

Preliminarne meritve prototipa praktičnega šumnega termometra

Rok Tavčar¹, Samo Beguš¹, Jovan Bojkovski¹

¹Univerza 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. Johnson noise thermometer is one of primary thermometers. This means that it does not need to be calibrated with another thermometer. One of the largest obstacles of measuring temperature with a Johnson noise thermometer is low value of thermal noise. Value of Johnson noise is in a range of a few microvolts RMS for practical thermometers. This is especially problematic in industry environments with high background electromagnetic noise. In this article evaluation of a prototype Johnson noise thermometer suitable for industry environment is presented.

1 Uvod

Termometer na podlagi Johnsonovega šuma se uvršča med primarne termometre [1, 2]. Med drugimi so primerni termometri tudi: akustični termometer, plinski termometer in termometer celostnega sevanja. Teh termometrov pred uporabo ni potrebno umeriti z drugim termometrom ampak lahko temperaturo izračunamo neposredno iz konstant in drugih od temperature neodvisnih fizikalnih veličin.

Z šumnim termometrom izmerimo temperaturo tako, da izmerimo efektivno vrednost termičnega šuma na znanem upor. Enačba, ki povezuje temperaturo z močjo termičnega šuma je:

$$T = \frac{\overline{V_T^2}}{4k_B R \Delta f} \quad (1)$$

Kjer je k_B Boltzmannova konstanta, R upornost, Δf pasovna širina in $\overline{V_T^2}$ izmerjena efektivna napetost termičnega šuma. Efektivne napetosti termičnega šuma so majhne za uporabne vrednosti upornosti in temperature. Na primer na upor z upornostjo 5 k Ω , ki je na temperaturi 20 °C je vrednost šumne napetosti 9 μ V, pri merjenju šuma s pasovno širino 1 MHz.

Ena izmed zahtev pri izdelavi praktičnega šumnega termometra je, da je negotovost izmerjene temperature manjša od 0,1 °C. To pomeni, da mora biti negotovost izmerjenega termičnega šuma manjša kot 1,3 nV.

2 Metode

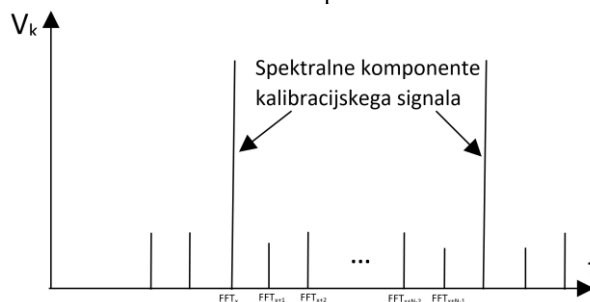
Za merjenje termičnega šuma se največkrat uporablja sistem z dvema ojačevalnikoma in korelator [3, 4, 5, 6]. S takim načinom zmanjšamo oziroma odpravimo nekoreliran šum na ojačevalnikih. To je šum, ki se pojavi samo na enem izmed ojačevalnikov. Izhod korelatorja je:

$$V_k = \sum V_1 * V_2^* \quad (2)$$

kjer je V_1 spekter izhoda prvega ojačevalnika in V_2 spekter izhoda drugega ojačevalnika. S tem načinom ne moremo odpraviti šumov, ki se pojavijo na obeh ojačevalnikih in šumov, na primer zaradi skupnega napajanja vseh ojačevalnikov. Prav tako ne moremo odpraviti dodatnih šumov, ki se pojavijo na merilnem uporu. Primer teh je šum zaradi elektromagnetnega valovanja iz okolice. Ta dva prispevka koreliranih šumov smo zmanjšali tako, da smo uporabili ločeno akumulatorsko napajanje za vsak ojačevalnik posebej in ustrezno ohišje.

Ker prenosne funkcija (ojačenje) celotnega sistema ni mogoče dovolj dobro poznati za doseganje zastavljene negotovosti 0,1 °C, smo uporabili referenčni vir šuma. To je predvsem posledica točnosti uporabljenih komponent v vezju in njihovih parazitnih kapacitivnosti.

Običajno je kalibracijski signal vsota sinusnih signalov z znanimi (enakimi) amplitudami in znanimi frekvencami ter naključno fazo. Spekter takšnega signala izgleda kot glavnik. V časovnem prostoru pa je podoben Gaussovega šumu. Z uporabljenim referenčnim virom smo tako kalibrirali oba ojačevalnika oziroma jima zmerili ojačenje. Na sliki 1 je prikazan izhod korelatorja iz katere nato izračunamo temperaturo.



Slika 1: Spekter signala na izhodu ... korelatorja. Vidne so spektralne komponente (razdelek FFTx), ki prikazujejo kalibracijski signal, ki se ponavlja vsakih N razdelkov. Med njimi so spektralne komponente merjene šumne napetosti.

Temperaturo izračunamo po enačbi:

$$T = \frac{V_c^2}{4k_B R_m \Delta f (NX - 1)} \quad (3)$$

kjer je V_c^2 efektivna napetost kalibracijskega signala, N perioda kalibracijskega signala v FFT spektru, R_m upornost merilnega upora, Δf pasovna širina enega razdelka FFT spektra in X razmerje med kalibracijskim signalom in izmerjenim šumom in je enako:

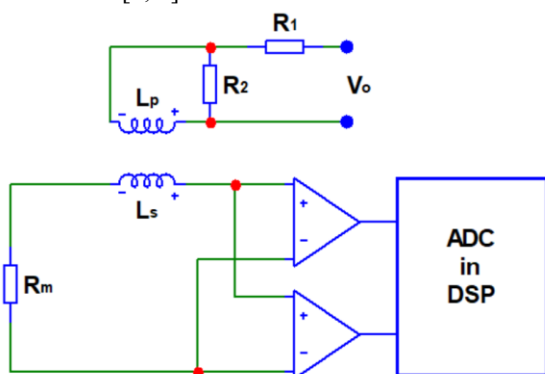
$$X = \frac{V_x}{\sum_{i=1}^{N-1} V_{x+i}} \quad (4)$$

kjer je V_x vrednost FFT spektra izhoda korelatorja, kjer je prisoten kalibracijski signal, V_{x+i} so vrednosti FFT spektra izhoda korelatorja med dvema kalibracijskima signaloma.

Enačba 3 velja v primeru, če lahko zanemarimo upornost vira kalibracijskega šuma, oziroma če lahko zanemarimo njegov šum. Če je upornost kalibracijskega vira prevelika postane enačba 3 odvisna tudi od zunanje temperature. V tem primeru moramo od kalibracijskega šuma odšteti prispevek zaradi termičnega šuma kalibracijskega vira.

2.1 Ojačevalnik

Na sliki 2 je prikazana poenostavljena shema šumnega termometra vključno z vezjem za prilagoditev kalibracijskega signala. Ojačevalnik smo izdelali glede na izkušnje z prejšnjim izdelanim ojačevalnikom [7] in drugimi obstoječimi zasnove nizko šumnih ojačevalnikov [8, 9].



Slika 2: Poenostavljena shema izdelanega šumnega termometra.

Na vhod V_o pripeljemo kalibracijski signal, ki ga nato oslabimo in galvansko ločimo od preostalega vezja. Končna efektivna napetost kalibracijskega signala, ki ga vidita ojačevalnika je:

$$V_c = \frac{V_o}{\frac{N_p R_1 + R_2}{N_s R_2} \sqrt{M}} \quad (5)$$

Kjer je V_o efektivna napetost oddanega signala, N_p število ovojev primarnega navitja transformatorja, N_s število ovojev sekundarnega navitja transformatorja, R_1 in R_2 sta upornosti napetostnega delilnika ter M število uporabljenih sinusnih signalov v referenčnem signalu.

Upornost upora R_1 v izdelanem termometru je $2 \text{ k}\Omega$ in upornost R_2 je $1 \text{ }\Omega$, število ovojev primarja je petkrat večje od števila ovojev sekundarja. S tem smo dosegli, da je upornost vira kalibracijskega šuma veliko manjša od upornosti merilnega upora. Tako veliko razmerje smo izbrali zaradi specifikacij uporabljenega vira kalibracijskega šuma in zaradi čim večjega dušenja motenj v kalibracijskem signalu. Amplituda kalibracijskega signala je bila 1 V .

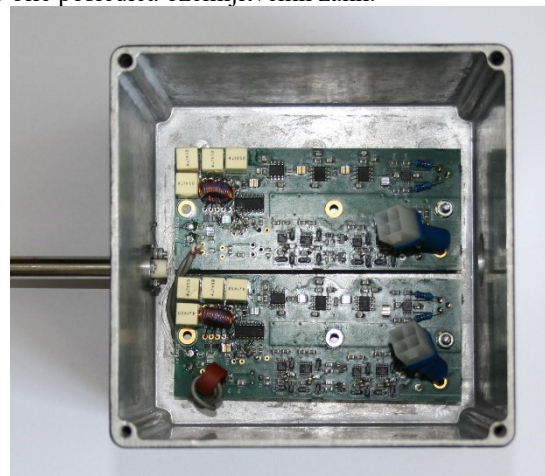
Na sliki 3 je prikazan izdelan šumni termometer. Merilni upor je na koncu zaprte cevi (na sliki levo). Upor je

zaščiten s stekleno cevko, da ne pride v stik s cevjo, ki je električno prevodna. Žice do merilnega upora so v cevi ločene med seboj. Vsaka žica je v svoji luknji keramične palice. Vsa ostala elektronika in priključki so v kovinski škatli (na sliki desno).



Slika 3: Slika izdelanega ojačevalnika. Na sliki sta označena oba izhoda (1,2) in vhod (3) za kalibracijski signal.

Na sliki 4 je prikazana notranjost škatle z obema ojačevalnikoma. Ojačevalnika sta enaka, razlika je samo v tem, da ima eden še vezje za prilagoditev kalibracijskega signala (na sliki spodaj levo). Večina preostalega prostora v škatli je zapolnjena s štirimi akumulatorji, ki omogočajo ločeno napajanje vsakega ojačevalnika. Vsak ojačevalnik ima svojo povezavo, do merilnega upora s čimer odstranimo vpliv termičnega šuma v povezovalnih žicah. To je posledica tega, da šum v povezavah ni koreliran. Izhod ojačevalnikov je diferencialni, s čimer zmanjšamo vpliv sofaznih motenj iz okolice. To je pomembno zato, ker je pričakovan izhod ojačevalnikov v območju od -1 V do $+1 \text{ V}$. Tako kot vhod je tudi izhod ojačevalnikov galvansko ločen od enote za zajemanje podatkov. Z galvansko ločitvijo ojačevalnikov od ostale uporabljene opreme smo zmanjšali motnje, ki so bile posledica ozemljitvenih zank.



Slika 4: Na sliki je vidna notranjost šumnega termometra z dvema ojačevalnikoma. Preostala notranjost je ob uporabi zasedena z akumulatorji.

3 Izvedba meritev

Meritve smo izvedli v vodni kopeli in v točki ledišča. Na sliki 5 je prikazana postavitev šumnega termometra in referenčnega termometra v vodni kopeli. Potopitev izdelanega termometra je bila večja od 20 cm . V točki ledišča je postavitev enaka z istim referenčnim termometrom.



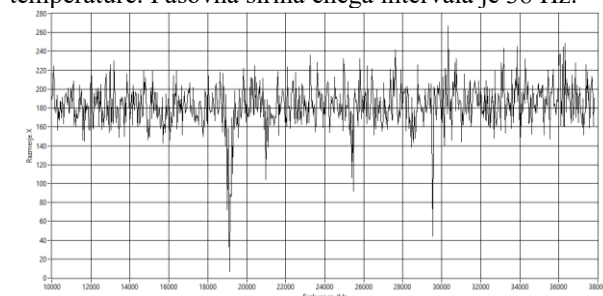
Slika 5: Postavitev šumnega termometra (1) in referenčnega termometra (2) v vodni kopeli.

Temperaturo smo izmerili v devetih različnih temperaturnih točkah od 0 °C do 80 °C.

Čas trajanja ene meritve je pod 3 s. Skupen čas trajanja vseh meritev je bil 7 ur.

4 Rezultati

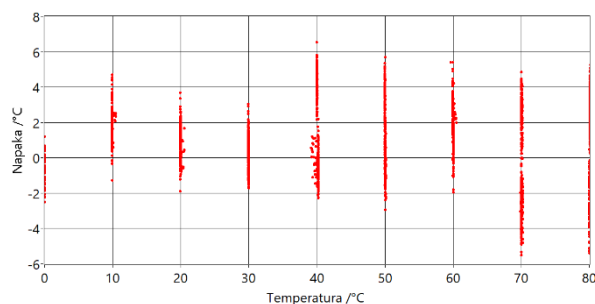
Na sliki 6 je prikazano izmerjeno razmerje med efektivno vrednostjo kalibracijskega signala in efektivno vrednostjo šuma na merilnem upor. Na sliki so prikazane vse vrednosti, ki smo jih uporabili za izračun temperature. Pasovna širina enega intervala je 38 Hz.



Slika 6: Prikaz izmerjenega razmerja med efektivno vrednostjo kalibracijskega signala in efektivno vrednostjo šuma na merilnem upor.

Teoretična efektivna vrednost šuma na merilnem upor, prikazanega na sliki 6 je 56 nV. Vidi se tudi motnje pri 19 kHz, 21 kHz, 25,5 kHz in 29,5 kHz kjer izmerjeno razmerje pade. Amplituda teh motenj se je tekom meritev spreminjala, medtem ko so frekvence ostale enake. Ocenjena efektivna vrednost motnje pri 19 kHz je 1 μ V. Eden izmed zaznanih razlogov za nastanek teh motenj, je stik ohišja termometra z ozemljitvijo električnega omrežja.

Na sliki 7 so prikazane nekorigirane (nekalibrirane) napake izmerjene temperature glede na referenčno temperaturo.



Slika 7: Na grafu so prikazane napake izmerjene temperature glede na referenčno temperaturo.

Iz grafa na sliki 7 je razvidno, da je negotovost izmerjene temperature večja od 1 °C. Predvidevamo, da je ta negotovost predvsem posledica motenj v izmerjenemu razmerju X, ki so prikazane na sliki 6. Temperaturna razlika 1 °C pri temperaturi 20 °C pomeni spremembo razmerja X iz 181,084 v 180,483.

5 Zaključek

Izdelan prototip praktičnega šumnega termometra je pokazal, da z njim lahko merimo temperature brez predhodnega umerjanja z drugim termometrom. Trenutni izdelan prototip ima negotovost izmerjene temperature večje od 1 °C. Za večjo težavo so se izkazale elektromagnetne motnje, ki kljub zaščiti ostajajo večji problem. Za izboljšanje negotovosti izmerjene temperature je tako potrebno izboljšati odpornost na zunanje motnje ali pa jih odstraniti naknadno z ustreznim algoritmom. Ena izmed mogočih rešitev tega problema je iskanje teh motenj v spektru in jih izločiti iz nadaljnjih izračunov temperature.

Literatura

- [1] 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
- [2] L. Callegaro, V. D'Elia, M. Pisani, and A. Pollaro, *An absolute Johnson noise thermometer*. 2009
- [3] 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.
- [4] S. P. Benz, J. M. Martinis, S. W. Nam, W. L. Tew, and D. R. White, "A new approach to Johnson noise thermometry using a Josephson quantized voltage source for calibration," in *Proc. TEMPMEKO*, 2001, pp. 37–44.
- [5] S. P. Benz, J. Qu, H. Rogalla, D. R. White, P. D. Dresselhaus, W. L. Tew, and S. W. Nam, "Improvements in the NIST Johnson noise thermometry system," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, no. 4, pp. 884–890, Apr. 2009.
- [6] 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
- [7] 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.

- [8] P. Horowitz, W. Hill, The Art of Electronics 3E, 2015
- [9] J. Vojtěch, Design of ultra low noise amplifiers, 2018