



# Ekološko snovanje elektronskih naprav

## ENOTA 12: Primer izdelave elektronske naprave

Ime avtorja: Andrej Sarjaš

12.1. Izdelava elektronske naprave.....	2
12.2. Izbira elementov naprave.....	3
12.2.1. Senzor pretoka zraka .....	3
12.2.2. Proporcionalni ventil.....	3
12.2.3. Mikrokrmilnik .....	4
12.2.4. Način vodenja pretoka.....	5
12.3. Izdelava tiskanine prototipa .....	6
12.3.1. Prvi prototip.....	6
12.3.2. Drugi prototip .....	8
12.3.3. Tretji prototip .....	8
12.4. Modeliranje sistema ter preizkus delovanja.....	10
12.5. Aplikacija za zajemanje in spremljanje podatkov iz naprave .....	11

Vsebina poglavja:

- Izdelava elektronske naprave
- Razvoj in nadgradnja produkta
- Prototipiranje in testiranje



## 2.1. Izdelava elektronske naprave

Poglejmo si primer izdelave elektronske naprave. Naročnik je naročil študijo ter izdelavo laboratorijske naprave za merjenje nizkih pretokov zraka pri procesu staranja transformatorskega olja. Transformatorsko olje služi za hlajenje transformatorskega sistema. Olje je ponavadi izdelano iz visoko rafiniranega materiala in mora biti stabilno pri visokih temperaturah. Prav tako mora olje imeti odlične izolacijske lastnosti, saj mora preprečevati korono (nizko energetska tlenje) in iskrenje. Lastnost olja je pomembna pri zanesljivosti energetskih naprav in prav iz tega razloga je določen standard ter postopek za testiranje olja.

Preden se lotimo principa izdelave, namenimo nekaj besed funkciji naprave. Postopek staranja transformatorskega olja je preizkus kvalitete olja. S konstantnim pretokom zraka skozi olje, pri temperaturi 120°C povzročimo proces hitrega staranja. Če skozi 0.5dl olja 10 dni konstantno spuščamo zrak s pretokom 1l/h pri temperaturi 120 °C, dosežemo starost olja, ki je ekvivalent 25 letni uporabi. Prisilno starano olje se nadalje testira v kemičnih laboratorijih, da se ugotovi njegova kemična sestava ter kvaliteta. Izdelava naprave za prisilni proces staranja sestoji iz dokumentacije, ki vključuje funkcijsko ter razgledno analizo. Razgledna analiz določa pregled naprav ter elementov obstoječih na trgu. Funkcijska dokumentacija določa tip izbranih elementov ter opisuje delovanje naprave. Po poizvedbi obstoječih rešitev, smo prišli do zaključka, da bomo vse elemente naprave izdelati sami. Tukaj smo imeli v mislim uporaba industrijskih regulatorjev pretoka, ki so izvedeni v obliki samostojnih naprav. Industrijske naprave lahko nadalje preko komunikacijskih vmesnikov priključimo na lastni sistem ali platformo. Trenutne industrijske rešitve ne ponujajo reguliranje nizkih pretokov, kot zahteva standard. Prav tako cena za posamezno enoto je zelo visoka. Naslednja težava je bila izbira cenovno ugodnega, zanesljivega ter natančnega senzorja. Pretok 1l/h spada v področje nizkih pretok, kjer klasični pristopi merjena z zaslonko niso več tako precizni in zanesljivi. Za vodenje pretoka skozi merilno mesto smo izbrali primerni proporcionalni ventil. Obe napravi smo povezali na mikrokrmilnik, ki je skrbel za zaprto-zančno vodenje pretoka ter komunikacijo z ostalimi zunanji napravami.

Določene funkcionalne lastnosti naprave:

- Natančnost naprave  $\pm 0.25$ l/h.
- Vodenje pretokov od 0.5-2l/h.
- Naprava mora biti čim manjša.
- Visoka zanesljivost.
- Komunikacija z osebnim računalnikom: USB, Bluetooth.
- Industrijska komunikacija RS485.
- Windows aplikacija za zajemanje in shranjevanje podatkov tekom testa.



Poglavitni ekološki vidiki pri snovanju naprave.

- Uporaba elementov, ki ne vsebujejo zdravju škodljivih snovi (svinec, živo srebro...).
- Zanesljivost.
- Čim manjša poraba energije.
- Minimizacija naprave ter čim manj uporabljenih elementov pri enaki zanesljivosti.
- Teža.

## 12.2. Izbira elementov naprave

Pri izbiri elementov smo se osredotočili na njihov zanesljivost, natančnost ter ceno.

### 12.2.1. Senzor pretoka zraka

Poglavitni kriterij pri določitvi sensorja je bilo želeno merilno območje [0.5–2] l/h ter zadostna občutljivost. Na trgu je zelo omejen nabor sensorjev za merjenje nizkih pretokov, ki so dimenzijsko in cenovno ugodni. Za izdelavo regulatorja smo potrebovali senzor, ki je sposoben komunicirati s krmilnikom po enem izmed klasičnih komunikacijskih vmesnikov: analogen vhod, vodilo I2C ali SPI. Izbrali smo senzor z vodilom I2C, temperaturno kompenzacijo in linearno merilno skalo. Tako smo se izognili še dodatni potrebi po programski linearizaciji ter dodatni kompenzaciji merilne napake. Izbrani senzor WBI prikazuje slika 1. Senzor izpolnjuje vse postavljene kriterije; merilno območje [0.1–2.5] l/h, resolucija 0.1l/h, komunikacija I2C, čas merjenja 5ms, dimenzije w/h/d-3.5x1x2.5cm.



Slika 1. WBI senzor pretoka zraka.

### 12.2.2. Proporcionalni ventil

Tudi pri izbiri ventila smo imeli postavljene podobne zahteve, kot pri izbiri sensorja. Ventil mora zagotavljati zvezno vodenje, primeren mora biti za male pretoke



zraka, cenovno sprejemljiv, malih dimenzij in z linearnim delovanjem. V ta namen smo izbrali družino linearnih ventilov VSO Low Flow proizvajalca Parker, slika 2. Ventil lahko zvezno regulira pretoke zraka od [0.01–10] l/h, dimenzija w/h/d-2x3x2cm ter ima delovno področje od 0-2Bar.



*Slika 2. Proporcionalni ventil.*

Za vodenje ventila z mikrokrmilnikom je potrebno skonstruirati prilagoditveno-krmilno vezje. Ventili bodo vodili s pomočjo PWM signala iz mikrokrmilnika. Za namene ekološkega snovanja bomo predstavili več iteracij razvoja krmilnega vezja. Poglavitni kriterij vezja je mala dimenzija, nizka teža, preprostost ter poraba energije.

### 12.2.3. Mikrokrmilnik

Za potrebe vodenja smo izbrali mikrokrmilnik, ki je sposoben izvajanja vseh funkcij regulacijskega algoritma, zajemanja podatkov ter komunikacija z zunanjimi napravami. Pri izbiri krmilnika smo upoštevali več dejavnikov, kot so frekvenca delovanja procesne enote, število vhodno-izhodnih priključkov. Iskali smo krmilnik s približno toliko priključki, kot smo jih potrebovali, nizko porabo energije ter cenovno ugoden. Prav tako smo med kriterije določitve ustreznosti mikrokrmilnika vključili zahtevo po zadostni zmogljivosti obdelave podatkov (AD pretvorbe, časovniki itd.). Za izdelavo prototipa regulatorja nizkih pretokov zraka smo izbrali 32-bitni ARM mikrokrmilnik proizvajalca STMicroelectronics družine F1xx in model STM32F103C8T6. Prav družina ARM STM32F1xx je ravnovesje med zmogljivostjo ter energijsko varčnostjo. Razvojni modul s STM32F103C8T6 je predstavljen na sliki 3.



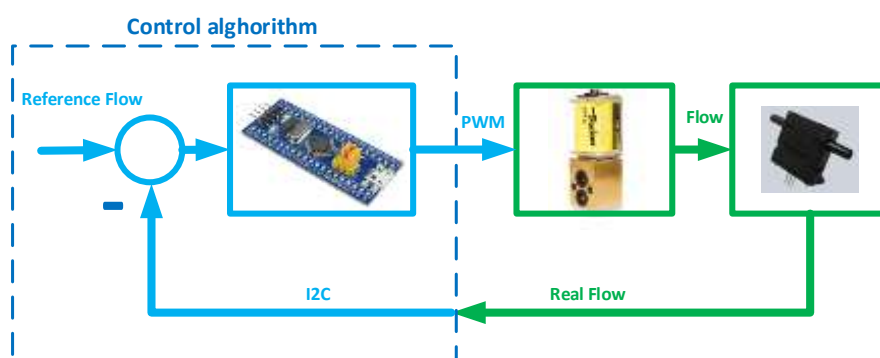
*Slika 3. Mikrokrmilnik.*



Mikrokontroler STM32F103C8T6 je 48 pinov in ima zadosti komunikacijskih modulov: 4xUSART, 2xI2C, 3xSPI. En USART komunikacijski modul bomo uporabili za industrijsko komunikacijo preko RS485, drugega pa za povezavo z osebnim računalnikom preko USB ali Bluetooth vmesnika. Senzor pretoka WBI bomo priključili preko vmesnika I2C. Za vodenje ventila bomo uporabili digitalni izhod s PWM modulacijo. Nekaj digitalnih izhodov bomo uporabili za statusne in prikazovalne lučke. Napravi bomo dodali nekaj tipk, za fizični zagon naprave, določitev načina delovanja ter izklop naprave. Napravo je možno zagnati tudi iz aplikacije za zajemanje podatkov.

#### 12.2.4. Način vodenja pretoka

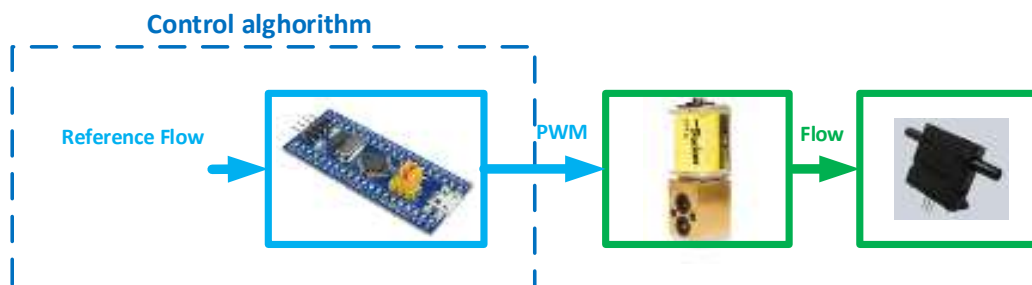
Pri načinu vodenja smo se odločili za princip zaprto-zančnega vodenja, slika 4. Zaprto-zančno vodenje nam omogoča višjo zanesljivost, boljšo odpravo motenj ter natančnost. Zaprto-zančno vodenje deluje po principu merjenja izhodne veličine ter povratnega prenosa informacije v sistem, kjer se izračuna napaka vodenja. Napaka vodenja se izračuna glede na željeno vrednost in trenutno meritev iz sensorja. Napako vodenja nadalje vodimo v regulator. Regulator preračuna potrebno izhodno veličino s katero vpliva na sistem. Za dan sistem smo uporabili klasično PID strukturo regulatorja. PID regulator je zelo uveljavljena regulacijska struktura v industrijskih okoljih. Odlikujeta preprosto ter relativno visoka zanesljivost delovanja. PID algoritem se izvaja v mikrokontrolerju.



Slika 4. Zaprto-zančno vodenje.

Zaprto-zančno vodenje glede na odprto-zančnega vodenje je kompleksnejše in zahteva več računske moči. Odprto-zančno vodenje je preprostejše toda manj zanesljivo, saj ne uporablja povrtane informacije iz izhoda, slika 5. Prav tako bi v našem primeru bilo odprto-zančno vodenje bistveno cenejše, saj ne bi potrebovali sensorja pretoka, ki je v sistemu vodenja najdražja komponenta.





Slika 5. Odprto-zančno vodenje.

Struktura PID regulatorja je predstavljena z naslednjim izrazom:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Iz enačbe je razvidno, da je PID algoritem sestavljen iz treh delov P, I in D. P-del pomeni proporcionalni, kar pomeni, da regulacijsko napako množimo s konstanto. P-del izboljša dinamične lastnosti zaprte zanke. I-del odpravlja napako vodenje, kar je pomembno za natančnost, toda na drugi strani zniža dinamiko sistema. Dinamika sistema pomeni, da regulator potrebuje več časa, da doseže referenčno vrednost. D-del zvišuje dinamiko sistema ter ojačuje merilni šum iz sensorja. Pravilna nastavitve PID-ja je kompromis med natančnostjo in hitrostjo.

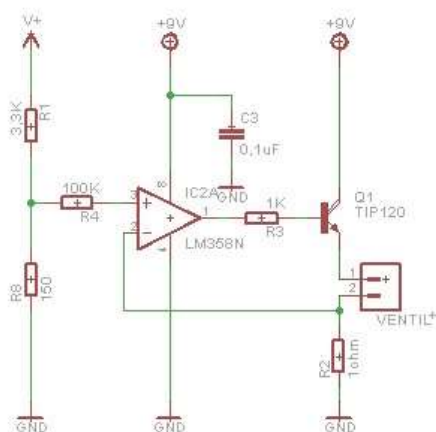
## 12.3. Izdelava tiskanine prototipa

Izdelava in načrtovanje regulatorja pretoka je potekalo v več stopnjah. Prvi prototipi niso dali zadovoljivih in zadostnih rezultatov. Težave so se pojavile z velikostjo naprave, visoke delovne temperature krmilne elektronike ter preveč uporabljenih komponent. Tako smo izdelali več prototipov, kjer smo se poglavitno ukvarjali z krmilno elektroniko ventila.

### 12.3.1. Prvi prototip

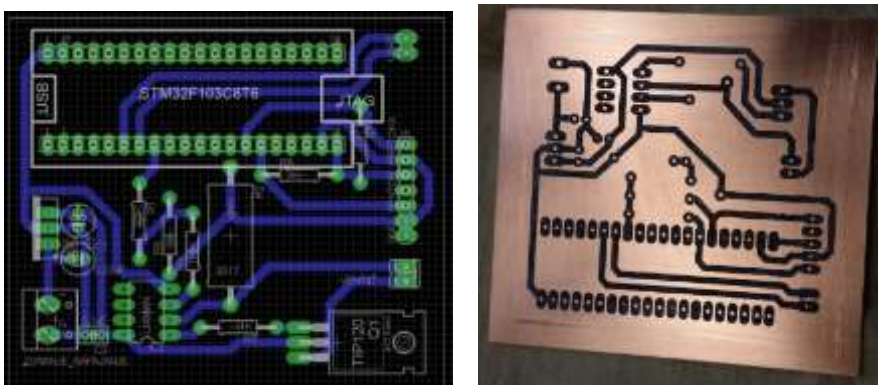
Za prvi prototip smo uporabili krmilno shemo ventila proizvajalca Parker. Za delovanje mikrokrmilnika smo dodali napetostni stabilizator ter priključne sponke za zunanjo napajanje ventila. Predpisana napajalna napetost je znašala 9V. Slika 6. predstavlja prvo verzijo krmilne elektronike ventila. Kot smo že omenili, bomo ventil vodili s PWM signalom, frekvence 10kHz. Krmilna elektronika uporablja operacijski ojačevalnik LM358, ki skrbi za stabilen tok skozi tuljavo. Za stikalni element se uporablja tranzistor TIP120. TIP120 je Darlingtonova vezava dveh BJT tranzistorjev.





Slika 6. Krmilno vezje ventila.

Načrtna tiskanina naprave v programu Altium z napajalnima priključkoma ter podnožjem za mikrokrmilnik, je predstavljen na sliki 7,8.



Slika 7. Izgled tiskanine naprave.



Slika 8. Končni izgled prototipa.

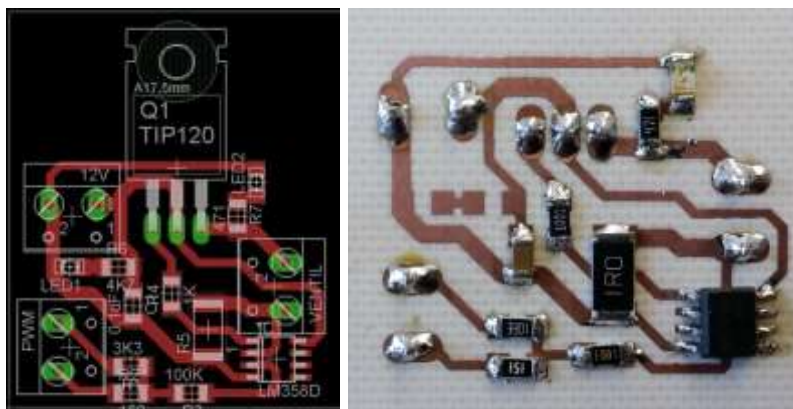




Prva verzija prototipa je bila popolnoma delujoča naprava. Največja težava tega prototipa je bila prekomerno gretje stikalnega elementa TIP120. Izmerjena temperatura stikalnega elementa je znašala blizu 70°C. Za dolgoročno delovanje in vgradnjo v ohišje bi bilo potrebno dodati hladilno telo. Dimenzija vezja je znašala 5x5cm.

### 12.3.2. Drugi prototip

Drugi prototip je baziral na istem vezju le, da smo krmilno vezje predimenzionirali in zmanjšali dimenzijo. Vse elemente razen stikalnega elementa TIP120 smo zamenjali z elementi na osnovi SMD tehnologije. SMD tehnologija omogoča izdelavo manjših elementov z istimi karakteristikami. Iz stališča ekološkega snovanja pomeni, da smo zamenjali element z elementi, ki so lažji in izdelani iz manj materiala. Drugi prototip vezja je prikazan na sliki 9.



*Slika 9. Drugi prototip vezja.*

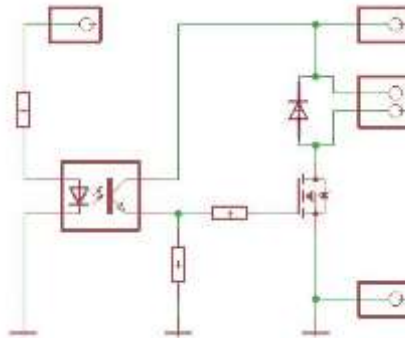
V drugem prototipu smo vezje zmanjšali za polovico. Dimenzija vezja je bila 2.3x2.2cm. Toda poglobitni problem gretje stikalnega tranzistorja je ostal.

### 12.3.3. Tretji prototip

V tretjem prototipu smo se odločili, da načrtamo samostojno vezje, kjer bomo uporabljali stikalni element, ki je sposoben skoraj brezizgubnega preklapljanja. Odločilo smo se, da načrtamo vezje z MOSFET stikalnim elementom. Ker je vodenje pretoka izvedeno v zaprti zanki, krmilna elektronika ventila ne potrebuje stabilizacije toka skozi ventil, kot pri prejšnjem prototipu. Iz vezja smo odstranili še operacijski ojačevalnik. Krmilna shema ventila je predstavljena na sliki 10.

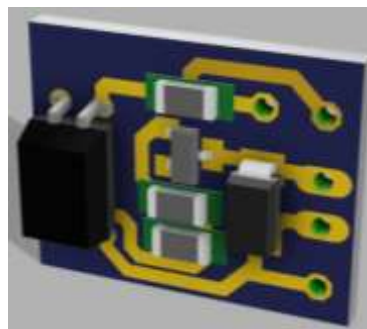






Slika 10. Tretji prototip krmilnega vezja s MOSFET tranzistorjem.

Stikalni element MOSFET v SMD tehnologiji je petkrat manjši od tranzistorja TIP120. Zadnji prototip je deloval brez prekomernega gretja. Temperatura MOSFET-a pri sobni temperaturi ni bila višja od 35°C, kar pomeni da smo imeli manjše izgube, kot pri prejšnjih verzija. Dimenzija vezja je sedaj znaša 1.2x1.5cm in uporabili smo manj in cenejše elemente. Za primerjavo lahko povemo, da je tranzistor TIP120 bil trikrat dražji, kot SMD verzija MOSFET-a. Pri zadnji verziji smo dodali optični sklopnik, ki služi za galvansko ločitev ter zaščito mikrokrmilnika. Končni izgled krmilnega vezja je na slika 11.



Slika 11. Končni izgled vezja.

Zadnji prototip je bil tudi končna verzija za izdelavo celotne naprave. Kratka primerjav treh prototipov prikazuje table 1.

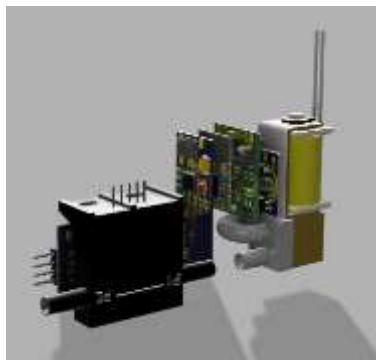
Characteristics	Ver. 1 (TIP120)	Ver. 2 (TIP120)	Ver. 3 (MOSFET)
<b>Dimension</b>	5x5cm	2.3x2.2cm	1.2x1.5cm
<b>Number of elements</b>	8	8 (SMD)	5 (SMD)
<b>Temperature of the switch</b>	70°C	70°C	35°C
<b>Weight</b>	16g	11g	3g
<b>Average Price</b>	17€	13€	8€

Table 1. Primerjava treh prototipov vezja.



## 12.4. Modeliranje sistema ter preizkus delovanja

Končni izgled celotne naprave je bil prikazan s pomočjo 3D modeliranja. S pomočjo 3D modeliranja smo prikazali celoten izgled naprave ter njeno notranjo sestavo. Slika 12-13. prikazuje končen izgled naprave ter njene notranje komponente.

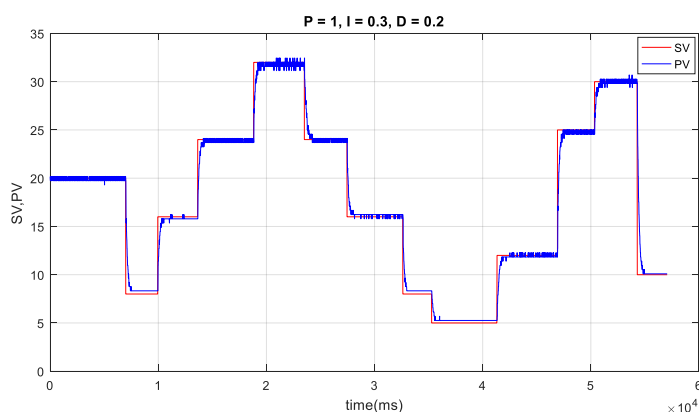


Slika 12. Prikazuje postavitev elementov brez ohišja.



Slika 13. Postavitev elementov v ohišje naprave.

Učinkovitost naprave je bila testirana po 240 urah delovanja. Slika 14 prikazuje vodenja pretoka in sledenje referenčnemu pretoku.

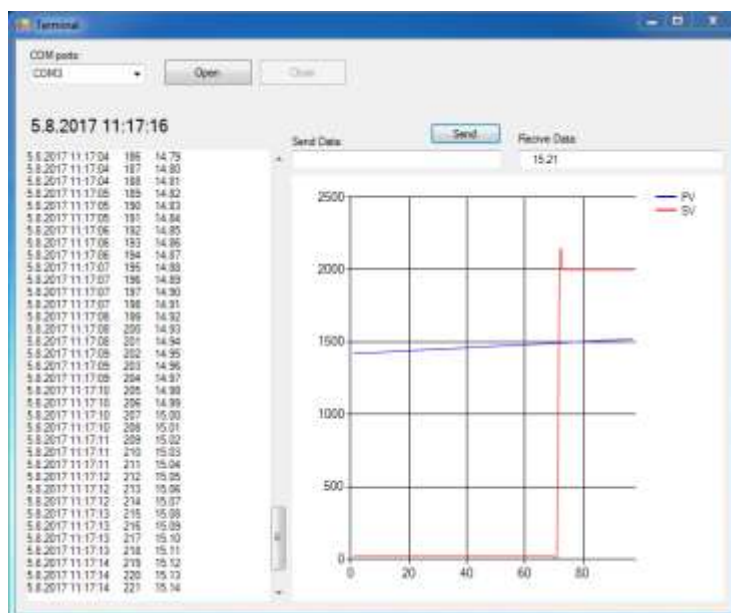


Slika 14. Vodenje pretoka. Rdeča- referenčna vrednost, Modra-realna vrednost pretoka.



## 12.5. Aplikacija za zajemanje in spremljanje podatkov iz naprave

Za potrebe kontinuiranega prikazovanja in beleženja trenutnih podatkov je bila izdelana Windows aplikacija, slika 15. Aplikacija je zasnovana tako, da prikazuje merjene rezultate in jih shranjuje v datoteko. V primeru izpada računalnika se datoteka za shranjevanje podatkov kreira vsako uro.



Slika 15. Aplikacija za prikaz in shranjevanje podatkov.

Po dokončni pilotski verziji naprave smo, naredili še primerjavo z industrijsko verzijo regulatorja pretoka. Trenutna verzija je zanesljiva, natančnost 0.1l/h in uporablja minimalne nabor elementov. Cena celotnega regulatorja znaša okrog 150€, kar je v primerjavi z najcenejšo industrijsko različico, ki ima natančnost 0.8l/h kar pet krat manj.

