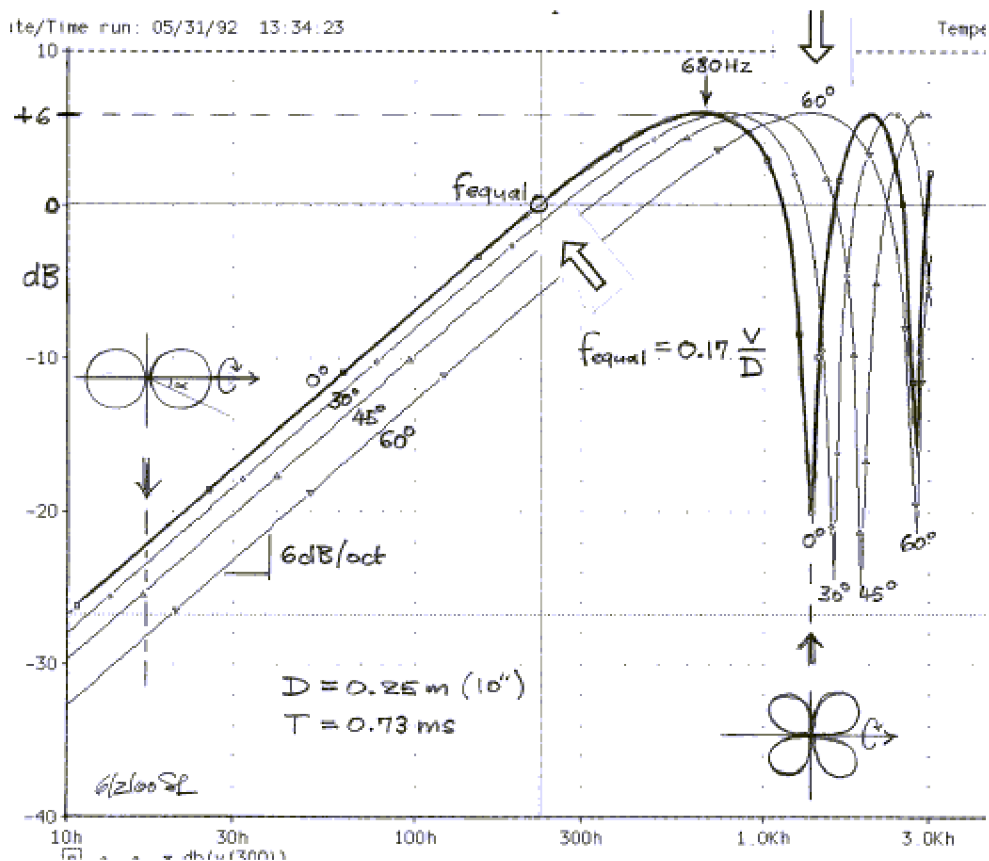
Základem mechanické konstrukce je krabička Hammond 546-1455K1201. Základní deska je navržena k jednoduchému zasunutí do drážek v hliníkovém profilu krabičky. Konektor mikro USB je zapájen přímo do základní desky a v čelním panelu je vyfrézovaná štěrbina pro konektor, konektory cinch jsou ve vyvrtaných otvorech.



Obrázek 3-11 Mechanické provedení celé konstrukce

3.6 Otevřená ozvučnice

Nejjednodušší model otevřené ozvučnice je jednoduchý dipólový model tvořený dvěma zářiči s opačnou polaritou. Pro frekvenční odezvu je charakteristický pokles na nízkých frekvencích se strmostí 6 dB/oktávu. Směrová charakteristika má potom osmičkový charakter a reproduktory jsou v celém přenášeném pásmu výrazně směrové. Dále je na přenosové charakteristice dobře patrné převýšení v oblasti nad dolním mezním kmitočtem a také nuly na vyšších kmitočtech. Frekvenční charakteristiku je nutné na nízkých kmitočtech kompenzovat.



Obrázek 3-12 Přenosová charakteristika dvoubodového zářiče [9]

3.7 Výběr reproduktorů pro reprosoustavu s otevřenou - dipólovou ozvučnicí

Pro praktickou implementaci reproduktorové výhybky byla zvolena koncepce dvoupásmové reproduktorové soustavy. V otevřené ozvučnici není oddělen prostor před a za membránou a v akustickém obvodu reproduktoru dochází k akustickému zkratu. Akustický zkrat způsobuje pokles akustického tlaku vyzařovaného reproduktorovou soustavou na nízkých kmitočtech, který je nutné kompenzovat. Tento jev klade zvýšené požadavky na zejména basový reproduktor. Pro výběr basového reproduktoru je důležitý objem vzduchu, který reproduktor dokáže rozpohybovat. Rozhodující jsou tedy parametry udávající maximální výchylku a plochu membrány. Basový reproduktor má v otevřené ozvučnici větší výchylku, než v uzavřené musí tedy mít malé zkreslení a nesmí být slyšitelné pazvuky při pohybu pohyblivých částí reproduktoru v koši. Další nevýhodou otevřené ozvučnice na nízkých kmitočtech je malá účinnost.

Většina komerčně dostupných výškových reproduktorů nemá otevřený akustický obvod a pro použití v dipólové konstrukci je nutné použít reproduktory dva pracující v protifázi. Výškové reproduktory s otevřeným akustickým obvodem mohou být konstruovány s klasickou kónickou membránou, jejich nevýhoda bývá obvykle nižší účinnost. Další možností je použít výškový reproduktor vyrobený planární technologií s membránou tvořenou páskem.

3.7.1 Středo basový reproduktor SM-212

S ohledem na požadavky byl jako basový reproduktor zvolen SM-212 z profesionální řady reproduktorů firmy Beyma. Reproduktor má velký zdvihový objem membrány 453 cm³, vysokou citlivost 97 dB 1W/1m a díky papírové membráně má vyrovnanou kmitočtovou charakteristiku až do vyšších středních kmitočtů, slibující bezproblémový návrh reproduktorové výhybky.



Obrázek 3-13 Středo basový reproduktor SM-212

Technické specifikace:

Nominální průměr	300 mm 12 in
Nominální impedance	8 Ω
Minimální impedance	6,5 Ω
Zatížitelnost	350 WAES
Špičková zatížitelnost	700 W
Citlivost	97 dB 1W / 1m
Kmitočtový rozsah	45 - 4.000 Hz
Doporučený objem ozvučnice	30 / 100 l 1,06 / 3,53 ft ³
Průměr cívky	63,5 mm 2,5 in
BI faktor	14,4 N/A
Délka cívky	19,5 mm
Maximální výchylka	27 mm

Thiele-Small parametry:

Rezonanční kmitočet	43 Hz
Stejnoseměrný odpor	5,5 Ω
Mechanická jakost Q_{ms}	5,3
Elektrická jakost Q_{es}	0,41
Celková jakost Q_{tc}	0,38
Ekvivalentní objem V_{as}	103 l
Účinnost η_0	1,9 %
Efektivní plocha membrány S_d	0,055 m ²
Maximální výchylka X_{max}	8,25 mm
Zdvihový objem V_d	453 cm ³
Indukčnost cívky L_e	0,6 mH

3.7.2 Výškový reproduktor AMTPRO-4 Air Motion Transformer

Pro zpracování vyšších středních a vysokých kmitočtů byl zvolen reproduktor AMTPRO-4 Air Motion Transformer od firmy Dayton Audio. Reproduktor má dobrou citlivost 94 dB 1W/1m, široký použitelný rozsah frekvencí 800 – 18000 Hz a má otevřený akustický obvod umožňující jednoduché použití v dipólové otevřené reproduktorové soustavě.

Reproduktor je vyrobený technologií air motion transformer a používá odlišný princip rozpohybování vzduchu než ostatní typy reproduktorů s membránou, které vykonávají dopřední a zpětný pohyb, jako píšť. Membrána je tvořena drobnými záhyby, které se smršťují a roztahují a tak nasávají a vytlačují vzduch, membrána nevykonává pístový pohyb. Princip je inspirovaný hmyzími orgány pro vytváření zvuku (cvrček).



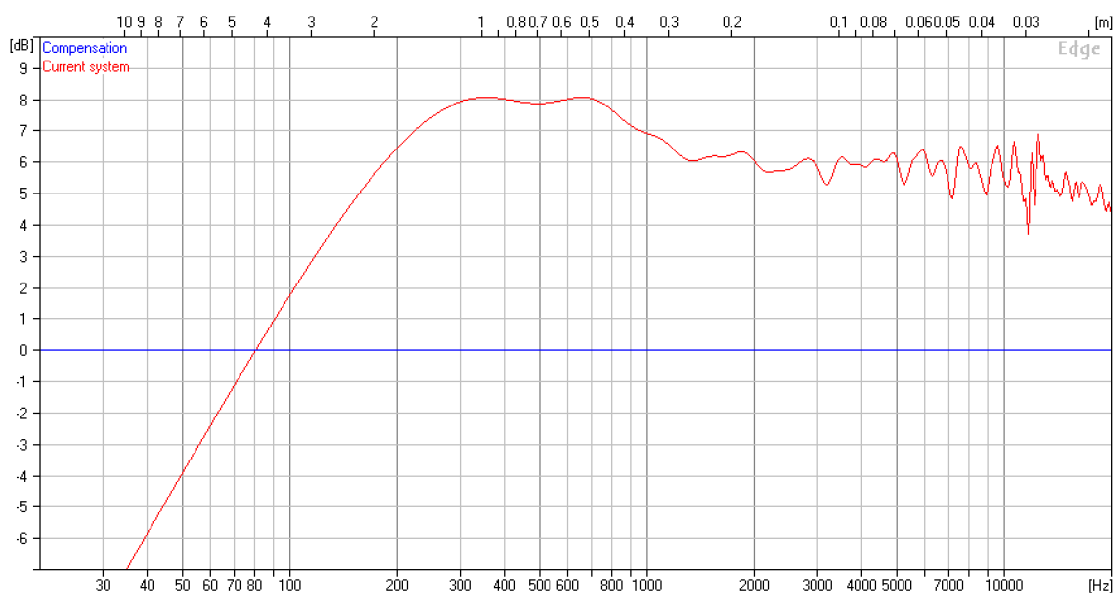
Obrázek 3-14 AMTPRO-4 Air Motion Transformer

Technické specifikace:

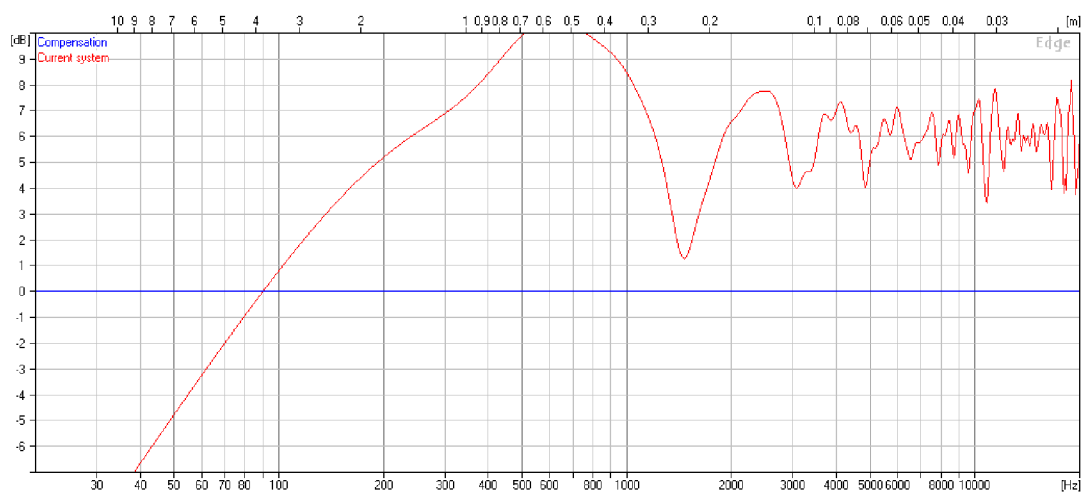
Impedance	4 Ω
Stejnoseměrný odpor	3,96 Ω
Indukčnost cívky L_e	0,06 mH
Plocha membrány S_d	54,72 cm ²
Citlivost	94 dB 1W / 1m
Zatížitelnost	50 W
Frekvenční rozsah	800 – 18000 Hz

3.8 Návrh a simulace otevřené ozvučnice

Ozvučnici tvoří rovinná deska o rozměrech 400 * 1100 mm. Jako materiál pro ozvučnici byla zvolena buková spárovka tloušťky 18 mm, především pro svoji tuhost a možnost ponechat povrch v surovém stavu. Rozměry ozvučnice jsou zvoleny s ohledem na průměr středobasového reproduktoru a umístění výškového reproduktoru ve výšce ucha sedícího posluchače. Středobasový reproduktor byl umístěn ve výšce 60 cm nad zemí, výškový reproduktor 2 cm nad středobasovým reproduktorem. Přenosové charakteristiky byly simulovány programem Edge [10].



Obrázek 3-15 Simulovaná přenosová charakteristika středobasového reproduktoru



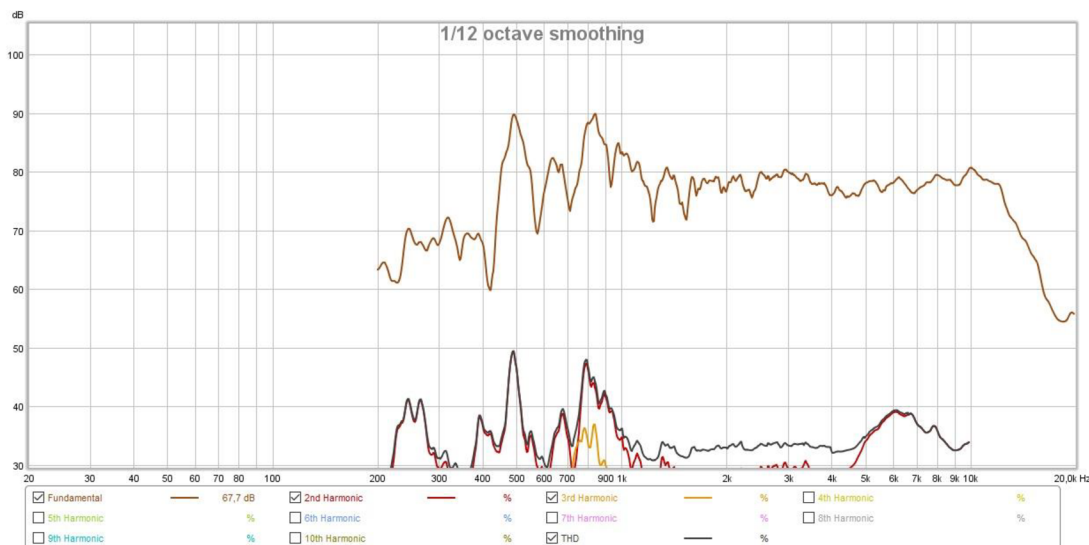
Obrázek 3-16 Simulovaná přenosová charakteristika výškového reproduktoru



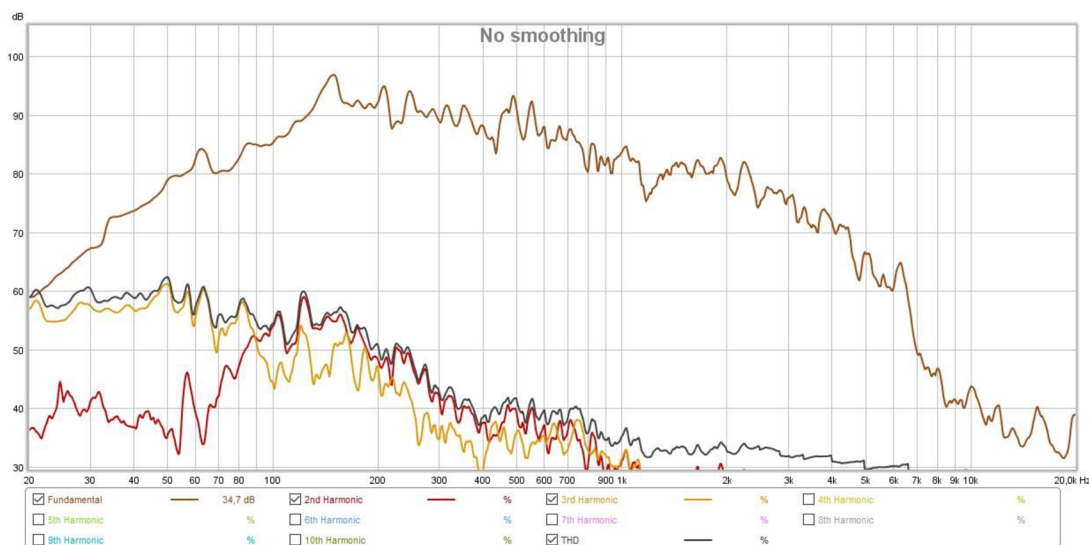
Obrázek 3-17 Fotografie prototypu otevřené ozvučnice osazená reproduktory

3.9 Měření reálných přenosových charakteristik reproduktorů v použité ozvučnici

Měření byla provedena kalibrovaným mikrofonom Dayton Audio UMM-6 USB v reálných poslechových podmínkách. K softwarovému zpracování naměřených dat pak posloužil program Room EQ Wizard[11].



Obrázek 3-18 Změřená kmitočtová charakteristika výškového reproduktoru 200 Hz – 20 kHz



Obrázek 3-19 Změřená kmitočtová charakteristika středobasového reproduktoru 20 Hz – 20 kHz

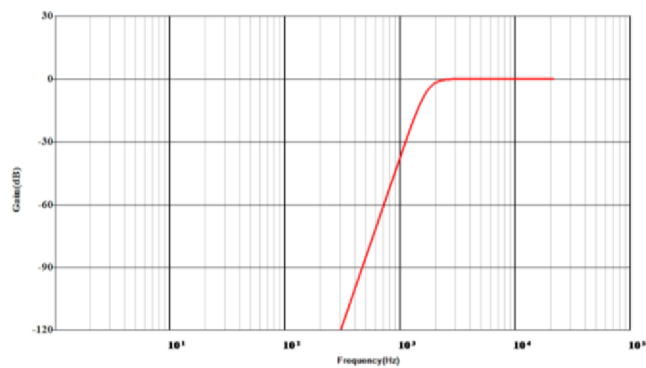
Naměřená frekvenční charakteristika výškového reproduktoru je vyrovnaná v oblasti 1,7 kHz – 14 kHz, nad tímto kmitočtem je již patrný strmý pokles. V oblasti 500 Hz – 1000 Hz je přenosová charakteristika silně nevyrovnaná, tento jev je způsobený interakcí s otevřenou ozvučnicí a je částečně patrný i na modelu vytvořeném v programu Edge.

Z frekvenční charakteristiky středobasového reproduktoru je patrné, že v oblasti 100 Hz – 1 kHz, což je opět částečně patrné i na modelu, je reproduktor výrazně citlivější než výškový. V oblasti pod 50 Hz a nad 1 kHz je citlivost srovnatelná s výškovým reproduktorem.

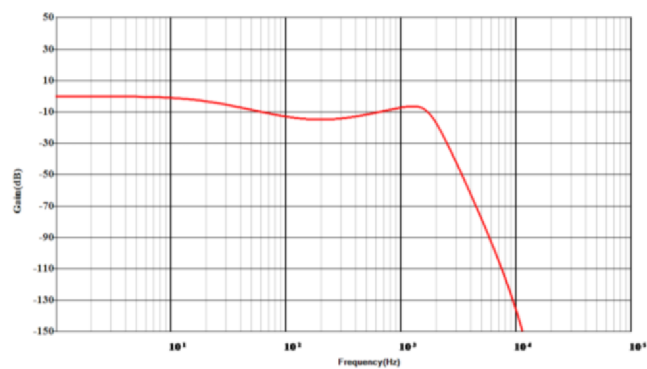
3.10 Návrh kmitočtové výhybky a kompenzace středobasového reproduktoru

S ohledem na změřenou kmitočtovou charakteristiku výškového reproduktoru byla zvolena dělicí frekvence na 1,7 kHz, aby byla odfiltrována výrazná maxima v oblasti pod 1 kHz. Byla zvolena výhybka typu Linkwitz-Riley o strmosti 48 dB/oktávu.

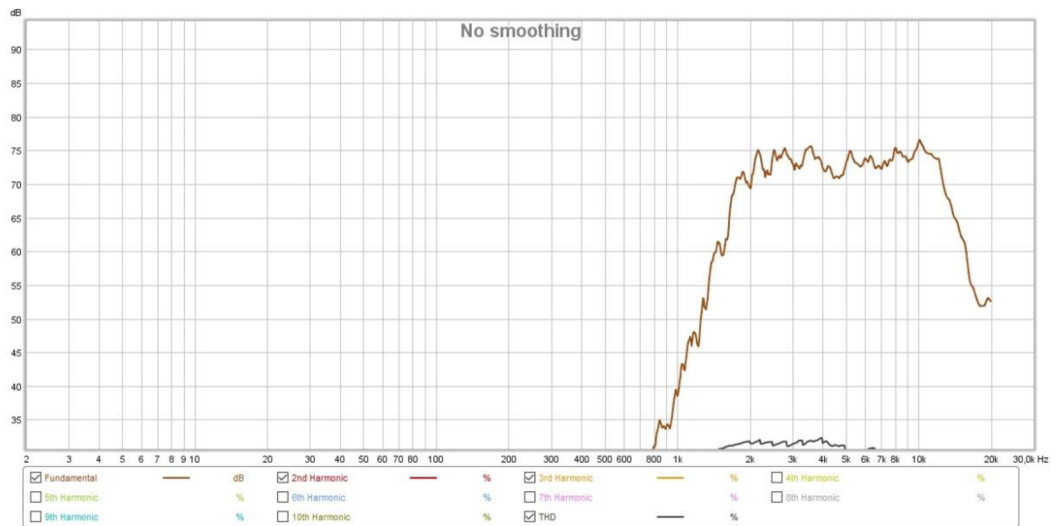
V případě středobasového reproduktoru byla opět zvolena výhybka typu Linkwitz-Riley o strmosti 48 dB/oktávu. Kompenzace poklesu na nízkých kmitočtech nebyla provedena s ohledem na srovnatelnou citlivost s výškovým reproduktorem v oblasti 50 Hz. Nárůst citlivosti v oblasti 100 Hz – 1kHz bylo kompenzováno filtrem nastaveným na kmitočet 200 Hz, jakost byla nastavena na 0,5 a potlačení -15 dB. Tento empirický přístup je odlišný oproti publikovaným postupům [9] a je výhodný s ohledem na volbu reproduktorů.



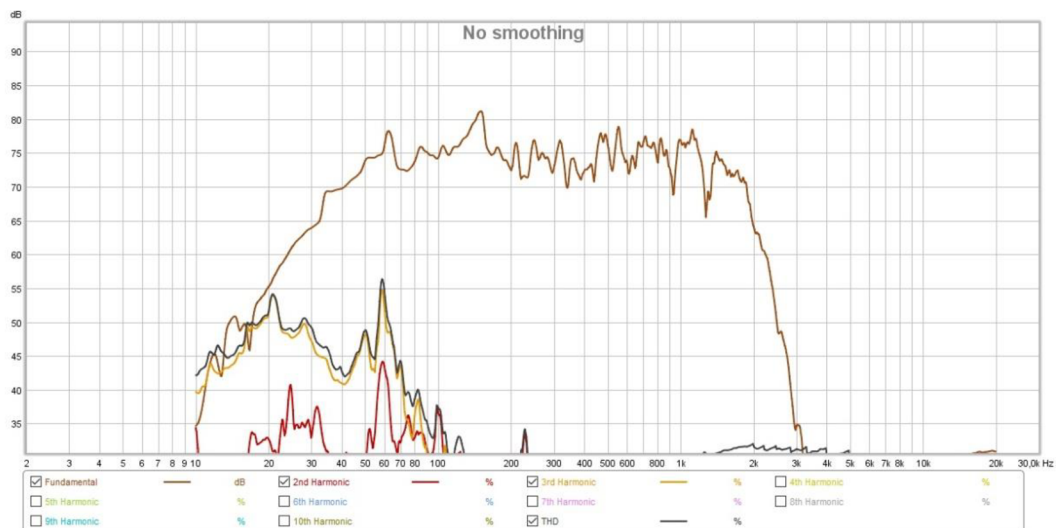
Obrázek 3-20 Přenosová charakteristika filtru pro výškový reproduktor



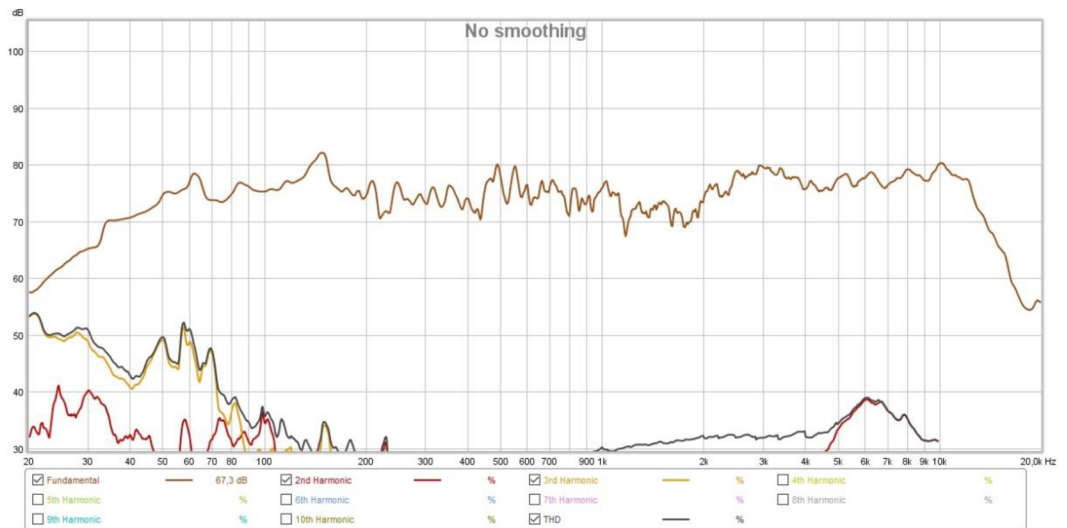
Obrázek 3-21 Přenosová charakteristika filtru pro středobasový reproduktor



Obrázek 3-22 Změřené přenosová charakteristika výškového reproduktoru s použitým filtrem



Obrázek 3-23 Změřené přenosová charakteristika středobasového reproduktoru s použitým filtrem



Obrázek 3-24 Změřené přenosová charakteristika celé reproduktorové soustavy

4 ZÁVĚR

V rámci diplomové práce byla navržena aktivní reproduktorová výhybky s využitím DSP, která zároveň slouží jako USB zvuková karta. Pro příjem audio dat z USB sběrnice a jejich převod na I2S sběrnici byl použit obvod PCM2706 a na pozici DSP a DA převodníku obvody PCM5142. Jako řídicí obvod pro konfiguraci registrů po sběrnici I2C DSP bloku byl posloužil mikrokontrolér MSP430G2553. Zdrojový kód ovladače miniDSP bloku byl vygenerován pomocí programu Purepath Studio v podobě hlavičkového souboru. Pro reproduktorovou soustavu s otevřenou ozvučnicí byla zvolena dvou pásmová koncepce s reproduktory SM-212 a AMTPRO-4 Air Motion Transformer. Ozvučnice byla zhotovena z bukové spárovky o tloušťce 18 mm. Reprodukty byly nejprve v ozvučnici změřeny kalibrovaným mikrofonem a na základě měření byly navrženy číslicové filtry výhybky. Z naměřené výsledná frekvenční charakteristiky vyplývá, že použitelný rozsah je od 35 Hz až do 14 kHz. Mírné zvlnění frekvenční charakteristiky by bylo dále možné kompenzovat v bloku DSP.

5 CITOVANÁ LITERATURA

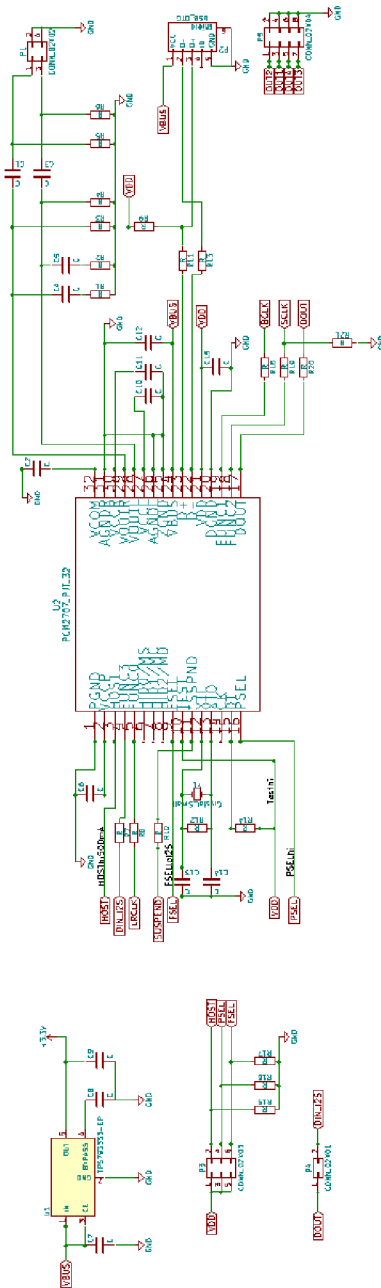
1. **Smith.** *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. San Diego : California Technical Publishing San Diego, CA, USA ©1997, 1997-1998. 0-9660176-3-3.
2. **Texas Instruments.** How delta-sigma ADCs work, Part 1. [Online] 2011. [Citace: 11. 12 2016.] <http://www.ti.com/lit/an/slyt423a/slyt423a.pdf>.
3. PCM5142. [Online] Texas Instruments. [Citace: 11. 12 2016.] <http://www.ti.com/product/PCM5142>.
4. **Analog Devices.** ADAU1452. [Online] 2016. [Citace: 11. 12 2016.] <http://www.analog.com/en/products/audio-video/audio-signal-processors/sigmadsp-audio-processors/adau1452.html>.
5. PCM2707. [Online] Texas Instruments. [Citace: 10. 5 2018.] <http://www.ti.com/product/PCM2707>.
6. TPS79333. [Online] Texas Instruments. [Citace: 10. 5 2018.] <http://www.ti.com/product/TPS79333-EP>.
7. MSP430G2553. [Online] Texas Instruments. [Citace: 10. 5 2018.] <http://www.ti.com/product/MSP430G2553>.
8. Using the MSP430 Launchpad as a Standalone I2C Host for Audio Products. [Online] Texas Instruments. [Citace: 10. 5 2018.] <http://www.ti.com/lit/an/slaa605a/slaa605a.pdf>.
9. **Linkwitz, Siegfried.** Models for a dipole loudspeaker design. [Online] [Citace: 10. 5 2018.] <http://www.linkwitzlab.com/models.htm>.
10. The Edge. [Online] Tolvan Data. [Citace: 5. 10 2018.] <http://www.tolvan.com/edge/help.htm>.
11. **Mulcahy, John.** Room EQ Wizard. [Online] [Citace: 10. 5 2018.] <https://www.roomeqwizard.com/>.

SEZNAM PŘÍLOH

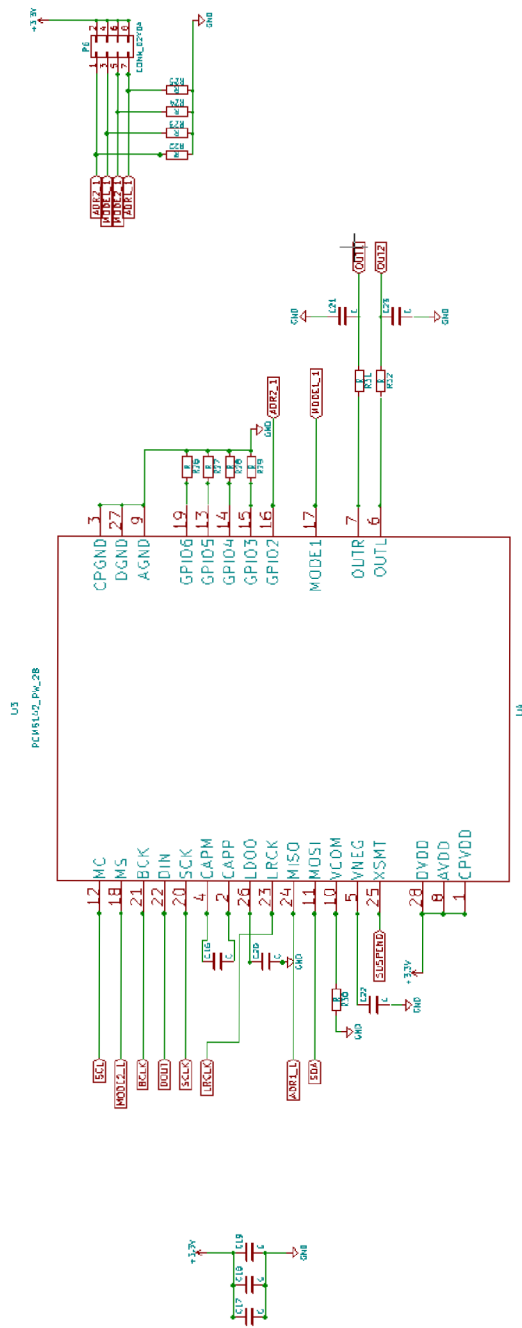
A	Návrh zařízení	40
A.1	Obvodové zapojení PCM 2706 a stabilizátoru napětí	40
A.2	Obvodové zapojení PCM 5142 U3	41
A.3	Obvodové zapojení PCM 5142 U4	42
A.4	Obvodové zapojení MSP430	43
A.5	Deska plošného spoje – top (strana součástek).....	44
A.6	Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)	45
A.7	Deska plošného spoje – osazovací plán	46
B	Seznam součástek	47
C	Ovladač PCM5142	48

A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

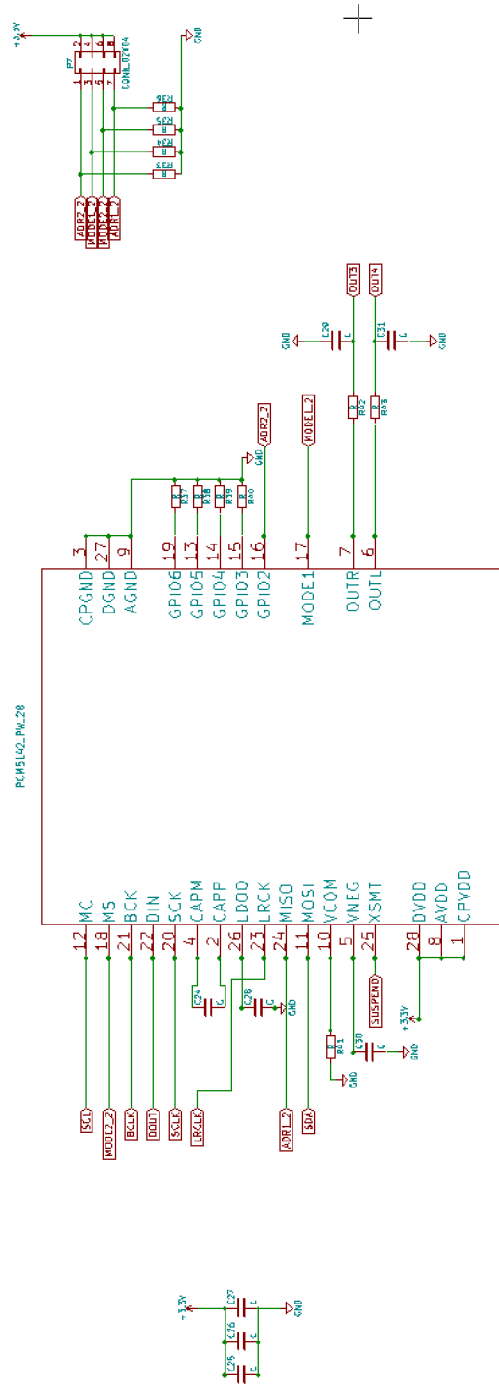
A.1 Obvodové zapojení PCM 2706 a stabilizátoru napětí



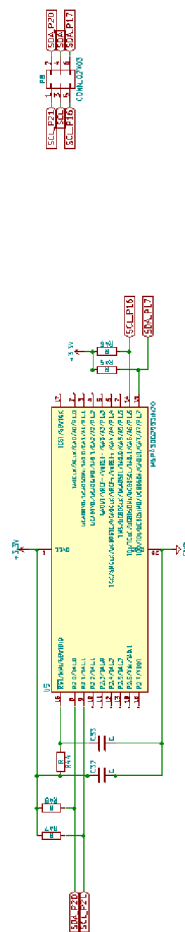
A.2 Obvodové zapojení PCM 5142 U3



A.3 Obvodové zapojení PCM 5142 U4

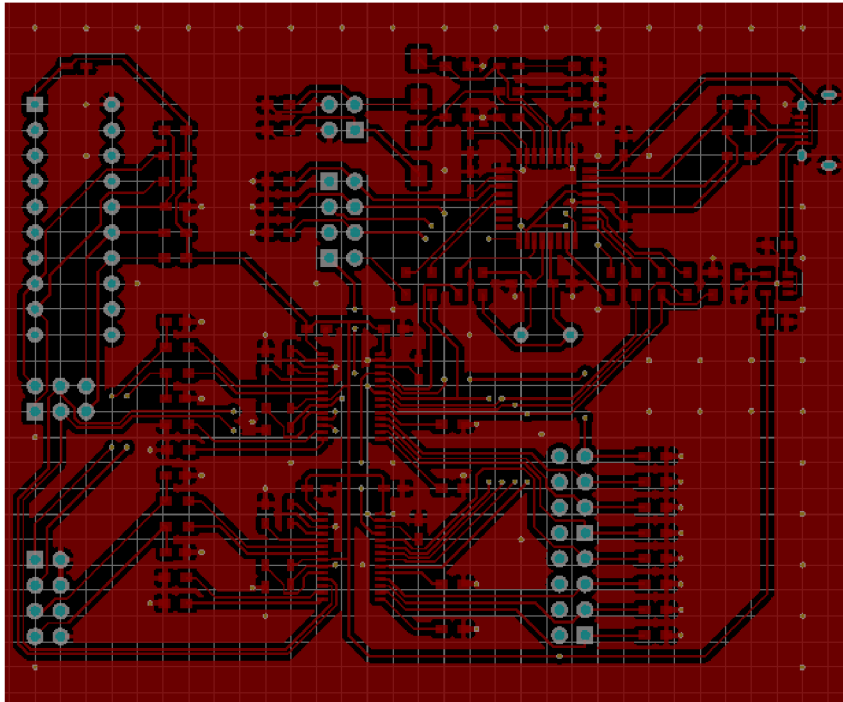


A.4 Obvodové zapojení MSP430



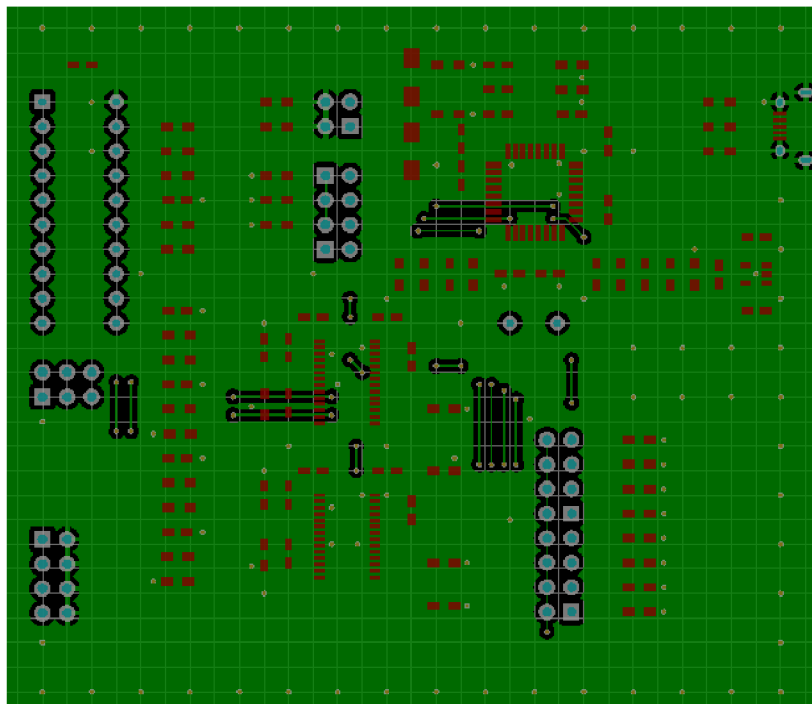
+

A.5 Deska plošného spoje – top (strana součástek)



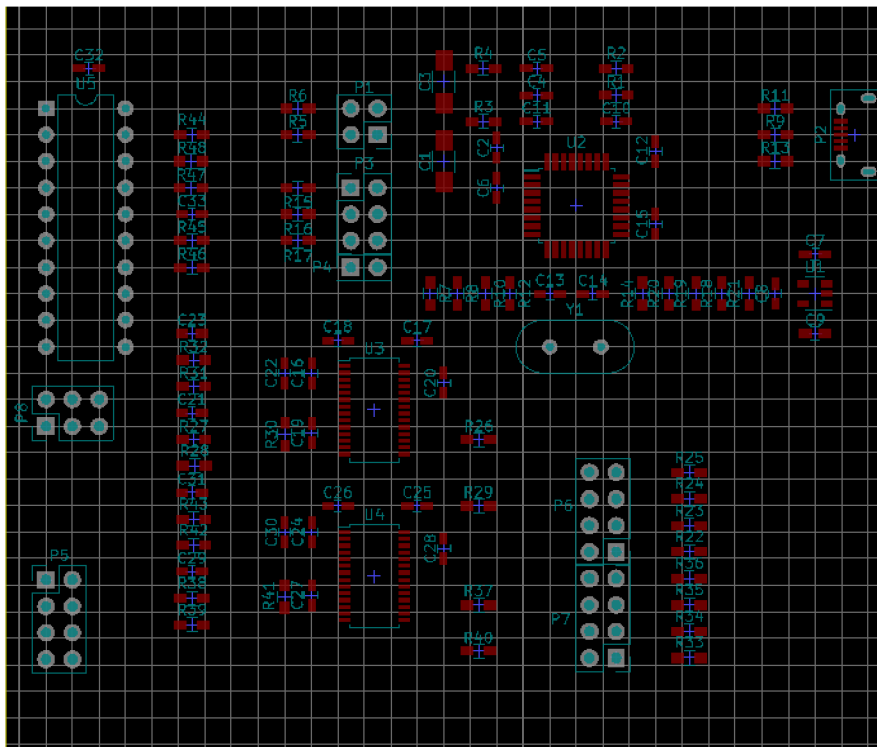
Rozměr desky 74 x 86 [mm], měřítko M1:1

A.6 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 74 x 86 [mm], měřítko M1:1

A.7 Deska plošného spoje – osazovací plán



Rozměr desky 74 x 86 [mm], měřítko M1:1

B SEZNAM SOUČÁSTEK

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1 – C5	NP		Neosazeno
C1 – C12	1u	C0603	Keramický kondenzátor
C13, C14	18p	C0603	Keramický kondenzátor
C21, C23, C29, C31	2,2n	C0603	Keramický kondenzátor
C15 – C 32	1u	C0603	Keramický kondenzátor
R1 – R6	NP		Neosazeno
R7 – R11	22	R0603	Rezistor
R12	1M	R0603	Rezistor
R13 – R14	22	R0603	Rezistor
R15 – R17	100k	R0603	Rezistor
R18 – R20	22	R0603	Rezistor
R21 – R30	100k	R0603	Rezistor
R31, R32, R42, R43	470	R0603	Rezistor
R33 – R41	100k	R0603	Rezistor
R44	100k	R0603	Rezistor
R45, R46, R09, R14	1,5k	R0603	Rezistor
U1	TPS793333-EP	SOT23	Stabilizátor
U2	PCM2706/7	TQFP32	USB - rozhraní
U3, U4	PCM5142	TSSOP28	DAC/DSP
U4	MSP430G2553	DIP20	MCU
Y1	12MHz	HC49S	Krystal
P1	CONN 02x02		Pinová lišta
P2	Micro USB		Micro USB konektor
P3	CONN 02x03		Pinová lišta
P4 – P7	CONN 02x04		Pinová lišta
P8	CONN 02x03		Pinová lišta

C OVLADAČ PCM5142

```
//CONTROL LOCATIONS
typedef struct {
    u8 control_page;    //coefficient page location
    u8 control_base;    //coefficient base address within page
    u8 control_mute_flag; //non-zero means muting required
    u8 control_string_index; //string table index
} control;

static control MUX_controls[] = {
};

static string MUX_control_names[] = {
};

static control VOLUME_controls[] = {
};

static string VOLUME_control_names[] = {
};

//INSTRUCTIONS & COEFFICIENTS
typedef struct {
    u8 reg_off;
    u8 reg_val;
} reg_value;

static string REG_Section_names[] = {
    "miniDSP_A_reg_values",
    "miniDSP_D_reg_values",
};

reg_value REG_Section_program[] = {
    { 0,0x00},
    { 0,0x01},
    // # reg[1][3] = 0x4
    { 3,0x04},
    { 0,0x00},
    // # reg[0][0x3] = 0x11
    { 3,0x11},
    // # reg[0][2] = 0x10
    { 2,0x10},
    {255,0x01},
    { 0,0x00},
    // # reg[0][0x2b] = 0x1f

```

```

    { 43,0x1F},
    { 0,0x2C},
//          # reg[ 44][ 1] = 0x00   ; Disable adaptive mode for DAC
    { 1,0x00},
//          # reg[ 44][ 1] = 0x04   ; Enable adaptive mode for DAC
    { 1,0x04},
    { 0,0x00},
//          # reg[0][2] = 0
    { 2,0x00},
//          # reg[0][0x8] = 0x4
    { 8,0x04},
//          # reg[0][0x53] = 0x7
    { 83,0x07},
//          # reg[0][0x3] = 0x0
    { 3,0x00},
};

```

```

reg_value miniDSP_A_reg_values[] = {
};
#define miniDSP_A_reg_values_COEFF_START 0
#define miniDSP_A_reg_values_COEFF_SIZE 0
#define miniDSP_A_reg_values_INST_START 0
#define miniDSP_A_reg_values_INST_SIZE 0

```

```

reg_value miniDSP_D_reg_values[] = {
    { 0,0x2C},
    { 8,0x6B},
    { 9,0xD6},
    { 10,0xF6},
    { 11,0x00},
    { 12,0x94},
    { 13,0x29},
    { 14,0x0A},
    { 15,0x00},
    { 16,0x6B},
    { 17,0xD6},
    { 18,0xF6},
    { 19,0x00},
    { 20,0x6A},
    { 21,0x3E},
    { 22,0x14},
    { 23,0x00},
    { 24,0xA5},
    { 25,0x20},
    { 26,0x4D},
    { 27,0x00},
    { 28,0x6B},
    { 29,0xD6},
    { 30,0xF6},
    { 31,0x00},
};

```

{ 32,0x94},
{ 33,0x29},
{ 34,0x0A},
{ 35,0x00},
{ 36,0x6B},
{ 37,0xD6},
{ 38,0xF6},
{ 39,0x00},
{ 40,0x6A},
{ 41,0x3E},
{ 42,0x14},
{ 43,0x00},
{ 44,0xA5},
{ 45,0x20},
{ 46,0x4D},
{ 47,0x00},
{ 48,0x7F},
{ 49,0xFF},
{ 50,0xFF},
{ 51,0x00},
{ 52,0x00},
{ 53,0x00},
{ 54,0x00},
{ 55,0x00},
{ 56,0x00},
{ 57,0x00},
{ 58,0x00},
{ 59,0x00},
{ 60,0x00},
{ 61,0x00},
{ 62,0x00},
{ 63,0x00},
{ 64,0x00},
{ 65,0x00},
{ 66,0x00},
{ 67,0x00},
{ 68,0x7F},
{ 69,0xFF},
{ 70,0xFF},
{ 71,0x00},
{ 72,0x00},
{ 73,0x00},
{ 74,0x00},
{ 75,0x00},
{ 76,0x00},
{ 77,0x00},
{ 78,0x00},
{ 79,0x00},
{ 80,0x00},
{ 81,0x00},

{ 82,0x00},
{ 83,0x00},
{ 84,0x00},
{ 85,0x00},
{ 86,0x00},
{ 87,0x00},
{ 88,0x7F},
{ 89,0xFF},
{ 90,0xFF},
{ 91,0x00},
{ 92,0x00},
{ 93,0x00},
{ 94,0x00},
{ 95,0x00},
{ 96,0x00},
{ 97,0x00},
{ 98,0x00},
{ 99,0x00},
{100,0x00},
{101,0x00},
{102,0x00},
{103,0x00},
{104,0x00},
{105,0x00},
{106,0x00},
{107,0x00},
{108,0x7F},
{109,0xFF},
{110,0xFF},
{111,0x00},
{112,0x00},
{113,0x00},
{114,0x00},
{115,0x00},
{116,0x00},
{117,0x00},
{118,0x00},
{119,0x00},
{120,0x00},
{121,0x00},
{122,0x00},
{123,0x00},
{124,0x00},
{125,0x00},
{126,0x00},
{127,0x00},
{ 0,0x2D},
{ 8,0x7F},
{ 9,0xFF},
{ 10,0xFF},

{ 11,0x00},
{ 12,0x00},
{ 13,0x00},
{ 14,0x00},
{ 15,0x00},
{ 16,0x00},
{ 17,0x00},
{ 18,0x00},
{ 19,0x00},
{ 20,0x00},
{ 21,0x00},
{ 22,0x00},
{ 23,0x00},
{ 24,0x00},
{ 25,0x00},
{ 26,0x00},
{ 27,0x00},
{ 28,0x7F},
{ 29,0xFF},
{ 30,0xFF},
{ 31,0x00},
{ 32,0x00},
{ 33,0x00},
{ 34,0x00},
{ 35,0x00},
{ 36,0x00},
{ 37,0x00},
{ 38,0x00},
{ 39,0x00},
{ 40,0x00},
{ 41,0x00},
{ 42,0x00},
{ 43,0x00},
{ 44,0x00},
{ 45,0x00},
{ 46,0x00},
{ 47,0x00},
{ 48,0x7F},
{ 49,0xFF},
{ 50,0xFF},
{ 51,0x00},
{ 52,0x00},
{ 53,0x00},
{ 54,0x00},
{ 55,0x00},
{ 56,0x00},
{ 57,0x00},
{ 58,0x00},
{ 59,0x00},
{ 60,0x00},

{ 61,0x00},
{ 62,0x00},
{ 63,0x00},
{ 64,0x00},
{ 65,0x00},
{ 66,0x00},
{ 67,0x00},
{ 68,0x7F},
{ 69,0xFF},
{ 70,0xFF},
{ 71,0x00},
{ 72,0x00},
{ 73,0x00},
{ 74,0x00},
{ 75,0x00},
{ 76,0x00},
{ 77,0x00},
{ 78,0x00},
{ 79,0x00},
{ 80,0x00},
{ 81,0x00},
{ 82,0x00},
{ 83,0x00},
{ 84,0x00},
{ 85,0x00},
{ 86,0x00},
{ 87,0x00},
{ 88,0x40},
{ 89,0x00},
{ 90,0x00},
{ 91,0x00},
{ 92,0x01},
{ 93,0x98},
{ 94,0xE2},
{ 95,0x00},
{ 96,0x01},
{ 97,0x98},
{ 98,0xE2},
{ 99,0x00},
{100,0x01},
{101,0x98},
{102,0xE2},
{103,0x00},
{104,0x6A},
{105,0x3E},
{106,0x14},
{107,0x00},
{108,0xA5},
{109,0x20},
{110,0x4D},

{111,0x00},
{112,0x01},
{113,0x98},
{114,0xE2},
{115,0x00},
{116,0x01},
{117,0x98},
{118,0xE2},
{119,0x00},
{120,0x01},
{121,0x98},
{122,0xE2},
{123,0x00},
{124,0x6A},
{125,0x3E},
{126,0x14},
{127,0x00},
{ 0,0x2E},
{ 8,0xA5},
{ 9,0x20},
{10,0x4D},
{11,0x00},
{12,0x71},
{13,0xD6},
{14,0x2F},
{15,0x00},
{16,0x91},
{17,0x45},
{18,0x8F},
{19,0x00},
{20,0x6B},
{21,0xB5},
{22,0xBA},
{23,0x00},
{24,0x6E},
{25,0xBA},
{26,0x71},
{27,0x00},
{28,0xA2},
{29,0x74},
{30,0x16},
{31,0x00},
{32,0x7F},
{33,0xFF},
{34,0xFF},
{35,0x00},
{36,0x00},
{37,0x00},
{38,0x00},
{39,0x00},

{ 40,0x00},
{ 41,0x00},
{ 42,0x00},
{ 43,0x00},
{ 44,0x00},
{ 45,0x00},
{ 46,0x00},
{ 47,0x00},
{ 48,0x00},
{ 49,0x00},
{ 50,0x00},
{ 51,0x00},
{ 52,0x7F},
{ 53,0xFF},
{ 54,0xFF},
{ 55,0x00},
{ 56,0x00},
{ 57,0x00},
{ 58,0x00},
{ 59,0x00},
{ 60,0x00},
{ 61,0x00},
{ 62,0x00},
{ 63,0x00},
{ 64,0x00},
{ 65,0x00},
{ 66,0x00},
{ 67,0x00},
{ 68,0x00},
{ 69,0x00},
{ 70,0x00},
{ 71,0x00},
{ 72,0x7F},
{ 73,0xFF},
{ 74,0xFF},
{ 75,0x00},
{ 76,0x00},
{ 77,0x00},
{ 78,0x00},
{ 79,0x00},
{ 80,0x00},
{ 81,0x00},
{ 82,0x00},
{ 83,0x00},
{ 84,0x00},
{ 85,0x00},
{ 86,0x00},
{ 87,0x00},
{ 88,0x00},
{ 89,0x00},

{ 90,0x00},
{ 91,0x00},
{ 92,0x7F},
{ 93,0xFF},
{ 94,0xFF},
{ 95,0x00},
{ 96,0x00},
{ 97,0x00},
{ 98,0x00},
{ 99,0x00},
{100,0x00},
{101,0x00},
{102,0x00},
{103,0x00},
{104,0x00},
{105,0x00},
{106,0x00},
{107,0x00},
{108,0x00},
{109,0x00},
{110,0x00},
{111,0x00},
{112,0x7F},
{113,0xFF},
{114,0xFF},
{115,0x00},
{116,0x00},
{117,0x00},
{118,0x00},
{119,0x00},
{120,0x00},
{121,0x00},
{122,0x00},
{123,0x00},
{124,0x00},
{125,0x00},
{126,0x00},
{127,0x00},
{ 0,0x2F},
{ 8,0x00},
{ 9,0x00},
{ 10,0x00},
{ 11,0x00},
{ 12,0x7F},
{ 13,0xFF},
{ 14,0xFF},
{ 15,0x00},
{ 16,0x00},
{ 17,0x00},
{ 18,0x00},

{ 19,0x00},
{ 20,0x00},
{ 21,0x00},
{ 22,0x00},
{ 23,0x00},
{ 24,0x00},
{ 25,0x00},
{ 26,0x00},
{ 27,0x00},
{ 28,0x00},
{ 29,0x00},
{ 30,0x00},
{ 31,0x00},
{ 32,0x7F},
{ 33,0xFF},
{ 34,0xFF},
{ 35,0x00},
{ 36,0x00},
{ 37,0x00},
{ 38,0x00},
{ 39,0x00},
{ 40,0x00},
{ 41,0x00},
{ 42,0x00},
{ 43,0x00},
{ 44,0x00},
{ 45,0x00},
{ 46,0x00},
{ 47,0x00},
{ 48,0x00},
{ 49,0x00},
{ 50,0x00},
{ 51,0x00},
{ 52,0x40},
{ 53,0x00},
{ 54,0x00},
{ 55,0x00},
{ 56,0xFF},
{ 57,0xFF},
{ 58,0xFF},
{ 59,0x00},
{ 60,0x80},
{ 61,0x00},
{ 62,0x00},
{ 63,0x00},
{ 64,0x40},
{ 65,0x00},
{ 66,0x00},
{ 67,0x00},
{ 68,0x7F},

{ 69,0xFF},
{ 70,0xFF},
{ 71,0x00},
{ 72,0x00},
{ 73,0x00},
{ 74,0x00},
{ 75,0x00},
{ 76,0x00},
{ 77,0xC0},
{ 78,0x00},
{ 79,0x00},
{ 80,0x00},
{ 81,0x00},
{ 82,0x00},
{ 83,0x00},
{ 84,0x09},
{ 85,0x80},
{ 86,0x00},
{ 87,0x00},
{ 88,0x0C},
{ 89,0xC0},
{ 90,0x00},
{ 91,0x00},
{ 92,0x12},
{ 93,0x00},
{ 94,0x00},
{ 95,0x00},
{ 96,0x25},
{ 97,0x00},
{ 98,0x00},
{ 99,0x00},
{ 0,0x3E},
{ 8,0x6B},
{ 9,0xD6},
{ 10,0xF6},
{ 11,0x00},
{ 12,0x94},
{ 13,0x29},
{ 14,0x0A},
{ 15,0x00},
{ 16,0x6B},
{ 17,0xD6},
{ 18,0xF6},
{ 19,0x00},
{ 20,0x6A},
{ 21,0x3E},
{ 22,0x14},
{ 23,0x00},
{ 24,0xA5},
{ 25,0x20},

{ 26,0x4D},
{ 27,0x00},
{ 28,0x6B},
{ 29,0xD6},
{ 30,0xF6},
{ 31,0x00},
{ 32,0x94},
{ 33,0x29},
{ 34,0x0A},
{ 35,0x00},
{ 36,0x6B},
{ 37,0xD6},
{ 38,0xF6},
{ 39,0x00},
{ 40,0x6A},
{ 41,0x3E},
{ 42,0x14},
{ 43,0x00},
{ 44,0xA5},
{ 45,0x20},
{ 46,0x4D},
{ 47,0x00},
{ 48,0x7F},
{ 49,0xFF},
{ 50,0xFF},
{ 51,0x00},
{ 52,0x00},
{ 53,0x00},
{ 54,0x00},
{ 55,0x00},
{ 56,0x00},
{ 57,0x00},
{ 58,0x00},
{ 59,0x00},
{ 60,0x00},
{ 61,0x00},
{ 62,0x00},
{ 63,0x00},
{ 64,0x00},
{ 65,0x00},
{ 66,0x00},
{ 67,0x00},
{ 68,0x7F},
{ 69,0xFF},
{ 70,0xFF},
{ 71,0x00},
{ 72,0x00},
{ 73,0x00},
{ 74,0x00},
{ 75,0x00},

{ 76,0x00},
{ 77,0x00},
{ 78,0x00},
{ 79,0x00},
{ 80,0x00},
{ 81,0x00},
{ 82,0x00},
{ 83,0x00},
{ 84,0x00},
{ 85,0x00},
{ 86,0x00},
{ 87,0x00},
{ 88,0x7F},
{ 89,0xFF},
{ 90,0xFF},
{ 91,0x00},
{ 92,0x00},
{ 93,0x00},
{ 94,0x00},
{ 95,0x00},
{ 96,0x00},
{ 97,0x00},
{ 98,0x00},
{ 99,0x00},
{100,0x00},
{101,0x00},
{102,0x00},
{103,0x00},
{104,0x00},
{105,0x00},
{106,0x00},
{107,0x00},
{108,0x7F},
{109,0xFF},
{110,0xFF},
{111,0x00},
{112,0x00},
{113,0x00},
{114,0x00},
{115,0x00},
{116,0x00},
{117,0x00},
{118,0x00},
{119,0x00},
{120,0x00},
{121,0x00},
{122,0x00},
{123,0x00},
{124,0x00},
{125,0x00},

{126,0x00},
{127,0x00},
{ 0,0x3F},
{ 8,0x7F},
{ 9,0xFF},
{ 10,0xFF},
{ 11,0x00},
{ 12,0x00},
{ 13,0x00},
{ 14,0x00},
{ 15,0x00},
{ 16,0x00},
{ 17,0x00},
{ 18,0x00},
{ 19,0x00},
{ 20,0x00},
{ 21,0x00},
{ 22,0x00},
{ 23,0x00},
{ 24,0x00},
{ 25,0x00},
{ 26,0x00},
{ 27,0x00},
{ 28,0x7F},
{ 29,0xFF},
{ 30,0xFF},
{ 31,0x00},
{ 32,0x00},
{ 33,0x00},
{ 34,0x00},
{ 35,0x00},
{ 36,0x00},
{ 37,0x00},
{ 38,0x00},
{ 39,0x00},
{ 40,0x00},
{ 41,0x00},
{ 42,0x00},
{ 43,0x00},
{ 44,0x00},
{ 45,0x00},
{ 46,0x00},
{ 47,0x00},
{ 48,0x7F},
{ 49,0xFF},
{ 50,0xFF},
{ 51,0x00},
{ 52,0x00},
{ 53,0x00},
{ 54,0x00},

{ 55,0x00},
{ 56,0x00},
{ 57,0x00},
{ 58,0x00},
{ 59,0x00},
{ 60,0x00},
{ 61,0x00},
{ 62,0x00},
{ 63,0x00},
{ 64,0x00},
{ 65,0x00},
{ 66,0x00},
{ 67,0x00},
{ 68,0x7F},
{ 69,0xFF},
{ 70,0xFF},
{ 71,0x00},
{ 72,0x00},
{ 73,0x00},
{ 74,0x00},
{ 75,0x00},
{ 76,0x00},
{ 77,0x00},
{ 78,0x00},
{ 79,0x00},
{ 80,0x00},
{ 81,0x00},
{ 82,0x00},
{ 83,0x00},
{ 84,0x00},
{ 85,0x00},
{ 86,0x00},
{ 87,0x00},
{ 88,0x40},
{ 89,0x00},
{ 90,0x00},
{ 91,0x00},
{ 92,0x01},
{ 93,0x98},
{ 94,0xE2},
{ 95,0x00},
{ 96,0x01},
{ 97,0x98},
{ 98,0xE2},
{ 99,0x00},
{100,0x01},
{101,0x98},
{102,0xE2},
{103,0x00},
{104,0x6A},

{105,0x3E},
{106,0x14},
{107,0x00},
{108,0xA5},
{109,0x20},
{110,0x4D},
{111,0x00},
{112,0x01},
{113,0x98},
{114,0xE2},
{115,0x00},
{116,0x01},
{117,0x98},
{118,0xE2},
{119,0x00},
{120,0x01},
{121,0x98},
{122,0xE2},
{123,0x00},
{124,0x6A},
{125,0x3E},
{126,0x14},
{127,0x00},
{ 0,0x40},
{ 8,0xA5},
{ 9,0x20},
{10,0x4D},
{11,0x00},
{12,0x71},
{13,0xD6},
{14,0x2F},
{15,0x00},
{16,0x91},
{17,0x45},
{18,0x8F},
{19,0x00},
{20,0x6B},
{21,0xB5},
{22,0xBA},
{23,0x00},
{24,0x6E},
{25,0xBA},
{26,0x71},
{27,0x00},
{28,0xA2},
{29,0x74},
{30,0x16},
{31,0x00},
{32,0x7F},
{33,0xFF},

{ 34,0xFF},
{ 35,0x00},
{ 36,0x00},
{ 37,0x00},
{ 38,0x00},
{ 39,0x00},
{ 40,0x00},
{ 41,0x00},
{ 42,0x00},
{ 43,0x00},
{ 44,0x00},
{ 45,0x00},
{ 46,0x00},
{ 47,0x00},
{ 48,0x00},
{ 49,0x00},
{ 50,0x00},
{ 51,0x00},
{ 52,0x7F},
{ 53,0xFF},
{ 54,0xFF},
{ 55,0x00},
{ 56,0x00},
{ 57,0x00},
{ 58,0x00},
{ 59,0x00},
{ 60,0x00},
{ 61,0x00},
{ 62,0x00},
{ 63,0x00},
{ 64,0x00},
{ 65,0x00},
{ 66,0x00},
{ 67,0x00},
{ 68,0x00},
{ 69,0x00},
{ 70,0x00},
{ 71,0x00},
{ 72,0x7F},
{ 73,0xFF},
{ 74,0xFF},
{ 75,0x00},
{ 76,0x00},
{ 77,0x00},
{ 78,0x00},
{ 79,0x00},
{ 80,0x00},
{ 81,0x00},
{ 82,0x00},
{ 83,0x00},

{ 84,0x00},
{ 85,0x00},
{ 86,0x00},
{ 87,0x00},
{ 88,0x00},
{ 89,0x00},
{ 90,0x00},
{ 91,0x00},
{ 92,0x7F},
{ 93,0xFF},
{ 94,0xFF},
{ 95,0x00},
{ 96,0x00},
{ 97,0x00},
{ 98,0x00},
{ 99,0x00},
{100,0x00},
{101,0x00},
{102,0x00},
{103,0x00},
{104,0x00},
{105,0x00},
{106,0x00},
{107,0x00},
{108,0x00},
{109,0x00},
{110,0x00},
{111,0x00},
{112,0x7F},
{113,0xFF},
{114,0xFF},
{115,0x00},
{116,0x00},
{117,0x00},
{118,0x00},
{119,0x00},
{120,0x00},
{121,0x00},
{122,0x00},
{123,0x00},
{124,0x00},
{125,0x00},
{126,0x00},
{127,0x00},
{ 0,0x41},
{ 8,0x00},
{ 9,0x00},
{ 10,0x00},
{ 11,0x00},
{ 12,0x7F},

{ 13,0xFF},
{ 14,0xFF},
{ 15,0x00},
{ 16,0x00},
{ 17,0x00},
{ 18,0x00},
{ 19,0x00},
{ 20,0x00},
{ 21,0x00},
{ 22,0x00},
{ 23,0x00},
{ 24,0x00},
{ 25,0x00},
{ 26,0x00},
{ 27,0x00},
{ 28,0x00},
{ 29,0x00},
{ 30,0x00},
{ 31,0x00},
{ 32,0x7F},
{ 33,0xFF},
{ 34,0xFF},
{ 35,0x00},
{ 36,0x00},
{ 37,0x00},
{ 38,0x00},
{ 39,0x00},
{ 40,0x00},
{ 41,0x00},
{ 42,0x00},
{ 43,0x00},
{ 44,0x00},
{ 45,0x00},
{ 46,0x00},
{ 47,0x00},
{ 48,0x00},
{ 49,0x00},
{ 50,0x00},
{ 51,0x00},
{ 52,0x40},
{ 53,0x00},
{ 54,0x00},
{ 55,0x00},
{ 56,0xFF},
{ 57,0xFF},
{ 58,0xFF},
{ 59,0x00},
{ 60,0x80},
{ 61,0x00},
{ 62,0x00},

{ 63,0x00},
{ 64,0x40},
{ 65,0x00},
{ 66,0x00},
{ 67,0x00},
{ 68,0x7F},
{ 69,0xFF},
{ 70,0xFF},
{ 71,0x00},
{ 72,0x00},
{ 73,0x00},
{ 74,0x00},
{ 75,0x00},
{ 76,0x00},
{ 77,0xC0},
{ 78,0x00},
{ 79,0x00},
{ 80,0x00},
{ 81,0x00},
{ 82,0x00},
{ 83,0x00},
{ 84,0x09},
{ 85,0x80},
{ 86,0x00},
{ 87,0x00},
{ 88,0x0C},
{ 89,0xC0},
{ 90,0x00},
{ 91,0x00},
{ 92,0x12},
{ 93,0x00},
{ 94,0x00},
{ 95,0x00},
{ 96,0x25},
{ 97,0x00},
{ 98,0x00},
{ 99,0x00},
{ 0,0x98},
{ 8,0x00},
{ 9,0x00},
{ 10,0x00},
{ 11,0x00},
{ 12,0x00},
{ 13,0x00},
{ 14,0x00},
{ 15,0x00},
{ 16,0x00},
{ 17,0x10},
{ 18,0x00},
{ 19,0x00},

{ 20,0x00},
{ 21,0x10},
{ 22,0x04},
{ 23,0x01},
{ 24,0x00},
{ 25,0x60},
{ 26,0xC8},
{ 27,0x00},
{ 28,0x00},
{ 29,0x00},
{ 30,0x00},
{ 31,0x00},
{ 32,0x00},
{ 33,0x00},
{ 34,0x00},
{ 35,0x00},
{ 36,0x00},
{ 37,0x40},
{ 38,0x04},
{ 39,0x03},
{ 40,0x00},
{ 41,0x61},
{ 42,0xB3},
{ 43,0xFB},
{ 44,0x00},
{ 45,0x61},
{ 46,0xAF},
{ 47,0xFB},
{ 48,0x00},
{ 49,0x30},
{ 50,0xEC},
{ 51,0x02},
{ 52,0x00},
{ 53,0x30},
{ 54,0xF0},
{ 55,0x02},
{ 56,0x01},
{ 57,0x14},
{ 58,0x82},
{ 59,0xBD},
{ 60,0x00},
{ 61,0x60},
{ 62,0xC8},
{ 63,0x22},
{ 64,0x00},
{ 65,0x00},
{ 66,0x00},
{ 67,0x00},
{ 68,0x00},
{ 69,0x00},

{ 70,0x00},
{ 71,0x00},
{ 72,0x00},
{ 73,0x40},
{ 74,0x04},
{ 75,0x02},
{ 76,0x00},
{ 77,0x61},
{ 78,0x94},
{ 79,0x00},
{ 80,0x00},
{ 81,0x00},
{ 82,0x00},
{ 83,0x00},
{ 84,0x00},
{ 85,0x00},
{ 86,0x00},
{ 87,0x00},
{ 88,0x00},
{ 89,0x40},
{ 90,0x04},
{ 91,0x26},
{ 92,0x00},
{ 93,0x61},
{ 94,0xBB},
{ 95,0xFB},
{ 96,0x00},
{ 97,0x61},
{ 98,0xB7},
{ 99,0xFB},
{100,0x00},
{101,0x30},
{102,0xEC},
{103,0x02},
{104,0x00},
{105,0x30},
{106,0xF0},
{107,0x02},
{108,0x01},
{109,0x14},
{110,0x82},
{111,0xBD},
{112,0x00},
{113,0x61},
{114,0x94},
{115,0x45},
{116,0x00},
{117,0x00},
{118,0x00},
{119,0x00},

{120,0x00},
{121,0x00},
{122,0x00},
{123,0x00},
{124,0x00},
{125,0x40},
{126,0x04},
{127,0x25},
{ 0,0x99},
{ 8,0x00},
{ 9,0x61},
{10,0xA0},
{11,0x02},
{12,0x00},
{13,0x61},
{14,0xA0},
{15,0x25},
{16,0x00},
{17,0x00},
{18,0x00},
{19,0x00},
{20,0x00},
{21,0x40},
{22,0x04},
{23,0x51},
{24,0x00},
{25,0x40},
{26,0x04},
{27,0x9D},
{28,0x00},
{29,0x61},
{30,0xBF},
{31,0xFB},
{32,0x00},
{33,0x00},
{34,0x00},
{35,0x00},
{36,0x00},
{37,0x00},
{38,0x00},
{39,0x00},
{40,0x00},
{41,0x30},
{42,0xF0},
{43,0x02},
{44,0x01},
{45,0x14},
{46,0x83},
{47,0xCC},
{48,0x00},

{ 49,0x00},
{ 50,0x00},
{ 51,0x00},
{ 52,0x00},
{ 53,0x61},
{ 54,0xC3},
{ 55,0xFB},
{ 56,0x00},
{ 57,0x00},
{ 58,0x00},
{ 59,0x00},
{ 60,0x00},
{ 61,0x00},
{ 62,0x00},
{ 63,0x00},
{ 64,0x00},
{ 65,0x30},
{ 66,0xF0},
{ 67,0x02},
{ 68,0x01},
{ 69,0x14},
{ 70,0x83},
{ 71,0xCC},
{ 72,0x00},
{ 73,0x00},
{ 74,0x00},
{ 75,0x00},
{ 76,0x00},
{ 77,0x6F},
{ 78,0xEC},
{ 79,0x48},
{ 80,0x00},
{ 81,0x6F},
{ 82,0xEC},
{ 83,0x49},
{ 84,0x00},
{ 85,0x30},
{ 86,0x00},
{ 87,0x02},
{ 88,0x00},
{ 89,0x30},
{ 90,0x00},
{ 91,0x02},
{ 92,0x00},
{ 93,0x6F},
{ 94,0xEC},
{ 95,0x4A},
{ 96,0x00},
{ 97,0x6F},
{ 98,0xEC},

{ 99,0x4B},
{100,0x00},
{101,0x30},
{102,0x00},
{103,0x02},
{104,0x00},
{105,0x30},
{106,0x00},
{107,0x02},
{108,0x00},
{109,0x6F},
{110,0xEC},
{111,0x4C},
{112,0x00},
{113,0x6F},
{114,0xEC},
{115,0x4D},
{116,0x00},
{117,0x30},
{118,0x00},
{119,0x02},
{120,0x00},
{121,0x30},
{122,0x00},
{123,0x02},
{124,0x00},
{125,0x6F},
{126,0xEC},
{127,0x4E},
{ 0,0x9A},
{ 8,0x00},
{ 9,0x6F},
{ 10,0xEC},
{ 11,0x4F},
{ 12,0x00},
{ 13,0x30},
{ 14,0x00},
{ 15,0x02},
{ 16,0x00},
{ 17,0x30},
{ 18,0x00},
{ 19,0x02},
{ 20,0x00},
{ 21,0x6F},
{ 22,0xF0},
{ 23,0x94},
{ 24,0x00},
{ 25,0x6F},
{ 26,0xF0},
{ 27,0x95},

{ 28,0x00},
{ 29,0x30},
{ 30,0x04},
{ 31,0x02},
{ 32,0x00},
{ 33,0x30},
{ 34,0x04},
{ 35,0x02},
{ 36,0x00},
{ 37,0x6F},
{ 38,0xF0},
{ 39,0x96},
{ 40,0x00},
{ 41,0x6F},
{ 42,0xF0},
{ 43,0x97},
{ 44,0x00},
{ 45,0x30},
{ 46,0x04},
{ 47,0x02},
{ 48,0x00},
{ 49,0x30},
{ 50,0x04},
{ 51,0x02},
{ 52,0x00},
{ 53,0x6F},
{ 54,0xF0},
{ 55,0x98},
{ 56,0x00},
{ 57,0x6F},
{ 58,0xF0},
{ 59,0x99},
{ 60,0x00},
{ 61,0x30},
{ 62,0x04},
{ 63,0x02},
{ 64,0x00},
{ 65,0x30},
{ 66,0x04},
{ 67,0x02},
{ 68,0x00},
{ 69,0x6F},
{ 70,0xF0},
{ 71,0x9A},
{ 72,0x00},
{ 73,0x6F},
{ 74,0xF0},
{ 75,0x9B},
{ 76,0x00},
{ 77,0x30},

```
{ 78,0x04},
{ 79,0x02},
{ 80,0x00},
{ 81,0x30},
{ 82,0x04},
{ 83,0x02},
{ 84,0x01},
{ 85,0x10},
{ 86,0x03},
{ 87,0xFF},
};
#define miniDSP_D_reg_values_COEFF_START 0
#define miniDSP_D_reg_values_COEFF_SIZE 912
#define miniDSP_D_reg_values_INST_START 912
#define miniDSP_D_reg_values_INST_SIZE 323
```