

# Načrtovanje proti-prekrivnega filtra za praktični šumni termometer

Rok Tavčar<sup>1</sup>, Samo Beguš<sup>1</sup>, Jovan Bojkovski<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univerza v Ljubljani, Fakulteta za Elektrotehniko, Laboratorij za meritve in kakovost  
E-pošta: Rok.Tavcar@fe.uni-lj.si

## Evaluation of practical Johnson noise thermometer

**Abstract.** Digitalization is one of the more important step of measuring temperature with practical Johnson noise thermometer. Because the analog signal is white noise, so it has equal power on all frequencies, it is especially important to use anti-aliasing filter before AD conversion. With insufficient filter before ADC the digitized signal would show increased noise and measured temperature. In this article are described important characteristics of few commonly used filters and their implementations.

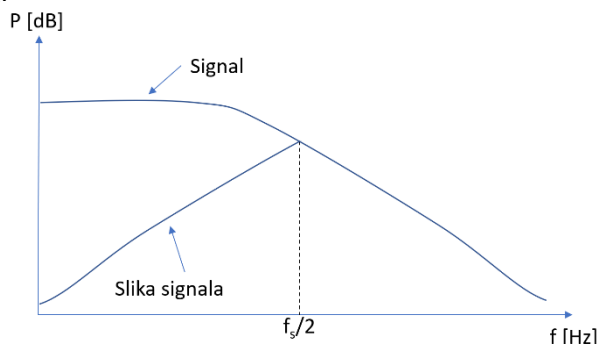
## 1 Uvod

Pri vseh analognih signalih, ki jih vzorčimo z analogno digitalnim pretvornikom (ADC) je potrebno zagotoviti, da jih vzorčimo z dovolj veliko vzorčno frekvenco  $f_s$ .

$$f_s = 2f_{max} \quad (1)$$

kjer je  $f_{max}$  najvišja frekvenca analognega signala [1].

V primeru, da ta pogoj ni izpolnjen, dobimo v digitaliziranem signalu še navidezno sliko signala, kot je prikazano na sliki 1.



Slika 1: Prikaz vpliva premajhne vzorčne frekvence na digitaliziran signal.

Problem premajhne vzorčne frekvence je še posebno izrazit pri šumnem termometru [2,3], ker je signal beli šum [4,5], oziroma povedano drugače vsebuje vse frekvence in z enako amplitudo. Omejitev frekvence nastane samo zaradi parazitnih komponent analognega ojačevalnika in zaradi omejene pasovne širine analognega ojačevalnika in ADC. Ta problem, je možno rešiti z uporabo proti-prekrivnega filtra (ang. anti-aliasing filter) za potlačitev tistih frekvenčnih komponent analognega signala, ki imajo frekvenco višjo od polovice vzorčne frekvence.

## 2 Metode

Pri izbiri filtra je na voljo širok izbor različnih tipov filtrov, njihovih izvedb in odzivov. Poznamo nizkopasovni filter, visokopasovni filter, pasovno-prepustni filter, pasovno-zaporni filter in vse prepustni filter oziroma zakasnilni filter. Kot že sama imena povedo gre za filtre, ki prepuščajo točno določene frekvence, ostale pa zadržijo. Za filtriranje pred ADC je potreben nizkopasovni filter, tako da zadržimo frekvenčne komponente signala, ki bi povzročile navidezne slike v digitaliziranem signalu.

### 2.1 Odziv filtrov

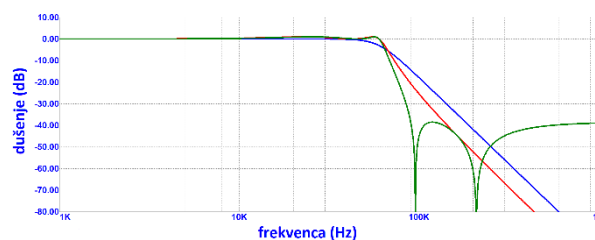
Pri načrtovanju filtrov največkrat uporabljamo približke idealnemu filtru, ki jih je mogoče enostavno prilagoditi in realizirati. Med najbolj uporabljenimi približki idealnega filtra so med drugimi tudi: Butterworthov [6] filter, Čebišev [7] filter in eliptični [8] filter.

**Butterworthov filter** optimizira valovitost filtra pri frekvencah, ki jih prepušča. Ima najbolj linearen fazni odziv med opisanimi filtri.

**Čebišev filter** ima bolj strm odziv v prehodnem območju med prepustnimi in zapornimi frekvencami kot Butterworthov filter. Posledica tega je večja valovitost filtra pri prepustnih frekvencah kot jo ima Butterworthov filter.

**Eliptični filter** ima med opisanimi filtri najbolj strm odziv v prehodnem območju odziva filtra. Posledica tega pa je da ima veliko valovitost tako pri prepustnih kot zapornih frekvencah.

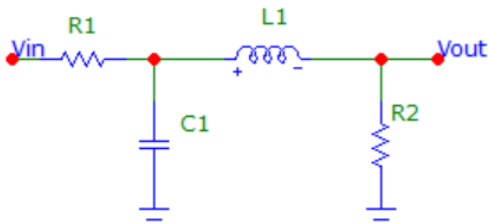
Na sliki 2 so prikazani idealni odzivi nizkopasovnega Butterworthovega (modra barva), Čebiševega (rdeča barva) in eliptičnega (zelena barva) filtra. Vidi se različna valovitost odzivov in hitrost prehoda med prepustnimi in zapornimi frekvencami.



Slika 2: Primerjava odzivov različnih filtrov 4 reda pri mejni frekvenci 60 kHz.

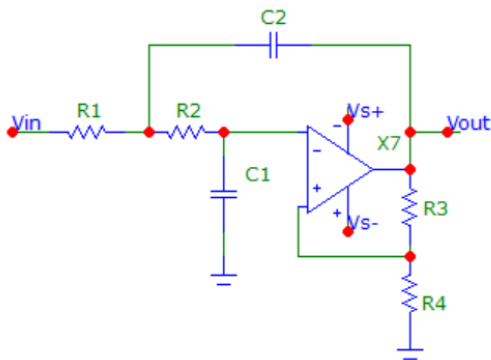
## 2.2 Izvedbe filtrov

Najbolj enostavna izvedba filtra je pasivni filter, ki je sestavljen iz uporov, kondenzatorjev in dušilk. Med aktivne izvedbe pa med drugimi uvrščamo Sallen-Key [9] in MFB [10]. Aktivne izvedbe vsebujejo poleg pasivnih komponent tudi ojačevalnik. S tem pristopom lahko realiziramo filter tako, da izvedemo vsako stopnjo filtra posebej, brez vpliva na izbiro komponent v drugih stopnjah. Njihovi glavni prednosti sta: izvedba brez uporabe dušilk in možnost izbire ojačenja. Na slikah 3,4 in 5 so prikazane izvedbe ene stopnje filtrov. Prikazani pasivni elementi ustrezajo izvedbi nizkopasovnega filtra.



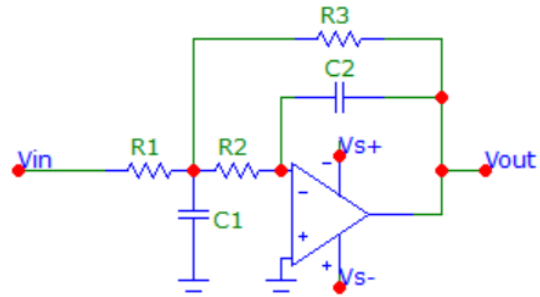
Slika 3: nizkopasovni pasivni filter drugega reda.

Prednost pasivnih filtrov je enostavna izvedba, ki ne potrebuje dodatnega napajanja. Pasivni filtri imajo tudi nizek lastni šum, ki je posledica le termičnega šuma na uporabljenih pasivnih komponentah filtra. Glavna slabost takega filtra so vrednosti posameznih komponent. Največje težave so premajhna vhodna upornost filtra, prevelika izhodna upornost filtra in izbira dušilk, ki ustrezajo izračunani vrednosti.



Slika 4: nizkopasovni aktivni filter v izvedbi Sallen-Key

Ena stopnja filtra v izvedbi Sallen-Key je drugega reda in ima neinvertirajoče ojačenje. Ojačenje se določi z dvema uporoma ( $R3$  in  $R4$ ), ki nimata vpliva na ostale lastnosti filtra. Te lastnosti naredijo tako izvedbo filtra zelo prilagodljivo glede na ostale topologije.



Slika 5: nizkopasovni aktivni filter v izvedbi MFB

Ena stopnja filtra v izvedbi MFB je drugega reda in ima invertirajoče ojačenje. Ker je ojačenje posamezne stopnje odvisno od ostalih lastnosti filtra je tak filter najbolj uporaben tam kjer je pomembno majhno število elementov. Druga pomembna prednost je, da je za razliko od ostalih aktivnih izvedb filtrov možno enostavno izvesti diferencialno različico filtra.

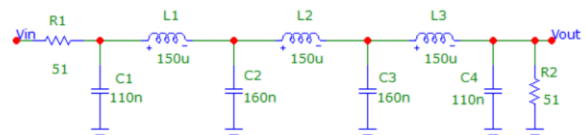
Aktivni filtri imajo napram pasivnim filtrom tudi nekaj slabosti. Med največje slabosti štejemo potreba po napajanju aktivnih elementov, omejeno frekvenčno območje delovanja in veliko večji lastni šum.

## 3 Primerjava filtrov

Primerjane so bile različne implementacije filtra z naslednjimi zahtevami: mejna frekvenca filtra  $f_c$  je 60 kHz, slabljenje pri 100 kHz mora biti vsaj 40 dB. Filter ima Čebišev odziv.

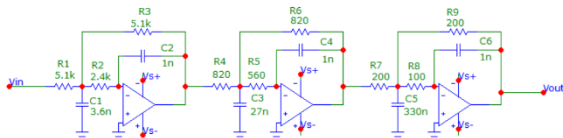
Lastnosti filtra so izbrane glede na zahteve za uporabo v izdelanem praktičnem šumnem termometru opisanem v [11,12]. Čebišev odziv je izbran zaradi tega, ker valovitost v spektru prejetega signala ni moteča, ima strm odziv v prehodnem območju in omogoča enostavno izvedbo.

Pasivni filter, ki ustreza zahtevam je prikazan na sliki 6. Filter je sedmega reda z vhodno in izhodno impedanco  $50 \Omega$ .

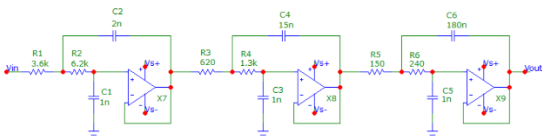


Slika 6: nizkopasovni pasivni Čebišev filter sedmega reda

Aktivna filtra v izvedbi MFB in Sallen-Key sta prikazana na sliki 7 in na sliki 8. Filtra imata 3 stopnje in sta šestega reda.



Slika 7: nizkopasovni aktivni Čebišev filter šestega reda v izvedbi MFB

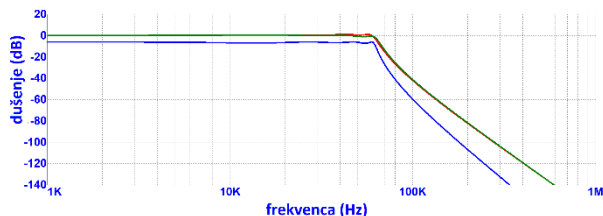


Slika 8: nizkopasovni aktivni Čebišev filter šestega reda v izvedbi Sallen-Key

Pasivne komponente v vse filterih so izbrane tako, da so iz serije E24, razen dušilke v pasivnem filtru so iz serije E12.

## 4 Rezultati

Na sliki 9 so prikazani odzivi filtrov. Z modro barvo je označen pasivni filter, z rdečo barvo je označen MFB filter in z zeleno je označen filter v izvedbi Sallen-key. Vsi operacijski ojačevalniki v filterih so enaki in so OPA211. Odziv pasivnega filtra je za 6 dB pod ostalimi odzivi, kar je pričakovano zaradi izbranih uporov v filtru. Pasivni filter je tudi bolj strm v prehodnem in zapornem frekvenčnem območju, kar je posledica tega, da je filter sedmega reda, ostala dva filtra pa sta šestega reda. Iz slike 9 je razvidno tudi, da sta si odziva obeh aktivnih filtrov podobna.



Slika 9: odzivi filtrov prikazanih na sliki 6 (moder), sliki 7 (rdeč) in na sliki 8 (zelen)

Filtri imajo tudi druge pomembne lastnosti. Pasivni filter močno obremeni signalni vir saj ima upornost samo 100  $\Omega$ . Med tem, ko imata oba aktivna filtra več kot 10x večjo upornost. Velike razlike so tudi v velikosti šuma na izhodu filtra, ki ga povzroči sam filter. Pri pasivnem filtru je največja velikost šuma na izhod manjša kot  $1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ , pri izvedbi MFB je šum manjši kot  $630 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  in pri izvedbi Sallen-Key je manjši kot  $210 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ .

Pasivni filter in filter v izvedbi MFB imata tudi to prednost, da ju je mogoče enostavno pretvori v diferencialno izvedbo, kar poenostavi njihovo uporabo pri ADC z diferencialnimi vhodi. Operacijski ojačevalnik v aktivnih filtru morajo biti dovolj hitri drugače filter ne deluje pravilno. Za oba aktivna filtra mora biti GBW ojačevalnika v prvi stopnji vsaj 1.6

MHz, v drugi stopnji vsaj 8,3 MHz in v zadnji stopnji vsaj 39 MHz.

## 5 Zaključek

Vsi primerjani filtri so se izkazali za primerne za filtriranje pred AD pretvorbo. Kot najboljši se je izkazal aktivni Čebišev filter v izvedbi MFB. Izbrani filter zagotavlja dovolj dobro dušenje vseh signalov, ki bi povzročili navidezno sliko v digitaliziranem signalu. Navidezni signal je manjši od -62 dB glede na vhodni signal, pri najbolj kritični frekvenci (60 kHz). Čeprav je izhodni šum take izvedbe filtra visok ( $630 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ) je še vedno dovolj majhen glede samega šumu signala, ki je  $100 \text{ } \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ .

Največjo težavo pri načrtovanju predstavlja zahteva, da mora biti odziv filtra čim bolj strm v prehodnem frekvenčnem območju. To je pomembno zato, da lahko zmanjšamo zahtevnost digitalne obdelave signalov, ki je najbolj odvisna od frekvence vzorčenja ADC.

Pri izvedbi filtra je velika težava pri izboru aktivnega elementa (operacijskega ojačevalnika) saj zadnja stopnja zahteva velik GBW (39 MHz), kar močno omeji njihovo izbiro. Prav tako, to omejuje tudi red filtra, saj vsaka nadaljnja stopnja zahteva še večji GBW. Večje število stopenj pa tudi povečuje lastni šum filtra.

## Literatura

- [1] Shannon, Claude E. (January 1949). "Communication in the presence of noise". *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*. 37 (1): 10–21
- [2] P. Bramley, D. Cruickshank, and J. Pearce, "The Development of a Practical, Drift-Free, Johnson-Noise Thermometer for Industrial Applications," *International Journal of Thermophysics*, vol. 38, no. 2, p. 25, Dec. 2016
- [3] L. Callegaro, V. D'Elia, M. Pisani, and A. Pollarolo, *An absolute Johnson noise thermometer*. 2009
- [4] S. W. Nam, S. P. Benz, P. D. Dresselhaus, C. J. Burroughs, Jr., W. L. Tew, D. R. White, and J. M. Martinis, "Progress on Johnson noise thermometry using a quantum voltage noise source for calibration," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 54, no. 2, pp. 653–657, Apr. 2005.
- [5] D. R. White, S. P. Benz, J. R. Labenski, S. W. Nam, J. F. Qu, H. Rogalla, and W. L. Tew, "Measurement time and statistics for a noise thermometer with a synthetic-noise reference," *Metrologia*, vol. 45, no. 4, pp. 395–405, Aug. 2008
- [6] Butterworth, S. "On the Theory of Filter Amplifiers". *Experimental Wireless and the Wireless Engineer*. 7: 536–541, 1930.
- [7] Mason, J. C.; Handscomb, D.C. (2002). *Chebyshev Polynomials*. Taylor & Francis.
- [8] W. Cauer, *Synthesis of Linear Communication Networks*, McGraw-Hill, New York, 1958.
- [9] Sallen, R. P.; E. L. Key (March 1955). "A Practical Method of Designing RC Active Filters". *IRE Transactions on Circuit Theory*. 2 (1): 74–85.

- [10] Karki, J. Active low-pass filter design, TI Application Report, 2002.
- [11] R. Tavčar, S. Beguš, J. Bojkovski, "Optimizacija ojačevalnika za praktični šumni termometer," v Zbornik devetindvajsete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2020, 21.-22. september 2020, Portorož, Slovenija, A. Žemva, ur., A. Trost, ur. Ljubljana: IEEE Region 8, Slovenska sekcija IEEE, 2020, str. 265-268.
- [11] R. Tavčar, S. Beguš, J. Bojkovski, "Preliminarne meritve prototipa praktičnega šumnega termometra" v Zbornik devetindvajsete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2021, 20.-21. september 2021, Portorož, Slovenija, A. Žemva, ur., A. Trost, ur. Ljubljana: IEEE Region 8, Slovenska sekcija IEEE, 2021, str. 263-266.