

Modeliranje filtrske sekcije vhodnega kanala analogne mešalne mize z vtičnikom Steinberg VST

Žiga Rezar, Urban Burnik, Jurij F. Tasič
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko
Tržaška 25, 1000 Ljubljana
ziga.rezar@gmail.com

ABSTRACT

This paper addresses digital modeling of electrical circuits of the Studer 962/961 analogue audio mixing desk equaliser in the form of a real-time algorithm. Presentation covers a model of analogue audio gear, but the methods used are not specific to a specific circuit type. Our goal was to define a transfer function of the analysed circuit - a frequency dependent gain - and to translate the later into a discrete-time domain model. The model is to be implemented as a plugin, using one of the common interfaces for algorithm integration in digital audio workstations.

1 Uvod

Sodobna avdio produkcija danes temelji na uporabi digitalne strojne in programske opreme. Odločilne prednosti digitalizacije so povečana fleksibilnost, zanesljivost in ponovljivost, kar obvladuje kakovost ter povečuje učinkovitost dela. Kljub navidezno superiornim lastnostim digitalne produkcijske tehnike danes spoznavamo, da imajo realna analogna vezja za obdelavo zvočnih signalov določene lastnosti, ki merljivo signal degradirajo, percepcijsko pa so nastali artefakti človeku prijetni. Nelinearnosti polprevodniških komponent, transformatorjev in elektronk v analogni tehniki namreč povzročajo sluhu prijetna harmonska popačenja, kar pojasnjuje "dolgočasnost" in "pustost" nekaterih izdelkov čiste digitalne produkcije. Pojavi impedančno nepopolnih sklopov, resonanc ali nelinearnosti vezja so določenim kosom opreme dali svoj nezgrešljiv pečat, svoj zvočni "prstni odtis", ki si ga nešteto inženirjev želi uporabiti tudi v digitalnem svetu.

Danes lastnosti obeh svetov združujemo z modeliranjem klasičnih analognih produkcijskih elementov v digitalni produkcijski verigi. Tovrstno modeliranje je običajno izvedeno v obliki vtičnika (ang. *Plug-in*) za produkcijske sisteme, kot vodilne proizvajalce takšnih vtičnikov pa lahko omenimo *Universal Audio*, *Waves*, *Softube* in *Steinberg* v sodelovanju z *Yamaha*. Skupaj s ponovljivostjo nastavitvev, velikega števila hkratnih instanc pri delu z več-kanalnim zvokom (tudi več kot 100 kanalov) in nenazadnje privlačno ceno so tovrstne rešitve danes zelo priljubljene. Nezanemarljivo je tudi, da lahko ne le z zvokom, ampak tudi z uporabniškim vmesnikom sledimo izvorni analogni napravi, to pa bistveno olajša

delo izkušenim tonskim inženirjem vajenim uporabe klasične opreme.

2 Digitalni model analognega vezja

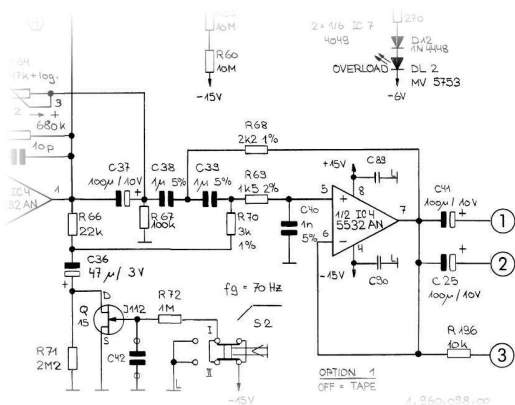
Digitalno modeliranje danes uporabljamo predvsem v fazi razvoja novih analognih elektronskih vezij, saj s tem znižamo stroške in skrajšamo čas razvoja. V ta namen imamo na voljo že izdelane knjižnice elektronskih gradnikov. Te podrobno specificirajo parametre kot sta na primer nelinearnost in frekvenčni odziv, uporabljamo pa jih v simulatorjih, kakršno je na primer orodje SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*) [1].

S takšnimi modeli smo si pomagali tudi v pričujočem razvoju modela. Programsko orodje iz družine SPICE smo uporabili pri začetni analizi vezja, kjer smo identificirali stopnjo nelinearnosti in njene glavne izvore. Sledila je linearizacija z izdvojenim modelom harmonskega popačenja. Funkcijo linearnega modela smo zapisali v obliki prenosne funkcije $\mathbf{H}(s)$ v zveznem Laplace-ovem prostoru, čemur je sledila preslikava slednje v diskretni prostor $\mathbf{H}(z)$ z uporabo bilinearne transformacije. Rezultat je rekurzivni algoritem, ki ga zapišemo v programskem jeziku okolja, v katerem bomo implementirali končni izdelek - programski vtičnik.

Vtičnik smo implementirali v okolju VST 2 (*Virtual Studio Technology*), ki je glede na svojo odprtost med razvijalci v času pisanja članka močno razširjen. Programska struktura VST vtičnika je grobo razdeljena na glavo, konstruktor, grafični vmesnik, glavno zanko za obdelavo vzorcev, del za izvedbo kontrole parametrov glavne zanke in seznam virov (ang. *resource*). Osnovna datotečna struktura je sicer že predlagana v primerih projektov v SDK (*Software Development Kit*), vendar ni strogo predpisana. Če na primer želimo celoten grafični vmesnik zapisati v samostojni datoteki, to lahko storimo, vendar je za to potrebno poglobljeno poznavanje struktur programskega jezika.

3 Model nizkega sita vhodnega modula mešalne mize Studer 962

Studer 961/962 še danes velja za eno od mešalnih miz z najboljšim zvokom, vgrajeni frekvenčni izenačevalnik omogoča frekvenčne spremembe brez obarvanja zvoka. V vezju nastopata dve stikali in štirje potenciometri, namenjeni na-



Slika 1: Odsek vezja z nizkim sitom vhodnega modula Studer 962

stavljanju prenosne funkcije. To pomeni, da bomo morali pri vsaki spremembi nastavitvev ponovno izračunati prenosno funkcijo in do naslednje spremembe predpostaviti, da je vezje statično. Temperaturno lezenje in staranje komponent zanemarimo. Sledila je ocena linearnosti aktivnih komponent vezja, uporabljenih operacijskih ojačevalnikov NE5532AN in RC4559. Ker želimo, da je naš model zvesta reprezentacija realnega vezja, moramo obratovalni napetostni nivo slediti od vhoda do dela za frekvenčno uravnavanje, torej še precejšen del vezja, ki sicer ne bo vključen v model. Ključen podatek nam predstavlja nazivni vhodni nivo tega vezja, ki je naveden kot -9dBu do +21dBu. Takšen razpon je izveden najprej s preklopom stikala med področjema -9dBu:+6dBu in +6dBu:+21dBu in dodatno ojačevalno stopnjo, ki omogoča zvezno nastavljanje ojačanja od 0dB do +15dB. Namen takšne izvedbe vhodnega vezja je, da signale različnih jakosti iz različnih virov nivojsko poenoti in na ta način poenostavi zasnovno nadaljnjega vezja. To je v našem primeru specifičirano za delovanje na 0dBu, torej v področju vršnih vrednosti +/-2.19V [2]. Napajalna napetost operacijskih ojačevalnikov je +/- 15V, kar pomeni, da popačenje zaradi bližine napajalni napetosti lahko zanemarimo. Prav tako lahko zanemarimo tudi morebitno nelinearnost operacijskih ojačevalnikov, saj so njihovi izhodi zadostno obremenjeni, ojačanje pa je omejeno na 15dB, kar pomeni dobršno mero negativne povratne vezave in posledično zelo linearno delovanje.

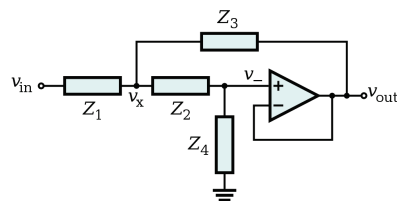
3.1 Analogni model prenosne funkcije

V vezju je uporabljeno nizko sito drugega reda s topologijo Sallen-Key [3]. To je zelo razširjena topologija frekvenčnih filtrov, v našem primeru pa se pojavi nekoliko drugače kot običajno. Prva razlika je dodatni nizko-prepustni filter, ki ga tvorita R_{69} in C_{40} ; ta frekvenčni spekter omeji navzgor do približno 106kHz (-3dB). Tolikšna frekvenca je že daleč izven slišnega področja, zato ta filter pri modeliranju lahko zanemarimo, omejitev pa najbrž pripomore k stabilnosti vezja, ker preprečuje visokofrekvenčne oscilacije. Drugi odklik od najpogostejše implementacije pa je izbira vrednosti uporov in posledično kolenskih frekvenc obeh filtrov. Ti dve

sta navadno postavljeni enako, z enakimi vrednostmi uporov in kondenzatorjev, tu pa so se snovalci očitno odločili za položnejše koleno in frekvenčna pola postavili na 53Hz in 72Hz - ti dve frekvenci določata kombinaciji upora in kondenzatorja R_{70} in C_{39} ter R_{68} in C_{38} . Faktor kvalitete filtra $Q=0.49$, kar pomeni, da filter v prepustnem pasu blizu prve kolenske frekvence ni idealen (kvaliteta Butterworth-ovega filtra z minimalno valovitostjo je približno 0.707), verjetno pa so snovalci ocenili, da bo takšen filter zvočno deloval prijetneje in bolj naravno kot podobna inačica z ostrejšim kolonom. Z namenom dodatne poenostavitve vezja si oglejmo še vezavo R_{70} in C_{36} . Ta dva elementa tvorita filter prvega reda s kolonom okrog 1Hz, za kar lahko brez slabe vesti zaključimo, da je namenjeno le preprečevanju enosmernega toka skozi to vejo. Ker v našem primeru analiziramo predvsem izmenične lastnosti vezja, lahko za frekvence v slišnem področju ta kondenzator zanemarimo in nadomestimo s kratkim stikom.

Za izračun prenosne funkcije bomo uporabili poenostavljeno vezje, kot smo ga utemeljili nekoliko prej, torej brez nizko-prepustnega filtra pred vhodom v ojačevalnik in vezavo R_{70} na 0V brez C_{36} . Ker sta C_{38} in C_{39} enake vrednosti, ju lahko označujemo samo kot C . Izpeljave se bomo lotili kar z nastavkom za Sallen-Key vezje:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Z_3 Z_4}{Z_1 Z_2 + Z_3(Z_1 + Z_2) + Z_3 Z_4} \quad (1)$$



Slika 2: Generično Sallen-Key vezje (enačba 1)

Po vstavitvi vrednosti impedanc in nekaj uredjanja ulomka dobimo izraz:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = H(s) = \frac{s^2 R_{68} C R_{70} C}{1 + 2s R_{68} C + s^2 R_{68} C R_{70} C} \quad (2)$$

Na tem mestu RC konstante označimo kot frekvence, saj bomo takšno obliko zapisa potrebovali po bilinearni transformaciji enačbe. Tako konstanto $R_{68}C$ označimo z $\frac{1}{\omega_1}$ in $R_{70}C$ z $\frac{1}{\omega_2}$. Frekvenčni spekter se med prostoroma s in z ne preslika linearno, zato moramo pri vstavljanju časovnih konstant v funkcijo $\mathbf{H}(z)$ le te najprej pravilno preslikati. Ta pojav se imenuje frekvenčno upogibanje (ang. *frequency warping*).

$$H(s) = \frac{s^2}{s^2 + 2s\omega_2 + \omega_1\omega_2} \quad (3)$$

3.2 Digitalni model prenosne funkcije

Preslikava v diskretni časovni prostor preko bilinearne transformacije je razmeroma enostavna. S substitucijo $s =$

$\frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$, kjer je T obhodni čas vzorčevalne frekvence f_s dobimo:

$$H(z) = \frac{\frac{4}{T^2} \frac{(1-z^{-1})^2}{(1+z^{-1})^2}}{\frac{4}{T^2} \frac{(1-z^{-1})^2}{(1+z^{-1})^2} + 2\omega_2 \frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} + \omega_1 \omega_2}$$

$$H(z) = \frac{\frac{4}{T^2} - 2\frac{2}{T}z^{-1} + \frac{4}{T^2}z^{-2}}{(\frac{4}{T^2} + 2\frac{2}{T}\omega_2 + \omega_1\omega_2) + 2(\omega_1\omega_2 - \frac{4}{T^2})z^{-1} + (\frac{4}{T^2} - 2\frac{2}{T}\omega_2 + \omega_1\omega_2)z^{-2}}$$

Iz tako urejene enačbe lahko preprosto preberemo koeficiente digitalnega filtra, kjer koeficiente v števcu označimo z a_n in tiste v imenovalcu z b_n :

$$a_0 = \frac{4}{T^2}, a_1 = 2\frac{2}{T}, a_2 = \frac{4}{T^2}$$

$$b_0 = \frac{4}{T^2} + 2\frac{2}{T}\omega_2 + \omega_1\omega_2$$

$$b_1 = 2(\omega_1\omega_2 - \frac{4}{T^2})$$

$$b_2 = \frac{4}{T^2} - 2\frac{2}{T}\omega_2 + \omega_1\omega_2$$

V takšni obliki je zapis že primeren za implementacijo v programski kodi vtičnika, kjer ga bomo le še normalizirali po b_0 .

4 Realizacija digitalnega modela za vmesnik VST2

Prenosno funkcijo smo programsko realizirali v jeziku C++. Pri tem smo uporabili predlogo skladno z aplikativnim programskim vmesnikom okolja VST2.

Algoritem obdelave signalov v realnem času smo realizirali v objektu *ProcessDoubleReplacing*. Objekt obsega inicializacijo lokalnih spremenljivk, procesiranje podatkov pa skladno z zahtevami okolja VST poteka v zaporednih blokih omejene dolžine. Pravilno delovanje zagotovimo z lokalizacijo spremenljivk, pri čemer poskrbimo, da ponovni klic modula ne ponastavlja začetnih pogojev diferenčne enačbe. Ključno je, da se navedene spremenljivke nahajajo zunaj tega objekta, sicer na začetku vsakega bloka pride do prehodnega pojava in posledično do slišnih motenj. Prav tako moramo zunaj objekta locirati koeficiente diferenčne enačbe, saj tako omogočimo odziv na spremembo kontrolnih parametrov v živo, med obratovanjem vtičnika.

V objektu *OnParamChange* je definiran odziv vtičnika na spremembo kontrol v uporabniškem vmesniku. Ker imamo v enem vtičniku navadno več spremenljivih parametrov, postopek spreminjanja izvedemo s strukturo *switch* znotraj modula *IMutexLock*, ki zagotavlja določeno mero enovitosti izvajanja ukazov za spremembo parametrov in na ta način preprečuje napake pri izračunih.

Za modeliranje celotnega vezja frekvenčnega izenačevalnika je smiselna delitev vezja na funkcionalne bloke. To v praksi pomeni lažje odkrivanje napak zaradi preglednejše programske kode in manjšo občutljivost sistema na morebitne anomalije, ki bi sistem višjega reda, zapisan z eno samo enačbo, zaradi numeričnih napak pri računanju z omejeno ločljivostjo lahko pripeljale v nepredvidljiv režim delovanja.

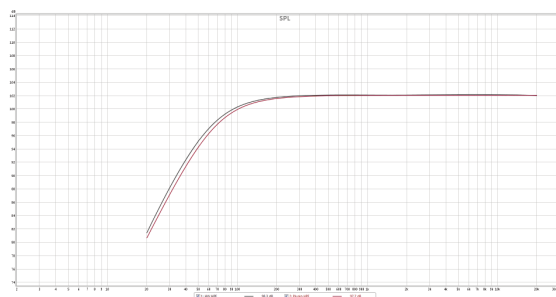
5 Verifikacija

Za meritev frekvenčnega odziva smo uporabili program REW (Room EQ Wizard) [4]. Ta je sicer v prvi vrsti namenjen merjenju akustičnih parametrov prostora, vendar se funkcionalnost izračuna in prikaza frekvenčne prenosne karakteristike iz odziva na frekvenčni prelet lahko uporabi za merjenje katerega koli audio sistema. Prednost programa je tudi možnost delovanja z gonilniki ASIO [5] in posledično delovanje z zelo majhnim zamikom, hkrati z drugimi programi za delo z zvokom. Testiranje smo izvedli pri nadzorovanih signalnih nivojih in parametrih sistema.

Algoritem je v realnem času tekel kot VST2 vtičnik v programu Reaper [6], signal je bil v ta program speljan z vezavo prej uporabljenega izhoda na prosti vhod A/D oz. D/A pretvornika, izhod pa na prej uporabljeni vhod. Ker razen usklajenega takta vzorčenja programa med seboj nimata nobene komunikacije, je REW tako navidez meril še eno zunanjo enoto, meritve pa se je po nivojski uskladitvi dalo direktno primerjati s tistimi analognega modula.

6 Rezultati objektivnega preizkusa

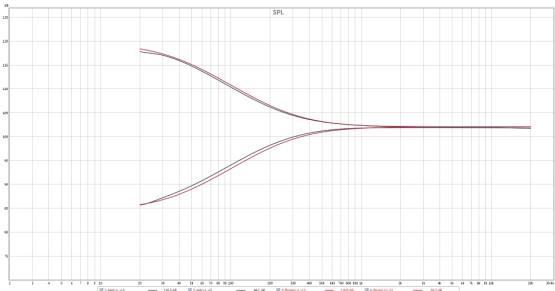
Primerjava frekvenčnih odzivov je pokazala odlično ujemanje oblike filtrov, prav tako je nivojsko ustrezno maksimalno ojačanje ali dušenje. Razlike so se na grafih pojavile zaradi zvezno nastavljenih parametrov na analognem modulu, kar pri nastavljanju "na oko" neizogibno pomeni nekaj odstopanja. Ob zveznih kontrolah, enakih ekstremnih nastavitvah in ob posrečeni nastavitvi primerjalno enaki obliki filtra lahko te meritve ocenimo kot uspešne oz. lahko na njihovi podlagi trdimo, da je model verodostojen. Opaziti je le manjšo anomalijo pri najnižjih frekvencah, pri okrog 30Hz. Izvor tega pojava iz sheme ni trivialno razviden, zato bo za njegovo modeliranje potrebno še nekaj poglobljene analize električnega vezja. Na grafih je odziv analognega modula označen s črno, odziv algoritma pa z rdečo barvo.



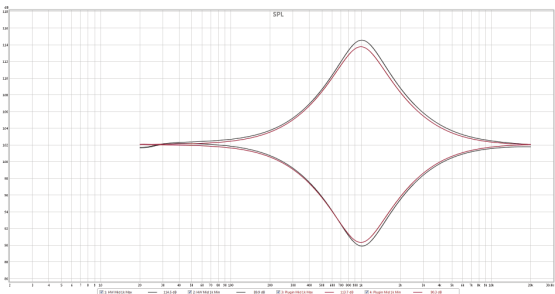
Slika 3: Odziv nizkega sita

7 Metodologija subjektivnega preizkusa

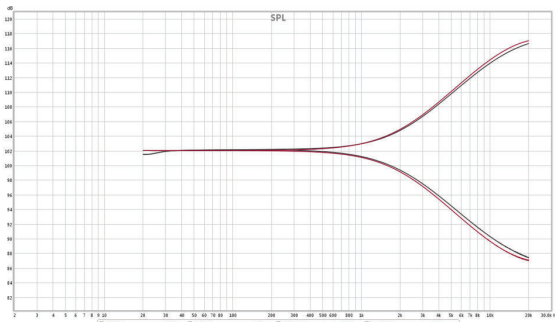
Subjektivno preizkušanje samo po sebi pomeni, da je velik del ugotovitev mogoče prepustiti interpretaciji posameznika, kar naredi takšne poizkuse znanstveno nezanesljive. Za subjektivni preizkus smo uporabili studijske zvočnike *Spendor BCIA*, ki imajo certifikat o umerjenosti frekvenčnega odziva ter odstopanja med levim in desnim zvočnikom. Soba,



Slika 4: Odziv izenačevalnika nizkih frekvenc pri nastavitvi +/- 15dB



Slika 5: Odziv izenačevalnika srednjih frekvenc pri frekvenčni nastavitvi 1kHz in skrajnih nastavitvah



Slika 6: Odziv izenačevalnika visokih frekvenc pri nastavitvi +/- 15dB

v kateri se je preizkus izvajal, je akustično obdelana tako, da je odmevni čas zelo kratek, nizke frekvence pa nekoliko zadušene, da stojni valovi niso preveč izraziti. Najprej smo opravili testiranje izenačevalnika visokih frekvenc, z ostalimi gumbi nastavljenimi v nevtralni legi. Poslušali smo odziv v skrajnih nastavitvah in nato v nekaj vmesnih. Sledilo je poslušanje odziva izenačevalnika srednjih frekvenc. Tega smo najprej nastavili na nekaj dobro definiranih pozicij (ekstremi in sredinska lega frekvenčnega dosega ter ekstremi ojačanja) in nato nekaj poljubnih nastavitvev analognega modula poizkusili "na uho"poustvariti z vtičnikom. Potek preizkusa izenačevalnika nizkih frekvenc je enak tistemu za visoke frekvence, le da smo postopek ponovili še v kombinaciji z visoko-propustnim filtrom, saj je takšna kombinacija v praksi obdelave zvoka za glasbo precej pogosta.

Testiranje je na vseh točkah pokazalo visoko stopnjo uje-

manja, saj slišne razlike v večini primerov ni bilo mogoče nedvoumno opredeliti. Analogni modul in vtičnik sta se v nekaj niansah sicer razlikovala, vendar lahko razlike brez težav opredelimo kot znotraj odstopanj med posameznimi moduli iste mešalne mize, ki so posledica toleranc uporabljenih elementov vezja.

8 Zaključek

Industrija digitalnih algoritmov za obdelavo zvoka, s selitvijo produkcije iz velikih studiev v spalnice in domače kleti zaradi cenovno dostopne opreme, v zadnjem času doživlja hiter razcvet. Največja želja nove generacije ustvarjalcev je, da bi lahko v domačem studiu poustvarili zvok "velikih", ta pa se je skozi čas izoblikoval tudi s pomočjo sedaj legendarnih analognih mešalnih miz, kakršne del je tudi modul, ki smo ga modelirali. Sicer bodo programi, zgrajeni s pomočjo modeliranja, zanimivi verjetno le toliko časa, dokler bo ustvarjala in kupovala generacija, ki podpira kult legendarne analogne opreme, vseeno pa se za prihodnost tega trga ne gre bati, saj produkti, ki so plod dobre inženirske prakse kljubujejo času in menjavi trendov.

Pravo delo za doseg resnične verodostojnosti vtičnika se sicer sedaj šele začena. Tisto, kar daje analogni opremi svoj čar ter vrednost in kar pri delu v digitalni domeni tonski mojstri pogrešamo, je harmonsko popačenje in tega vidika modeliranja v pričujočem delu ne obravnavamo. Modeliranje filterske sekcije z linearnim digitalnim filtrom se je sicer potdilo kot korektno, vendar bo šele model vhodne stopnje, ki vsebuje transformator kot galvansko ločitev, algoritem naredil resnično avtentičen. Prav modeliranje nelinearnih elektronskih komponent danes predstavlja največji izziv pri razvoju algoritmov, saj je za pravilno harmonsko sestavo popačenja potrebno natančno poustvariti nelinearno amplitudno prenosno karakteristiko ter pojav histereze.

Zahvala

Za vso pomoč se najprej zahvaljujem viš. pred. dr. Francu Policardiju in prof. dr. Tadeju Tumi, veliko spoštovanje pa gre tudi podjetju Studer, ker je omogočilo prost dostop do vse servisne literature svojih starejših produktov. V veliko pomoč mi je bil tudi internetni blog na temo pisanja VST vtičnikov avtorja g. Martina Finkeja [7].

Literatura

- [1] <http://en.wikipedia.org/wiki/SPICE>, dostopno julija 2014.
- [2] Studer Professional Audio AG, Operating and Service Instructions, Dosegljivo: ftp://ftp.studer.ch/Public/Products/Mixing_Analog/961-962/Manuals/961-962.Op.Serv.pdf, dostopno 2. 5. 2014.
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Sallen_Key_topology, dostopno julija 2014.
- [4] <http://www.roomeqwizard.com>, dostopno julija 2014.
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Audio_Stream_Input_Output, dostopno julija 2014
- [6] <http://www.reaper.fm/>, dostopno julija 2014.
- [7] <http://www.martin-finke.de/blog/>, dostopno julija 2014.
- [8] Julius O. Smith III, Introduction to Digital Filters with Audio Applications, W3K Publishing, 2012.