

# Izzivi uporabe NTK termistorjev pri merjenju temperature v močnostnih pretvornikih

Marko Petkovšek

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, SI-1000 Ljubljana  
E-pošta: marko.petkovsek@fe.uni-lj.si

## Challenges of using NTC thermistors for temperature measurements in power converters

*Abstract.* Advances in the fields of semiconductor components and microcontrollers in the last years have given a huge impetus to development of power converters for various applications. Due to extremely capable supervising microcontrollers that offer many GPIO pins, several features – once only on the wish list – have become almost “a must have”. Among them there is also monitoring and diagnostics of temperature – not only of the process, but also of key converter components, thus resulting in increased safety and operational reliability of the whole system. During the design stage, however, a large focus is given to find cost-efficient solutions. In the paper, a simple approach for temperature measurement using NTC thermistors is investigated for three methods that differ in the required prework, expected accuracy and calculation complexity.

## 1 Uvod

Močnostni pretvorniki predstavljajo pomemben segment elektronskih sklopov, pri katerih je v zadnjih letih opaziti precejšen napredek. Poleg razvoja močnostnih komponent je k temu vsekakor doprinesel razvoj mikrokrmilniške tehnike, s katero poskrbimo za ustrezno izvajanje naprednih krmilno-regulacijskih algoritmov. Poleg neposrednega krmiljenja močnostnih polprevodniških elementov, kar je pravzaprav glavna vloga mikrokrmilnika v močnostnem pretvorniku, je vedno več poudarka opaziti na dodatnih funkcionalnostih, kot je npr. nadzor in sprotna diagnostika nad ključnimi parametri [1]. V ta namen je seveda treba imeti na razpolago dovolj splošno-namenskih (GPIO) priključkov, ki jih lahko po potrebi definiramo kot izhodne ali pa vhodne priključke. Pri nadzoru in diagnostiki so ključnega pomena prav slednji, saj npr. preko digitalnih vhodov, še bolj pa prek analognih vhodov lahko spremljamo celo vrsto fizikalnih veličin tako pretvornika, kot tudi celotnega sistema, katerega del je močnostni pretvornik. Poleg merjenja napetosti in tokov, kar predstavlja osnovo za delovanje močnostnega pretvornika, je pomembno področje nadzora in diagnostike tudi merjenje ostalih fizikalnih veličin sistema, med katere vsekakor sodi tudi temperatura. Merjenje temperature pri tem ni omejeno samo na merjenje temperature tehnološkega procesa, ampak gre tudi za merjenje temperature močnostnega

pretvornika ali njegovih podsklopov [2], kar je s stališča varnosti in zanesljivosti delovanja pretvornika seveda še kako pomembno. Pri razvoju močnostnih pretvornikov smo tako po eni strani priča vedno širšemu naboru »obveznih« funkcionalnosti, po drugi strani pa je inženirska kreativnost pri iskanju ustreznih rešitev vedno bolj podvržena pritisku »cenovne optimizacije« končnega izdelka. V nadaljevanju prispevka bo prav v tej luči podrobneje osvetljen princip nizkocenovnega merjenja temperature, in sicer z uporabo NTK termistorjev.

## 2 Splošno o NTK termistorjih

NTK termistorji so temperaturno odvisni upori, ki jih pogosto uporabljamo za cenovno ugodno merjenje temperature. Za njih je značilna izrazito nelinearna karakteristika odvisnosti upornosti od temperature – za razliko od kovinskih uporovnih termometrov (RTD; resistance temperature device, predstavnik temperaturna sonda PT100), pri katerih je ta odvisnost v širokem temperaturnem področju linearna.

Ne glede na vrsto uporovnega temperaturnega sensorja je informacija o temperaturi pridobljena posredno preko merjenja padca napetosti na njem. To pomeni, da moramo senzor vključiti v bolj ali manj kompleksno vezje [3], pri katerem je izhodna napetost sorazmerna temperaturi. Seveda je zaželeno, da bi bila napetost linearno odvisna od temperature, kot je npr. pri namenskih integriranih vezjih za merjenje temperature z vgrajenimi linearizacijskimi vezji, ki delujejo na principu merjenja padca napetosti na pn spoju diode oz. bipolarnega tranzistorja pri vsiljenem konstantnem toku [4]. A če je glavno vodilo pri merjenju temperature cenovna optimizacija, potem so NTK termistorji kljub svoji nelinearni karakteristiki cenovno najugodnejša rešitev.

### 2.1 Karakteristika NTK termistorja

Proizvajalci podajajo odvisnost upornosti od temperature večinoma v obliki tabelaričnih podatkov s korakom 5 °C (tudi 1 °C), pri tem pa poskušajo upornost NTK termistorja kar najbolje analitično opisati upoštevajoč dve konstanti:

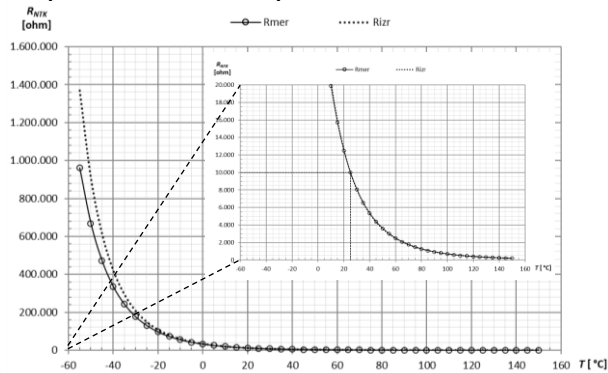
$$R_T = A \cdot e^{BT}, \quad (1)$$

pri čemer je konstanta  $A$  vezana na geometrijo in koncentracijo dodanih primesi, konstanta  $B$  pa na osnovni material upora. Termistorje ločimo prav po

vrednosti konstante  $B$  – poimenovane tudi snovna konstanta – njene vrednosti se gibljejo med 2000 K in 5000 K. Raje kot zapis (1) uporabljamo zvezo (2), s katero lahko izračunamo upornost termistorja  $R_T$  pri temperaturi  $T$  upoštevajoč nazivno vrednost njegove upornosti ( $R_0$ ) pri absolutni temperaturi  $T_0 = 298,15$  K:

$$R_T = R_0 \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}. \quad (2)$$

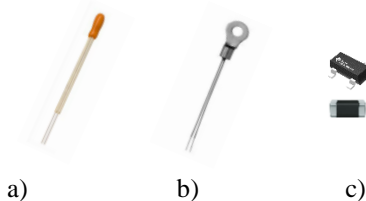
Na sliki 1 je za 10 k $\Omega$  NTK termistor s snovno konstanto  $B_{25/100} = 4000$  K [5] poleg tabelarnih vrednosti ( $R_{mer}$ ) upoštevajoč (2) podana tudi izračunana ( $R_{izr}$ ) odvisnost upornosti od temperature. Indeks 25/100 pri oznaki za konstanto  $B$  podaja temperaturno območje, na katerem so izračunane upornosti upoštevajoč (2) najbolj skladne s pomerjenimi. Upornost termistorja se v celotnem temperaturnem razponu od  $-55$  °C do  $+150$  °C zelo spreminja. Na sliki 1 je po y osi povečano prikazano območje upornosti do 20 k $\Omega$ , označena pa je tudi nazivna vrednost termistorja pri  $T_0 = 25$  °C. Za ta primer uporabljeni termistor ima po podatkih proizvajalca [5] pri temperaturi  $T = 150$  °C upornost  $R = 182,03$   $\Omega$ .



Slika 1. Karakteristika NTK termistorja.

## 2.2 Izvedbe NTK termistorjev

Pri praktični uporabi termistorjev je pomembna tudi pritrditiv. Če merimo temperaturo medija (zrak, voda...), potem je verjetno smiselno uporabiti izvedbo z izoliranimi žičnimi priključki (slika 2a). Pri merjenju temperature npr. na hladilnem rebro je smiselno uporabiti termistor s priključnim ušesom (slika 2b), za merjenje temperature elektronskega sklopa (del tiskanega vezja) pa bomo verjetno izbrali kar SOT ali SMD izvedbo termistorja (slika 2c, [5]), pri čemer bomo seveda poskrbeli za ustrezen termični kontakt termistorja z delom vezja, katerega temperaturo merimo.

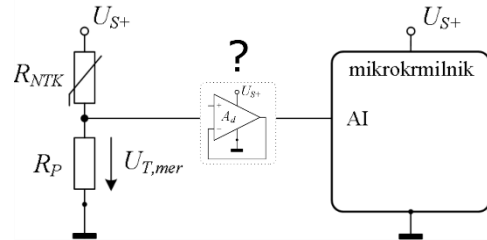


Slika 2. Izvedbe NTK termistorjev.

## 3 Merjenje temperature z NTK termistorjem

### 3.1 Prilagodilno vezje za NTK termistor

Zahteva po cenovno ugodnem merjenju temperature narekuje tudi izbiro ustreznega prilagodilnega vezja, ki nam informacijo uporovnega senzorja temperature preoblikuje v napetost. Daleč najbolj preprosto vezje je kar uporovni delilnik (slika 3), ki ga sestavljata termistor in upor, katerega upornost mora biti čim bolj neodvisna od temperature. V kolikor je napetost  $U_{T,mer}$  iz uporovnega delilnika nato pripeljana na analogni vhod (AI) nadzornega mikrokrmilnika z »zadostno« vhodno impedanco, je uporaba dodatnega operacijskega ojačevalnika v vezavi napetostni sledilnik nepotrebna. Poleg tega se na ta način izognemo tudi morebitni dodatni napaki, ki jo v meritev vnaša neidealni operacijski ojačevalnik (preostala napetost, temperaturno lezenje...).



Slika 3. Prilagodilno vezje za merjenje temperature.

Vrednost upornosti  $R_P$  določimo glede na nazivno vrednost upornosti termistorja, napajalno napetost  $U_{S+}$  in želeno temperaturno območje. Na vhodu mikrokrmilnika bomo torej pomerili napetost:

$$U_{T,mer} = U_{S+} \cdot \frac{R_P}{R_{NTK} + R_P}. \quad (3)$$

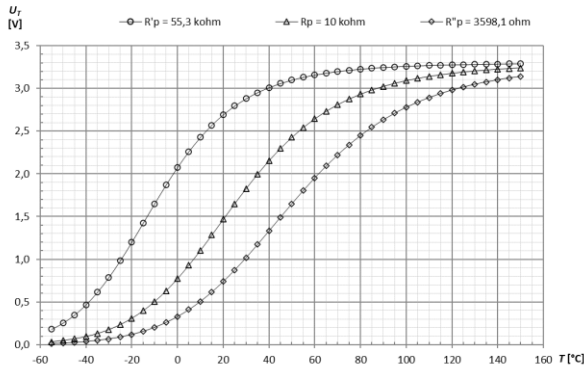
### 3.2 Princip izračuna temperature

V nadaljevanju bo za primer 10 k $\Omega$ -skega NTK termistorja [5], katerega karakteristika je podana na sliki 1, podan princip izračuna temperature za predlagano prilagodilno vezje, ki ga napajamo z napetostjo  $U_{S+} = 3,3$  V.

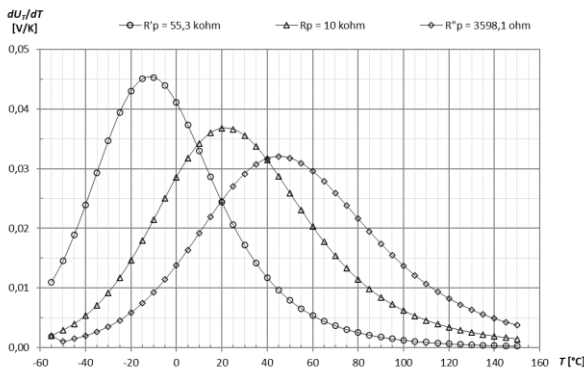
Če za začetek predpostavimo, da je vrednost  $R_P = R_0 = 10000$   $\Omega$ , potem lahko za celotni temperaturni razpon upoštevajoč tabelarno podane vrednosti upornosti izrišemo potek napetosti  $U_T$  v odvisnosti od temperature (slika 4). S slike je razvidno, da je sprememba napetosti  $U_T$  v odvisnosti od temperature največja ravno v območju okrog temperature 25 °C, kar je logično, saj smo predpostavili upornost  $R_P = R_0$ . Prilagodilno vezje ima torej največjo občutljivost pri temperaturi, ki jo določa vrednost upornosti  $R_P$ , kar moramo upoštevati pri dimenzioniranju. Na sliki 4 sta podana tudi poteka napetosti za  $R'_P = 55,3$  k $\Omega$  (ustreza upornosti termistorja pri  $-10$  °C) in  $R''_P = 3598,19$   $\Omega$  (ustreza upornosti termistorja pri 50 °C), na sliki 5 pa je

izrisan še potek spremembe napetosti v odvisnosti od spremembe temperature ( $\Delta U_T/\Delta T$ ) za celotno temperaturno območje in predpostavljene vrednosti upornosti  $R_p$ .

Kot je razvidno s slik 4 in 5, je s primerno izbiro vrednosti upornosti  $R_p$  v delilniku napetosti storjen šele prvi korak pri merjenju temperature, in sicer definiranje temperaturnega območja, v katerem je občutljivost merjenja najvišja. Naslednji korak pa je iskanje algoritma, s katerim je mogoče – sploh v primeru kompleksnega mikrokrmilniško vodenega sistema (npr. močnostnega pretvornika) – preračunati pomerjeno napetost v temperaturni ekvivalent.



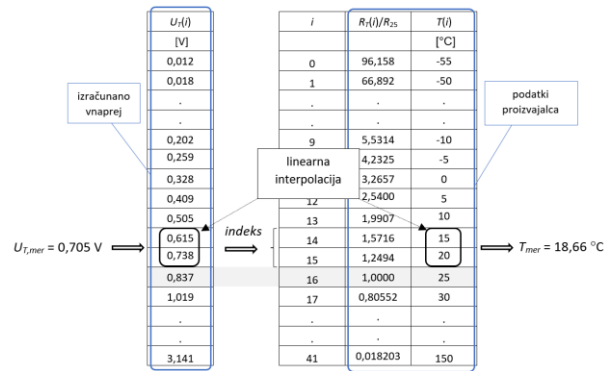
Slika 4. Potek napetosti  $U_T$  v odvisnosti od temperature za različne vrednosti upornosti  $R_p$ .



Slika 5. Potek spremembe  $\Delta U_T/\Delta T$  v odvisnosti od temperature za različne vrednosti upornosti  $R_p$ .

### a) Tabelarični pristop

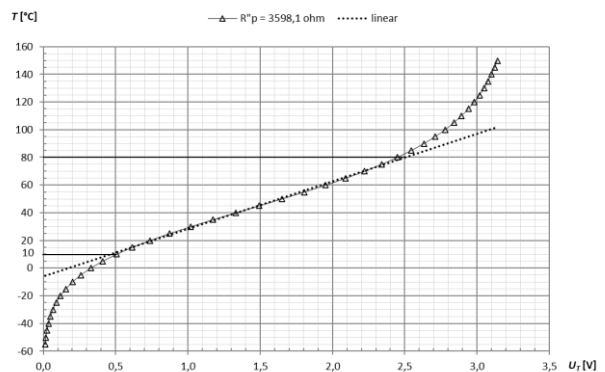
Pri tej metodi sestavimo tabelo z upornostmi termistorja v odvisnosti od temperature (slika 6), ki jih dobimo iz podatkovnih listov proizvajalca. Tabeli dodamo stolpec izračunanih napetosti  $U_T(i)$  za predpostavljene uporovni delilnik, nakar je v krmilnem programu mikrokrmilnika treba za pomerjeno napetost  $U_{T,mer}$  najti ustrezni sosednji napetosti z indeksoma ( $i$ ) in ( $i+1$ ) in njima pripadajoči temperaturi. Z linearno interpolacijo v zadnjem koraku izračunamo »vmesno« temperaturo  $T_{mer}$ . Četudi je algoritem branja tabelaričnih vrednosti relativno preprost in metoda rezultira v izredno majhni napaki, pa je praktična izvedba lahko problematična s stališča časovne in »prostorske« obremenitve mikrokrmilnika – sploh v primeru »gostejše« tabele proizvajalca (podatki so največkrat podani s korakom 5 °C, redkeje celo s korakom 1 °C).



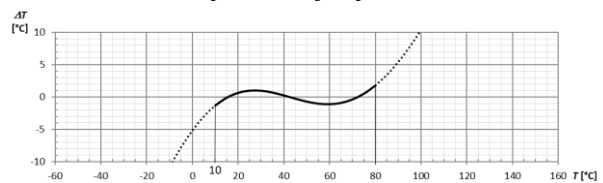
Slika 6. Tabelarični pristop pri izračunu temperature.

### b) Aproximacija s polinomskimi funkcijami

Za začetek si pretvorimo odvisnost napetosti s slike 4 za privzeto vrednost upornosti  $R''_p = 3598,1 \Omega$  (ustreza upornosti termistorja pri temperaturi 50 °C) tako, da zamenjamo x in y os (slika 7). S slike 7 je že na prvi pogled opazno, da bi lahko odvisnost  $T(U_T)$  vsaj na omejenem območju aproksimirali kar s premico in posledično izračunavali temperaturo upoštevajoč pomerjeno napetost (x os) in enačbo premice. Pri tem je napaka, ki jo naredimo, odvisna od postavitve premice – na sliki 7 je vrisana premica, s katero »kar dobro« aproksimiramo  $T(U_T)$  na območju od 10 °C do 80 °C. Izven tega območja znaša napaka (na sliki 8 označena z  $\Delta T$ ) pri izračunu temperature že več kot  $\pm 2$  °C.



Slika 7. Temperatura v odvisnosti od pomerjene napetosti  $U_T$  in aproksimacija s premico.



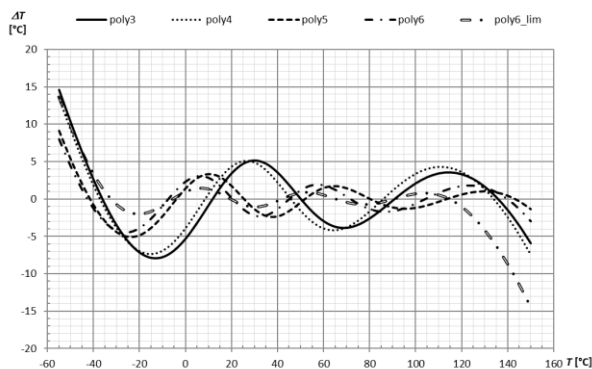
Slika 8. Napaka pri izračunu temperature ( $\Delta T$ ) pri aproksimaciji s premico.

Pravkar predstavljeni princip preračuna temperature iz pomerjene napetosti je sicer korekten, a le v omejenem temperaturnem obsegu. Boljši rezultat je seveda pričakovati s polinomsko funkcijo višjega reda:

$$T = a_n \cdot u^n + a_{n-1} \cdot u^{n-1} + \dots + a_1 \cdot u + a_0. \quad (4)$$

Z  $a_i$  so v (4) označeni koeficienti polinoma in z  $u$  pomerjena napetost ( $U_T$ ).

Na sliki 9 je upoštevajoč (4) podano odstopanje izračunane temperature od dejanske ( $\Delta T$ ) pri aproksimaciji diskretno podanih točk s slike 7 s polinomom 3., 4., 5. in 6. stopnje s koeficienti, s katerimi smo aproksimirali krivuljo na nazivnem področju termistorja. Opazno je, da je napaka tudi pri precej visokem redu polinomske funkcije še vedno relativno velika. A podobno kot pri linearni aproksimaciji, je tudi pri polinomih višjega reda ob malo ožjem temperaturnem področju lahko pričakovana temperaturna napaka precej manjša, kar govori v prid polinomski aproksimaciji. Na sliki 9 je tako podana tudi napaka za aproksimacijo s polinomom 6. reda, katerega koeficienti so izračunani za temperaturno območje od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$  (označeno poly6\_lim). Opazno je, da je na tem območju pričakovana napaka manjša od  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Slika 9. Napaka  $\Delta T$  v odvisnosti od reda polinomske funkcije.

### c) Analitični pristop

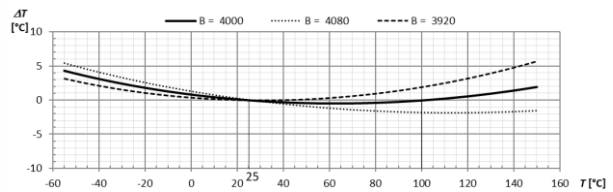
Pri tem izhajamo iz osnovnega prilagodilnega vezja (slika 3) in relacije med upornostjo in temperaturo, ki jo podaja (2). Če združimo zapisa (2) in (3), dobimo:

$$U_{T,mer} = U_{S+} \cdot \frac{R_P}{R_0 e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} + R_P}, \quad (5)$$

nakar po antilogaritmiranju in manjšem preurejanju iz (5) izrazimo temperaturo  $T$  (v kelvinih):

$$T_{mer} = \frac{1}{\frac{1}{B} \ln\left(\frac{R_P}{R_0} \left(\frac{U_{S+}}{U_{T,mer}} - 1\right)\right) + \frac{1}{T_0}}. \quad (6)$$

Kompleksnost izraza (6) je lahko problematična s stališča časovne obremenitve mikrokrmilnika, predvsem pa je izračun pogojen s snovno konstanto, ki jo proizvajalec po navadi podaja samo za del temperaturnega območja ( $B_{25/100}$ ). Na skrajnih mejah območja je posledično napaka pri izračunu enaka 0, vmes je manjša od  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , levo in desno od njiju pa prične naraščati (slika 11). Posebno pozornost je treba nameniti tudi dejanski vrednosti konstante  $B$ . Na sliki 11 je podana izračunana napaka tudi za  $\pm 2\%$  odstopanje od nazivne vrednosti, zato je pred praktično uporabo vsekakor smiselno izvesti kalibracijske meritve [6].



Slika 11. Napaka pri izračunu temperature ( $\Delta T$ ) pri analitičnem pristopu.

## 4 Zaključek

V prispevku je osvetljen princip cenovno ugodnega merjenja temperature z NTK termistorji, pri čemer je predpostavljeno, da je izračun temperature izveden v nadzornem mikrokrmilniku močnostnega pretvornika.

Predstavljeni so tri metode izračuna, dve temeljita na tabelaričnih podatkih, tretja pa na podani snovni konstanti termistorja. Pričakovana napaka je sicer najnižja v primeru tabelaričnega pristopa, sploh v primeru »gosto« podanih podatkov s strani proizvajalca. Kljub temu tudi preostali dve metodi ponujata zelo sprejemljive rezultate, pri čemer je treba izpostaviti analitično metodo, ki zahteva najmanj priprav. Za praktično realizacijo je ključnega pomena predvsem časovna obremenitev mikrokrmilnika za posamezno metodo, kar pa presega okvire tega prispevka.

## Zahvala

Prispevek je nastal v okviru raziskovalnega projekta L2619 »Napredni elektronski napajalni modul za avtomobilski katalizator«, ki ga je podprla Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

## Literatura

- [1] M. Jaraczewski, R. Mielnik, T. Gębarowski, M. Sułowicz: Low-Frequency Signal Sampling Method Implemented in a PLC Controller Dedicated to Applications in the Monitoring of Selected Electrical Devices. *Electronics* 2021, 10, 442.
- [2] C. Matei, J. Urbonas, H. Votsi, D. Kendig, P. H. Aaen: Dynamic Temperature Measurements of a GaN DC-DC Boost Converter at MHz Frequencies. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35, pp. 8303-8310, doi: 10.1109/TPEL.2020.2964996.
- [3] C. Wang, Z. Hou, J. You: Temperature-to-Frequency Converter With 1.47% Error Using Thermistor Linearity Calibration. *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, July 2019.
- [4] Texas Instruments. "TMP23x-Q1 Automotive Grade High-Accuracy Analog Output Temperature Sensors," Data sheet. [Online]. Dosegljivo: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tmp235-q1.pdf> [23.6.2021].
- [5] TDK. NTC thermistors. [Online]. Dosegljivo: [https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/sensor/ntc/chip-ntc-thermistor/data\\_sheet/50/db/ntc/db/ntc/ntc\\_smd\\_automotive\\_series\\_0603.pdf](https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/sensor/ntc/chip-ntc-thermistor/data_sheet/50/db/ntc/db/ntc/ntc_smd_automotive_series_0603.pdf) [23.6.2021].
- [6] Y. Liu, Y. Liu, W. Zhang, J. Zhang: The Study of Temperature Calibration Method for NTC Thermistor. *2020 IEEE 4th International Conference on Frontiers of Sensors Technologies (ICFST)*, 2020, pp. 50-53. 6. – 9. November, 2020, Shanghai, Kitajska.