

Avtomatizacija meritev na procesni liniji

Kristjan Cuznar

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko

kc8861@student.uni-lj.si

I. OPIS AVOMATIZIRANO-MERILNEGA PROBLEMA

Procesne linije postajajo vse bolj kompleksne in vsebujejo vedno več senzorskih naprav, ki služijo podrobnejšem vpogledu v procesno dogajanje. Zaradi zagotavljanja visoke razpoložljivosti (ang. high availability) je na kritičnih točkah procesa potrebno implementirati avtomatizirane redundantne senzorske sisteme, ki pa morajo delovati po različnih principih. Vse sisteme je potrebno tekom obratovanja vzdrževati in zagotavljati, da vsi sistemi delujejo pravilno, tj. dajejo verodostojne informacije.

Namišljen odsek procesne linije, ki je namenjen merjenju temperature visokokakovostne tekočine, ki se uporablja v kritični infrastrukturi, sestoji iz:

- senzorskega sistema, ki vključuje:
 - polprevodniški merilnik – LM35,
 - uporovni merilnik – PT100 in
 - termistor NTC – USP10982,
- nadzorno-krmilnega sistema, ki zajema:
 - programirljivi logični krmilnik (PLK) in
 - nadzorni računalnik.

II. OPIS REŠITVE

Implementirano je bilo avtomatizirano merjenje temperature produkta, prenos meritve iz programirljivega logičnega krmilnika (PLK) v nadzorni sistem za dodatno analizo in izdelavo poročil. Razvit nadzorni sistem z grafičnim uporabniškim vmesnikom omogoča nadzor, ki obsega sistem za avtomatsko kalibracijo merilnikov na podlagi referenčnega merilnika, katerega se ga intervalno vgrajuje v procesno linijo. Grafični uporabniški vmesnik omogoča tudi realnočasovno spremljanje dogajanja na procesni liniji.

Celotna programska koda je priložena poročilu, dostopna pa je tudi preko spletne povezave: <https://github.com/CuAuPro/Seminar---AVMS>.

III. ZAJEM MERITEV S PLK

Na industrijski PLK (Siemens S1200) so povezani trije različni tipi merilnikov temperature, kar omogoča zagotavljanje visoke razpoložljivosti in večje zaupanje v meritve v primeru izpada enega merilnika.

V prvem sklopu tega dela rešitve avtomatiziranih meritev v procesu moramo na podlagi znanih statičnih karakteristik posameznih senzorjev le-te priklopiti na merilni sistem ter

umeriti. Vezave posameznih senzorjev so prikazane na sliki 1, izračuni temperature na podlagi meritev (v našem primeru napetosti na vseh analogne kartice PLC) pa izračunamo:

- Polprevodniški merilnik

Iz dokumentacije razberemo, da, po kalibraciji, po vezavi 1a dobimo napetost po enačbi:

$$V_{OUT} = 1[mV/^{\circ}C] \cdot T_{IZM}[^{\circ}C], \quad (1)$$

iz česar sledi, da temperaturo lahko izračunamo kot:

$$T_{IZM}[^{\circ}C] = \frac{V_{OUT}[mV]}{1[mV/^{\circ}C]}. \quad (2)$$

- Uporovni merilnik

Iz enačbe napetostnega delilnika izpeljemo enačbo, s katero izračunamo trenutno upornost merilnika:

$$R_S = \frac{U_{RS} \cdot R}{U_{REF} - U_{RS}} \quad (3)$$

Temperaturo iz upornosti izračunamo preko naslednje enačbe [1]:

$$T_{IZM}[^{\circ}] = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4B \left(1 - \frac{R_{RTD}}{R_0}\right)}}{2B}, \quad (4)$$

kjer so:

$$\begin{aligned} A &= \alpha \left(1 + \frac{\delta}{100}\right), \\ B &= -\alpha \delta \cdot 10^{-4}, \\ \alpha &= 0,00385^{\circ}C^{-1}, \\ \delta &= 1,5 \text{ in} \\ R_0 &= \text{upornost pri } 0^{\circ}C. \end{aligned}$$

- Termistor NTC

Statično karakteristiko lahko opišemo s Steinhart-Hart enačbo [2]:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R) + C (\ln(R))^3. \quad (5)$$

Koeficiente A , B in C so odvisni od tipa in modela merilnika, ki jih izračunamo na podlagi treh meritev pri različnih referenčnih temperaturah preko naslednjih enačb:

$$\begin{aligned}
A &= Y_1 - (B + L_1^2 C) L_1 \\
B &= \gamma_2 - C(L_1^2 + L_1 L_2 + L_2^2) \\
C &= \left(\frac{\gamma_3 - \gamma_2}{L_3 - L_2} \right) (L_1 + L_2 + L_3)^{-1} \\
\gamma_2 &= \frac{Y_2 - Y_1}{L_2 - L_1} \\
\gamma_3 &= \frac{Y_3 - Y_1}{L_3 - L_1} \\
Y_1 &= 1/T_1, Y_2 = 1/T_2, Y_3 = 1/T_3 \\
L_1 &= \ln(R_1), L_2 = \ln(R_2), L_3 = \ln(R_3).
\end{aligned} \tag{6}$$

Zahtevane meritve so predstavljene v tabeli I.

Tabela I: Meritve za določanje statične karakteristike termistorja.

| i | $T[^\circ C]$ | $R[\Omega]$ |
|---|---------------|-------------|
| 1 | 8,8 | 11850 |
| 2 | 24,3 | 10300 |
| 3 | 75,5 | 1620 |

Iz enačb (6) izračunamo koeficiente $A = 0,001575561$, $B = 0,0001422168$ in $C = 5,987 \cdot 10^{-7}$. S tem smo določili enačbo za izračun temperature na podlagi upornosti termistorja, ki jo izračunamo posredno iz merjenja napetosti (slika 1b).

Razvit je bil program za zajem meritev iz vseh merilnikov ter program, ki nudi komunikacijo preko komunikacijskega protokola OPC UA, ki je splošno uveljavljen v sorodnih industrijskih aplikacijah.

Slika 2 prikazuje konfiguracijo PLK in nastavitve strežnika OPC UA.

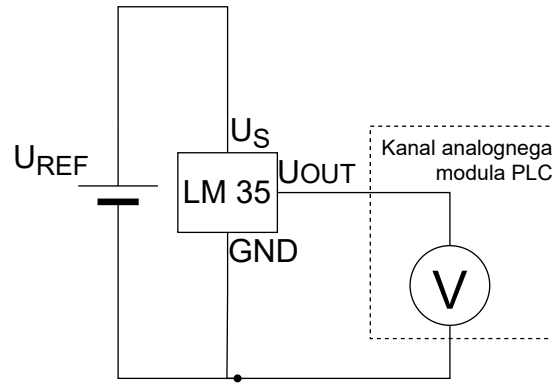
IV. NADZORNI SISTEM

Nadzorni sistem je zasnovan modularno, kar je posebno pri večjih projektih zelo zaželena lastnost. V aplikaciji za nadzor naše procesne linije je sistem zasnovan iz naslednjih modulov:

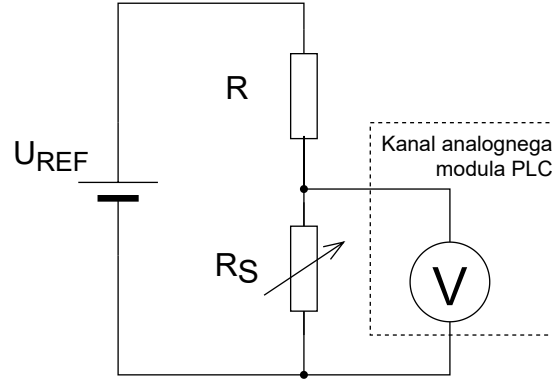
- grafični uporabniški vmesnik,
- modul za zajem podatkov s PLK,
- modul za kalibracijo merilnikov in
- modul za arhiviranje podatkov.

Module se lahko v aplikacijo dodaja ali odvzema glede na želje ciljnega uporabnika. Zasnovani so tako, da se glede na zahteve ciljnega uporabnika spreminja notranje lastnosti (sprememba komunikacijskega protokola, sprememba števila merilnikov itd.), glavni aplikaciji pa je modul predstavljen z višjim nivojem abstrakcije.

Celotna programska koda za nadzorni sistem je napisana v programskem jeziku Python. Vsak izmed modulov je predstavljen v nadaljevanju.

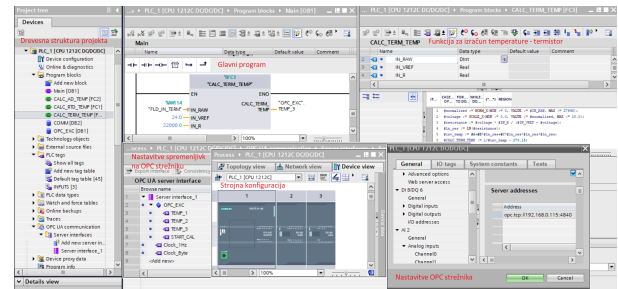


(a) Vezava polprevodniškega merilnika.



(b) Vezava uporovnega merilnika ter termistorja. R_S predstavlja merilnik.

Slika 1: Vezave merilnikov.



Slika 2: Konfiguracija PLK in OPC UA strežnika.

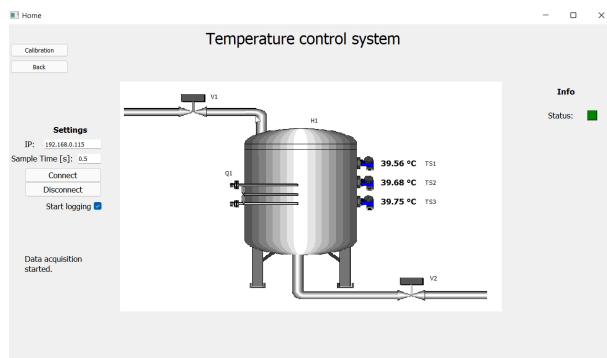
A. Grafični uporabniški vmesnik

Grafični uporabniški vmesnik je modul, ki omogoča interakcijo s celotnim sistemom. Razvit je bil z uporabo ogrodja PyQt [3], ki je Pythonov vtičnik medplatformnega nabora orodij grafičnega vmesnika Qt. Prednost razvitega grafičnega vmesnika je večnitnost, kar pohitri delovanje in uporabniku daje dobro uporabniško izkušnjo brez zakasnitev v delovanju.

Zaradi enostavnejšega razporejanja posameznih elementov v aplikaciji je bilo uporabljeno programsko orodje QT Designer, s katerim je bila nato generirana programska koda,

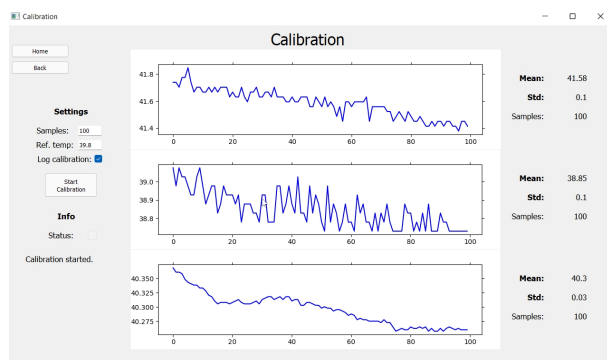
ki jo je možno, z modifikacijami, uvoziti v glavno aplikacijo.

Glavno stran, ki prikazuje osnovni pogled na procesno linijo in temperature posameznih merilnikov, prikazuje slika 3.



Slika 3: GUI – glavna stran.

Druga stran, ki je namenjena avtomatski kalibraciji merilnikov pa je prikazana na sliki 4.



Slika 4: GUI – kalibracija.

B. Sistem za zajem podatkov s PLK

Za zajemanje podatkov s PLK, je bil implementiran OPC UA odjemalec (na nadzornem računalniku), ki iz OPC UA strežnika (PLK) pridobiva podatke.

OPC UA modul odjemalca je napisan v programskem jeziku Python in je zasnovan kot neodvisen modul, ki se ga lahko prilagaja zahtevam uporabnika (v konfiguracijsko datoteko se vpiše parametre, nato pa sistem brez korekcij deluje v skladu z zahtevami v konfiguracijski datoteki).

OPC UA modul strežnika pa je bil implementiran v programskem okolju TIA Portal, ki omogoča parametriranje strežnika, ki teče na samem PLK. Potrebno je določiti varnostne nastavitve, parametre za dostop do OPC UA vmesnika ter spremenljivke, ki želimo, da so dostopne za zajem s strani OPC UA odjemalca.

Zajem podatkov je aktualen samo v času, ko se produkt nahaja v področju obravnavanega dela procesne linije, ob drugih časih so meritve in shranjevanje podatkov nesmiselne, saj po nepotrebnem obremenjujemo vire za hranjenje podatkov (tokovi podatkov iz drugih virov, ki jih tukaj ne obravnavamo – drugi deli procesne linije).

Začetek in konec zajema podatkov simuliramo z namenskim gumbom (v realnih razmerah bi bil to signal, ki predstavlja prisotnost produkta).

C. Sistem za kalibracijo

Razvit je bil tudi modul, ki je namenjen avtomatski kalibraciji merilnikov (grafični vmesnik je prikazan na sliki 4). Uporabnik preko grafičnega vmesnika izbere nastavitve kalibracije:

- število vzorcev (N),
- referenčna temperatura (T_{REF} – iz neodvisnega merilnika – v realni aplikaciji bi bila lahko ta odčitana iz neodvisnega merilnika) in
- izbira arhiviranja rezultatov kalibracije

ter požene sistem. V delovni točki (T_{REF} – znana konstantna temperatura) se začnejo izvajati meritve, na podlagi katerih se ocenijo povprečne vrednosti, standardni odkloni in druge statistične vrednosti meritev posameznih merilnikov. Na podlagi teh rezultatov se izvede korekcija merilnikov ter generira poročilo o kalibraciji.

V arhivsko datoteko se preko sistema za arhiviranje meritev zapišejo:

- aritmetična sredina,
- standardna deviacija meritev in
- število meritev,

nato pa se ponovno izvede (N) meritev ter na podlagi teh določi merilno negotovost korigiranih merilnikov:

$$u(\hat{T}) = z \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{T}_i - T_{REF})^2}{N(N-1)}}, \quad (7)$$

kjer z predstavlja faktor razširitve (pri stopnji zaupanja 95% je enak 2).

Rezultat se nato za vsak merilnik zapiše v pripadajočo arhivsko datoteko.

D. Sistem za arhiviranje meritev

Razvit je bil zapisovalnik podatkov. Modul, ki nudi to storitev se izvaja v svoji niti, kar predstavlja neodvisno (časovno ter prostorsko gledano) zapisovanje od zajemanja podatkov. Pred ali med izvajanjem meritev se lahko omogoči zapisovanje meritev za kasnejšo obdelavo. Ob trenutku začetka izvajanja arhiviranja se kreira datoteka s smiselnim imenom ter vanjo shranjuje meritve. Sistem omogoča ločen zapis podatkov, ki se uporabijo pri kalibraciji merilnikov.

Podatki se zapisujejo v obliki časovnih vrst, ki ponuja neomejene možnosti kasnejše analize, ki lahko vključuje tudi storitve strojnega učenja za detekcijo anomalij na procesni liniji.

Isti sistem pa je namenjen tudi za arhiviranje rezultatov kalibracije merilnikov in služi za zagotavljanje sledljivosti postopkov kalibracije ter določanje merilnih negotovosti.

Sistem je modularno zasnovan tako, da se lahko podatki zapisujejo v formatu, ki ga želi uporabnik. To pomeni, da je sistem nadzornemu sistemu viden kot višji abstraktni sloj in se ga lahko neodvisno, brez posegov v nadzorni sistem, posodablja oziroma spreminja.

E. Demonstracija

Glavno stran, ki prikazuje osnovni pogled na procesno linijo in temperature posameznih merilnikov, kot že pokazano, prikazuje slika 3, druga stran, ki je namenjena avtomatski kalibraciji merilnikov pa je prikazana na sliki 4.

Posnetek demonstracije delovanja nadzornega sistema je dostopen na spletni povezavi: <https://1drv.ms/u/s!AndTi34I-kN5gfXU32iVHrG2JQbEQ?e=oKKKt7>.

Na začetku je videti odstopanja med posameznimi meritvami, zato se zažene posotpek kalibracije s 100-imi vzorci. Izrišejo se grafi meritev (v domačem okolju ni bilo možno zagotoviti povsem konstantne temperature, zato je na grafih moč opaziti trend padanja temperature) in statistični podatki kalibracije, v arhivski datoteki pa se zapišejo končni rezultati kalibracije. Na glavni strani pa je potem videti ujemanje med meritvami. V nekem trenutku je simuliran odvzeme merilnika iz procesne linije, na kar nas takoj opozori nadzorni sistem z ustrezno signalizacijo (meritev določenega merilnika se za določeno vrednost – ki jo nastavi uporabnik in ni stvar načrtovalca – razlikuje od ostalih dveh). Merilnik vstavimo nazaj in stanje se normalizira.

V nadaljevanju pa sta prikazana še odsek arhiviranih podatkov meritev ter okrnjen rezultat kalibracije.

Primer rezultatov kalibracije.

```
TS,mean,std,compensate,uncertainty,values
TS1,25.408,0.067,2.408,0.018,"[...]"
TS2,19.517,0.021,-3.483,0.0031,"[...]"
TS3,22.617,0.054,-0.383,0.013,"[...]"
```

LITERATURA

- [1] "Accurate calculation of PT100/PT1000 temperature from resistance." Dosegljivo: <https://techoverflow.net/2016/01/02/accurate-calculation-of-pt100pt1000-temperature-from-resistance/>. [Dostopano: 3. 5. 2022].
- [2] "How to obtain the temperature value from a thermistor measurement." Dosegljivo: <https://www.allaboutcircuits.com/industry-articles/how-to-obtain-the-temperature-value-from-a-thermistor-measurement/>. [Dostopano: 3. 5. 2022].
- [3] "Pyqt." Dosegljivo: <https://riverbankcomputing.com/software/pyqt/intro>. [Dostopano: 3. 4. 2022].

Primer arhivskih podatkov. Vrednosti niso ustrezno zaokrožene, saj v času pred kalibracijo še ni podatka merilnih negotovosti posameznih merilnikov.

```
ts,TS1,TS2,TS3,nr_acq_data
2022-05-06T22:35:48.913971,25.788,19.561,23.276,1
2022-05-06T22:35:49.118875,25.788,19.706,23.254,2
2022-05-06T22:35:49.322968,25.788,19.610,23.251,3
2022-05-06T22:35:49.525406,25.752,19.658,23.247,4
2022-05-06T22:35:49.726013,25.752,19.706,23.240,5
```