

UNIVERZA V LJUBLJANI

Fakulteta za elektrotehniko

Blaž Makuc

**SISTEM ZA REGULACIJO ZRAČNEGA
PRETOKA IN NADZOR ČISTOSTI ZRAČNIH
FILTROV**

DIPLOMSKO DELO UNIVERZITETNEGA ŠTUDIJA

Mentor: doc. dr. Boštjan Murovec

Ljubljana, 2010

Zahvala

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Boštjanu Murovcu za strokovne nasvete in pripombe ter pregledovanje diplomske naloge.

Zahvaljujem se tudi zaposlenim v podjetju Smarteh, še posebej mag. Dragu Rijavcu, za pomoč pri izpeljavi projekta.

Predvsem pa se zahvaljujem staršema za podporo in vzpodbude skozi celoten čas mojega študija.

Povzetek

Diplomska naloga temelji na dveh produktih podjetja Smarteh d.o.o. iz Tolmina. Prvi je namenjen nadzoru čistosti filtrov zraka in se imenuje Filter sistem. Filtri se med obratovanjem zamažejo in posledično vedno slabše odstranjujejo nečistoče iz zraka. Poleg tega pa se na njih ustvarja vse večji padec tlaka, ki v sistem vnaša izgubo energije. Z merjenjem padca tlaka na filterjih lahko ugotovimo, kdaj je določen filter izrabljen in potreben zamenjave.

Drugi izdelek podjetja, imenovan Fan sistem, omogoča regulacijo pretoka zraka. Krmilnik, kot ključni element tega sistema, na podlagi želene vrednosti padca tlaka, ki ga povzroča pretočni zrak, in dejanske izmerjene vrednosti regulira frekvenco ventilatorja, ki poganja zrak.

Oba izdelka, katerih delovanje je medsebojno povezano, skupaj sestavljata sistem Pollustop, ki namenjen uporabi v večjih kuhinjah in prostorih, kjer se zadržuje večje število ljudi. Da bi združen sistem deloval pravilno, je potrebna kalibracija. Naša naloga je bila izpopolnitev sistema in izdelava njegove avtomatske kalibracije.

Ključne besede: filtri zraka, Filter sistem, pretok zraka, regulacija, Fan sistem, Pollustop, avtomatska kalibracija.

Abstract

This thesis is based on two products of company Smarteh d.o.o. from Tolmin. The first one is used to supervise the cleanliness of air filters and is called Filter system. During the operating time filters become more and more dirty. This results in reduced contaminants removal from the fluid and increased power consumption due to increased pressure drop on filters. Measuring the pressure drop on filters enables us to detect dirty filters that should be replaced.

The second product is used for regulating the airflow and is called Fan system. The system's controller regulates the airflow based on the reference pressure drop and the measured pressure drop.

Both products combined form a system called Pollustop, which is intended for larger kitchens, hotels and other places with many people. For the system to work properly, it has to be calibrated and set right. Our work was based on improving the Pollustop system and applying an automated calibration to the system.

Keywords: air filters, Filter system, airflow, regulation, Fan system, Pollustop system, automated calibration.

Kazalo

1. Uvod	1
2. Strojna oprema sistema Pollustop.....	3
2.1. Filtracija in filtri	5
2.1.1. Mehanizmi zajema mehanskih delcev	6
2.1.2. Model filtra	8
2.1.3. Uporabljeni filtri	14
2.2. Povezave elementov sistema Pollustop	17
2.2.1. Vodilo I2C	17
2.3. Sklop Filter sistem	19
2.3.1. Modul LPC-2.C05	19
2.3.2. Modul LPC-2.DO6	20
2.3.3. Modul LHC-1.VV3	21
2.3.4. Krmilnik LHC-1.MU3.....	22
2.3.5. Konzola Filter sistema	23
2.4. Sklop Fan sistem.....	24
2.4.1 Modul LPC-2.DI5.....	25
2.4.2. Modul LHC-1.VV1	25
2.4.3. Krmilnik LHC-1.MU2.....	26
2.4.4. Konzola Fan sistema.....	29
3. Programska oprema	31
3.1. Razvojno okolje Cypress PSoC designer 5.0	31
3.2. Program Lrc Tester	32
3.3. Program Lrc Many	34
3.4. Program GSM Manager	34
4. PID regulacija	35
4.1. Proporcionalni člen P	36
4.2. Integrirni člen I	37
4.3. Diferencirni člen D	39
4.4. Združeni členi P, I in D v PID regulatorju	39
4.5. Digitalna izvedba PID regulatorja	41
4.6. Nastavitev PID regulatorja	43

4.6.1. Metoda Ziegler - Nichols z nihajnim preizkusom	43
5. Nastavitev in spremljanje delovanja sistema Pollustop	48
5.1. Nastavitev in spremljanje delovanja Filter sistema.....	48
5.1.1. Nastavitev parametrov krmilnika LHC-1.MU3	48
5.1.2. Spremljaje delovanja krmilnika LHC-1.MU3	50
5.1.3. Nastavitev parametrov konzole Filter sistema	53
5.1.4. Nastavitev modula LPC-1.C05	57
5.2. Nastavitev in spremljanje delovanja Fan sistema	58
5.2.1. Nastavitev parametrov krmilnika LHC-1.MU2	58
5.2.2. Spremljaje delovanja krmilnika LHC-1.MU2	60
5.2.3. Nastavitev parametrov konzole Fan sistema.....	62
6. Delovanje sistema Pollustop	64
6.1. Kalibracija sistema	66
6.2. Alarm za menjavo filtrov	67
6.3. Alarm prekoračitve sistemskega tlaka	67
7. Zaključek.....	69
8. Literatura.....	70

Kazalo slik

Slika 1: Shema sistema Pollustop.....	4
Slika 2: Velikosti nečistoč v zraku [1].....	6
Slika 3: Mehanizmi globinske filtracije [1].....	7
Slika 4: Koncept povezave naprav preko I2C vodila	18
Slika 5: Prenos podatkov preko I2C vodila [7]	19
Slika 6: GSM komunikacijski modul LPC-2.C05	20
Slika 7: Modul LPC-2.DO6 (levo), vezalna shema (desno).....	20
Slika 8: Modul LHC-1.VV3	21
Slika 9: Modul LHC-1.MU3	23
Slika 10: Konzola Filter sistema.....	23
Slika 11: Modul LPC-2.DI5 (levo) s pripadajočo vezalno shemo (desno)	25
Slika 12: Modul LHC-1.VV1	26
Slika 13: Krmilnik LHC-1.MU2	27
Slika 14: Pulzirajoč signal	27
Slika 15: Bločni diagram pulzno širinske modulacije [13]	28
Slika 16: Konzola Fan sistema	30
Slika 17: Razvojno okolje Cypress PSoC designer 5.0.....	31
Slika 18: Glavno okno programa Lrc Tester	32
Slika 19: Lrc Tester – nastave komunikacije in beleženja podatkov (levo), podrobnejša nastavitev beleženja podatkov (desno)	33
Slika 20: Regulacijska shema v časovnem prostoru [12].....	35
Slika 21: Regulacijska shema v prostoru s [12]	35
Slika 22: Bločni diagram PID regulatorja [12].....	39
Slika 23: Odziv PID regulatorja na stopničast signal pogreška: a) idealni primer b) realni primer [12].....	40
Slika 24: Metoda Ziegler-Nichols z nihajnim preizkusom [12]	43
Slika 25: Lrc Tester, EEPROM 1 krmilnika Filter sistema.....	48
Slika 26: Lrc Tester, EEPROM 2 krmilnika Filter sistema.....	50
Slika 27: LRC Tester, RAM 1 krmilnika Filter sistema.....	51
Slika 28: Osnovno okno programa Lrc Many	53
Slika 29: Povezava s konzolo (levo), izbor vrste povezave (desno)	54

Slika 30: Okno konzole Filter sistema (levo), nastavitve zvočnega alarma (desno)	55
Slika 31: Nastavitveno okno za periodo zvočnega alarma (levo), shranjevanje parametrov (desno).....	55
Slika 32: Okno programa Lrc Many s podatki za krmilnik Filter sistema.....	56
Slika 33: Nastavitev SIM kartice s programom GSM Manager	57
Slika 34: Preverjanje stanja filtrov (levo), alarmiranje preko modula LPC-2.C05 (desno).....	58
Slika 35: Lrc Tester, EEPROM krmilnika Fan sistema	59
Slika 36: Lrc Tester, RAM krmilnika LHC-1.MU2	60
Slika 37: Okno s parametri konzole Fan sistema v Lrc Many-ju.....	62
Slika 38: Okno v Lrc Many-ju s parametri za krmilnik Fan sistema.....	63
Slika 39: Shema sistema Pollustop	64

Kazalo grafov

Graf 1: Padec tlaka v odvisnosti od pretoka zraka ter vnesenega prahu za filter CL-66-10-F8 LK L=635 proizvajalca Halton [16]	10
Graf 2: Padec tlaka v odvisnosti od pretoka zraka	12
Graf 3: Padec tlaka v odvisnosti od pretoka zraka za vrečni filter F5 proizvajalca Halton	13
Graf 4: Padec tlaka v odvisnosti od pretoka zraka za vrečni filter F6 proizvajalca Halton	13
Graf 5: Padec tlaka v odvisnosti od pretoka zraka za vrečni filter G3 proizvajalca Halton.....	13
Graf 6: Karakteristika filtra CLP-ZF-P-592-592-46-H2-G4-S-P in pripadajoča polinomska regresijska krivulja 2. reda.....	14
Graf 7: Karakteristika filtra CL-66-10-F8 LK L=635 in pripadajoča polinomska regresijska krivulja 2. reda.....	15
Graf 8: Karakteristika filtra CLP-RP-P-593-593-292-4-H12-GF-P in pripadajoča polinomska regresijska krivulja 2. reda.....	16
Graf 9: Odziv sistema pri naraščajočem ojačanju KP in pri $KI = 0$ ter $KD = 0$	45
Graf 10: Odziv sistema pri ojačanjih $KP = 5,3$, $KI = 1,2$ in $KD = 5,9$	46
Graf 11: Odziv sistema pri ojačanjih $KP = 2,5$, $KI = 2,5$ in $KD = 2,5$	46
Graf 12: Prilagajanje regulatorja na motnje	47

Kazalo tabel

Tabela 1: Podatki iz karakteristike filtra in nadaljnji izračuni	11
Tabela 2: Karakteristike senzorja tlaka [6]	22
Tabela 3: Parametri regulatorjev po metodi Ziegler – Nichols [12]	44

1. Uvod

Človek v današnjem času s svojim delovanjem na različne načine vpliva na svoje okolje. Velik del tega predstavlja vpliv človeka na zrak, ki je ključnega pomena za človekovo zdravje in počutje. V industrijskih in storitvenih procesih se v zrak dnevno vnašajo ogromne količine nečistoč. Ker so zahteve na področju ekologije in kakovosti človekovega bivalnega prostora vedno višje, je med drugim vse bolj pomemben nadzor čistosti zraka.

Ključno vlogo pri zagotavljanju čistega zraka igrajo filtri. S kombinacijo različnih filtrov lahko iz zraka odstranimo večino neželenih delcev. Seveda je potrebno zrak usmeriti skozi filtre, saj drugače slednji ne morejo opraviti svojega dela. V procesih, kjer v zrak vnašamo nečistoče, je pomembno, da ves onesnažen zrak zajamemo v cevi, ki peljejo do filtrov. Da preprečimo uhajanje zraka, na mestu, kjer se onesnažen zrak izsesava iz procesa, zagotovimo zadosten podtlak z ustreznimi ventilatorji.

Ti po prezračevalnih ceveh poganjajo zrak od mesta vnosa nečistoč preko filtrov do izhodnega mesta. Velikost zračnega pretoka nadziramo s frekvenco ventilatorja. Če je slednja prenizka, nam iz sistema uhaja umazan zrak, medtem ko pri previsoki frekvenci po nepotrebnem trošimo preveč energije za pogon ventilatorjev. Ustrezno delovanje zagotovimo z regulatorjem, ki na podlagi informacije o želenem in dejanskem pretoku zraka regulira ventilator.

Umazanija, ki se pri filtriranju zraka nabira v filtrih, zmanjšuje pretočnost filtrov, kar se odraža v povišanem padcu tlaka na filtrih. Le-ta povzroči znižan pretok zraka, kar vodi v slabše izsesavanje umazanega zraka. Da bi zagotovili ustrezen pretok zraka, mora regulator dvigniti frekvenco ventilatorja, ki poganja zrak.

S časom se filtri tako zamažejo in ne opravljajo svoje funkcije zadovoljivo. Delci, ki so jih predhodno zadržali, pričnejo uhajati iz filtrov, hkrati pa zaradi premajhne pretočnosti povzročajo preveliko oviro v sistemu in s tem izgubo energije. Zaradi teh razlogov je nujen stalen nadzor stanja filtrov, saj le tako lahko pravočasno ugotovimo, kdaj so iztrošeni.

Snov diplomskega dela je sistem, ki omogoča opisan nadzor filtrov in pretoka zraka. Ta sistem se imenuje Pollustop in je razdeljen na dva dela. Prvi omogoča nadzor čistosti filtrov in se imenuje Filter sistem, drugi pa regulira pretok zraka skozi filtre in se imenuje Fan sistem. Sistem Pollustop je primeren za uporabo v večjih kuhinjah in prostorih, kjer se zadržuje večje število ljudi. To so razni nakupovalni centri, hoteli ali restavracije. V nadaljevanju diplome je najprej opisana strojna oprema sistema Pollustop, nato programska oprema, tej sledi opis PID regulacije pretoka zraka in na koncu še nastavitev ter delovanje sistema.

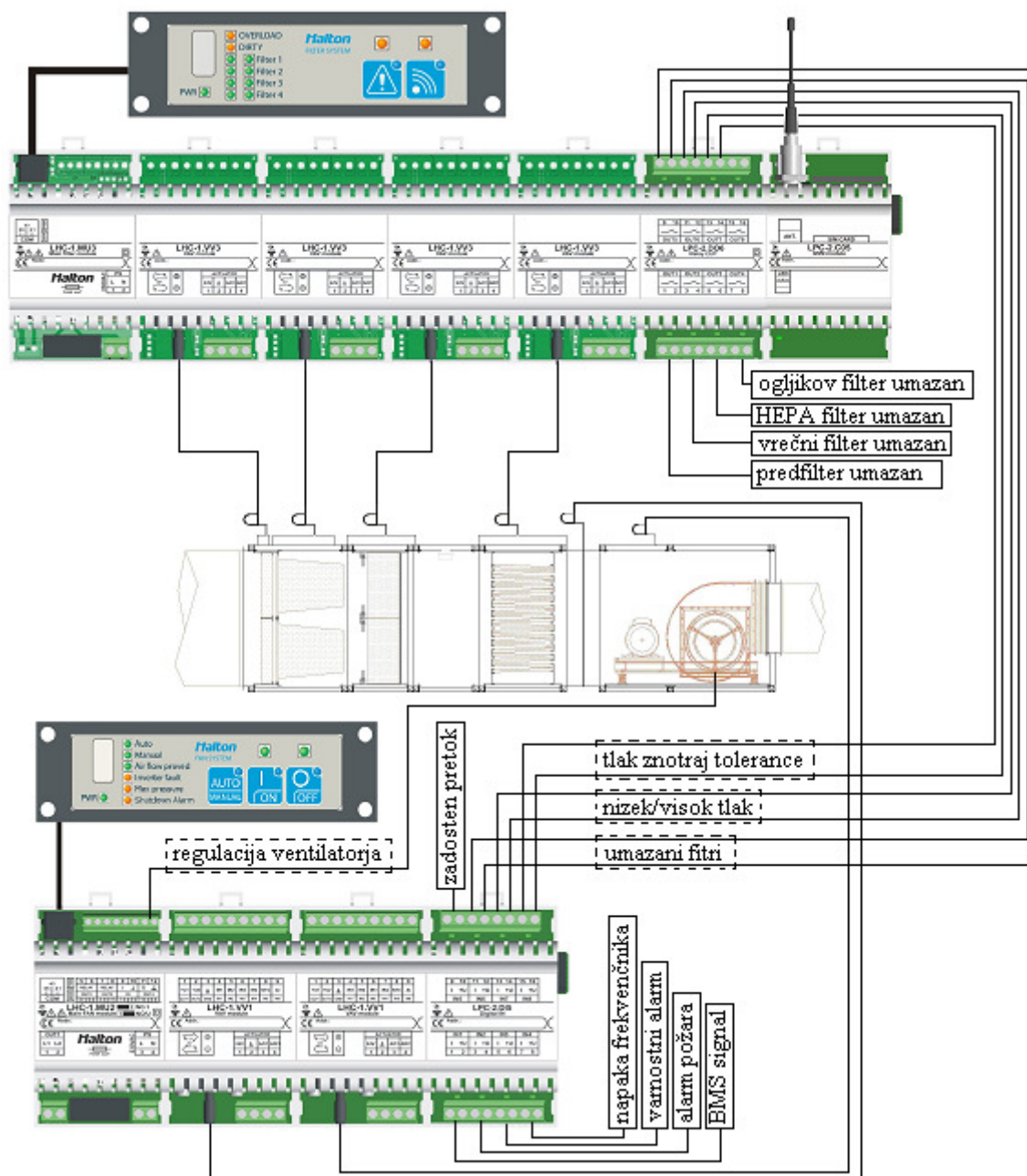
2. Strojna oprema sistema Pollustop

Spodnja slika prikazuje zasnovo sistema Pollustop. V zgornjem delu slike se nahaja Filter sistem. Sestavljajo ga konzola, krmilnik in šest modulov, serijsko povezanih na krmilnik. Prvi štiri moduli so merilniki tlaka. Sledi modul z digitalnimi izhodi in, kot zadnji, modul, ki omogoča komunikacijo preko GSM omrežja. Merilni moduli preko cevi zajemajo padce tlaka na filtrih, katerih stanje nadzira sistem. Modul z digitalnimi izhodi omogoča javljanje alarmov in povezavo s Fan sistemom, ki predstavlja drugi del sistema Pollustop. Na krmilnik Filter sistema je povezana konzola, preko katere ima uporabnik stik s sistemom. Na njej so prikazane osnovne informacije, kot je stopnja umazanosti filtrov in stanje komunikacije s krmilnikom. Dostop do dodatnih informacij je omogočen z dlančnikom, s katerim se uporabnik poveže na konzolo.

Na spodnjem delu slike 1 se nahaja Fan sistem. Tudi tu predstavlja konzola zgornji nivo sistema, saj omogoča uporabniku nadzor sistema. Na čelni plošči konzole so prikazane osnovne informacije o sistemu, do dodatnih podatkov pa lahko uporabnik dostopa preko dlančnika. Ključni element za delovanje sistema je krmilnik. Ta nadzira delovanje ventilatorja, ki poganja zrak skozi filtre. Za izvršitev naloge krmilnik potrebuje dva modula za merjenje diferencialnega tlaka in modul z digitalnimi vhodi. Prvi merilnik tlaka je uporabljen za regulacijo pretoka zraka, drugi pa za nadzor obremenitve ventilatorja. Digitalni vhodi omogočajo povezano delovanje Fan sistema in Filter sistema ter upoštevanje alarmov z zunanjih naprav.

V nadaljevanju so najprej opisani filtracija zraka in uporabljeni filtri. Slednji sicer niso del sistema Pollustop, vendar je njihovo obnašanje ključno za razumevanje delovanja sistema.

Naslednje podpoglavje opisuje povezavo elementov sistema Pollustop. Sledita mu še dve podpoglavji z opisom elementov Filter sistema in Fan sistema.



Slika 1: Shema sistema Pollustop

2.1. Filtracija in filtri

Filtracijo definiramo kot ločevanje ene snovi od druge. Filtri nam omogočajo odstranjevanje drobnih mehanskih delcev in neželenih plinov iz zraka. S pravilno kombinacijo različnih filtrov lahko onesnažen zrak v veliki meri očistimo. Koliko delcev lahko iz zraka odstranimo, je odvisno od učinkovitosti filtra, ki je definirano kot razmerje med številom delcev, zajetih v filtru, in vsemi delci v toku skozi filter [1,2]:

$$e = \frac{N_f}{N} \cdot 100 \quad (1)$$

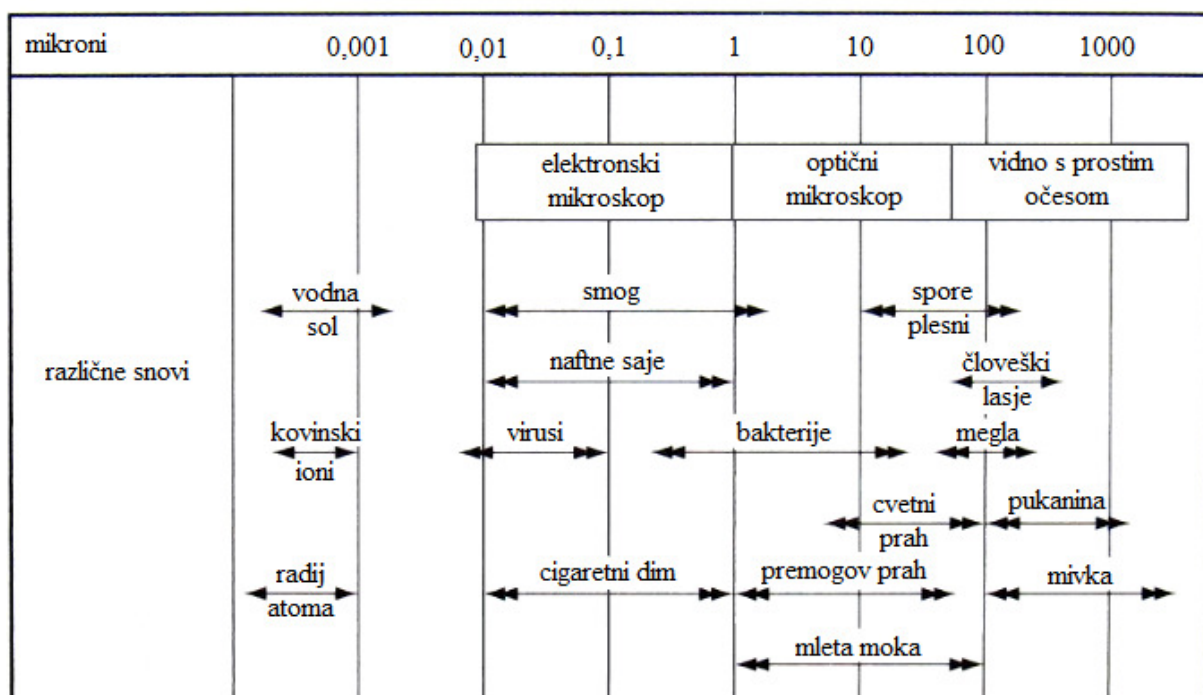
e ... učinkovitost filtra,

N_f ... delci, zajeti v filtru,

N ... delci v toku skozi filter.

Učinkovitost filtra se določi za posamezno območje velikosti delcev ali glede na celotno število delcev vseh velikosti.

Za pravi izbor filtrov naprej analiziramo zrak, da ugotovimo, kakšne nečistoče so v njem prisotne. Filtri za finejše delce vnašajo v sistem večji padec tlaka. Zato bi bilo nesmiselno uporabiti takšne filtre, če so nečistoče, ki jih želimo iz zraka odstraniti, večjih dimenzij. Kadar so v zraku neželeni delci različnih velikosti, uporabimo filtre, ki so sestavljeni iz več stopenj. Na prvo mesto postavimo filter, ki zadrži večje delce, finejše pa prepusti. Za njim postavimo filter, ki zadrži drobnejše delce, temu pa sledi še filter za najbolj drobne delce. Kot zadnjega lahko vključimo še kemični filter za razne neželene pline. Če bi na prvo mesto postavili filter z največjo učinkovitostjo, bi ta zajel vse delce in bi ga morali zaradi tega pogosto menjavati. Ostali filtri pa bi ostali skoraj popolnoma čisti. Naslednja slika prikazuje velikosti nekaterih nečistoč, ki se pojavljajo v zraku.



Slika 2: Velikosti nečistoč v zraku [1]

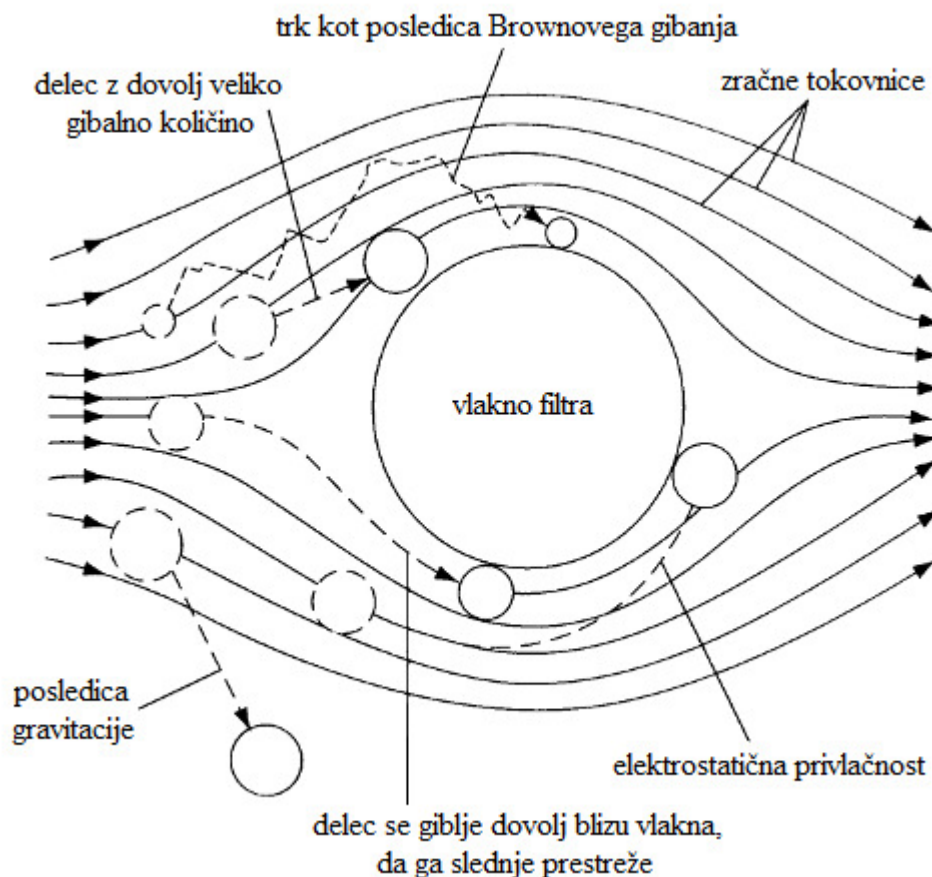
2.1.1. Mehanizmi zajema mehanskih delcev

Irwin M. Hutten v knjigi Handbook of nonwoven filter media [1] definira štiri osnovne mehanizme filtracije.

- Površinsko sejanje (ang. surface straining): delci, ki so večji od odprtin v filtru, ne morejo skozi in se tako ločijo od preostalega medija. Delci, manjši od odprtin, nadaljujejo svojo pot. Filtri, ki delujejo na tem principu, imajo ponavadi odprtine enakomernih velikosti.
- Globinsko sejanje (ang. depth straining): premer posameznih odprtin v filtru se spreminja od večjega proti manjšemu. Delci prodirajo v filter, dokler ne dosežejo točke, kjer je premer odprtine manjši od njihovega premera. Delci, manjši od najožjega dela odprtine, prosto nadaljujejo svojo pot.
- Površinska filtracija (ang. surface filtration): pri tem načinu filtriranja delci, ki se v slojih nabirajo na površini filtra, tudi sami sodelujejo pri filtraciji. Dobra lastnost takšnih filtrov je, da je mogoče s pretokom zraka v obratni smeri filter očistiti. S tem je omogočena večkratna uporaba filtra.

- Globinska filtracija (ang. depth filtration): vključuje mehanizme za filtracijo, kjer je premer delcev manjši od premerov odprtin v filtru. Ti mehanizmi so opisani v nadaljevanju.

Spodnja slika prikazuje različne možnosti zajema delcev, ki so premajhni za običajno filtracijo.



Slika 3: Mehanizmi globinske filtracije [1]

Mehanizmi, ki omogočajo globinsko filtracijo (slika 3), se med seboj razlikujejo v glavnem glede na sposobnost, kako velike delce odstranijo iz pretoka zraka.

- delci, ki imajo dovolj veliko vztrajnost, da se odtrgajo od zračne tokovnice in trčijo ob vlakno filtra,
- delci, katerih vztrajnost je premajhna, da bi se odtrgali od zračne tokovnice vendar se gibajo dovolj blizu vlakna filtra, da se lahko prilepijo nanj,
- za zelo majhne delce je značilno Brownovo gibanje. Slednje je neurejeno termično gibanje mikroskopskih delcev v plinih ali kapljevinah kot posledica trkov z

molekulami. Takšno gibanje povzroči odcepitev delca od tokovnice in s tem možnost trka delca z vlaknom filtra,

- delce, katerih naboj je različno predznačen od vlakna filtra, lahko elektrostatična sila pritegne iz tokovnice na vlakno.

Mehanizem, na podlagi katerega filter zajame največ delcev, je predvsem odvisen od velikosti delcev. Zelo majhni delci so podvrženi Brownovemu gibanju in obstaja precej velika verjetnost, da bodo zajeti. Veliki delci imajo dovolj veliko vztrajnost, da se ločijo od tokovnice in trčijo ob vlakno filtra. Najtežje je zajeti delce, katerih velikost se giblje od 0,04 μm do 0,4 μm . Ti so preveliki, da bi bili podvrženi Brownovemu gibanju, hkrati pa se ne morejo odtrgati iz tokovnice. Ti delci so ponavadi označeni s kratico MPPS (ang. most penetrating particle size) kar bi lahko prevedli kot delci najbolj prodornih velikosti.

2.1.2. Model filtra

Za namen aplikacije, ki je tema diplomske naloge, bi radi poznali kakšen je padec tlaka na filtru v odvisnosti od pretoka skozi filter. Obstaja več modelov, ki precej natančno opisujejo gibanje tekočin in plinov skozi porozne snovi, kamor spadajo tudi filtri. Vendar uporaba teh modelov zahteva poznavanje precej koeficientov in drugih lastnosti, ki opisujejo filter in medij, ki se giblje skozenj. Zaradi te kompleksnosti takšni modeli terjajo predolg čas računanja. Hkrati pa bi se moral uporabnik, ob menjavi tipa filtra, preveč poglobiti v podrobnosti samega delovanja in bi tako uporaba postala prezahtevna. Zaradi tega je potrebno opisati padec tlaka na filtru v odvisnosti od pretoka na čim bolj enostaven način, ki pa mora kljub temu zagotavljati ustrezno natančnost.

Enačba, ki opisuje pretok v odvisnosti od padca tlaka

V nadaljevanju je opisana izpeljava enačbe, ki opisuje pretok v odvisnosti od padca tlaka. Enačba temelji na predpostavki, da gre za stacionaren pretok brez trenja. Izpeljana pa je iz Bernoullijeve enačbe [8, 9]. Slednja pravi, da je vzdolž tokovnice vsota kinetične energije, potencialne energije in tlaka konstantna:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 + p_2 \quad (2)$$

V zgornji enačbi pomeni:

ρ ... gostoto zraka,

v ... hitrost,

h ... višino,

g ... težnostni pospešek,

p ... tlak.

Če predpostavimo, da se višina filtra ne spreminja, velja:

$$h_1 = h_2 \quad (3)$$

Bernoullijeva enačba pa se poenostavi v:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + p_2 \quad (4)$$

Iz zakona o ohranitvi mase sledi:

$$v_1 S_1 \rho = v_2 S_2 \rho \quad (5)$$

S_1 in S_2 predstavljata površino preseka pretoka v dveh različnih točkah, v_1 in v_2 pa hitrosti v teh dveh točkah. Če iz enačbe (5) izrazimo hitrost v_1 in jo vstavimo v enačbo (4), dobimo:

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{S_2^2}{S_1^2}}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)} \quad (6)$$

Volumski pretok lahko izrazimo kot:

$$\phi = v_2 S_2 \quad (7)$$

Če enačbo za hitrost (6) vstavimo v enačbo za pretok (7), dobimo:

$$\phi = \frac{S_2}{\sqrt{1 - \frac{S_2^2}{S_1^2}}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)} \quad (8)$$

Zgornjo enačbo lahko preoblikujemo v:

$$\phi = S_2 \sqrt{\frac{2}{\rho \left(1 - \frac{S_2^2}{S_1^2}\right)}} \sqrt{p_1 - p_2} \quad (9)$$

Razliko tlakov lahko zapišemo kot:

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad (10)$$

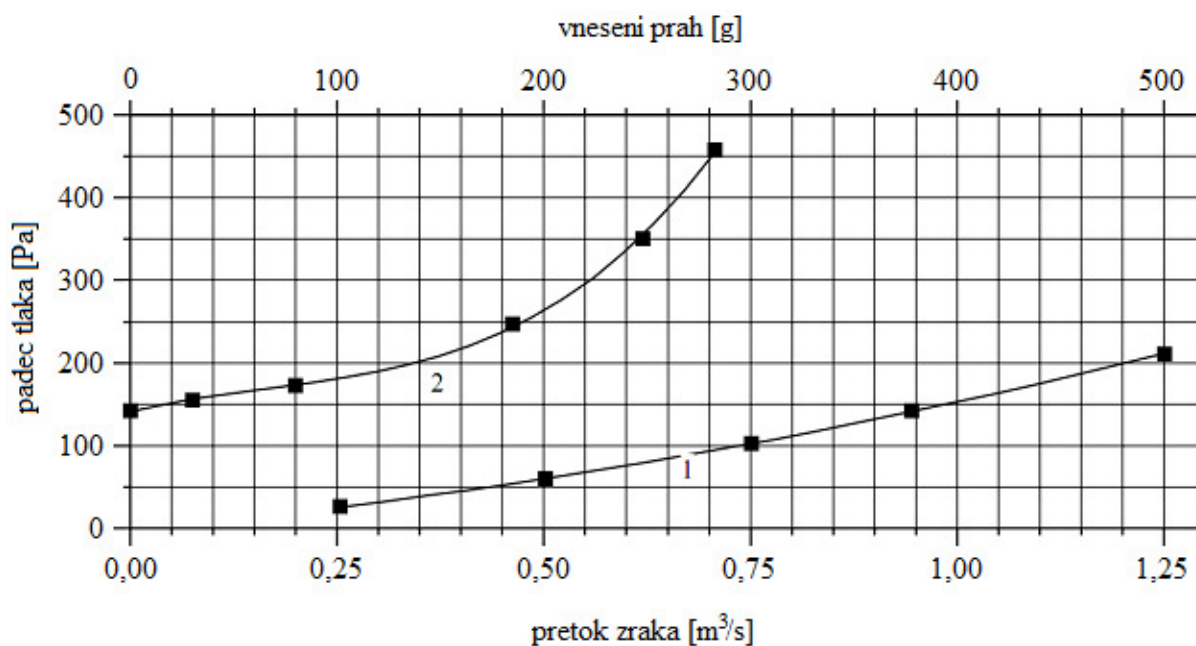
Ker so vrednosti S_1 , S_2 in ρ konstante, jih lahko združimo v skupnem koeficientu K :

$$K = S_2 \sqrt{\frac{2}{\rho \left(1 - \frac{S_2^2}{S_1^2}\right)}} \quad (11)$$

Tako se izraz za pretok poenostavi v:

$$\phi = K \sqrt{\Delta p} \quad (12)$$

Za oceno uporabnosti enačbe (12) kot modela filtra smo uporabili več grafov, ki podajajo padec tlaka na posameznem filtru v odvisnosti od pretoka zraka skozi filter. Eden izmed takšnih grafov je prikazan na spodnji sliki.



Krivulja 1: padec tlaka kot funkcija pretoka zraka (pri čistem filtru).

Krivulja 2: padec tlaka kot funkcija vnesenega prahu pri testnem pretoku zraka (0,944 m³/s).

Graf 1: Padec tlaka v odvisnosti od pretoka zraka ter vnesenega prahu za filter CL-66-10-F8

LK L=635 proizvajalca Halton [16]

Iz posameznih grafov smo nato odčitali padce tlaka pri določenih pretokih ter iz dobljenih točk izračunali posamezne koeficiente K s pomočjo enačbe:

$$K = \frac{\phi}{\sqrt{\Delta p}} \quad (13)$$

Iz vseh dobljenih koeficientov smo nato izračunali povprečno vrednost ter to še nekoliko prilagodili, tako da se je graf, ki smo ga izrisali s pomočjo dobljenega koeficienta K tem bolj ujemal z grafom dobljenim iz točk prebranih z originalnega grafa. S preoblikovanjem enačbe (12) lahko dobimo enačbo, ki omogoča izračun padca tlaka iz poznane pretoka in koeficienta K :

$$\Delta p = \frac{\phi^2}{K^2} \quad (14)$$

Tabela 2 prikazuje vrednosti pretoka zraka (Φ) ter pripadajoče padce tlaka, odčitane iz zgornjega grafa.

Φ [m ³ /s]	p_{px} [slikovna točka]	p [Pa]	K	p_{Kizb} [Pa]	$p - p_{Kizb}$ [Pa]
0,25	19	26,4	0,049	9,77	16,6
0,30	23	31,9	0,053	14,06	17,9
0,35	28	38,9	0,056	19,14	19,7
0,40	33	45,8	0,059	25,00	20,8
0,45	38	52,8	0,062	31,64	21,1
0,50	43	59,7	0,065	39,06	20,7
0,55	49	68,1	0,067	47,27	20,8
0,60	55	76,4	0,069	56,25	20,1
0,65	61	84,7	0,071	66,02	18,7
0,70	68	94,4	0,072	76,56	17,9
0,75	74	102,8	0,074	87,89	14,9
0,80	81	112,5	0,075	100,00	12,5
0,85	88	122,2	0,077	112,89	9,3
0,90	95	131,9	0,078	126,56	5,4
0,95	103	143,1	0,079	141,02	2,0
1,00	111	154,2	0,081	156,25	-2,1
1,05	118	163,9	0,082	172,27	-8,4
1,10	126	175,0	0,083	189,06	-14,1
1,15	135	187,5	0,084	206,64	-19,1
1,20	144	200,0	0,085	225,00	-25,0
1,25	153	212,5	0,086	244,14	-31,6

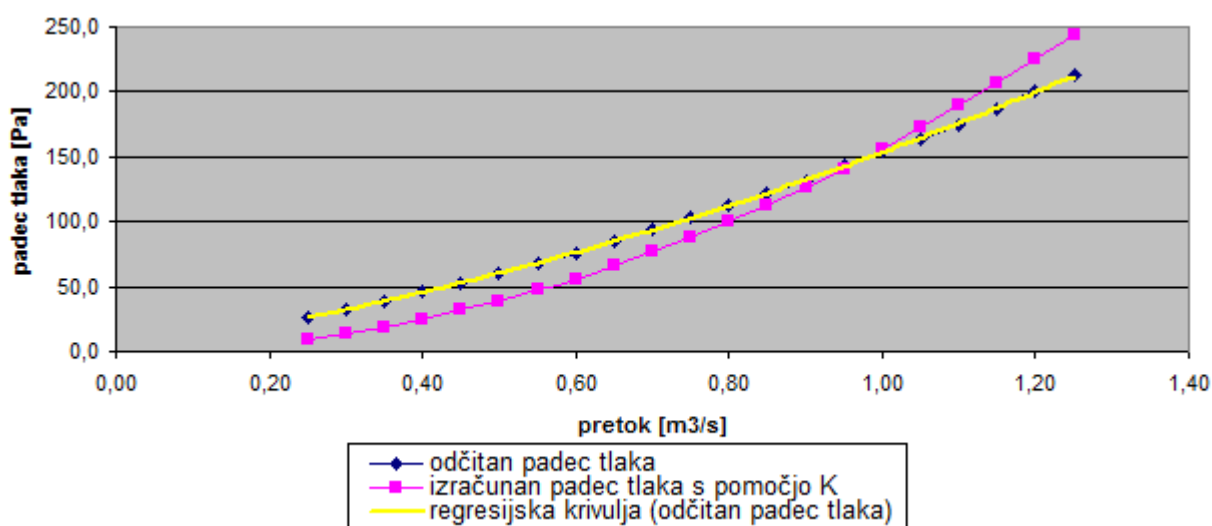
Tabela 1: Podatki iz karakteristike filtra in nadaljnji izračuni

Padci tlaka, dobljeni pri odčitavanju iz grafa, so podani v slikovnih točkah (p_{px}). Na izvorni sliki zgornjega grafa 50 Pa ustreza 36 slikovnim točkam. S tem podatkom so v tabeli izračunane vrednosti padcev tlaka (p) v paskalih. Za vsak pretok in pripadajoč padec tlaka je po enačbi (13) izračunan koeficient K . Povprečna vrednost vseh dobljenih koeficientov znaša 0,072. Za K smo izbrali vrednost 0,08, saj se je tako dobljen graf bolj prilagel originalnemu,

kot graf dobljen s povprečno vrednostjo koeficienta. Nato smo z izbranim koeficientom K_{izb} po enačbi (14) izračunali padce tlaka. Ti so v tabeli označeni s $p_{K_{izb}}$. V tabeli izraz $p - p_{K_{izb}}$ pomeni absolutno napako, ki je nastala z uporabo enačbe (14).

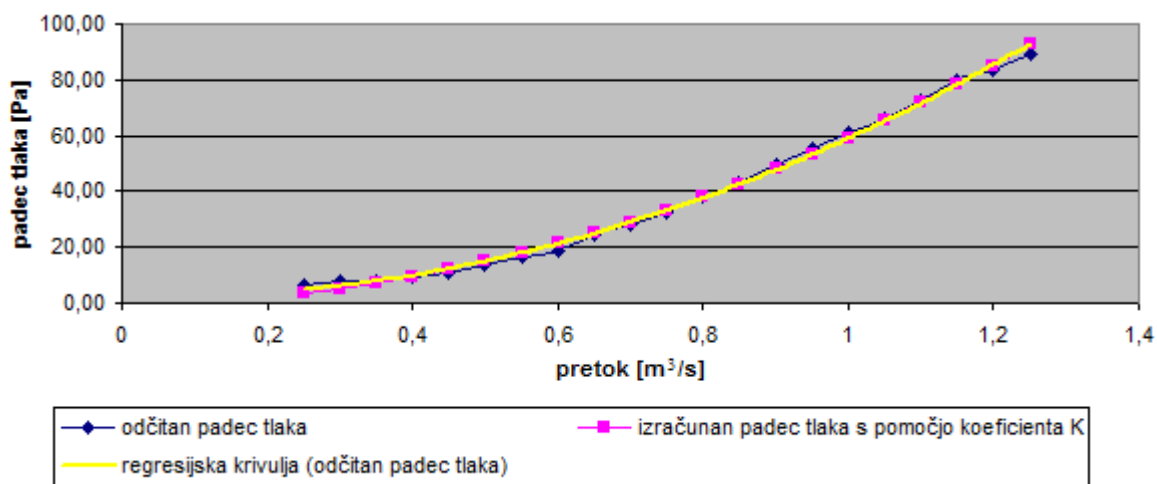
Kot je moč videti v tabeli, so te napake pri posameznih pretokih precej velike. Pri najnižjem pretoku znaša napaka celo 63 % dejanskega pretoka, kar je vsekakor nesprejemljivo. Še lepše kot v tabeli se to odstopanje vidi v grafu 2. Na grafu je poleg krivulje odčitane tlaka in tlaka, izračunane s pomočjo koeficienta K , prikazana tudi regresijska krivulja, ki pripada krivulji odčitane tlaka. Enačba regresijske krivulje je polinom 2. reda:

$$p = 65,042 \phi^2 + 88,548 \phi - 0,1629 \quad (15)$$

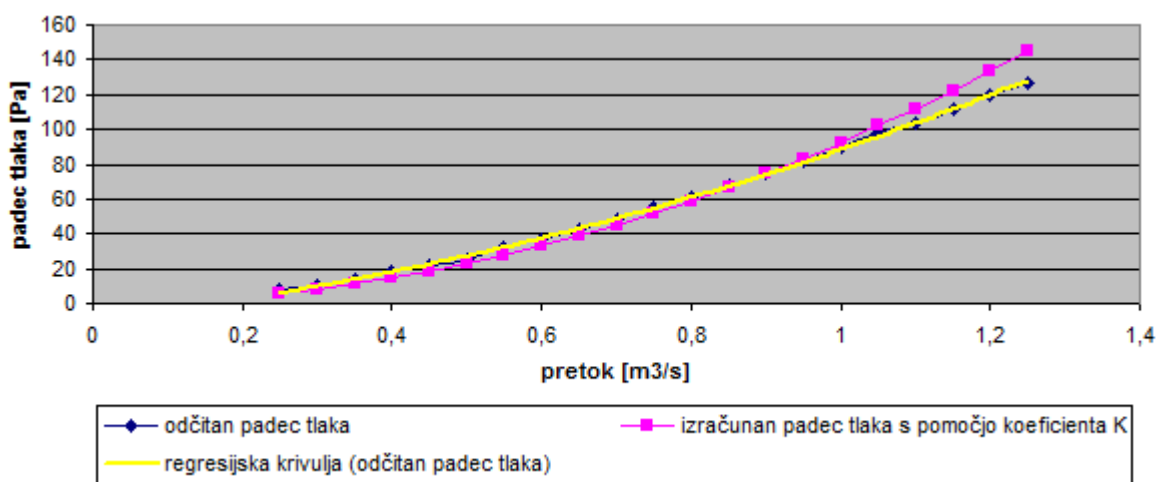


Graf 2: Padec tlaka v odvisnosti od pretoka zraka

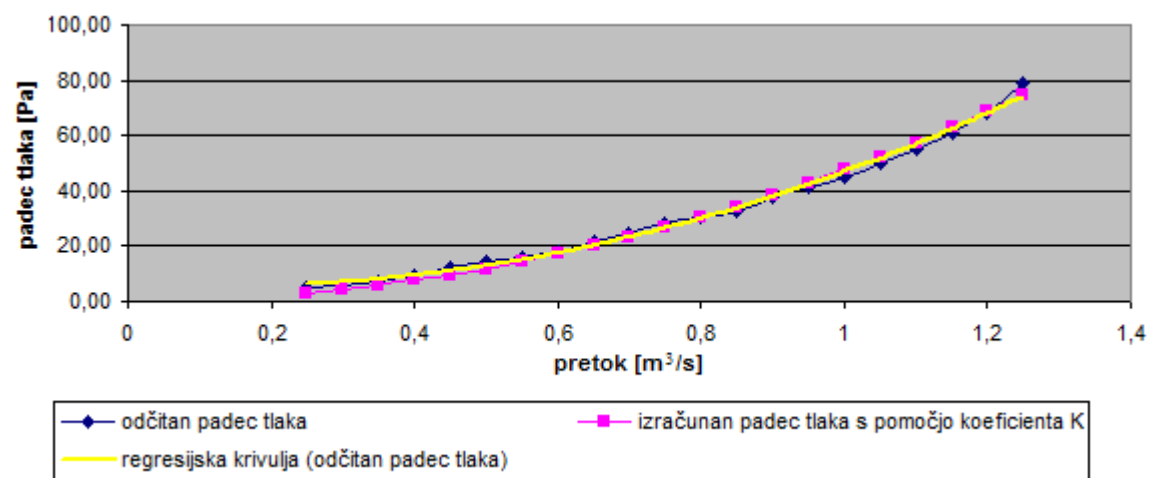
Kot je razvidno iz grafa 2, se regresijska krivulja in odčitana krivulja padca tlaka skoraj popolnoma ujemata, saj absolutna napaka v nobeni točki ne presega vrednosti 1 Pa. Na takšen način smo preverili možnost uporabe enačbe (12) kot model filtra z več karakteristikami filtrov. Možnost uporabe takšnega modela filtra smo preverili še na naslednjih grafih.



Graf 3: Padec tlaka v odvisnosti od pretoka zraka za vrečni filter F5 proizvajalca Halton



Graf 4: Padec tlaka v odvisnosti od pretoka zraka za vrečni filter F6 proizvajalca Halton



Graf 5: Padec tlaka v odvisnosti od pretoka zraka za vrečni filter G3 proizvajalca Halton

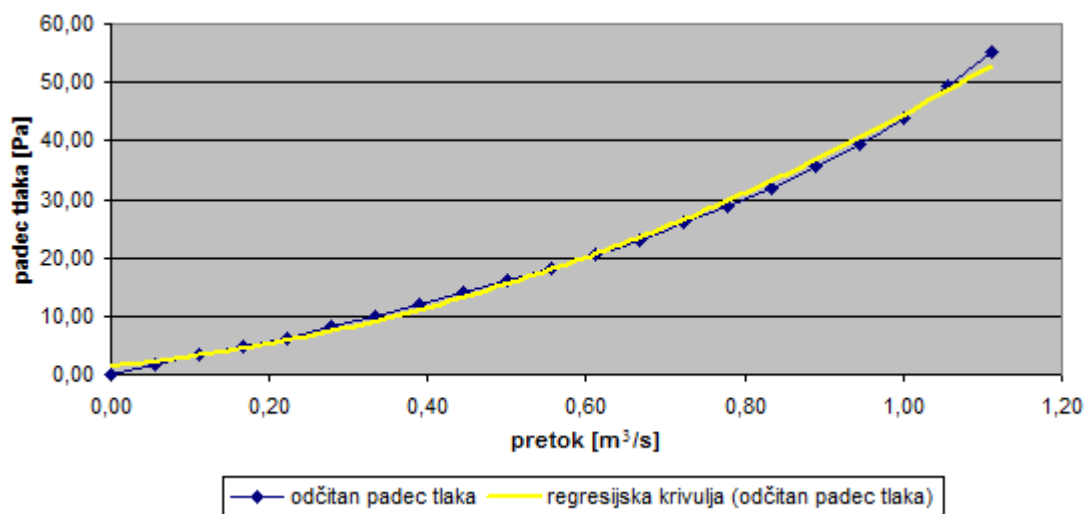
Na zgornjih treh grafih je razvidno precej dobro ujemanje odčitane karakteristike s karakteristiko, izračunano s koeficientom K. Vendar preveliko odstopanje pri prvem filtru, ki ga prikazuje graf 2, nakazuje, da se model filtra z enačbo (12) ne obnaša zadovoljivo v vseh primerih. Zaradi tega smo se odločili filtre opisati s polinomsko enačbo 2. reda, ki omogoča natančen opis pri vseh filterih.

2.1.3. Uporabljeni filtri

V nadaljevanju so opisani štirje različni tipi filtrov, ki lahko skupaj tvorijo učinkovit filter za čiščenje zraka.

Predfilter

Predfilter je namenjen zajemanju največjih delcev v zraku, medtem ko drobnejše prepušča. Za izdelavo modela smo uporabili Haltonov Z-line panel filter z oznako CLP-ZF-P-592-592-46-H2-G4-S-P [10]. Povprečna učinkovitost tega filtra znaša 30 %. Graf 6 prikazuje padec tlaka v odvisnosti od pretoka ter pripadajočo polinomsko regresijsko krivuljo 2. reda, za uporabljen predfilter.



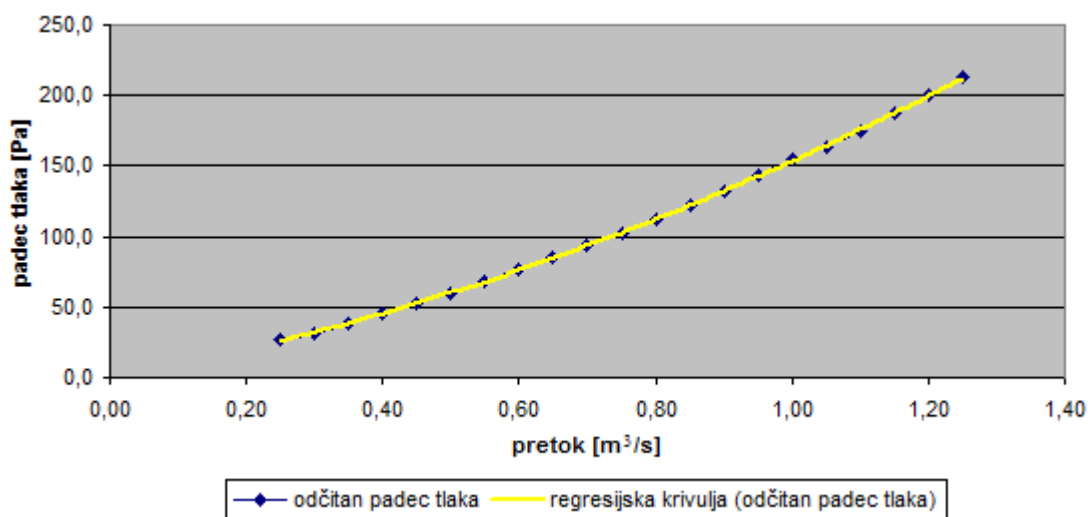
Graf 6: Karakteristika filtra CLP-ZF-P-592-592-46-H2-G4-S-P in pripadajoča polinomsko regresijska krivulja 2. reda

Model pred filtra, ki smo ga dobili s pomočjo regresijske krivulje podaja naslednja enačba:

$$p = 30,156\phi^2 + 13,387\phi + 1,2468 \quad (16)$$

Vrečni filter

Drugi po vrsti v sklopu vseh štirih filtrov je vrečni filter. Uporabili smo Haltonov filter CL-66-10-F8 LK L=635 [10]. Povprečna učinkovitost za delce velikosti $0,4\ \mu\text{m}$ za ta filter znaša 84 %. Ta podatek nam pove, da bo filter iz zraka odstranil precej manjše delce kot predfilter. Slednji pa bo seveda poskrbel, da se vrečni filter ne bo prehitro zamazal z večjimi delci. Graf 7 prikazuje padec tlaka v odvisnosti od pretoka ter pripadajočo polinomske regresijske krivuljo 2. reda, za uporabljen vrečni filter.



Graf 7: Karakteristika filtra CL-66-10-F8 LK L=635 in pripadajoča polinomska regresijska krivulja 2. reda

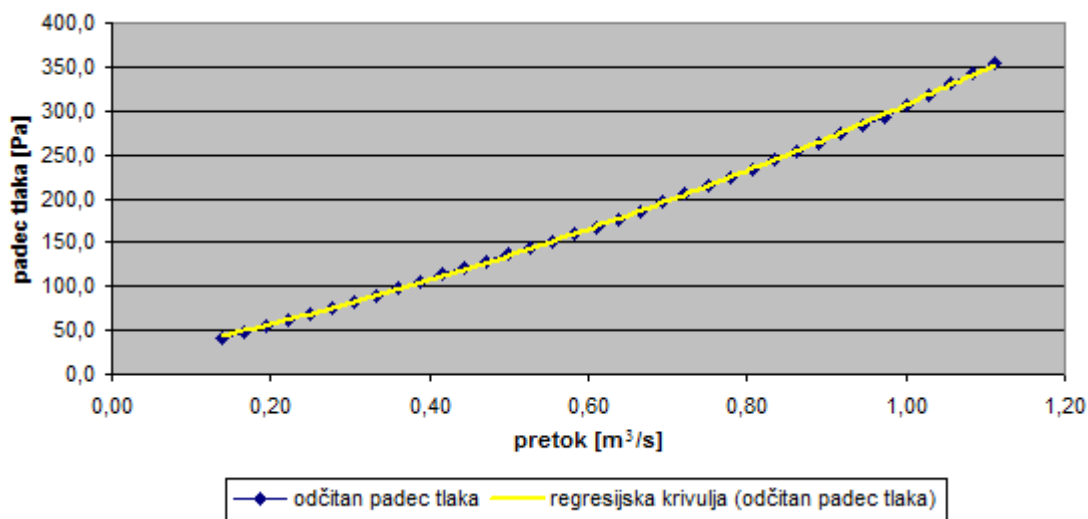
Model vrečnega filtra, ki smo ga dobili s pomočjo regresijske krivulje, podaja naslednja enačba:

$$p = 65,042\phi^2 + 88,548\phi - 0,1629 \quad (17)$$

HEPA filter

HEPA (ang. high efficiency particulate air) označuje visoko učinkovite filtre za delce najbolj prodornih velikosti, ki so velikokrat imenovani s kratico MPPS (ang. most penetrating particle

size). Za model HEPA filtra smo uporabili Haltonov Rigid pocket filter z oznako CLP-RP-P-593-593-292-4-H12-GF-P [10]. Učinkovitost tega filtra znaša za MPPS delce več kot 99,5 %. Graf 8 prikazuje padec tlaka v odvisnosti od pretoka ter pripadajočo polinomske regresijske krivuljo 2. reda, za uporabljen HEPA filter.



Graf 8: Karakteristika filtra CLP-RP-P-593-593-292-4-H12-GF-P in pripadajoča polinomska regresijska krivulja 2. reda

Model HEPA filtra, ki smo ga dobili s pomočjo regresijske krivulje podaja spodnja enačba:

$$p = 103,91 \phi^2 + 187,5 \phi + 15,496 \quad (18)$$

Ogljikov filter

Na zadnje mesto se ponavadi postavi kemični filter. V ta namen je velikokrat uporabljeno aktivno oglje. To je oglje, ki mu s posebnimi postopki močno povečajo poroznost. Tako ima lahko samo 1 g snovi površino preko 500 m². Za aktivno oglje je značilna adsorbcija. To je proces, pri katerem molekule iz zraka ali tekočine (adsorbat) odstranjujemo z vezavo na neko trdno snov (adsorbent). Večja kot je površina adsorbenta, več molekul se veže nanj. Aktivno oglje učinkovito veže nase organske snovi, ki temeljijo na ogljiku. Dobro pa nase veže tudi klor.

V času pisanja diplomske naloge še nismo dobili karakteristike ogljikovega filtra, zaradi česar nismo mogli narediti njegovega modela. Tako smo pri preizkušanju delovanja programa uporabili le približne parametre, ki so dali smiselne rezultate. Parametre modela bi lahko, ob znani karakteristiki ogljikovega filtra, zlahka zamenjali za prave.

2.2. Povezave elementov sistema Pollustop

Da lahko sistem Pollustop normalno deluje, morajo biti krmilnik, moduli in konzola v obeh podsistemih med seboj povezani. Obe konzoli sta s posameznima krmilnikoma povezani preko vodila RS-485. Krmilnika lahko povežemo tudi z osebnim računalnikom. Pri tem na računalniku uporabimo serijska vrata RS-232. Ker krmilnik komunicira po standardu RS-485, ga moramo z računalnikom povezati preko pretvornika med RS-232 in RS-485. Na obe konzoli se lahko povežemo z dlančnikom preko brezžične infrardeče (IR) povezave.

Krmilnik in moduli so narejeni tako, da se drug zraven drugega montirajo na DIN letev. Pri tem so med seboj povezani z vodilom I2C, preko katerega krmilnik ciklično zajema podatke iz posameznih modulov. V nadaljevanju je opisano delovanje vodila I2C.

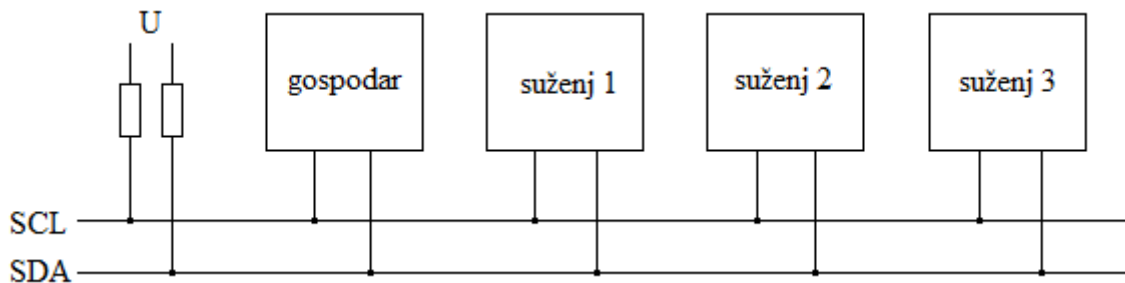
2.2.1. Vodilo I2C

Vodilo I2C [7] je bilo izdelano za komunikacijo komponent na istem elektronskem vezju. Danes ta povezava poteka tudi do ločenih komponent. Glavne značilnosti vodila I2C so:

- vodilo sestavljata le dve liniji; podatkovna linija (SDA) in urina linija (SCL),
- vsaka naprava na vodilu ima svoj naslov in je programsko naslovljiva. Naprava, ki je gospodar, lahko deluje kot sprejemnik in kot oddajnik,
- omogoča več gospodarjev in zaznavo trka podatkov ter arbitražo za določanje, kateri gospodar bo uporabljal vodilo, kadar dva ali več gospodarjev hkrati pričnejo s komunikacijo.

Na vodilu je vedno vsaj ena naprava gospodar. Ta krmili SCL linijo in začenja ter zaključuje prenose podatkov. Ostale naprave so sužnji. Vsak suženj ima svoj naslov, preko katerega ga gospodar lahko pokliče. Obe liniji, SDA in SCL, sta tipa odprti ponor (ang. open drain). To pomeni, da lahko naprave liniji vsiljujejo nizek nivo napetosti (logična 0), ne morejo pa ji

vsiljevati visokega nivoja (logična 1). Visok nivo na liniji zagotovi dva upora, ko liniji nobena naprava ne vsiljuje logične 0. Na naslednji sliki je prikazan enostaven primer povezave naprav preko I2C vodila.



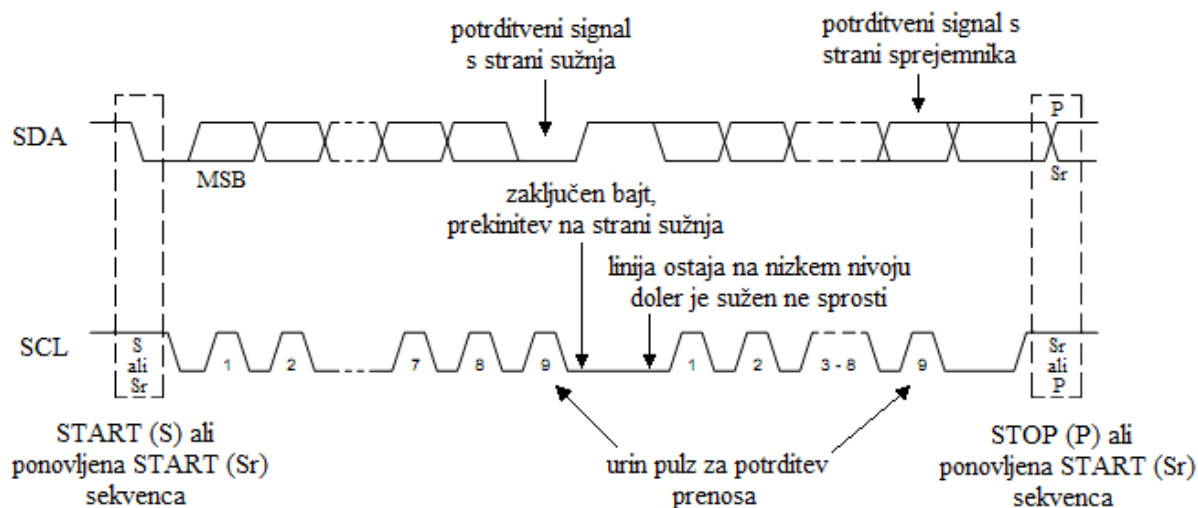
Slika 4: Koncept povezave naprav preko I2C vodila

Prenos podatkov

Vsi prenosi se začnejo s sekvenco START (S) in končajo s sekvenco STOP (P). START predstavlja spremembo linije SDA iz visokega na nizek nivo, medtem ko je nivo linije SCL visok. Sprememba SDA iz nizkega na visok nivo ob visokem SCL pa pomeni STOP. To sta edina primera, ko se SDA spreminja, medtem ko je SCL na visokem nivoju. Sekvenci START sledi naslovni zlog. Z njim gospodar izbere sužnja, s katerim komunicira. Izbrani suženj nato potrdi prenos.

Podatki se vedno prenašajo v zlogih. Število prenesenih zlogov v posameznem prenosu je neomejeno. Sprejemnik ob negativnih prehodih SCL sprejme po en bit preko SDA. Znotraj zloga se vedno najprej prenese najpomembnejši bit (MSB – most significant bit). V primeru, da suženj v nekem trenutku ne more sprejemati podatkov, lahko drži SCL na nizkem nivoju. V tem primeru mora gospodar počakati, da se SCL sprosti in gre na visok nivo.

Na koncu vsakega prenesenega zloga je obvezno potrjevanje prenosa s strani sprejemnika. Gospodar ustvari urin pulz namenjen potrjevanju prenosa podatkov. Oddajnik med tem pulzom sprosti podatkovno linijo SDA tako, da je ta na visokem nivoju. Če je prenos uspel, sprejemnik medtem povleče linijo SDA na nizek nivo, v nasprotnem primeru SDA ostane na visokem nivoju. Gospodar lahko nato zaključi prenos s STOP sekvenco ali pa ponovi START sekvenco. Naslednja slika ponazarja prenos podatkov preko I2C vodila.



Slika 5: Prenos podatkov preko I2C vodila [7]

2.3. Sklop Filter sistem

Filter sistem omogoča nadzor čistosti filtrov. Sestavljajo ga konzola, krmilnik in šest dodatnih modulov. Glavno vlogo ima krmilnik LHC-1.MU3, za meritev tlaka se uporabljajo štirje moduli LHC-1.VV3, komunikacijo z drugimi napravami omogoča modul LPC-2.DO6 z osmimi relejskimi izhodi, javljanje alarmov in preverjanje stanja filtrov preko GSM omrežja pa je omogočeno z modulom LPC-2.C05. Stik uporabnika s sistemom omogoča konzola.

2.3.1. Modul LPC-2.C05

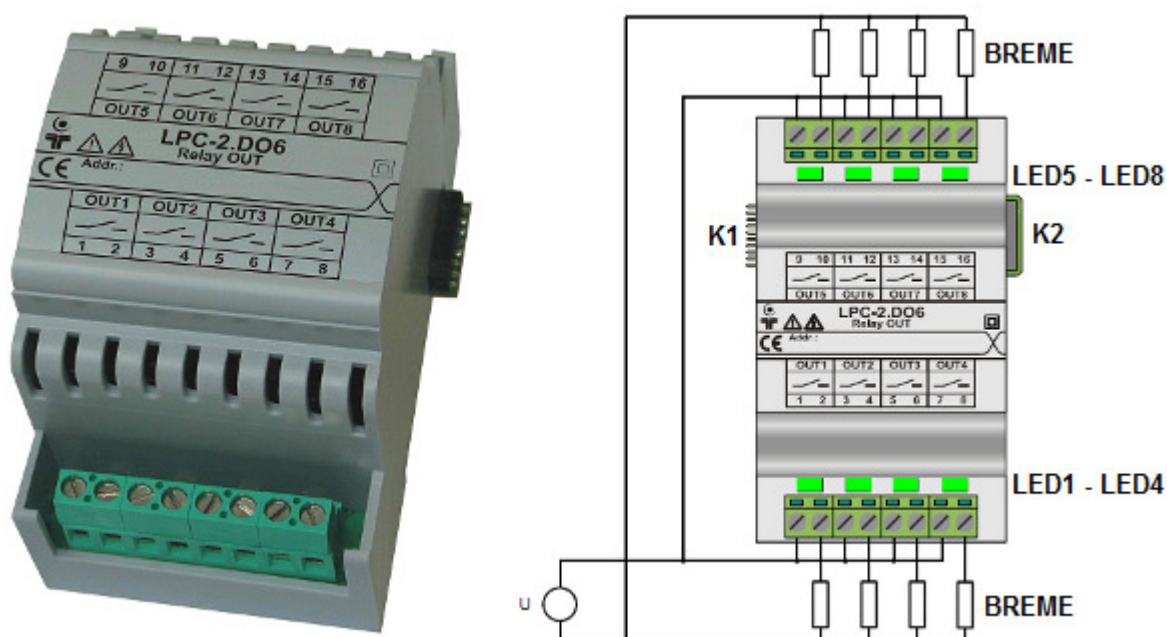
Modul LPC-2.C05 [3] (slika 6) omogoča komunikacijo z mobilnimi GSM napravami, kot so GSM telefoni ali GSM modemi. Komunikacija poteka preko SMS sporočil. LPC-2.C05 lahko preko GSM omrežja posreduje do osem digitalnih in osem analognih vrednosti ter hkrati sprejema osem digitalnih in osem analognih ukazov, ki so poslani z mobilnih GSM telefonov ali drugih GSM naprav. Prejeti ukazi so lahko vezani direktno na digitalne ali analogne izhode, ali pa nastavljajo moduleve parametre. Za pravilno delovanje modula moramo najprej nastaviti SIM kartico, ki jo uporablja. To storimo z ustrezno programsko opremo, ki je opisana v poglavju Programska oprema.



Slika 6: GSM komunikacijski modul LPC-2.C05

2.3.2. Modul LPC-2.DO6

Modul LPC-2.DO6 [6] je prikazan na levi strani slike 7, na desni strani pa se nahaja vezalna shema modula. Kot je razvidno s slike, modul vsebuje osem relejskih izhodov. Ti digitalni izhodi so v mirovanju odprti. Vsak izhod ima pripadajočo LED diodo, ki se prižge, ko je rele sklenjen in izhod predstavlja kratek stik.



Slika 7: Modul LPC-2.DO6 (levo), vezalna shema (desno)

Z modulom nadziramo napajanje bremena tako, da ga priključimo zaporedno z bremenom in virom napetosti U , kot kaže slika 7 desno. Rele znotraj modula priklopi oziroma odklopi breme od vira napetosti. LED1 do LED8 označujejo LED diode, ki pripadajo posameznim relejskim izhodom. K1 in K2 označujeta komunikacijsko vodilo I2C, preko katerega krmilnik upravlja izhode modula LPC-2.DO6. K1 označuje vhodno, K2 pa izhodno stran vodila.

2.3.3. Modul LHC-1.VV3

Na sliki 8 je prikazan modul LHC-1.VV3. Ta vsebuje diferencialni senzor tlaka in ima zato dva priključka za cevi. Če se na senzorjev pozitivni vhod priključi tlak pred oviro in na njegov negativni vhod tlak za oviro, dobimo na izhodu podatek o padcu tlaka na oviri.



Slika 8: Modul LHC-1.VV3

Tabela 2 podaja tehnične specifikacije vgrajenega senzorja tlaka. Oznaka FSS (full scale span) pomeni algebraično razliko med izhodnim signalom senzorja za najvišji in najnižji specificiran tlak.

Karakteristika	Najnižja vrednost	Tipična vrednost	Najvišja vrednost	Enota
Natančnost (0 ... 85 °C)	- 0,5	/	0,5	% FSS
Zakasnitev odziva	/	0,5	/	ms
A/D resolucija	/	12	/	bit
D/A resolucija	/	/	11	bit
Tokovna poraba	/	5	/	mA
Analogne karakteristike				
Premik pri ničnem tlaku	2,48	2,50	2,52	V
Razpon izhoda (FSS)	/	4	/	V
Izhod pri 100 Pa	4,48	2,50	2,52	V
Izhod pri 0 Pa	0,48	0,50	0,52	V
Digitalne karakteristike				
Premik pri ničnem tlaku	16252	16384	16515	štetij
Razpon izhoda (FSS)	/	26214	/	štetij
Izhod pri 100 Pa	29359	29490	29621	štetij
Izhod pri 0 Pa	3146	3277	3408	štetij

Tabela 2: Karakteristike senzorja tlaka [6]

2.3.4. Krmilnik LHC-1.MU3

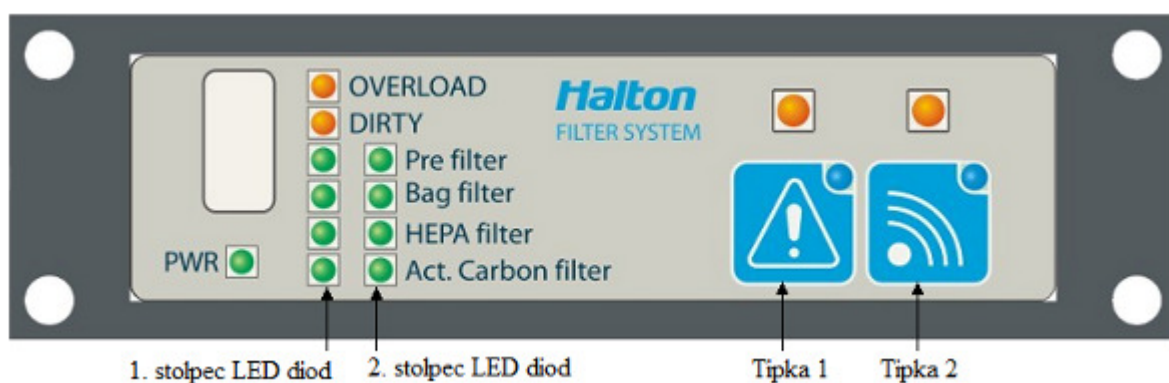
Glavni sestavni del krmilnika LHC-1.MU3 (slika 9) je mikrokrmilnik Cypress PSoC CY8C29466-24PXI [14]. PSoC v angleščini pomeni programmable system on chip, kar bi lahko prevedli kot programabilen sistem na čipu. Slednji vsebuje nastavljive analogne in digitalne periferne elemente, pomnilnik ter mikroprocesor. Krmilnik je preko vodila I2C povezan z ostalimi moduli, ki mu omogočajo stik z zunanji napravami. Z vodila ciklično zajema podatke ter pošilja ukaze na priključene module. Za pravilno delovanje je ob prvem priklopu krmilnika potrebno preko računalnika nastaviti sistemske parametre. Za to se uporabi ustrezno programsko opremo, ki je opisana v poglavju o programski opremi. V ustaljenem delovanju je krmilnik povezan s konzolo.



Slika 9: Modul LHC-1.MU3

2.3.5. Konzola Filter sistema

Konzola (slika 10) predstavlja najvišji nivo sistema, saj omogoča stik uporabnika s Filter sistemom. Preko dlančnika uporabniku posreduje status krmilnika LHC-1.MU3, hkrati pa so na njej shranjeni nekateri parametri, ki jih krmilnik potrebuje za svoje delovanje. Vnos slednjih bi lahko bil izveden tudi z računalnikom direktno na krmilnik. Ker so ponavadi krmilnik in ostali moduli montirani na težje dostopnih mestih, je veliko enostavnejša komunikacija s konzolo, ki se nahaja na dostopnejšem mestu. Zato smo na konzolo namestili parametre, ki jih je potrebno pogosteje spreminjati. Ti so opisani v poglavju Nastavitve in spremljanje delovanja sistema Pollustop.



1. stolpec LED diod

2. stolpec LED diod

Tipka 1

Tipka 2

Slika 10: Konzola Filter sistema

Na čelni plošči Konzole sta dve kapacitivni tipki, nad njima pa LED diodi. Ko se katera izmed njiju prižge, pomeni, da je nekje v sistemu prišlo do napake. Na levi strani Konzole sta dva stolpca LED diod. Levi s številom svetlečih diod prikaže stopnjo umazanosti filtrov. Zgornji dve diodi stolpca ponazarjata kritično umazanost filtrov. Predzadnja zasveti kadar je potrebno filter zamenjati, medtem ko se zgornja LED dioda prižge, ko je filter že prekomerno umazan.

Drugi stolpec LED diod uporabniku pove, na kateri filter se nanaša informacija iz prvega stolpca. Ob pritisku na prvo tipko se najprej prižge LED dioda ob predfiltru in hkrati določeno število LED diod prvega stolpca, glede na stopnjo umazanosti tega filtra. Nato se enako zgodi za vse preostale filtre. Ko je kateri izmed filtrov preveč umazan, se prižge rdeča LED dioda nad prvo tipko, ki signalizira alarm in zahteva poseg operaterja. Kateri filter je potrebno zamenjati, uporabnik preveri tako, da prvo tipko drži nekaj trenutkov.

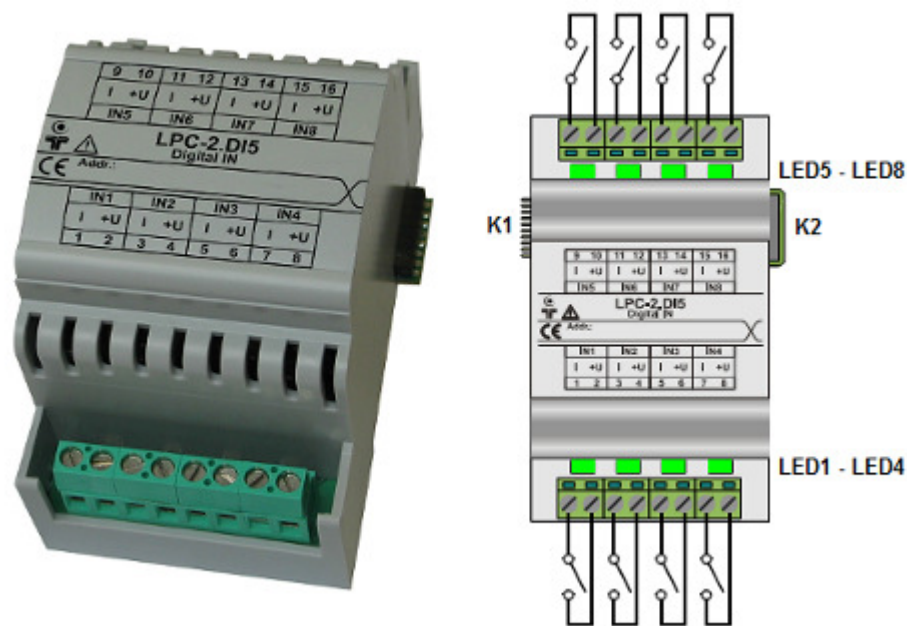
Prižgana LED dioda nad drugo tipko zaznamuje komunikacijsko napako v sistemu. LED dioda, označena s PWR, je prižgana vedno, ko je sistem priklopljen na električno omrežje. Nad PWR LED diodo je IR sprejemnik/oddajnik, preko katerega se uporabnik z dlančnikom poveže s konzolo.

2.4. Sklop Fan sistem

Fan sistem omogoča regulacijo pretoka zraka preko regulacije števila vrtljajev motorja ventilatorja, ki poganja zrak. Sestavljajo ga štirje moduli. Glavno vlogo izmed teh modulov igra krmilnik, ki se imenuje LHC-1.MU2. Nastavitve krmilnika lahko spreminjamo preko osebnega računalnika ali preko dlančnika. Pri tem moramo uporabiti ustrezno programsko opremo. Ta je opisana v poglavju o programski opremi, same nastavitve pa v poglavju Nastavitve in spremljanje delovanja sistema Pollustop. Krmilnik prejema informacijo o padcu tlaka iz dveh modulov LHC-1.VV1, ki vsebujeta senzor tlaka. Preko modula LPC-2.DI5 pa lahko sprejme digitalne informacije z drugih naprav.

2.4.1 Modul LPC-2.DI5

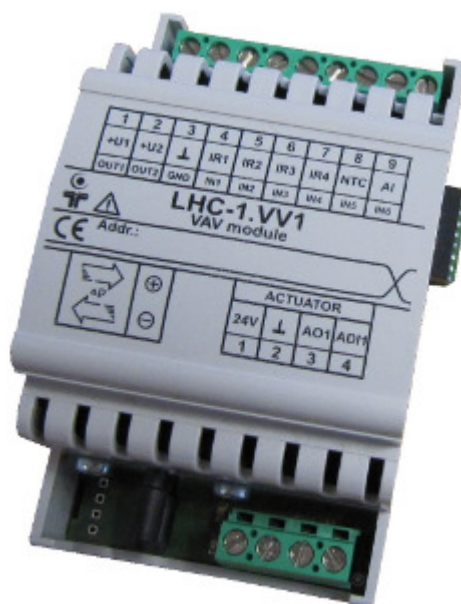
Modul LPC-2.DI5 [5] ima osem digitalnih breznapetostnih vhodov, ki so galvansko izolirani. Vsak vhod ima LED diodo, ki sveti, kadar je na vhodu kratek stik. Na spodnji sliki se na levi strani nahaja modul LPC-2.DI5, na desni strani pa je prikazana vezalna shema za ta modul.



Slika 11: Modul LPC-2.DI5 (levo) s pripadajočo vezalno shemo (desno)

2.4.2. Modul LHC-1.VV1

Edina razlika med modulom LHC-1.VV1 in LHC-1.VV3, ki je predstavljen v podpoglavju 2.3.3., je v dodatnih vhodih in izhodih, ki jih ima LHC-1.VV1. Le-ti pa se v tej aplikaciji ne uporabljajo in zato niso opisani. Oba modula vsebujeta enak senzor tlaka. Opis tega se nahaja pri opisu modula LHC-1.VV3. Spodnja slika prikazuje modul LHC-1.VV1.



Slika 12: Modul LHC-1.VV1

2.4.3. Krmilnik LHC-1.MU2

Glavni sestavni del krmilnika LHC-1.MU2 (slika 13) je, tako kot pri LHC-1.MU3, mikrokontroler Cypress PSoC CY8C29466-24PXI. Krmilnik LHC-1.MU2 preko vodila I2C ciklično zajema podatke ter pošilja ukaze preostalim modulom v sistemu. Krmilnik lahko preko njegovih COM vrat povežemo z računalnikom ali s konzolo. Ob prvem zagonu sistema, je potrebno z računalnikom na krmilniku nastaviti sistemske parametre. V ustaljenem delovanju je krmilnik povezan s konzolo. Ta mu pošilja podatke, potrebne za njegovo delovanje. Nastavitev parametrov ob zagonu in tistih, ki so dostopni na konzoli je opisana v poglavju Nastavitev in spremljanje delovanja sistema Pollustop.

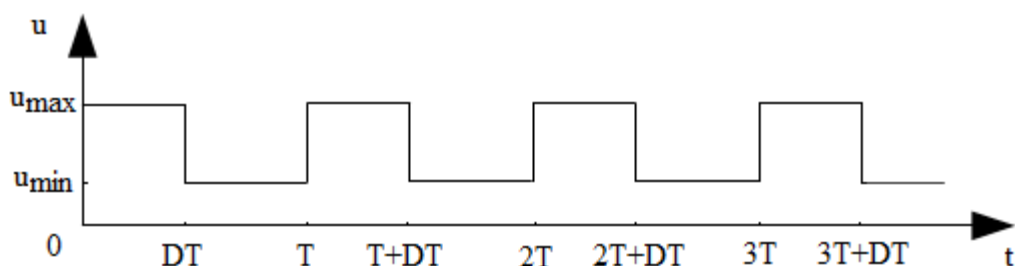


Slika 13: Krmilnik LHC-1.MU2

Od LHC-1.MU3 se LHC-1.MU2 dejansko razlikuje le po dodatnih vhidih in izhodih, ki jih vsebuje. OUT1 zajema fazi L1 in L2. Obe proti N priključku napajalnega vhoda dajeta 230 VAC napetosti. Napetost izhoda OUT1 lahko programsko preklapljamemo med 0 in 230 VAC. OUT2 in OUT3 sta digitalna izhoda, IN pa analogni vhod. OUT4 je analogni izhod, ki se uporablja za krmiljenje ventilatorja. Njegova vrednost se spreminja s pulzno širinsko modulacijo.

Pulzno širinska modulacija

S pulzno širinsko modulacijo krmilnik nadzira moč, ki se prenese do porabnika [11]. Z večanjem širine pulza se prenesena moč večja, nasprotno se manjša. Naslednja slika prikazuje pulzirajoč signal.



Slika 14: Pulzirajoč signal

Povprečno vrednost signala u na sliki 15 lahko zapišemo kot:

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (19)$$

Kar se lahko zapiše tudi kot:

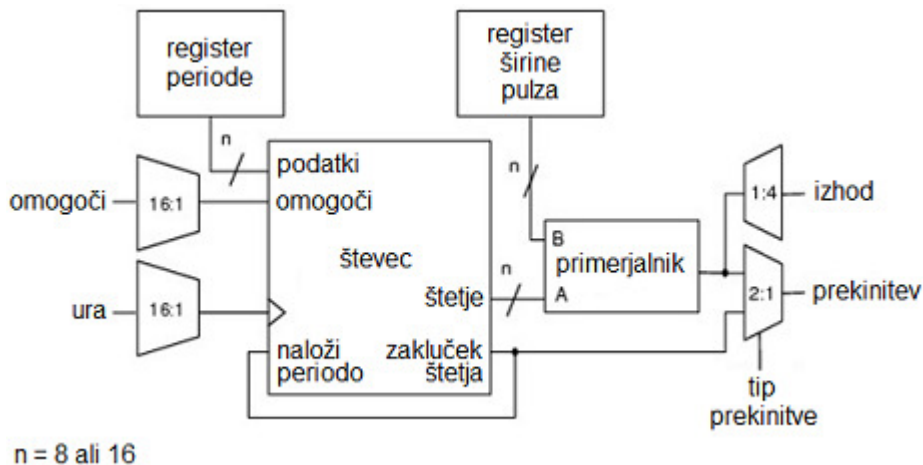
$$\bar{u} = \frac{1}{T} \left(\int_0^{DT} u_{max} dt + \int_{DT}^T u_{min} dt \right) = \frac{D T u_{max} + T (1 - D) u_{min}}{T} = D u_{max} + (1 - D) u_{min} \quad (20)$$

Če velja, da je $u_{min} = 0$, potem se izraz (20) poenostavi v:

$$\bar{u} = D \cdot u_{max} \quad (21)$$

Izraz (21) kaže, da je povprečna vrednost signala in s tem prenesena moč odvisna od širine pulza.

Mikroprocesor, vgrajen v krmilniku, nam omogoča programsko nastavljanje pulzno širinske modulacije. Spodnja shema prikazuje delovanje pulzno širinske modulacije v mikroprocesorju [13].



Slika 15: Bločni diagram pulzno širinske modulacije [13]

Najprej moramo pulzno širinsko modulacijo na ustreznem vhodu omogočiti. Nastaviti moramo še periodo izhodnega signala in širino pulza. Na začetku vsakega urinega pulza se vrednost števec zniža za ena. Ko števec doseže vrednost 0, se izhodu števec imenovanem zaključek štetja priredi visok napetostni nivo, kar povzroči ponoven zapis vrednosti periode v števec. Slednji v tem trenutku ponovno prične z odštevanjem. Ker se izhod zaključek štetja postavi za tem, ko števec doseže vrednost 0, je perioda izhodnega signala za 1 večja od

nastavljene vrednosti v registru periode. Naslednja enačba podaja periodo izhodnega signala pulzno širinske modulacije.

$$T_{izhoda} = (vrednost\ periode + 1) / f_{ure} \quad (22)$$

Ob vsakem urinem pulzu primerjalnik primerja vrednost števca z nastavljeno širino pulza. Nastavimo lahko, da je napetostni nivo izhoda primerjave visok, ko je vrednost števca manjša od širine pulza, ali ko je manjša ali enaka. Delovni cikel izhodnega signala podaja razmerje med širino pulza in periodo.

$$\text{delovni cikel} = \begin{cases} \frac{\text{širina pulza iz registra}}{\text{perioda iz registra} + 1} & , \text{ za primerjavo manj kot} \\ \frac{\text{širina pulza iz registra} + 1}{\text{perioda iz registra} + 1} & , \text{ za primerjavo manj kot ali enako} \end{cases} \quad (23)$$

Če nastavimo vrednost širine pulza večjo ali enako vrednosti periode, je delovni cikel enak 100 %. Ločljivost izhoda pulzno širinske modulacije lahko nastavimo na 8 ali 16 bitov.

Analogni izhod krmilnika LHC-1.MU2 je nastavljen od 0 V do 10 V. V programu, ki teče na krmilniku, smo nastavili periodo na 10000. Izhod krmilnika je enak 10 V, ko tudi širino pulza nastavimo na 10000. Ob priključitvi krmilnika na napajanje hočemo, da ima analogni izhod vrednost 0 V, zato nastavimo širino pulza na 0. To prikazuje naslednji izsek kode.

```
PWM16_1_DisableInt();           // Prekinitve (interrupt) onemogočene
PWM16_1_WritePeriod(10000);     // Nastavitev periode na 10000
PWM16_1_WritePulseWidth(0);     // Nastavitev širine pulza na 0
PWM16_1_Start();                // Prekinitve omogočene
```

Zgornja koda se izvede le ob inicializaciji. V vsakem ciklu krmilnik prilagaja le širino pulza, glede na izhod PID regulatorja, ki ga uporablja za regulacijo pretoka zraka.

2.4.4. Konzola Fan sistema

Kot pri Filter sistemu je tudi pri Fan sistemu konzola (slika 16) prilagojena za stik uporabnika s sistemom. Na njej so shranjeni parametri sistema, ki jih je potrebno pogosteje spreminjati.

Do njih lahko dostopamo s pomočjo dlančnika. Ti parametri so podrobneje opisani v poglavju Nastavitev in spremljanje delovanja sistema Pollustop.



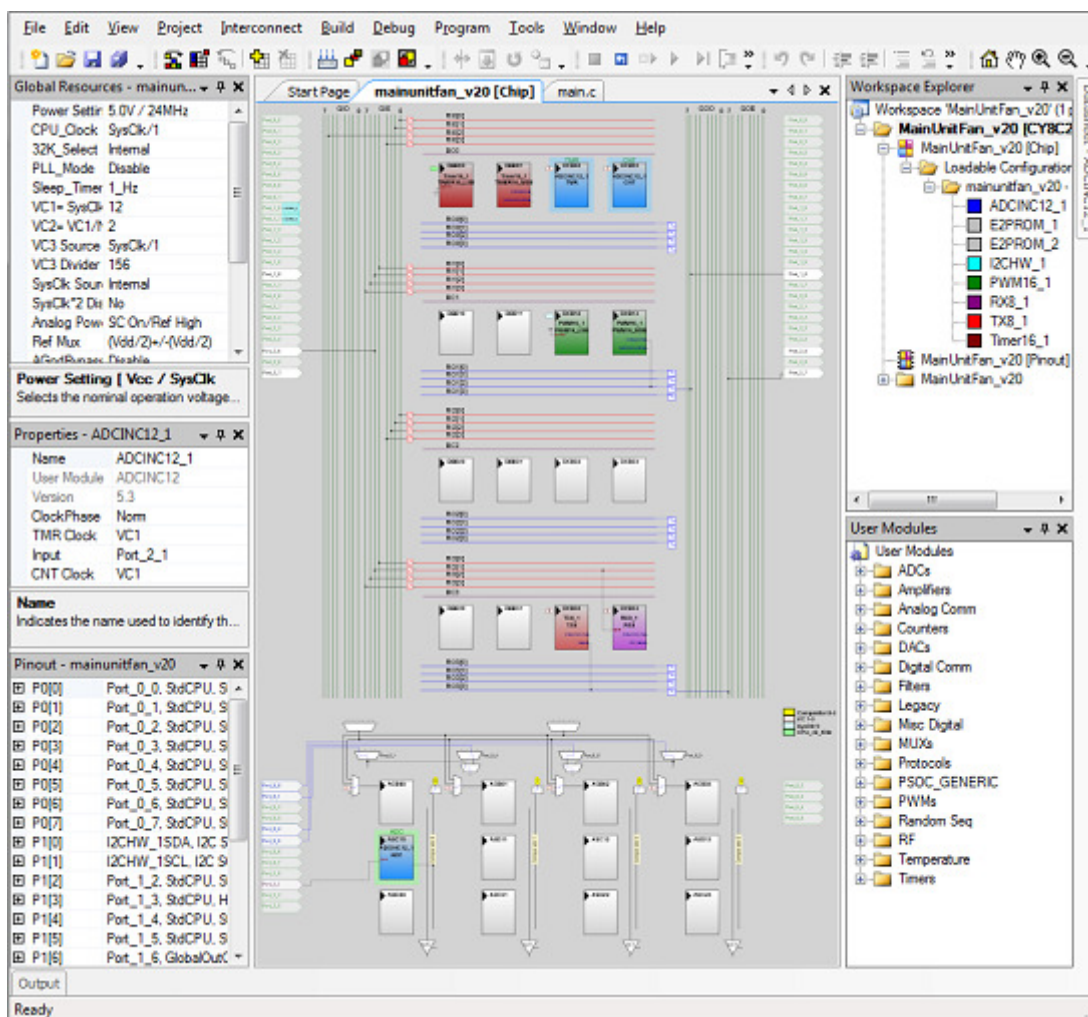
Slika 16: Konzola Fan sistema

Na čelni plošči so tri kapacitivne tipke. Prva z leve omogoča spreminjanje med avtomatskim in ročnim načinom delovanja. Uporaba ročnega in avtomatskega načina delovanja je podrobneje opisana v nadaljevanju. V ročnem načinu lahko z desno tipko (OFF) ventilator izklopimo, s srednjo (ON) pa vklopimo. Stolpec LED diod na levi strani prikazuje trenutno stanje sistema. Uporabnik lahko razbere ali je sistem v avtomatskem (Auto) ali ročnem (Manual) načinu delovanja. Tretja LED dioda z vrha (Inverter fault) je namenjena javljanju alarma s frekvenčnika, ki je del ventilatorja. Četrta LED dioda (Air flow proved) sveti, ko je zagotovljen zadosten pretok zraka. Predzadnja LED dioda (Maximum pressure) zasveti kadar je presežen padec tlaka, ki ga ventilator še prenese brez uničenja. Zadnja (Shutdown alarm) se vklopi, ko se zaradi varnosti ventilator izklopi. To se lahko zgodi zaradi prekomerno umazanih filtrov ali zaradi presežene največje dovoljene obremenitve ventilatorja.

3. Programska oprema

3.1. Razvojno okolje Cypress PSoC designer 5.0

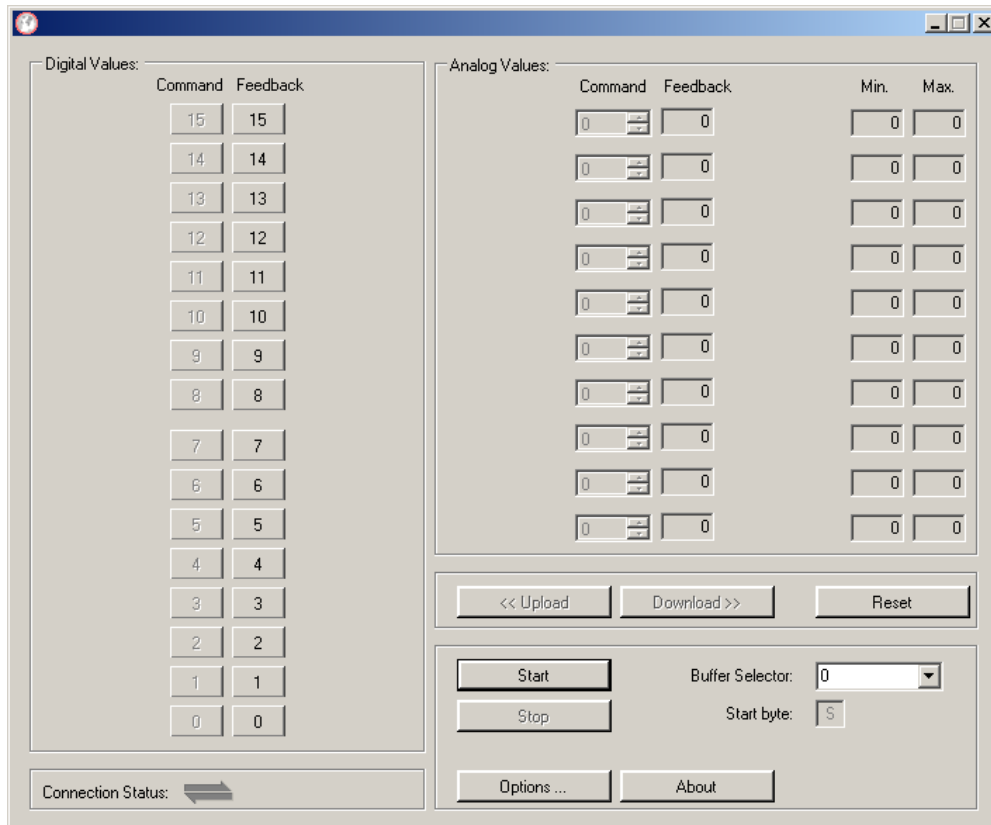
Glavni sestavni del krmilnikov LHC-1.MU2 in LHC-1.MU3 je mikrokrmilnik Cypress PSoC CY8C29466-24PXI [14]. Zato se za njuno programiranje uporablja integrirano razvojno okolje Cypress PSoC designer 5.0 (slika 17) [15]. V njem najprej izberemo, s katero PSoC napravo bomo delali. Sledi izbor in nastavljanje modulov kot so: EEPROM, analogno digitalni in digitalno analogni pretvorniki, moduli, ki omogočajo pulzno širinsko modulacijo, komunikacijo po vodilu I2C, števeci, ura itd. Ko je PSoC čip nastavljen, lahko pričnemo s programiranjem v C-ju ali zbirnem jeziku.



Slika 17: Razvojno okolje Cypress PSoC designer 5.0

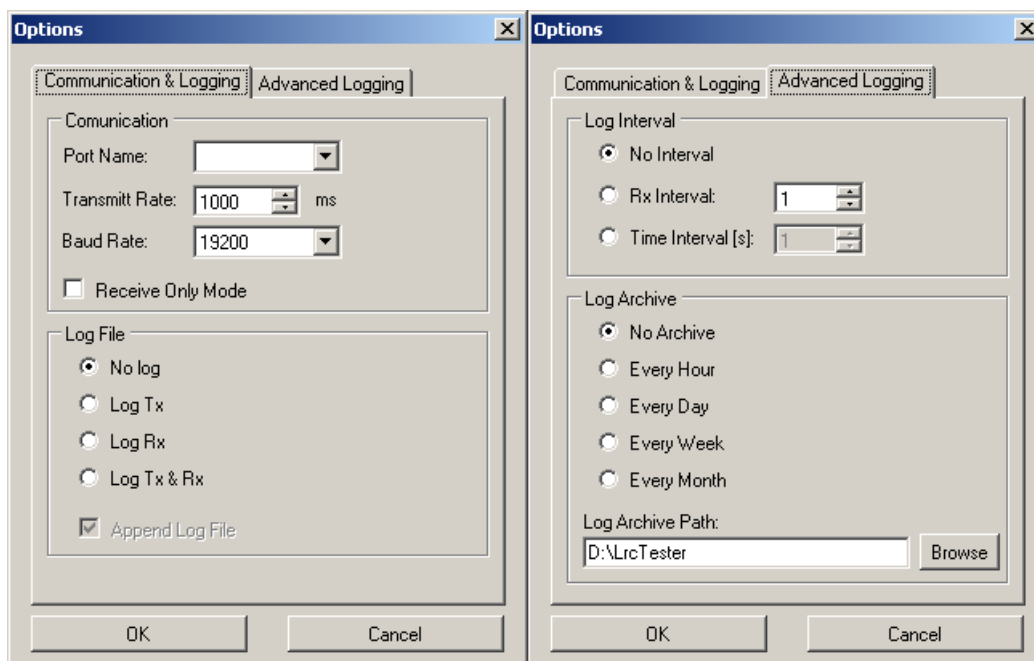
3.2. Program Lrc Tester

Program Lrc Tester nam omogoča spremljanje stanja krmilnikov in spreminjanja njihovih parametrov preko osebnega računalnika. Na sliki 18 je prikazano glavno okno programa.



Slika 18: Glavno okno programa Lrc Tester

Po uspešni fizični povezavi med krmilnikom in računalnikom moramo za komunikacijo pripraviti še program Lrc Tester. Do nastavitev komunikacije in beleženja podatkov pridemo iz glavnega okna programa Lrc Tester s klikom na gumb Options (Možnosti). Naslednja slika prikazuje okno, ki se nam ob tem odpre.



Slika 19: Lrc Tester – nastavitve komunikacije in beleženja podatkov (levo), podrobnejša nastavitve beleženja podatkov (desno)

V zavihku za komunikacijo in beleženje podatkov (Communication & Logging) nastavimo ustrezna vrata na računalniku (Port Name), hitrost povezave (Transmitt Rate) in pasovno širino (Baud Rate), ki mora biti za pravilno komunikacijo enaka 19200. Zavihek za napredno beleženje podatkov (Advanced Logging) omogoča natančnejšo določitev beleženja podatkov.

Komunikacijo s krmilnikom vzpostavimo z gumbom Star in prekinemo z gumbom Stop. Status povezave lahko preverimo v spodnjem levem kotu okna v okvirju Connection Status. Zgornja puščica prikazuje poslane, spodnja pa prejete podatke. Ko je določen paket poslan oziroma sprejet, se puščica obarva zeleno. Na krmilniku lahko spremljamo dve vrsti parametrov. Prvi so zapisani v trajnem spominu (EEPROM), drugi pa v trenutnem spominu (RAM). Parametri, ki se nahajajo v EEPROM-u, nam omogočajo uglasitev delovanja krmilnika, medtem ko so v RAM-u večinoma prikazane le trenutne vrednosti spremenljivk programa, ki teče na krmilniku. Da bi bilo mogoče spreminjati obnašanje krmilnika tekom delovanja, lahko z določenimi ukazi spreminjamo nekatere nastavitve, ki se zapišejo v trajni pomnilnik krmilnika, tudi preko RAM-a. Izbor med prikazovanjem vrednosti EEPROM-a in RAM-a je omogočen v meniju Buffer Selector.

Leva stran Lrc Testerja je rezervirana za prikaz digitalnih podatkov. Lrc Tester lahko sprejema in pošilja dva bajta oziroma 16 binarnih vrednosti. Na desni strani okna so prikazane analogne vrednosti. Teh je na voljo 10. Največja analogna vrednost, ki jo je moč prenesti, je 65535. Pri digitalnih in analognih vrednostih imamo po dva stolpca vrednosti. Levi prikazuje naš ukaz (Command), desni pa vrednost, ki jo krmilnik vrača (Feedback). Za hitro preverjanje analognih podatkov sta na skrajni desni strani prikazani najmanjša in največja vrednost prejetih podatkov. Pri digitalnih in analognih vrednostih lahko poleg poslanih ukazov in prejetih podatkov sami vpišemo opis vrednosti. Katere podatke vidimo v Lrc Testerju, je odvisno od samega programa, ki teče na krmilniku.

3.3. Program Lrc Many

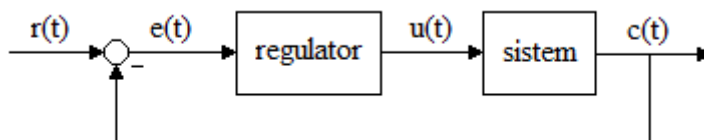
Z dlančnikom se preko IR povezave povežemo s konzolo. Za to potrebujemo program Lrc Many, ki teče na dlančniku. Z dlančnikom preko konzole dostopamo do istih podatkov kot s programom Lrc Tester na računalniku, hkrati pa lahko spreminjamo parametre, ki se shranijo v EEPROM konzole.

3.4. Program GSM Manager

Program GSM Manager nam omogoča nastavitve sim kartice, ki jo modul LPC-1.C05 uporablja za povezavo v GSM omrežje. Hkrati lahko s tem programom spremljamo stanje GSM modula.

4. PID regulacija

Krmilnik LHC-1.MU2 uporablja za krmiljenje pretoka zraka PID regulator [12]. Splošno regulacijsko shemo prikazuje spodnja slika.



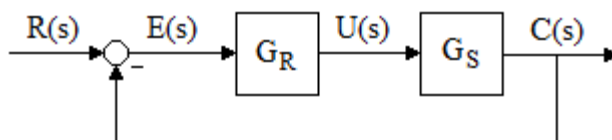
Slika 20: Regulacijska shema v časovnem prostoru [12]

Oznake pomenijo:

- $r(t)$... referenčna veličina,
- $c(t)$... regulirana veličina,
- $e(t)$... pogrešek oziroma razlika med referenčno veličino in regulirano veličino,
- $u(t)$... regulirna veličina.

Vrednost regulirane veličine je potrebno v sistemu najprej izmeriti. Dobljeno vrednost nato primerjamo z referenčno oziroma želeno vrednostjo. Njuna razlika tvori pogrešek. Regulator lahko na podlagi prejetega signala pogreška izračuna regulirno veličino. Slednjo peljemo na vhod sistema, katerega izhodno veličino reguliramo.

Če spremenljivke, ki opisujejo shemo na sliki 20, pretvorimo z Laplaceovo transformacijo iz časovnega prostora v prostor kompleksne spremenljivke, lahko regulator in sistem predstavimo s prenosnima funkcijama, kar prikazuje slika 21.



Slika 21: Regulacijska shema v prostoru s [12]

Oznake na zgornji sliki pomenijo:

- $R(s)$... Laplaceov transform referenčne veličine $r(t)$,
- $C(s)$... Laplaceov transform regulirane veličine $c(t)$,

- $E(s)$... Laplaceov transform pogreška med referenčno in regulirano veličino,
- $U(s)$... Laplaceov transform regulirne veličine,
- $G_R(s)$... prenosna funkcija regulatorja,
- $G_S(s)$... prenosna funkcija sistema.

Regulirano veličino dobimo, če prenosno funkcijo sistema $G_S(s)$ pomnožimo z regulirno veličino $U(s)$:

$$C(s) = G_S \cdot U(s) \quad (24)$$

Regulirna veličina je enaka produktu prenosne funkcije regulatorja $G_R(s)$ in pogreška $E(s)$:

$$U(s) = G_R \cdot E(s) \quad (25)$$

Pogrešek pa dobimo z razliko med referenčno vrednostjo $R(s)$ in regulirano vrednostjo $C(s)$:

$$E(s) = R(s) - C(s) \quad (26)$$

Iz enačbe (26) izrazimo spremenljivko $C(s)$ in jo vstavimo v enačbo (24). Nato v enačbi (24) nadomestimo spremenljivko $U(s)$ z enačbo (25). Če iz dobljene enačbe izrazimo pogrešek $E(s)$, dobimo naslednji izraz:

$$E(s) = \frac{R(s)}{1 + G_S G_R} \quad (27)$$

Če pogrešek, zapisan v prostoru s , pomnožimo s kompleksno frekvenco s in v dobljenem izrazu spremenljivko s limitiramo proti 0, dobimo kot rezultat pogrešek v ustaljenem stanju, podan v časovnem prostoru:

$$e_{ss}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot E(s) \quad (28)$$

Pogrešek v ustaljenem stanju lahko uporabimo za vrednotenje delovanja regulatorjev, saj nam pove, koliko se bo dejanska vrednost regulirane veličine razlikovala od želene.

4.1. Proporcionalni člen P

Za proporcionalni regulator je značilno, da je regulirna veličina prenosorazmerna s pogreškom. To odvisnost prikazuje naslednja enačba:

$$u(t) = K_P \cdot e(t) \quad (29)$$

Za oceno uporabnosti proporcionalnega regulatorja lahko uporabimo izraz, ki ga podaja enačba (28). Za ta namen predpostavimo, da reguliramo sistem prvega reda. Fizikalno gledano je to lahko RC vezje, termični sistem, hidravlični sistem, motor itd. Prenosna funkcija takšnega sistema je:

$$G_s = \frac{1}{Ts + 1} \quad (30)$$

Prenosna funkcija regulatorja pa je enaka:

$$G_R = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P \quad (31)$$

Naj bo referenčna vrednost enaka enotini stopnici $r(t) = 1(t)$. Njen Laplaceov transform je enak $R(s) = 1/s$. Z uporabo enačbe (28) dobimo pogrešek v ustaljenem stanju:

$$e_{ss}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{R(s)}{1 + G_s G_R} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{\frac{1}{s}}{1 + \frac{1}{Ts + 1} \cdot K_P} = \frac{1}{K_P + 1} \quad (32)$$

Če je referenca naraščajoč signal $r(t) = t$ in njen Laplaceov transform $R(s) = 1/s^2$, dobimo naslednji pogrešek v ustaljenem stanju:

$$e_{ss}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{R(s)}{1 + G_s G_R} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{\frac{1}{s^2}}{1 + \frac{1}{Ts + 1} \cdot K_P} = \frac{1}{0} \rightarrow \infty \quad (33)$$

Pri stopničasti referenci je pogrešek v ustaljenem stanju različen od nič in odvisen od vrednosti ojačanja K_P . Z večanjem proporcionalnega ojačanja lahko pogrešek znižamo, vendar bo preveliko ojačanje privedlo do nihajočega odziva. Naraščajoči referenci proporcionalni regulator ne more slediti. Tako gre pogrešek v ustaljenem stanju proti neskončnosti.

4.2. Integrirni člen I

Regulirno veličino integrirnega regulatorja podaja naslednja enačba:

$$u(t) = K_I \int e(t) dt \quad (34)$$

Enačbo (34) lahko zapišemo tudi v naslednji obliki:

$$\frac{du(t)}{dt} = K_I \cdot e(t) \quad (35)$$

Vidimo, da je hitrost regulirne veličine proporcionalna pogrešku. V zgornjih dveh enačbah K_I predstavlja integracijsko konstanto integrirnega regulatorja. Prenosna funkcija regulatorja je:

$$G_R = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_I}{s} \quad (36)$$

Bistvena lastnost integrirnega regulatorja je v tem, da lahko proizvaja regulirno veličino tudi, če je pogrešek enak nič. To pa zato, ker so pretekle vrednosti pogreška "napolnile" regulator.

V primeru, da imamo integrirni regulator v regulacijski shemi, ki jo prikazuje slika 21 dobimo za pogrešek, podan v prostoru kompleksne spremenljivke s , naslednjo obliko:

$$E(s) = \frac{R(s)}{1 + G_R(s)G_S(s)} = \frac{R(s)}{1 + \frac{K_I}{s} \frac{1}{Ts+1}} = \frac{(Ts^2 + s)R(s)}{Ts^2 + s + K_I} \quad (37)$$

Za primerjavo proporcionalnega in integrirnega regulatorja ponovno privzemimo, da reguliramo sistem prvega reda. V primeru, da je referenčna vrednost enaka enotini stopnici, dobimo naslednji pogrešek v ustaljenem stanju:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{(Ts^2 + s) \frac{1}{s}}{Ts^2 + s + K_I} = 0 \quad (38)$$

V primeru, da je referenca enaka naraščajočemu signalu $r(t) = t$, je pogrešek v ustaljenem stanju enak:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{(Ts^2 + s) \frac{1}{s^2}}{Ts^2 + s + K_I} = \frac{1}{K_I} \quad (39)$$

Vidimo, da lahko z integrirnim regulatorjem pri stopničasti referenci popolnoma izničimo pogrešek v ustaljenem stanju. Pri naraščajočih referenčnih signalih, sicer dobimo pogrešek različen od nič, vendar ga lahko z večanjem ojačanja znižamo. Tudi tukaj moramo paziti, da ojačanja ne zvišamo preveč, saj dobimo v nasprotnem primeru nihajoč odziv.

4.3. Diferencirni člen D

Izhodna vrednost diferencirnega regulatorja je proporcionalna odvodu pogreška, kar prikazuje naslednja enačba:

$$u(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (40)$$

S pretvorbo enačbe (40) v prostor kompleksne spremenljivke s dobimo naslednji zapis:

$$U(s) = K_D s E(s) \quad (41)$$

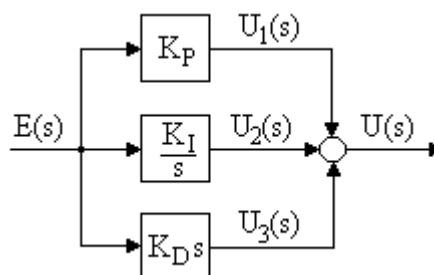
S preoblikovanjem enačbe (41) pa lahko izrazimo prenosno funkcijo diferencirnega regulatorja:

$$G_R = \frac{U(s)}{E(s)} = K_D s \quad (42)$$

Diferencirni regulator se samostojno ne uporablja. V povezavi s proporcionalnim ali integrirnim regulatorjem pa poveča občutljivost regulatorja na spremembo pogreška. Ker se odziva glede na spremembo pogreška, deluje prediktivno in izvaja hitre popravke v regulacijski zanki. Sam diferencirni člen nima vpliva na pogrešek v ustaljenem stanju. Ker pa poveča stabilnost, omogoča povečanje ojačanja proporcionalnega regulatorja in s tem zmanjšanje pogreška v ustaljenem stanju.

4.4. Združeni členi P, I in D v PID regulatorju

PID regulator realiziramo s paralelno kombinacijo proporcionalnega, diferencirnege in integrirnega člena. Spodnja slika prikazuje bločni diagram PID regulatorja.



Slika 22: Bločni diagram PID regulatorja [12]

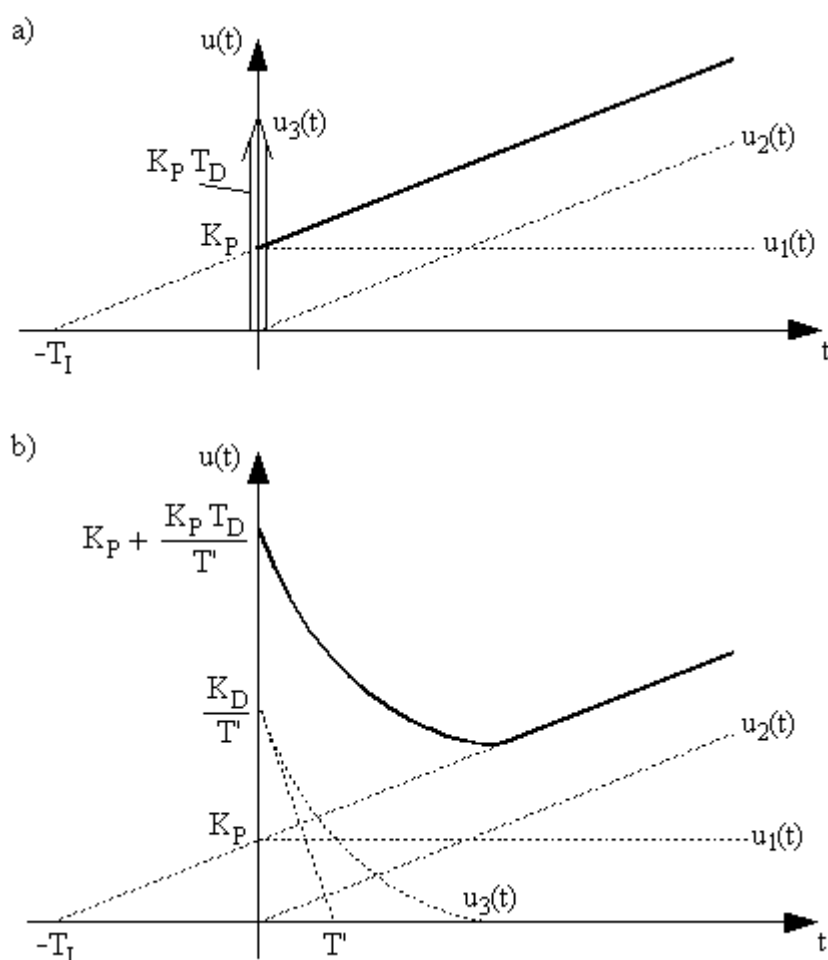
Prikazan je idealni diferencirni člen. Enačba (43) podaja prenosno funkcijo idealnega PID regulatorja:

$$G_R = K_P \cdot \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s\right) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (43)$$

Idealni diferencirni člen se na stopničasti signal odzove hipoma in z neskončno regulirno veličino, kar zahteva neskončno moč. Ker je to v praksi nemogoče izvesti, dodamo idealnemu členu zakasnitev prvega reda. Dobljen PID regulator je v praksi izvedljiv in ga podaja naslednja enačba:

$$G_R = K_P \cdot \left(1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{T' s + 1}\right) = K_P + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D s}{T' s + 1} \quad (44)$$

Slika 23 prikazuje odziv idealnega in realnega PID regulatorja na stopničasti signal pogreška.



Slika 23: Odziv PID regulatorja na stopničasti signal pogreška:

- a) idealni primer
- b) realni primer [12]

4.5. Digitalna izvedba PID regulatorja

Enačba (45) prikazuje enačbo zveznega PID regulatorja.

$$u(t) = K_P (e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt}) \quad (45)$$

Če pa želimo regulacijo izvesti programsko, zgornjo enačbo diskretiziramo. To storimo z zamenjavo integrala z vsoto in odvoda z diferenco. Tako dobimo PID regulacijski algoritem v diskretni obliki, ki je primeren za uporabo na računalnikih:

$$u(k) = K_P (e(k) + \frac{T_0}{T_I} \sum_{i=1}^k e(i-1) + \frac{T_D}{T_0} (e(k) - e(k-1))) \quad (46)$$

V zgornji enačbi T_0 pomeni čas med dvema zajetima vzorcema. V našem primeru smo z modulom LHC.1-VV1 zajemali vrednosti tlaka na vsako sekundo. Regulacijski algoritem, ki ga uporablja krmilnik LHC.1-MU2, prikazuje spodnja funkcija.

```
unsigned int SetFanRef(unsigned int pressureRef, unsigned int pressureAct,
unsigned int fanReference)
{
    static signed int fanRefMem=0;           // Prejšnji izhod za ventilator
    static signed int pressureDeltaOld=0;    // Napaka iz prejšnjega izračuna
    static signed int pressureDeltaSum=0;    // Vsota vseh prejšnjih napak
    signed int pressureDelta=0;              // Napaka tlaka
    unsigned int pressureDeadband=0;         // Mrtvo območje regulacije
    unsigned char divider=10;                // Delitelj za decimalke ojačanj
    unsigned char sampleTime=1;              // Čas zajemanja vzorcev tlaka
    unsigned int P,I,D;                      // Koeficients of PID regulator
    signed PID;                              // Ojačanja PID regulatorja

    if(regSource == INTERNAL)                // Regulacija pretoka - PID
    {
        pressureDelta = pressureRef-pressureAct;
        if(pressureDelta>EE_MAXDELTA_PRESS)
            pressureDelta=EE_MAXDELTA_PRESS;
        else if(pressureDelta<(-1*EE_MAXDELTA_PRESS))
            pressureDelta=EE_MAXDELTA_PRESS*(-1);
    }
```

```

pressureDeadband = (int)((float)EE_PRESSURE_DB/100) *
((float)(pressureRef));

if(pressureDeadband > (pressureRef/2))
    pressureDeadband = (pressureRef/2);
else if(pressureDeadband < 1)
    pressureDeadband = 1; // Spodnja meja je 1 Pa

if(abs(pressureDelta)>pressureDeadband)
{
    P = (signed int)( ((float)(EE_PID_K_P)) / ((float)(divider)) *
((float)(pressureDelta)) );
    I = (signed int)( ((float)(EE_PID_K_I)) / ((float)(divider)) *
((float)(pressureDeltaSum)) * ((float)sampleTime /10));
    D = (signed int)( ((float)(EE_PID_K_D)) / ((float)(divider)) *
((float)(pressureDelta-pressureDeltaOld)) / ((float)sampleTime
/10));
    PID=P+I+D;
    pressureDeltaSum=pressureDeltaSum+pressureDelta;
    pressureDeltaOld=pressureDelta;
    fanRefMem=PID;
}
}
else // Regulacija pretoka preko Filter sistema
{
    if(tolerancePressure == TRUE) // Tlak znotraj toleran.-polovičen korak
    {
        if(baselinePressure == TRUE)
            fanRefMem = fanRefMem - EE_PRESS_STEP/2; // Visok tlak
        else
            fanRefMem = fanRefMem + EE_PRESS_STEP/2; // Nizek tlak
    }
    else // Tlak je zunaj tolerance-celoten korak
    {
        if(baselinePressure == TRUE)
            fanRefMem = fanRefMem - EE_PRESS_STEP; // Visok tlak
        else
            fanRefMem = fanRefMem + EE_PRESS_STEP; // Nizek tlak
    }
}
}

```



```

if (fanRefMem > 10000)
    fanRefMem = 10000;           // Zgornja omejitev izhoda za ventilator
else if (fanRefMem < 0)
    fanRefMem = 0;               // Spodnja omejitev izhoda za ventilator

return (fanRefMem);             // Izračunan izhod za ventilator
}

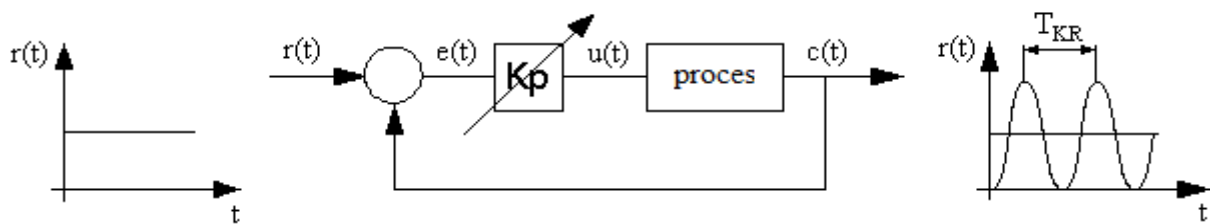
```

4.6. Nastavitev PID regulatorja

Obstaja več nastavitvenih pravil, s katerimi določimo ojačanja posameznih členov PID regulatorja. Pri tem se uporablja pokazatelje kakovosti regulacije oziroma regulacijske cenilke. Nekatere od njih so: čas vzpona, maksimalni prevzpon in umiritveni čas. Pri določevanju parametrov PID regulatorja smo uporabili metodo Ziegler-Nichols z nihajnim preizkusom.

4.6.1. Metoda Ziegler - Nichols z nihajnim preizkusom

Ta metoda zahteva poizkus v zaprti zanki, v kateri uporabimo le proporcionalni regulator. To pomeni, da ojačanje integrirnega in diferencirnega člena postavimo na nič. Regulacijskemu sistemu povečujemo ojačanje K_p , dokler regulirana veličina ne zaniha nedušeno. Ojačanje, pri katerem regulirna veličina nedušeno zaniha, imenujemo kritično ojačanje. Postopek iskanja kritičnega ojačanja prikazuje spodnja slika.



Slika 24: Metoda Ziegler-Nichols z nihajnim preizkusom [12]

Poleg kritičnega ojačanja potrebujemo za določitev parametrov PID regulatorja po tej metodi tudi kritično periodo T_{KR} . To je perioda, s katero niha odziv procesa pri kritičnem ojačanju. Spodnja tabela podaja parametre PID regulatorja, ki sta jih predlagala Ziegler in Nichols.

Vrsta regulatorja	K_P	T_I	T_D
P	$0,5 K_{KR}$	∞	0
PI	$0,45 K_{KR}$	$0,83 T_{KR}$	0
PID	$0,6 K_{KR}$	$0,5 T_{KR}$	$0,125 T_{KR}$

Tabela 3: Parametri regulatorjev po metodi Ziegler – Nichols [12]

Ojačanja K_P , K_I in K_D PID regulatorja dobimo z naslednjimi enačbami:

$$K_P = 0,6 T_{KR} \quad (47)$$

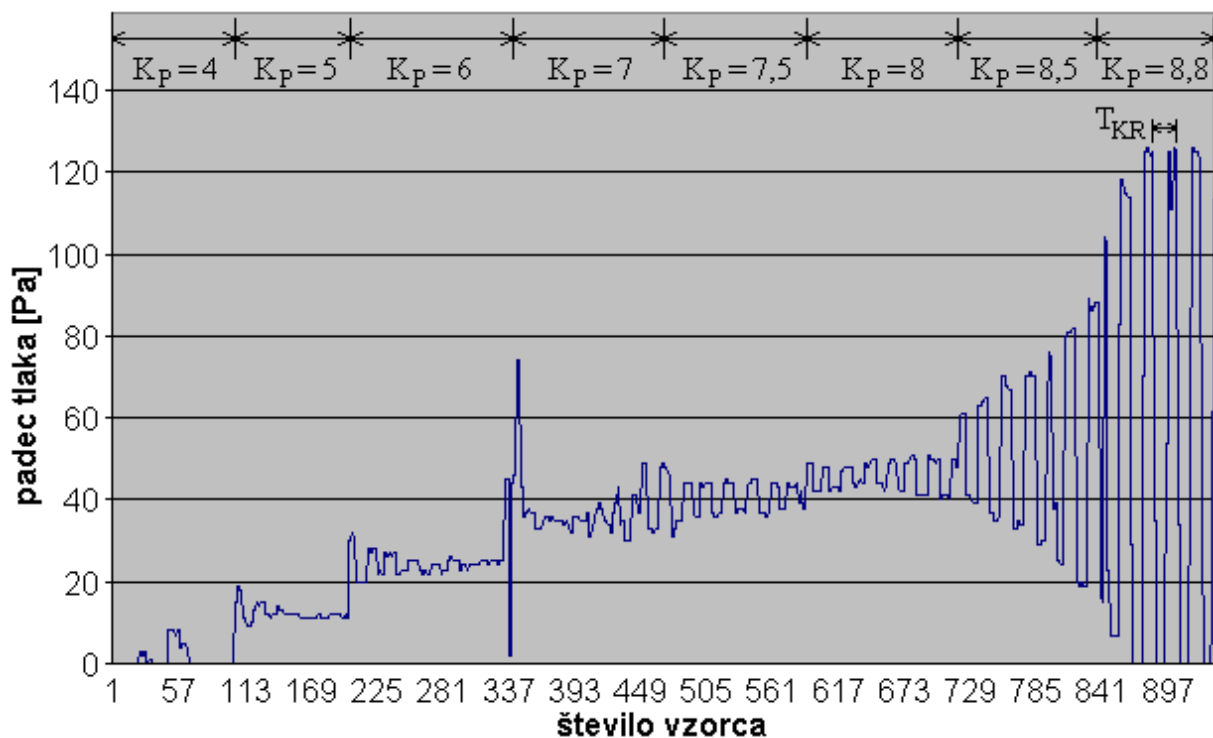
$$K_I = \frac{K_P}{T_I} = \frac{0,6 K_{KR}}{0,5 T_{KR}} \quad (48)$$

$$K_D = K_P T_D = 0,075 T_{KR} K_{KR} \quad (49)$$

Postopek določevanja ojačanj PID regulatorja

Ker v času pisanja diplomske naloge nismo imeli na razpolago pravih filtrov, ki bi jih lahko povezali v sistem, smo za filter uporabili kar peno, ki smo jo namestili v cevi, skozi katero je ventilator poganjal zrak. Seveda ojačanja PID regulatorja, ki smo jih dobili, ne bi veljala za realne filtre, vendar bi po enakem postopku lahko dobili prava ojačanja.

Integrirno in diferencirno ojačanje smo postavili na 0, referenčno vrednost tlaka pa smo nastavili na 200 Pa. Nato smo pričeli s povečevanjem proporcionalnega ojačanja. Pri tem smo s krmilnika LHC-1.MU2 na vsake pol sekunde zajeli vrednost tlaka, ki ga je izmeril modul LHC-1.MU1. Dobili smo naslednji graf.



Graf 9: Odziv sistema pri naraščajočem ojačanju K_P in pri $K_I = 0$ ter $K_D = 0$

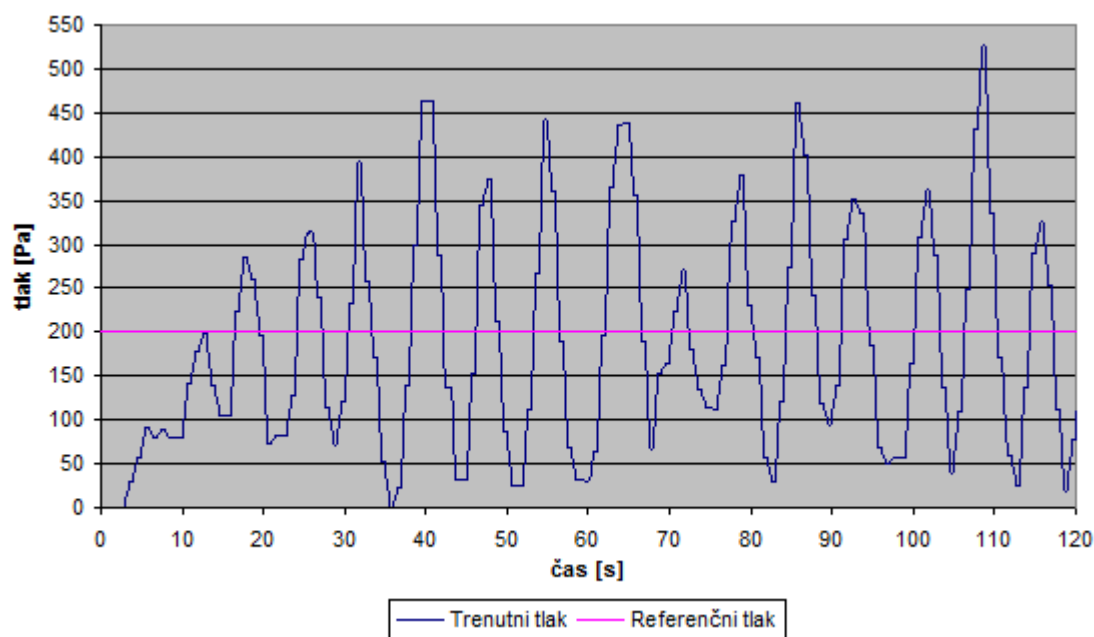
Pri ojačanju med 8,5 in 8,8 je odziv nedušeno zanihal. Iz znanega časovnega koraka zajemanja podatkov 0,5 s in zabeleženih vrednostih smo dobili kritično periodo $T_{KR} = 9$ s. Dobili smo naslednja ojačanja PID regulatorja.

$$K_P = 0,5 \cdot 8,8 = 5,3 \quad (50)$$

$$K_I = \frac{1,2 \cdot 8,8}{9} = 1,2 \quad (51)$$

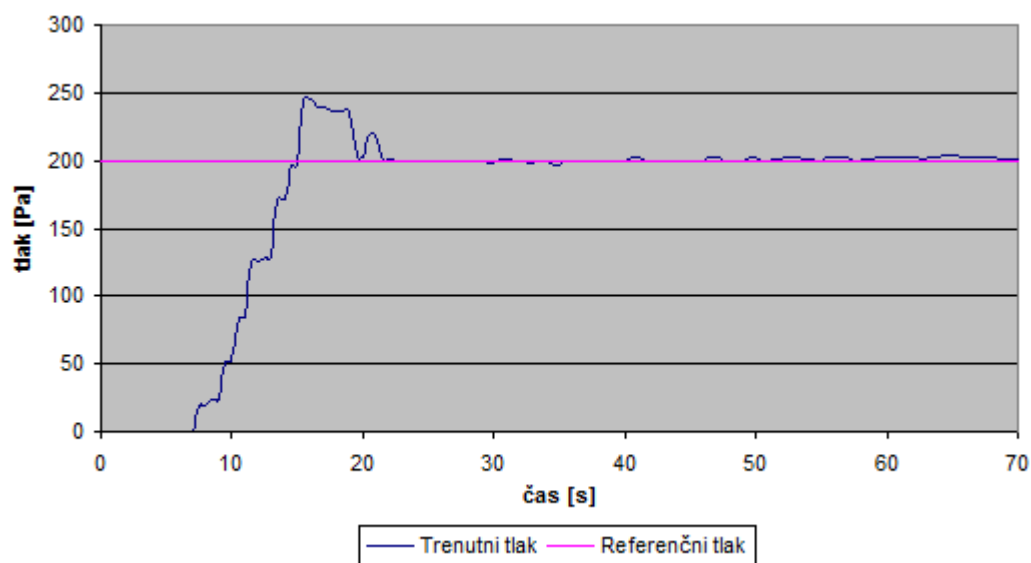
$$K_D = 0,075 \cdot 9 \cdot 8,8 = 5,9 \quad (52)$$

Z zgornjimi ojačanji PID regulatorja smo dobimo naslednji odziv sistema.



Graf 10: Odziv sistema pri ojačanjih $K_P = 5,3$, $K_I = 1,2$ in $K_D = 5,9$

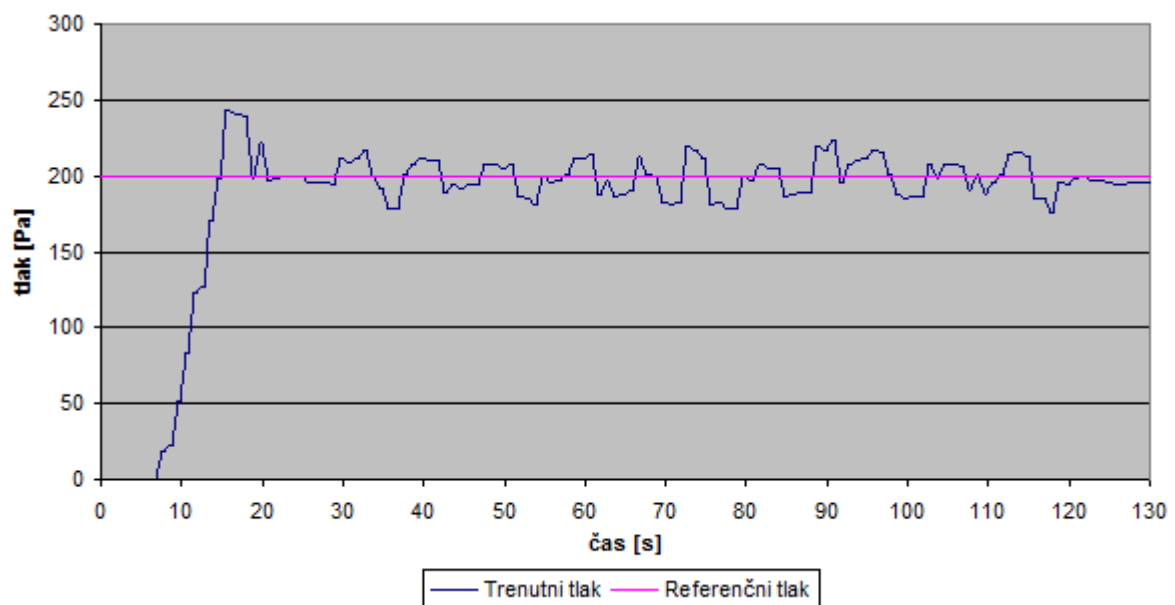
Nastavitvena pravila Zieglerja in Nicholisa naj bi dajala pri stopničasti referenci prevzpon od 10 % do 60 %, vendar smo v našem primeru dobili celo nihajoč odziv. Znaná slabost regulatorjev, nastavljenih s to metodo, je, da dajejo premajhno dušenje v zaprti zanki. To metodo smo uporabili z namenom najti okvirne vrednosti parametrov, ki smo jih nato eksperimentalno prilagodili. Na grafu 10 se vidi, da so izračunani parametri dosti preveliki, saj je odziv nihajoč. Zato smo naprej preizkusili s prepolovljenimi vrednostmi parametrov, ki so dali veliko boljši odziv. Slednje smo nato še malenkost prilagodili, tako da smo dobili odziv sistema, prikazan na grafu 11.



Graf 11: Odziv sistema pri ojačanjih $K_P = 2,5$, $K_I = 2,5$ in $K_D = 2,5$

Pri izračunu PID parametrov smo omejili največjo možno razliko med trenutnim in želenim tlakom, ki jo regulator uporabi pri izračunu krmilnega signala za ventilator, na 100 Pa. S tem smo onemogočili prevelike skoke krmilnega signala pri zagonu sistema in pri izkrmiljenju motenj. Hkrati smo tudi nastavili mrtvo območje regulacije na 3 % referenčne vrednosti tlaka. Ker je v tem primeru referenčni tlak enak 200 Pa to pomeni, da v območju tlaka od 194 Pa do 206 Pa izhod krmilnika ne spreminja vrednosti. Tako zagotovimo bolj konstantno delovanje motorja ventilatorja.

Preizkusili smo tudi odzivanje sistema na motnje. Slednje smo simulirali tako, da smo z odpiranjem in zapiranjem lopute spreminjali pretok v cevi. Naslednji graf prikazuje kako se je regulator prilagajal motnjam v sistemu.



Graf 12: Prilagajanje regulatorja na motnje

Dobljene nastavitve za PID regulator so seveda uporabne le v naših laboratorijskih razmerah. Na realnem objektu bi na podoben način prišli do pravih nastavitvev PID regulatorja.

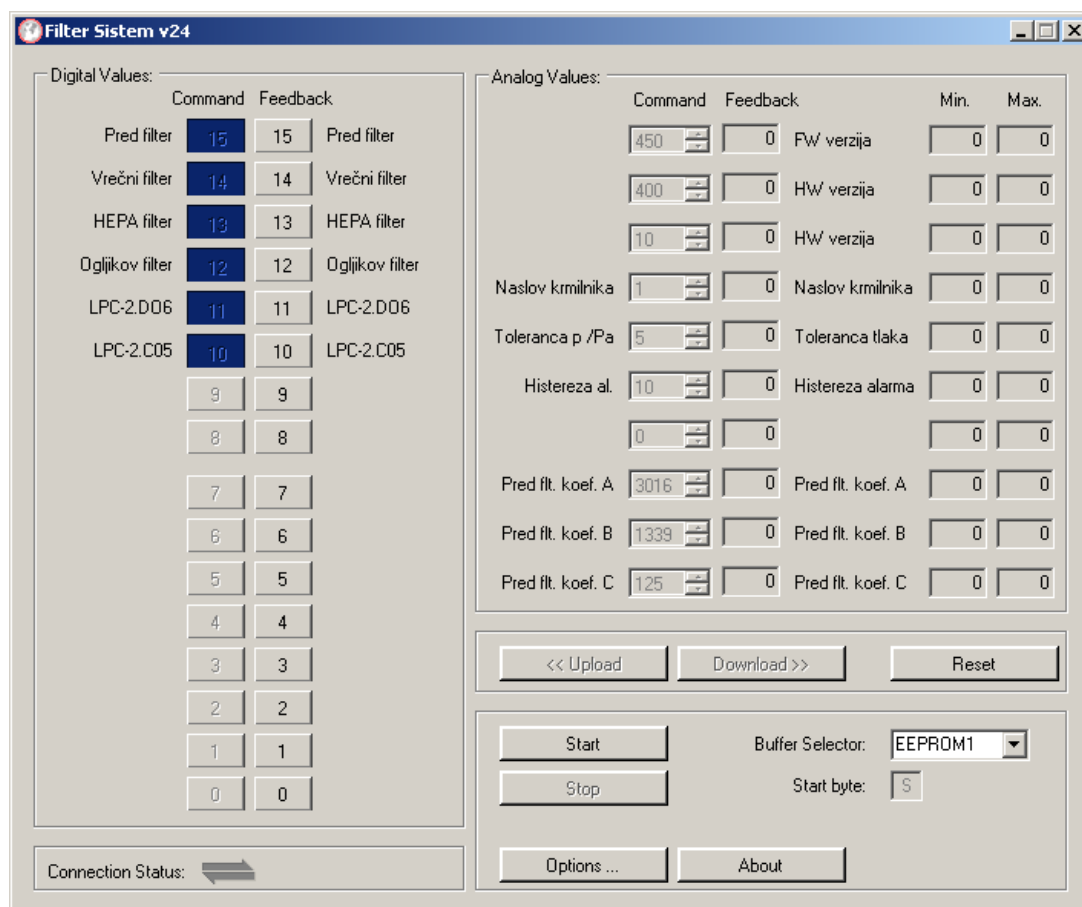
5. Nastavitev in spremljanje delovanja sistema Pollustop

5.1. Nastavitev in spremljanje delovanja Filter sistema

Za pravilno delovanje Filter sistema je potrebno pravilno nastaviti krmilnik LHC-1.MU3 in konzolo Filter sistema. Krmilnik lahko nastavimo s pomočjo programa Lrc Tester, konzolo pa preko dlančnika z aplikacijo LrcMany.

5.1.1. Nastavitev parametrov krmilnika LHC-1.MU3

S pomočjo Lrc Testerja lahko s krmilnika beremo in nanj zapisujemo parametre, ki se shranijo v njegov trajen spomin EEPROM. Ker ima krmilnik več kot deset analognih parametrov, so prikazani v dveh oknih. Prvo je označeno z *EEPROM1* (slika 25), drugo pa z *EEPROM2* (slika 26). Med njima preklapljam v meniju *Buffer Selector*.



Slika 25: Lrc Tester, EEPROM 1 krmilnika Filter sistema

Digitalni parametri

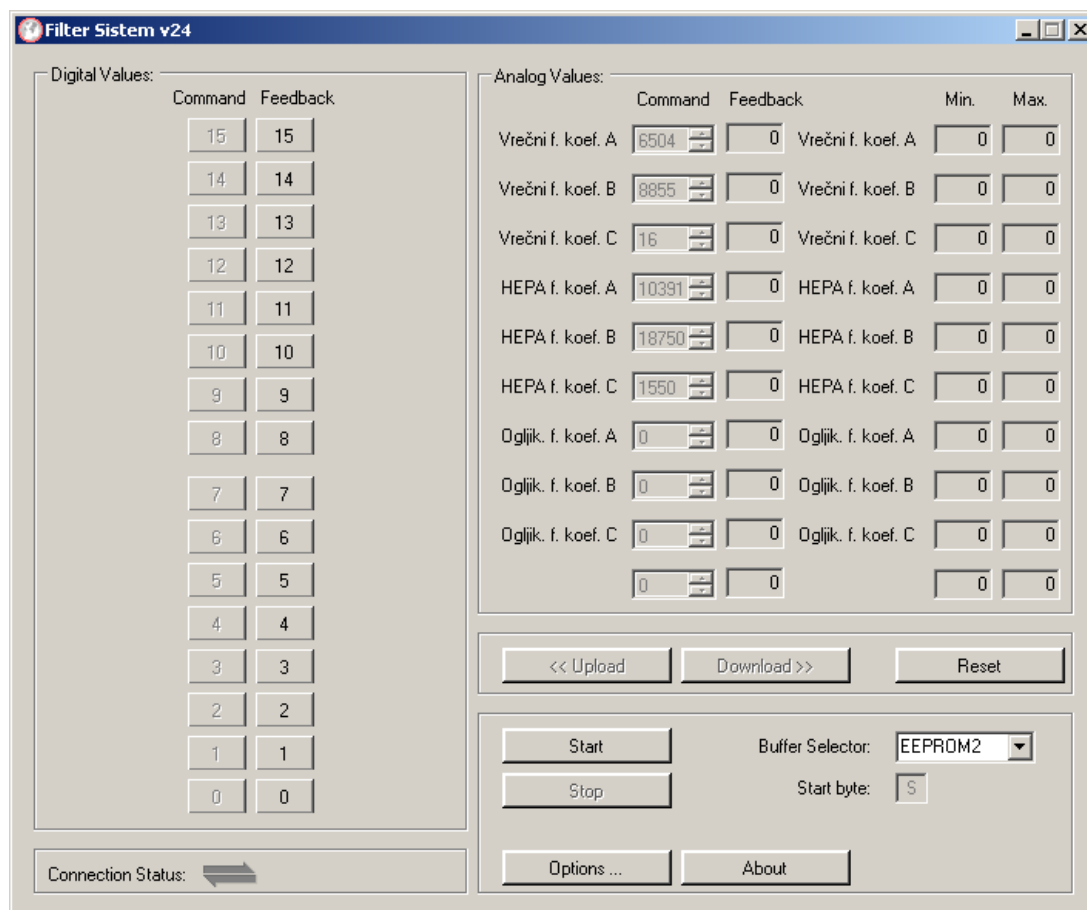
S pomočjo digitalnih bitov izberemo module, ki so priključeni na krmilnik. Če na primer aplikacija vsebuje le predfilter in vrečni filter, potrebujemo dva modula LHC-1.VV3 za merjenje padcev tlaka. Da ne bi krmilnik po nepotrebnem skušal komunicirati tudi s preostalima dvema moduloma LHC-1.VV3, ki jih pri takšni aplikaciji ni, na tem mestu s postavitvijo ustreznih bitov določimo uporabo dveh merilnih modulov. Enako lahko določimo prisotnost relejskega modula LPC-2.DO6 in GSM modula LPC-2.C05. Vendar z odstranitvijo slednjih dveh onemogočimo določene funkcije Filter sistema.

Analogni parametri

Analogni parametri, ki jih je potrebno nastaviti so:

- *Naslov krmilnika*; ta parameter je potreben za aplikacije, kjer je v mreži več krmilnikov, tako da lahko Konzola z vsemi pravilno komunicira. Ker je trenutno možno priklopiti le en krmilnik, se naslov krmilnika vedno nastavi na vrednost 1,
- *Toleranca tlaka*; vnese se v paskalih in pomeni največje dovoljeno odstopanje tlaka pri računanju povprečne vrednosti začetnega tlaka na čistih filtrih,
- *Histereza alarma*; podana je v paskalih in prepreči spreminjanje stanja alarma pri mejnih vrednostih,
- *Koeficienti pred filtra A, B in C*; to so koeficienti polinomskega modela druge stopnje za predfilter. Ker Lrc Tester ne omogoča vpisa decimalnih števil, se cifri z najnižjima vrednostma štejeta kot decimalni števili, ostale tri pa kot enice, desetice in stotice. Tako vrednost 3016, ki je na sliki 25 vpisana za Pred filter koeficient A, pomeni število 30,16.

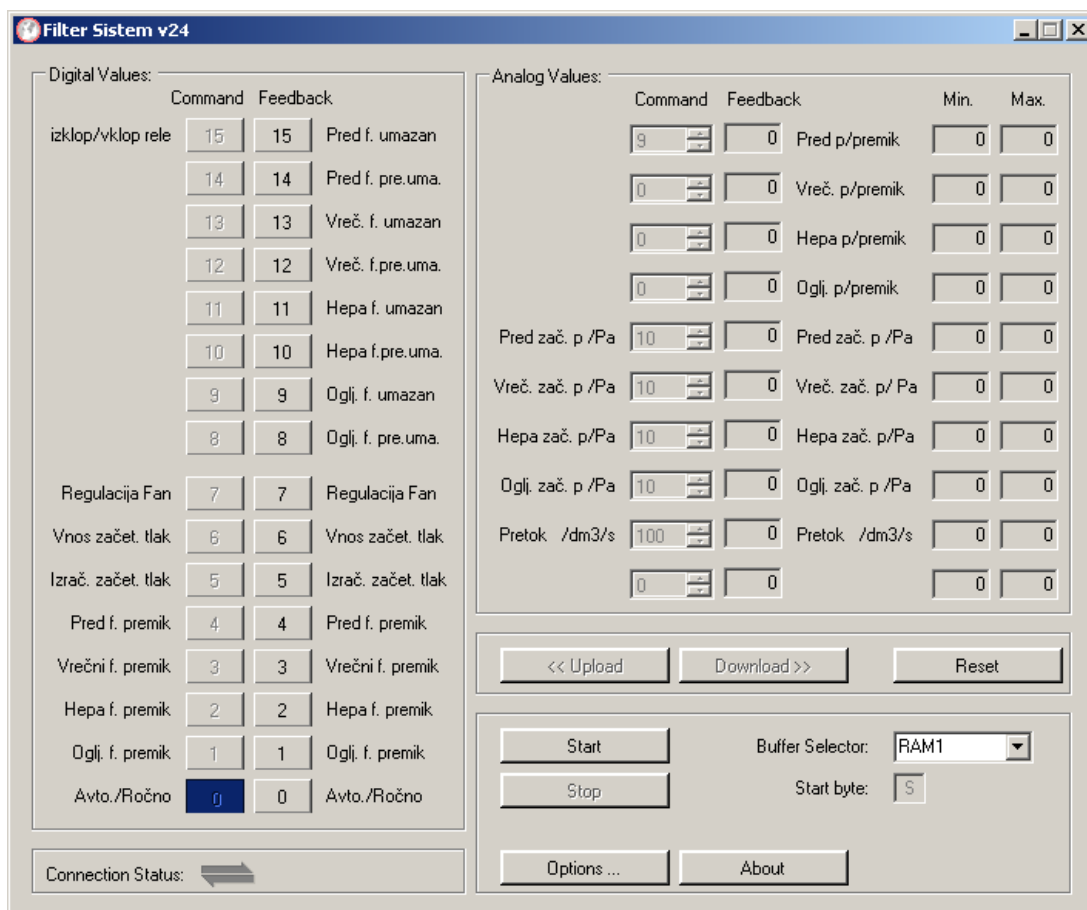
Okno s parametri drugega EEPROM-a prikazuje slika 26. V tem oknu podamo koeficiente A, B in C za polinomske modele preostalih treh filtrov. Tudi pri teh velja enak način vpisa parametrov, kot pri zgoraj opisanem predfilteru. Ker nismo uspeli pravočasno pridobiti natančnih podatkov o ogljikovem filteru, smo za ponazoritev delovanja za vse tri koeficiente modela filtra izbrali vrednost 10. Vpisane vrednosti zapišemo v EEPROM krmilnika z gumbom Download.



Slika 26: Lrc Tester, EEPROM 2 krmilnika Filter sistema

5.1.2. Spremljaje delovanja krmilnika LHC-1.MU3

Za pregled vrednosti trenutnih spremenljivk krmilnika je potrebno izbrati *RAM1* v meniju *Buffer Selektor*. V oknu, ki se nam odpre, vidimo digitalne in analogne vrednosti pomembnejših spremenljivk za delovanje sistema. Preko tega okna je mogoče sprožiti tudi ukaze, ki povzročijo zapis parametrov v trajen spomin. Predvsem so to parametri, katerih vrednosti med delovanjem pogosteje spreminjamo. Na sliki 27 je prikazano okno Lrc Testerja s spremenljivkami RAM pomnilnika.



Slika 27: LRC Tester, RAM 1 krmilnika Filter sistema

Digitalne vrednosti, ki jih vrača krmilnik, lahko razdelimo na alarme in potrditve izvedenih ukazov. Zgornjih osem bitov v stolpcu je namenjenih javljanju alarmov umazanih in prekomerno umazanih filtrov (biti od 15 do 8). Ostali biti, ki jih vrača krmilnik so potrditve o izvedbi naših ukazov. Pogoji, da je katerikoli ukaz sprejet, je postavljen bit (gumb) *Avtomatsko/Ročno* (bit 0). Ta preklopi delovanje krmilnika v ročni način. S tem preprečimo sprožitev ukazov po pomoti. Zgornji bit (bit 15) je namenjen testiranju delovanja relejev modula LPC-2.DO6. Z njim lahko vse releje sklenemo ali razklenemo.

Ukazi *Pred filter premik* (bit 4), *Vrečni filter premik* (bit 3), *Hepa filter premik* (bit 2) in *Ogljikov filter premik* (bit 1) se uporabljajo za izračun premika izhoda senzorja tlaka od vrednosti nič. Pri izračunu premika mora biti razlika tlaka, priključenega na cevki senzorja, enaka nič. Umerjanje tlačnega senzorja poteka tako, da krmilnik z modula LHC-1.VV3 zajame več izmerjenih vrednosti tlaka in nato iz dobljenih vrednosti izračuna povprečno vrednost tlaka. Slednja predstavlja premik izhoda senzorja od vrednosti nič. Da dobimo pravilno vrednost tlaka, se od izmerjene vrednosti tlaka vedno odšteje premik tlaka. Ko je

krmilnik v ročnem načinu, so vrednosti premikov tlačnih senzorjev prikazane v poljih analognih vrednosti označenih z *Pred tlak/premik*, *Vrečni tlak/premik*, *Hepa tlak/premik* in *Ogljikov tlak/premik*. Kadar pa je krmilnik v avtomatskem načinu, so v teh poljih prikazani trenutni padci tlakov, ki jih krmilnik prebere z merilnih modulov LHC-1.VV3.

Z bitom *Vnos začetnega tlaka* (bit 6) lahko shranimo začetne padce tlakov na filtrih pri delovni vrednosti pretoka zraka skozi filtre. Vpis teh vrednosti nam omogoča pravilen prikaz umazanosti filtrov na konzoli. Ukaz deluje v povezavi z analognimi polji za vnašanje podatkov. Ta so *Pred začetni tlak*, *Vrečni začetni tlak*, *Hepa začetni tlak* in *Ogljikov začetni tlak*. Če želimo ročno vpisati, kakšni so padci tlakov na čistih filtrih pri delovnem pretoku zraka, slednje vpišemo v zgoraj našeta polja za predfilter, vrečni filter, HEPA filter in ogljikov filter, ter nato postavimo bit *Vnos začetnega tlaka*. Ko se postavi bit *Vnos začetnega tlaka* v stolpcu za povratno informacijo (*Feedback*), vemo, da so se podatki uspešno shranili v EEPROM.

Poleg ročnega vpisa začetnih padcev tlakov na filtrih je mogoč tudi izračun teh vrednosti. Slednji temelji na koeficientih polinomskih modelov filtrov, ki se podajo preko *EEPROM1* in *EEPROM2*. Za izračun padcev tlakov je poleg koeficientov potrebno podati še vrednost delovnega pretoka zraka skozi filtre. Slednjega vpišemo v analogno polje z opisom *Pretok /dm³/s*. Iz opisa polja je razvidno, da se pretok zraka vnaša v dm³/s. Izračun se izvede s postavitvijo bita *Izračun začetnega tlaka* (bit 5). Po izračunu in vpisu padcev tlaka v EEPROM, lahko slednje vidimo v analognih poljih povratnih vrednosti s krmilnika, ki so označena z opisi *Pred začetni tlak*, *Vrečni začetni tlak*, *Hepa začetni tlak* in *Ogljikov začetni tlak*. Naslednja koda prikazuje funkcijo, ki jo uporablja krmilnik za izračun padcev tlaka na podlagi modela filtra in delovnega pretoka zraka.

```
unsigned int CalcFltBaseline(unsigned int airFlow, unsigned int
ee_koef_A, unsigned int ee_koef_B, unsigned int ee_koef_C)
{
    unsigned int pressureDrop;
    unsigned int round;
```

```

// Tlak se izračuna iz polinomskega modela:  $p = A \cdot q^2 + B \cdot q + C$ :
pressureDrop = (unsigned int)((float)airFlow/1000) *
((float)airFlow/1000) * ((float)ee_koef_A/10) + ((float)airFlow/1000) *
((float)ee_koef_B/10) + (float)ee_koef_C/10; // /1000 ker je pretok v
//  $\text{dm}^3/\text{s}$  in /100 ker so koeficienti v obliki xxx,xx; s 100 se deli v
// dveh delih; najprej z 10 in nato še z 10 pri zaokroževanju

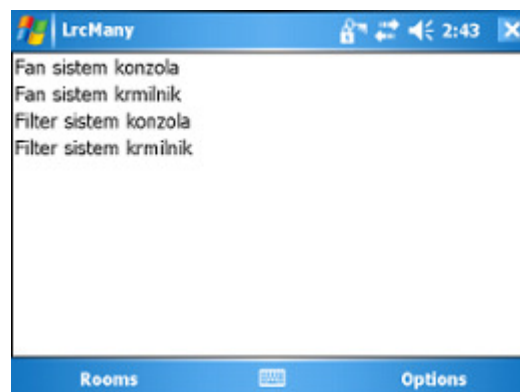
round = pressureDrop % 10; // Zaokroževanje tlaka - int. odreže decimalke
if(round > 4)
    pressureDrop = pressureDrop / 10 + 1;
else
    pressureDrop = pressureDrop / 10;
return(pressureDrop);
}

```

Bit *Regulacija Fan* (bit 7) sproži krmiljenje pretoka zraka s Filter sistemom. Za to je potrebna povezava med krmilnikom Filter sistema LHC-1.MU3 in Fan sistema LHC-1.MU2. Slednja je izvršena preko modula digitalnih izhodov LPC-2.DO6 Filter sistema in modula digitalnih vhodov LPC-2.DI5 Fan sistema. S tem ukazom sprožimo kalibracijo sistema, ki je opisana v nadaljevanju.

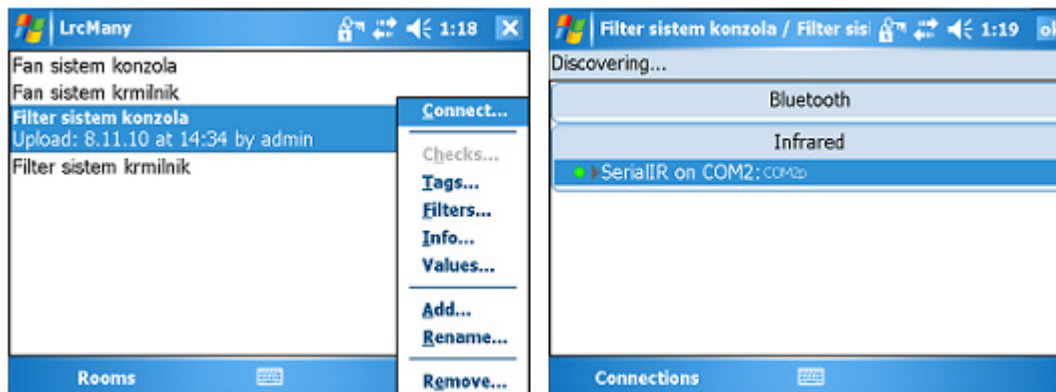
5.1.3. Nastavitev parametrov konzole Filter sistema

S programom Lrc Many lahko na dlančniku spremljamo delovanje krmilnika in nastavljamo parametre, ki se shranijo v EEPROM konzole. Spodnja slika prikazuje osnovno okno programa Lrc Many, ki prikazuje krmilnike in konzole, na katere se lahko povežemo.



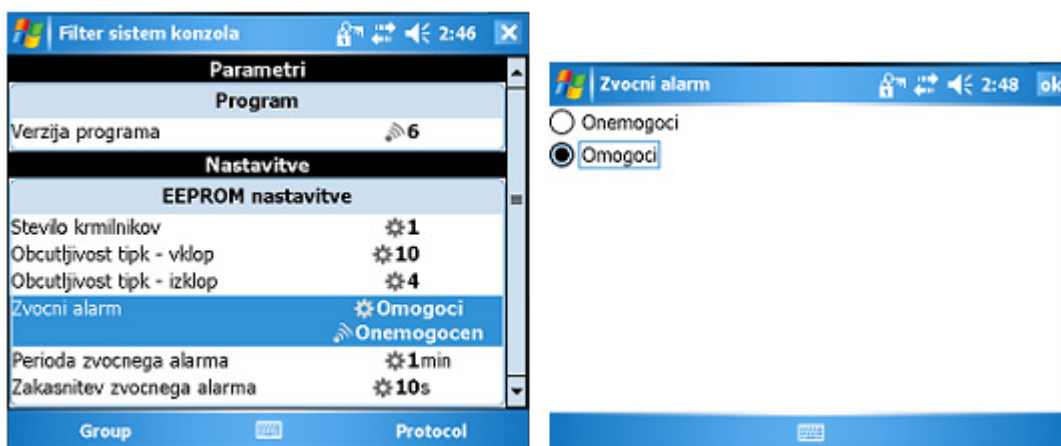
Slika 28: Osnovno okno programa Lrc Many

S pritiskom na želeno napravo se nam odpre dodatni meni, ki omogoča povezavo z izbrano napravo (Connect). Odpre se okno, v katerem izberemo vrsto povezave med dlančnikom in konzolo. Trenutno je podprta le infrardeča (IR) povezava.



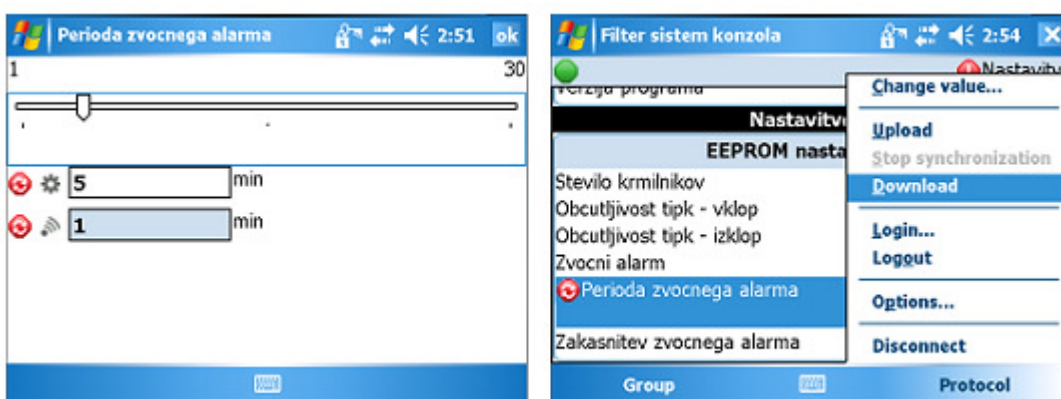
Slika 29: Povezava s konzolo (levo), izbor vrste povezave (desno)

Če se povežemo na konzolo Filter sistema, se odpre okno, ki ga je moč videti na levi strani slike 30. V tem oknu vidimo *verzijo programa*, ki teče na konzoli. Nastavimo število krmilnikov, ki so povezani na konzolo. Za filter sistem je privzeta vrednost ena, saj podpira le en krmilnik. Z *občutljivostjo tipk za vklop in izklop* lahko prilagodimo odzivanje kapacitivnih tipk konzole. Omogočimo ali onemogočimo *zvočni alarm*, kar je lepo vidno na sliki, saj je ravno ta nastavitev izbrana. Z ikono zobnika je označena naša nastavitev (*Omogoci*), z ikono signala pa vrednost, ki je shranjena na konzoli (*Onemogocen*). Z daljšim pritiskom na določen parameter se nam odpre okno, v katerem lahko spreminjamo vrednost parametra. Nastavitveno okno za digitalne vrednosti je prikazano na desni strani slike 30. V tem oknu omogočimo ali onemogočimo zvočno alarmiranje.



Slika 30: Okno konzole Filter sistema (levo), nastavitve zvočnega alarma (desno)

Na spodnji sliki je na levi prikazano nastavitveno okno za analogni parameter, ki je v tem primeru *perioda zvočnega alarma*. Slednjega lahko spremenimo z drsnikom ali z vpisom preko tipkovnice, ki jo aktiviramo v spodnjem delu okna.



Slika 31: Nastavitveno okno za periodo zvočnega alarma (levo), shranjevanje parametrov (desno)

Nove vrednosti parametrov lahko v EEPROM konzole vpišemo tako, da v Lrc Many-ju izberemo gumb *Protocol* in nato v meniju, ki se odpre, *Download*. Shranjevanje parametrov je prikazano na desni strani slike 31.

Na enak način kot s konzolo, se lahko z Lrc Many-jem povežemo tudi preko krmilnika. Okno, ki se nam ob tem odpre, prikazuje slika 32. Podatki v Lrc Many-ju so pri krmilniku Filter sistema razdeljeni v tri sekcije. V prvi sekciji so združeni alarmi in statusi. Pod alarmi so prikazani alarmi umazanih in prekomerno umazanih filtrov. Pri statusih lahko v

avtomatskem načinu preverimo trenutne padce tlaka na posameznih filtrih, v ročnem načinu pa premike senzorjev tlaka. Poleg teh vrednosti pod statusi vidimo tudi začetne padce tlakov na posameznih filtrih.

Filter sistem krmilnik	
Alarmi in statusi	
Alarmi	
❗ Predfilter umazan	ALARM
❗ Predfil. prekomerno umazan	ALARM
Vrečni filter umazan	Ni alarma
Vrečni fil. prekomerno umazan	Ni alarma
HEPA filter umazan	Ni alarma
HEPA fil. prekomerno umazan	Ni alarma
Ogljikov filter umazan	Ni alarma
Ogljikov fil. prekomerno umazan	Ni alarma
Statusi	
Predf. tlak[Pa]/premik[mV]	921
Vrečni f. tlak[Pa]/premik[mV]	814
HEPA f. tlak[Pa]/premik[mV]	964
Ogljikov f. tlak[Pa]/premik[mV]	990
Pred. zacetni tlak[Pa]	30 Pa
Vrečni zacetni tlak[Pa]	40 Pa
HEPA zacetni tlak[Pa]	50 Pa
Ogljikov zacetni tlak[Pa]	60 Pa
Ukazi	
Nacin delovanja	
Avto./Rocni nacin	Rocni
Regulacija Fan sistema	
Reg. Fan sistema	Izklop
Nastavitev zacetnega tlaka	
Vnos zacetnega tlaka	Stop
Izracun zacetnega tlaka	Stop
Predfil. zacetni tlak 30	
Vrečni f. zacetni tlak 40	
HEPA f. zacetni tlak 50	
Ogljikov f. zacetni tlak 60	
Pretok zraka 100	
Nastavitev premikov tlaka	
Predfil. premik tlaka	Stop
Pre Press.[Pa]/Offset[mV]	921
Bag Press. Offset	Stop
Bag Press.[Pa]/Offset[mV]	814
HEPA Press.[Pa]/Offset[mV]	964
A. Carb. Press. Offset	Stop
A. Carb. Press.[Pa]/Offset[mV]	990
EEPROM nastavitve	
Vklop / izklop alarmov	
Predfil. alarm	Omogoci
Vrečni f. alarm	Onemogoci
HEPA f. alarm	Onemogoci
Ogljikov f. alarm	Onemogoci
Alarm izklopa	Omogoci
Meje alarmov	
Predfilter umazan	80 Pa
Predf. prekomerno umazan	100 Pa
Vrečni f. umazan	80 Pa
Vrečni f. prekomerno umazan	100 Pa
HEPA f. umazan	80 Pa
HEPA f. prekomerno umazan	100 Pa
Ogljikov f. umazan	80 Pa
Ogljikov f. prekomerno umazan	100 Pa
Group	Protocol

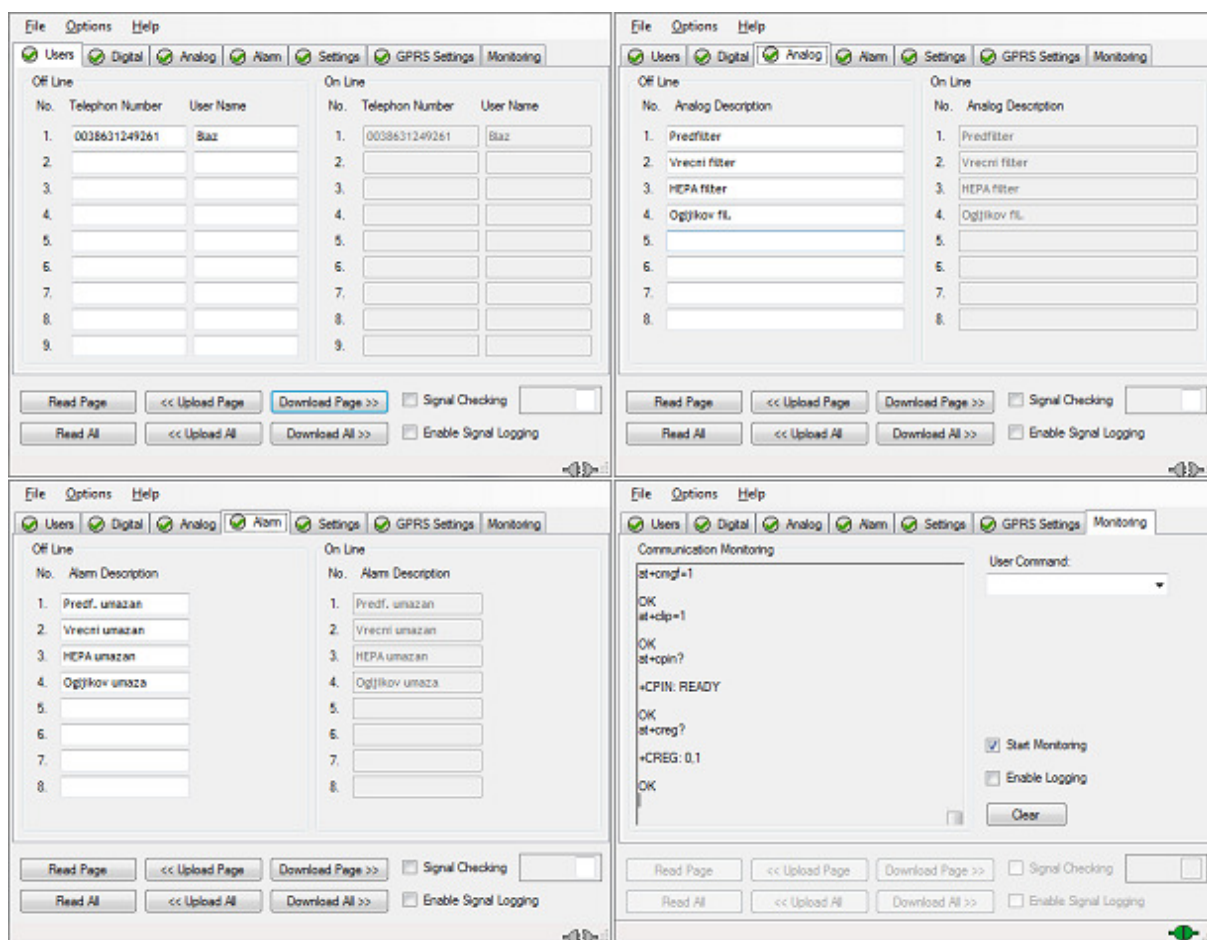
Slika 32: Okno programa Lrc Many s podatki za krmilnik Filter sistema

V sekciji z ukazi lahko preklapljam med avtomatskim in ročnim načinom delovanja, vklopimo ali izklopimo lahko regulacijo pretoka preko relejskega modula LPC-2.DO6, vnesemo začetne vrednosti padcev tlakov na čistih filtrih oziroma sprožimo izračun le teh na podlagi modelov filtrov in vnesenega delovnega pretoka zraka. Pri ukazih imamo tudi možnost izračuna premikov senzorjev tlaka.

V prvih dveh sekcijah so prikazani podatki s krmilnika LHC-1.MU2, ki jih lahko vidimo tudi na računalniku s programom Lrc Tester. V sekciji z EEPROM nastavitvami pa se nahajajo parametri, ki so shranjeni na konzoli. S slednjimi lahko omogočimo ali onemogočimo javljanje alarmov zaradi umazanih in prekomerno umazanih filtrov. Tu najdemo tudi nastavitve za meje tlakov, pri katerih se javijo alarmi za umazane in prekomerno umazane filtre.

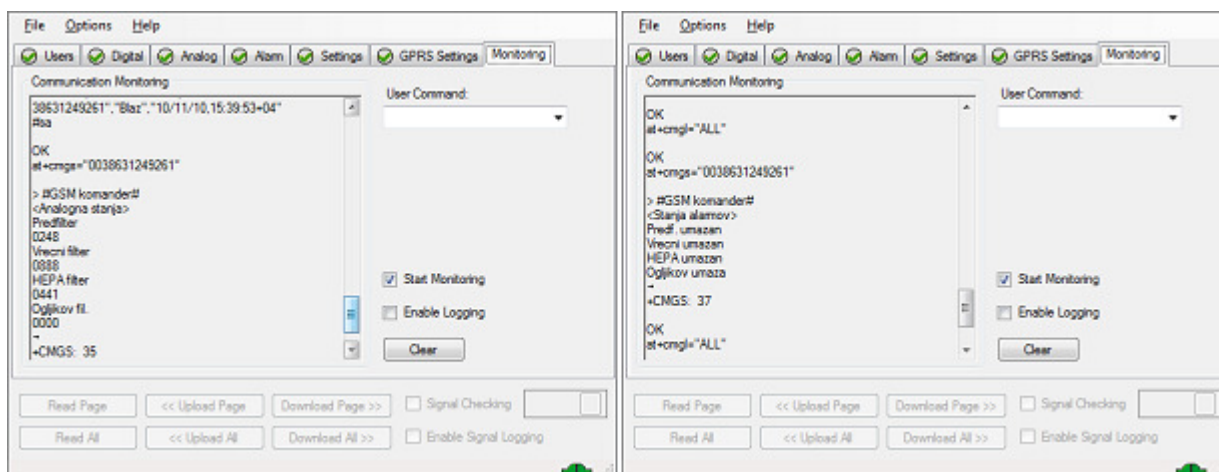
5.1.4. Nastavitev modula LPC-1.C05

Da modul LPC-2.C05 deluje pravilno, moramo nastaviti SIM kartico, ki jo ta uporablja za povezavo v GSM omrežje. Za to uporabimo program GSM Manager (slika 33). Na SIM kartico moramo zapisati imena uporabnikov in številke njihovih mobilnih telefonov (prvi kvadrant slike 33). Le vpisani uporabniki lahko preverjajo stanje filtrov, o alarmih pa so obveščeni prvi trije uporabniki v imeniku. Nato nastavimo opise analognih vrednosti in alarmov, ki jih prejemo. V našem primeru so to padci tlakov na filterih in alarmi zaradi umazanih filtrov (drugi in tretji kvadrant slike 33). Stanje modula LPC-2.C05 lahko nadziramo tako, da preklopimo na zavihek *Monitoring* in izberemo *Start Monitoring* (četrti kvadrant slike 33)



Slika 33: Nastavitev SIM kartice s programom GSM Manager

Če želimo preveriti, kakšni so padci tlakov na filtrih, moramo poslati sporočilo z vsebino #sa na telefonsko številko SIM kartice, ki jo uporablja modul. Na levi strani slike 34 je prikazano prejeto sporočilo z zahtevo po stanju analognih vrednosti. Ustvari se povratno sporočilo s padci tlakov na filtrih, ki se odpošlje uporabniku. Na desni strani slike 34 je prikazano pošiljanje alarmnega sporočila zaradi umazanih filtrov.

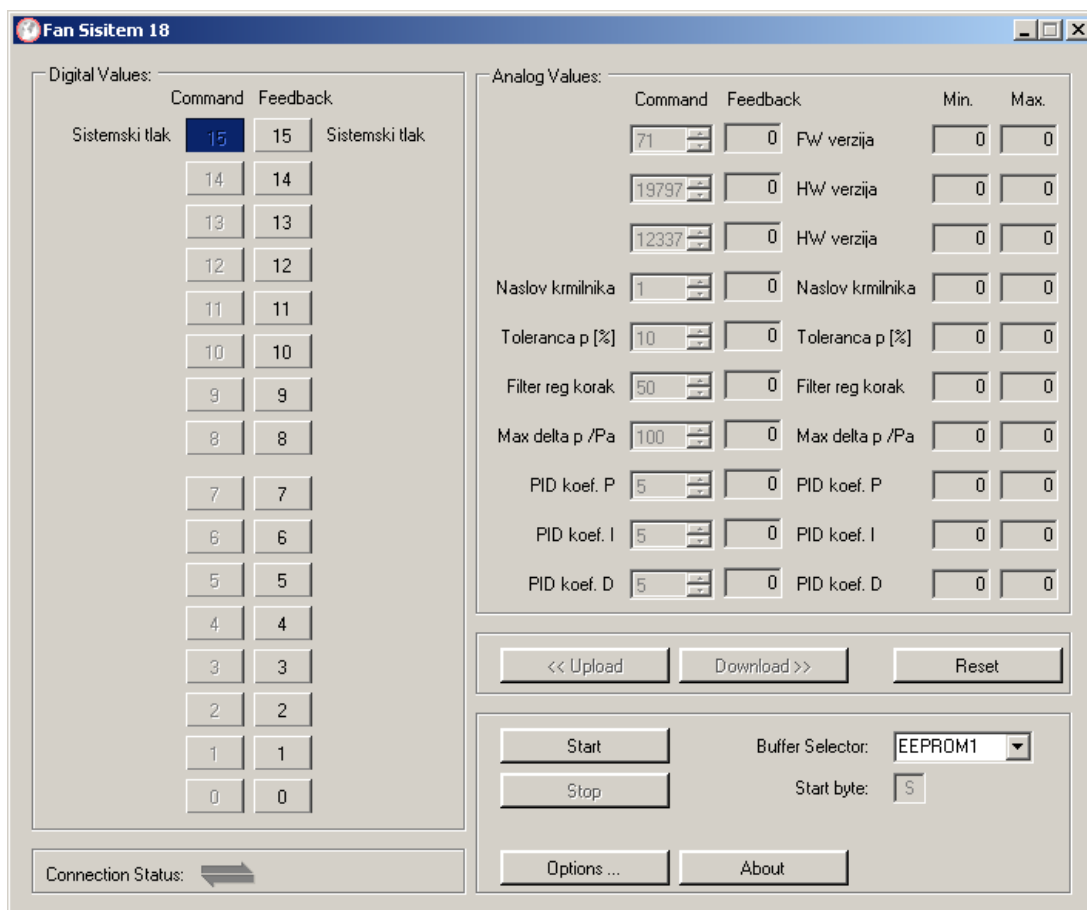


Slika 34: Preverjanje stanja filtrov (levo), alarmiranje preko modula LPC-2.C05 (desno)

5.2. Nastavitev in spremljanje delovanja Fan sistema

5.2.1. Nastavitev parametrov krmilnika LHC-1.MU2

Tako kot pri Filter sistemu moramo tudi pri Fan sistemu po programiranju krmilnika najprej nastaviti parametre v njegovem EEPROM-u. Naslednja slika prikazuje okno programa Lrc Tester s parametri, shranjenimi v EEPROM-u krmilnika.



Slika 35: Lrc Tester, EEPROM krmilnika Fan sistema

Digitalni parametri

Pri digitalnih parametrih z bitom *Sistemska tlak* vklopimo ali izklopimo možnost nadziranja sistemskega tlaka. Za nadzor slednjega je potreben dodaten modul LHC-1.VV1. Z njegovo pomočjo lahko nadziramo obremenitev ventilatorja. V primeru prekoračitve kritično meje krmilnik izključi ventilator. Tako preprečimo, da bi nepričakovana zamašitev cevi povzročila uničenje motorja ventilatorja.

Analogni parametri

Analogni parametri, ki jih nastavimo v EEPROM-u so:

- *Naslov krmilnika*; ker je na konzolo lahko vezan le en krmilnik, je ta parameter vedno 1,
- *Toleranca tlaka* (v procentih); podaja območje okrog referenčne točke, v katerem krmilnik ne regulira pretoka zraka,

- *Filter regulacijski korak*; korak s katerim se spreminja izhod krmilnika za regulacijo ventilatorja, ko je vklopljena možnost krmiljenja ventilatorja preko Filter sistema,
- *Maksimalna delta tlaka*; če razlika med trenutnim tlakom in referenčno vrednostjo preseže to vrednost, se kot razlika privzame ta vrednost,
- *Kp PID koeficient*; ojačanje proporcionalnega člena PID regulatorja,
- *Ki PID koeficient*; ojačanje integrirnega člena PID regulatorja,
- *Kd PID koeficient*; ojačanje diferencirnega člena PID regulatorja.

5.2.2. Spremljaje delovanja krmilnika LHC-1.MU2

Spodnja slika prikazuje okno RAM spremenljivk. Preko njih lahko preverimo trenutno stanje sistema, lahko pa tudi vplivamo na nekatere parametre, shranjene v trajnem EEPROM spominu krmilnika.

The screenshot shows the 'Fan Sistem 18' software interface. It is divided into several sections:

- Digital Values:** A table with columns for Command, Feedback, and Description. It lists various status signals like 'Zagotovljen tlak', 'Filter alarm', 'Sistemi alarm', etc., with corresponding Command and Feedback values.
- Analog Values:** A table with columns for Command, Feedback, Min., and Max. It lists various analog parameters like 'PwM izhod', 'Regulacijski tlak', 'Referenčni tlak', etc., with corresponding Command, Feedback, Min., and Max. values.
- Control Buttons:** A section with buttons for '<< Upload', 'Download >>', 'Reset', 'Start', 'Stop', 'Options ...', and 'About'.
- Buffer Selector:** A dropdown menu set to 'RAM1' and a 'Start byte' field set to 'S'.
- Connection Status:** A section at the bottom left showing the connection status.

Slika 36: Lrc Tester, RAM krmilnika LHC-1.MU2

Digitalne vrednosti, ki jih vrača krmilnik, lahko razdelimo na alarme, stanja perifernih naprav, ki so priključene na modul LPC-2.DI5, ter potrditve naših ukazov. Alarmi, ki jih javlja krmilnik so:

- *Filter alarm* (bit 14); preko modula LPC-2.DO6 se prenese s Filter sistema, kadar kateri izmed filtrov doseže prekomerno umazanost,
- *Sistemi alarm* (bit 13); javi se, če vrednost sistemskega tlaka narase preko določene vrednosti,
- *Alarm izklopa* (bit 12); ob javljenem Filter alarmu ali Sistemskem alarmu začne odšteti števec izklopa. Ko doseže vrednost 0 ur, se javi alarm izklopa in krmilnik ustavi ventilator,
- *Inverter alarm* (bit 11); alarm s frekvenčnika ventilatorjevega motorja,
- *Varnostni alarm* (bit 10); splošni varnostni alarm,
- *Alarm požara* (bit 9); javi se v primeru požara. Ker je normalno stanje digitalnega vhoda za ta alarm kratek stik, se alarm javi tudi če žice, preko katerih se signal za alarm prenaša, zgorijo,

Statusi, ki jih krmilnik prikazuje so:

- *Zagotovljen tlak* (bit 15); povratna informacija o tlaku. Ko je slednji zadosti velik, se ta bit postavi,
- *BMS signal* (bit 8); stanje signala, ki omogoča vklop in izklop ventilatorja preko sistema za nadzor stavb (building management system). delovanje ventilatorja je omogočeno samo takrat, ko je bit postavljen,
- *Ventilator* (bit 7); bit je postavljen vedno, kadar ventilator deluje.

Krmilnik sprejema ukaze samo v ročnem načinu, ki ga izberemo z bitom *Avtomatsko/Ročno* (bit 0). Z gumbom *Premik regulacijskega tlaka* (bit 1) sprožimo meritev premika senzorja tlaka od lege nič. Pri tem morata biti oba vhoda senzorja tlaka izpostavljena atmosferskemu tlaku. Ta ukaz je namenjen umerjanju prvega modula LHC-1.VV1, ki se uporablja za regulacijo pretoka zraka. Drugi modul LHC-1.VV1, ki je namenjen nadzoru sistemskega tlaka, lahko umerimo z bitom *Premik sistemskega tlaka* (bit 2). Vrednosti premikov obeh merilnih modulov lahko vidimo na strani analognih vrednosti v poljih *Premik regulacijskega tlaka* in *Premik sistemskega tlaka*. Z bitom *Regulacija preko Filter sistema* (bit 3) omogočimo krmiljenje ventilatorja preko krmilnika LHC-1.MU3. Bit *Referenčni tlak* (bit 4) omogoča vpis referenčne vrednosti tlaka, ki se uporablja pri regulaciji pretoka. Ta bit deluje v povezavi s poljem *Referenčni tlak* na strani analognih vrednosti. Ko je bit *Referenčni tlak* postavljen, se

vrednost vpisana v istoimensko analogno polje, zapiše v EEPROM krmilnika. Z bitoma *Elektrika* (bit 5) in *Plin* (bit 6) v ročnem načinu vklopimo ali izklopimo releja, ki nadzirata prisotnost elektrike in plina na kuhalnih površinah. Z ukazom *Vklopi ventilator* (bit 7) v ročnem načinu vklopimo in izklopimo ventilator.

Pri analognih vrednostih v polju *PWM izhod* vidimo, kakšna je trenutna vrednost izhodnega signala za ventilator. V polju *Regulacijski tlak* je prikazana trenutna vrednost tlaka, ki bi jo radi pripeljali do referenčne vrednosti, podane v polju *Referenčni tlak*. Polje *Tlak sistema* prikazuje trenutni sistemski tlak. Če ta prekorači maksimalno vrednost, se javi *Sistemski alarm*. Analogno polje *Števec izklopa* pa prikazuje število ur do izklopa ventilatorja za tem, ko se je sprožil *Alarm izklopa*.

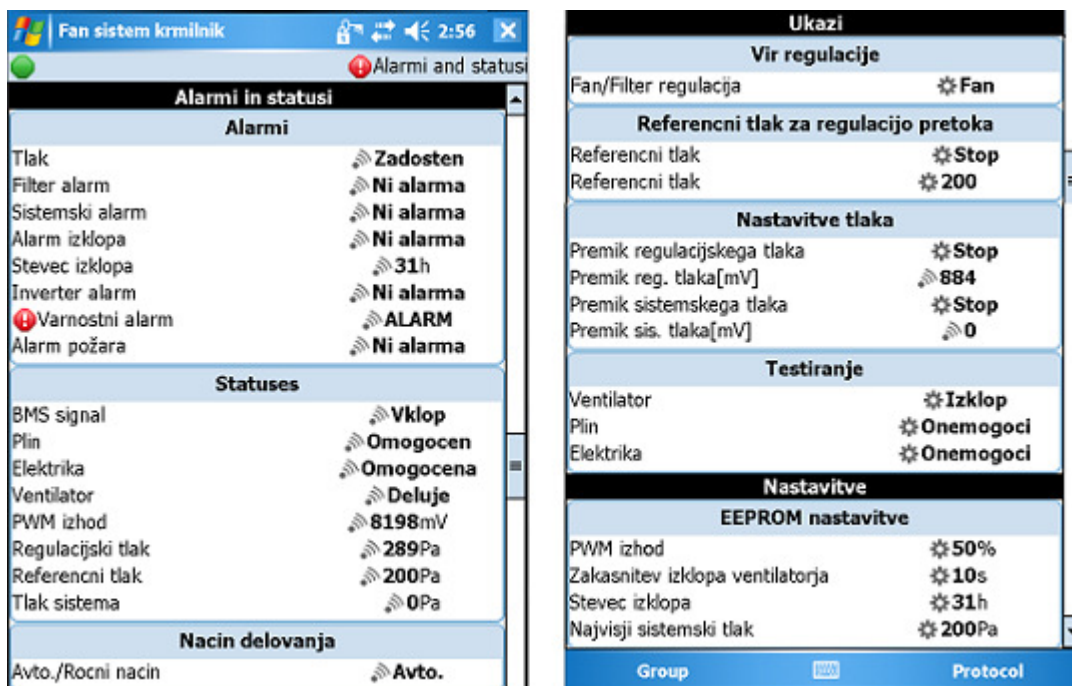
5.2.3. Nastavitev parametrov konzole Fan sistema

Tako kot pri Filter sistemu se lahko tudi pri Fan sistemu z dlančnikom povežemo na konzolo in nato preko aplikacije Lrc Many spreminjamo nastavitve na konzoli. Slednje so ravno tako razdeljene na nastavitve za delovanje konzole in nastavitve, ki jih konzola pošilja krmilniku. Na sliki 37 so prikazane nastavitve za delovanje konzole Fan sistema in so enake kot pri konzoli Filter sistema.



Slika 37: Okno s parametri konzole Fan sistema v Lrc Many-ju

Slika 38 prikazuje okno s parametri za krmilnik Fan sistema. Tudi tukaj so parametri razdeljeni v tri sekcije. V sekciji za alarme in statuse ter v sekciji za ukaze se nahajajo enaki alarmi in parametri, kot jih vidimo v Lrc Testerju. V sekciji z nastavitvami spreminjamo parametre, ki so shranjeni v EEPROM-u konzole in jih z Lrc Testerjem ni moč videti.

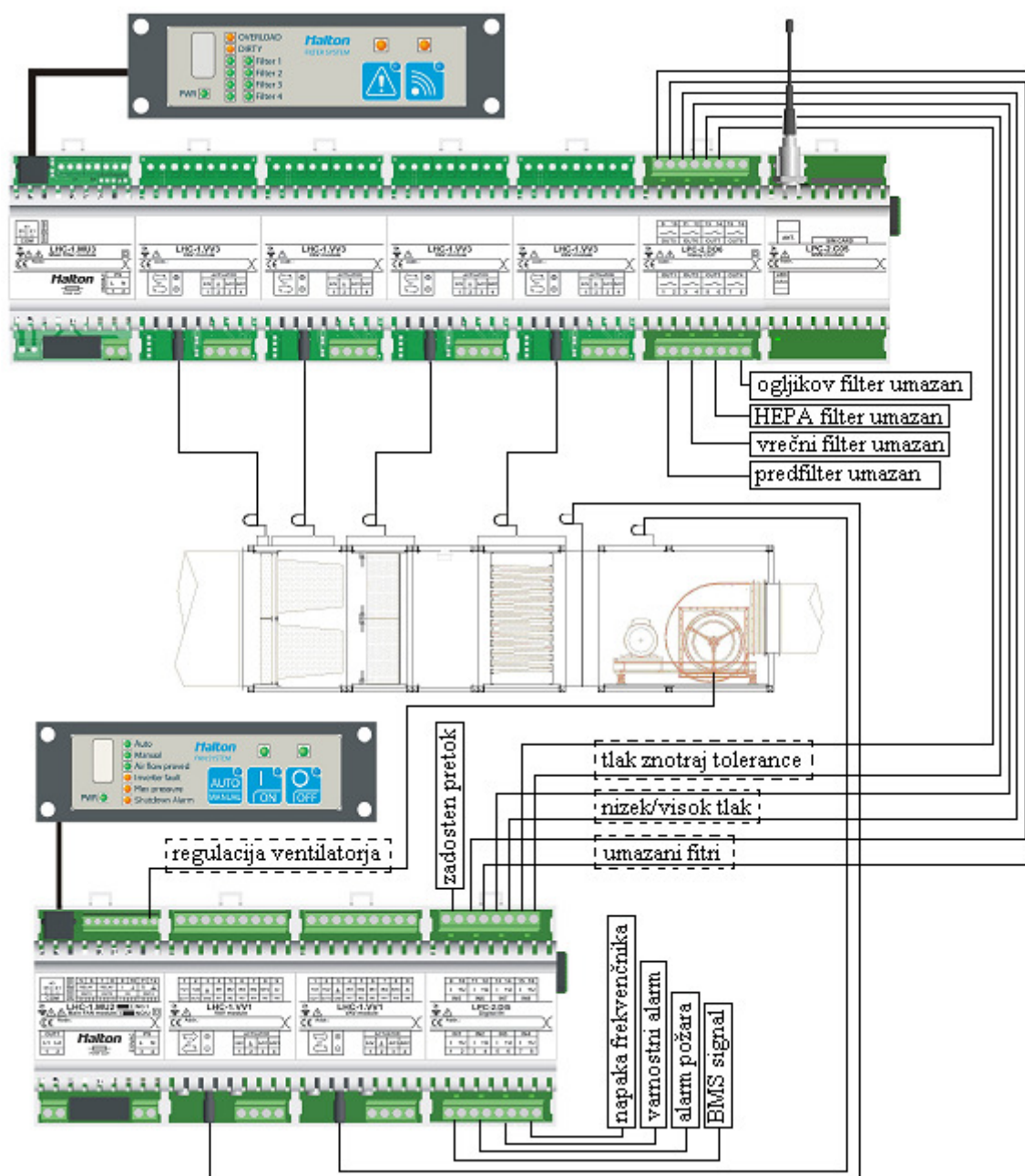


Slika 38: Okno v Lrc Many-ju s parametri za krmilnik Fan sistema

Pri EEPROM nastavitvah s parametrom *PWM izhod* nastavimo vrednost, ki jo bo imel izhod za krmiljenje ventilatorja v ročnem načinu. Z nastavitvijo *zakasnitev izklopa ventilatorja* nastavimo zakasnitev izklopa ventilatorja ob javljenem alarmu požara. Z nastavitvijo *števca izklopa* določimo število ur, ki naj pretečejo od nastopa filter alarma ali sistema alarma do javljenega alarma izklopa in izklopa ventilatorja. S parametrom *najvišji sistemski tlak* določimo mejo tlaka za *sistemski alarm*.

6. Delovanje sistema Pollustop

Sistem Pollustop je namenjen nadzoru čistosti filtrov in regulaciji pretoka zraka. Za nadzor čistosti filtrov skrbi Filter sistem, za regulacijo pretoka zraka pa Fan sistem. V prejšnjem poglavju so opisani parametri, ki jih je potrebno nastaviti, za pravilno delovanje celotnega sistema, v tem poglavju pa je opisano delovanje sistema Pollustop. Na spodnji sliki je prikazana shema celotnega sistema.



Slika 39: Shema sistema Pollustop

Merilni moduli LHC-1.VV3 Filter sistema merijo padce tlaka na posameznih filtrih. Merjeni padci tlaka so namenjeni nadzoru čistosti filtrov. Fan sistem uporablja dva merilna modula LHC-1.VV1. Prvi se uporablja za regulacijo pretoka zraka. S tem modulom merimo razliko med tlakom v cevi in atmosferskim tlakom. Drugi modul je namenjen nadzoru tlaka v sistemu. Če slednji narase preko najvišje dovoljene meje, lahko pride do uničenja motorja ventilatorja. Oba sistema, Fan in Filter sta med seboj povezana preko relejskega modula LPC-DO6 na strani Filter sistema in modula digitalnih vhodov LPC-DI5 na strani Fan sistema. Za povezavo so uporabljeni trije pari digitalnih izhodov in vhodov. S prvim parom Filter sistem sporoči Fan sistemu ali je pretok prenizek ali previsok, z drugim parom sporoči, da je padec tlaka na filtrih znotraj toleranc, s tretjim parom pa se na Fan sistem prenese informacija o prekomerni umazanosti določenega filtra. Poleg teh treh izhodov so na modulu LPC-DO6 uporabljeni še štirje. Vsak od teh pripada posameznemu filtru in se sklene, ko ta postane umazan. Tako lahko na primer s priklopom svetlobnega oddajnika za vsak posamezen filter uporabnika obvestimo o potrebi menjave določenega filtra.

Na modulu LPC-DI5 je, poleg že omenjenih treh, uporabljenih še pet digitalnih vhodov. Prvi vhod je namenjen povezavi Fan sistema s centralnim nadzornim sistemom. Z njim lahko preko tega vhoda vklopimo ali izklopimo ventilator, ki skrbi za pretok zraka. Drugi vhod se uporablja za javljanje nevarnosti požara. Če se sproži ta alarm, se mora ventilator ugasiti. V nasprotnem primeru bi ventilator v prostor dovajal svež zrak, kar bi povzročilo širjenje požara. Zaradi možnosti, da žice, preko katerih se alarm prenese, zgorijo, je alarm sprožen s prehodom na nizek napetostni nivo vhoda modula LPC-DI5. Na tretji vhod pripeljemo splošni varnostni alarm. Na ta vhod lahko vežemo varnostno stikalo, preko katerega je možno v sili izklopiti sistem. Četrty vhod se uporablja za povratno informacijo s frekvenčnika, ki upravlja motor ventilatorja. Ta vhod je namenjen frekvenčnikom, ki omogočajo javljanje napake z digitalnim izhodom. V primeru napake se ventilator izklopi, kar je prikazano tudi na konzoli Fan sistema. Peti vhod predstavlja povratno informacijo o zadostnem pretoku zraka oziroma zadostnem tlaku. Ta vhod uporabimo, če imamo v sistemu napravo, ki ob prenizkem pretoku zraka javlja to napako. Če katerega od opisanih vhodnih signalov ne želimo uporabljati, na tem vhodu napravimo kratek stik in tako preprečimo javljanje napak s tega vhoda.

6.1. Kalibracija sistema

Za nastavitev sistema moramo naprej na krmilniku Filter sistema nastaviti koeficiente modelov filtrov, ki jih nadziramo. Nato vnesemo vrednost pretoka zraka skozi filtre in sprožimo izračun padcev tlakov na filtrih pri podanem pretoku. Če te vrednosti poznamo, jih lahko vpišemo tudi ročno. Za tem vklopimo regulacijo ventilatorja s Filter sistema. Regulacija je izvedena na podlagi padca tlaka na vrečnem filtru. Vrečni filter je bil izbrani, ker se je izkazalo, da je ob konstantnem pretoku zraka padec tlaka na njem najbolj stabilen. Pri vklopu regulacije se aktivirata izhoda 5 in 6 na modulu LPC-2.DO6. Krmiljenje pretoka zraka preko filter sistema moramo potrditi tudi na Fan sistemu. Pri tem se namesto ojačanj PID regulatorja prične uporabljati vrednost parametra Filter regulacijski korak. Slednji določa velikost spremembe izhoda, preko katerega krmilnik Fan sistema krmili ventilator.

Kadar je padec tlaka na vrečnem filtru pod vpisano oziroma izračunano začetno vrednostjo, je peti rele modula LPC-2.DO6 razklenjen. Tedaj krmilnik LHC-1.MU2 vsako sekundo poveča izhod s predhodno nastavljenim korakom. Ob tem se pretok zraka povečuje. Ko doseže padec tlaka na filtru vrednost znotraj nastavljene tolerance, se sklene še šesti rele. S tem krmilnik Fan sistema ve, da je pretok zraka blizu želene vrednosti. Korak spreminjanja izhoda se prepolovi. Da bi preprečili preveliko nihanje pretoka okrog želene vrednosti, se poleg prepolovljenega koraka podaljša čas med dvema spremembama izhoda na dve sekundi. Ko je šesti rele sklenjen in se stanje petega spremeni, vemo, da smo ravnokar prečkali želeno vrednost pretoka zraka. V tem trenutku začne krmilnik Fan sistema zajemati vrednosti izmerjenih tlakov na svojem merilnem modulu, namenjenemu regulaciji pretoka zraka. Krmilnik iz desetih zajetih vrednosti tlakov izračuna povprečno vrednost, ki si jo z zapisom v trajen spomin zapomni kot referenčno vrednost tlaka. Če se šesti rele kadarkoli med zajemanjem te vrednosti razklene, se postopek ponovi od začetka.

Ta postopek lahko opravimo s pomočjo dlančnika in aplikacije Lrc Many. V aplikaciji vidimo, kdaj se zapiše nova referenčna vrednost tlaka. Za tem se pretok zraka še vedno krmili preko krmilnika Filter sistema. Izračun reference tlaka se ne ponovi, dokler ostaja šesti rele sklenjen. Če se rele razklene, pa se postopek ponovi.

Uporabnik lahko nastavlja zelene pretoke zraka v posameznih prostorih ali izsesavanje zraka s kuhalnih površin. Pri tem bo sistem vzdrževal zelen pretok zraka. Po zaključeni kalibraciji sistema je potrebno oba krmilnika postaviti v avtomatski način obratovanja. Krmilnik Fan sistema bo nato vzdrževal pretok zraka glede na referenčno vrednost tlaka, krmilnik Filter sistema pa bo nadziral stanje filtrov.

6.2. Alarm za menjavo filtrov

Med obratovanjem postajajo filtri vse bolj umazani in padec tlaka na njih narašča. Da bi se pretok zraka ohranjal, mora Fan krmilnik zviševati frekvenco motorja ventilatorja. V določenem trenutku padec tlaka na filtrih doseže vrednost, ki je enaka meji umazanih filtrov. Tedaj krmilnik Filter sistema sproži alarm. O tem je uporabnik obveščen na več načinov. Sklene se rele modula LPC-2.DO6, ki ustreza umazanemu filtru. Preko GSM modula LPC-2.C05 je poslano SMS sporočilo, ki uporabniku pove, kateri filter je umazan. Poleg tega pa se alarm prikaže še na konzoli Filter sistema. Ta uporabnika opozarja na umazan filter z zvočnim in vidnim signalom.

V primeru, da uporabnik umazanih filtrov ne zamenja, bo padec tlaka na njih še naprej naraščal. Frekvenca ventilatorja bo zato vse višja, s tem pa tudi poraba energije. Poleg tega začnejo ob prekomerni umazanosti zajeti delci iz filtrov izhajati, kar je potrebno preprečiti. V trenutku, ko je sprožen alarm o prekomerni umazanosti filtrov, se alarm prikaže na konzoli. Hkrati se sklence rele modula LPC-2.DO6, ki je povezan z modulom LPC-2.DI5 Fan krmilnika. Tedaj slednji preneha z vzdrževanjem pretoka zraka. Hkrati se sproži števec izklopa Fan sistema. Ko ta prešteje od nastavljene vrednosti ur do nič, se izhod krmilnika za ventilator postavi na nič. Poleg tega se na Fan konzoli prikaže alarm izklopa, ki z vidnim in zvočnim signalom opozarja uporabnika na izklop sistema. Tedaj mora uporabnik za ponoven zagon sistema nujno zamenjati umazane filtre.

6.3. Alarm prekoračitve systemskega tlaka

V primeru, da pride do zamašitve cevi ali kakšne druge napake, ki v sistem vnese velik padec tlaka, bo regulator dvigal hitrost ventilatorja, da bi vzdrževal zeleno vrednost pretoka zraka, kar lahko povzroči uničenje motorja ventilatorja. Da bi to preprečili, lahko Fan sistemu

dodamo dodaten merilni modul LHC-1.VV1 za nadzor sistemskega tlaka. Za ta namen je potrebno na konzoli Fan sistema nastaviti najvišjo dovoljeno vrednost tlaka. Če je ta prekoračena, se na konzoli javi alarm z zvočnim signalom in prikazom vzroka za alarm z ustrezno LED diodo. V tem trenutku krmilnik preneha z vzdrževanjem zelenega pretoka zraka. Hkrati pa začne odštrevati števec izklopa. Ko slednji od nastavljenega števila ur doseže vrednost 0, krmilnik izklopi ventilator in s tem prepreči uničenje motorja.

7. Zaključek

Do konca izdelave diplomske naloge so se nekatere zahteve naročnika glede sistema Pollustop spremenile. Odločili so se, da v cev pred ventilator dodajo vmesnik za merjenje pretoka. Z merjenjem padca tlaka na slednjem, preko karakteristike vmesnika izračunamo pretok zraka v cevi. Tako postopek kalibracije ni več potreben, kar precej poenostavi nastavitev sistema. Na krmilniku Fan sistema nastavimo želen pretok zraka. Ko je ta dosežen, na Filter sistemu sprožimo ukaz, ki si zapomni trenutne padce tlaka na filtrih kot začetne vrednosti. Vnos mejnih vrednosti padcev tlaka na umazanih in prekomerno umazanih filtrih je ostal ročen preko dlančnika na konzolo.

Drugo večjo spremembo je doživel regulator Fan sistema. Ker je hitrost regulacije zraka v našem primeru drugotnega pomena, smo PID regulator zamenjali s PI regulatorjem. Slednjega smo še nekoliko modificirali, tako da smo povečali stabilnost v ustaljenem stanju. To smo dosegli tako, da se s približevanjem želenemu pretoku zraka niža proporcionalno ojačanje regulatorja. To sicer upočasni regulacijo, vendar s tem zagotovimo, da v sistemu ne prihaja do oscilacij.

Polovica sistema Pollustop, to je Filter sistem že deluje v realnem okolju. Montirali smo ga v nakupovalnem središču na Dunaju. Celoten sistem Pollustop pa bo prvič zagnan do konca leta 2010 v Londonu.

8. Literatura

- [1] Hutten , Irwin Marshall: Handbook of nonwoven filter media, Elsevier, Oxford, 2007
- [2] Davies, C. N.: Air filtration, Academic Press inc. (London) ltd., London, 1973
- [3] Smarteh d.o.o., Longo programmable controller LPC-2.C05, Tehnična dokumentacija, verzija 3, Tolmin, 2005
- [4] Smarteh d.o.o., Longo programmable controller LPC-2.DO6, Tehnična dokumentacija, verzija 5, Tolmin, 2007
- [5] Smarteh d.o.o., Longo programmable controller LPC-2.DI5, Tehnična dokumentacija, verzija 3, Tolmin, 2005
- [6] Sensortechncs, Senzor tlaka HDIM010, Tehnična dokumentacija http://www.sensortechncs.com/download/DS_Standard-HDI_E_11650.pdf, dostopnost preverjena maja 2010
- [7] Philips Semiconductors, The I2C-bus specification, Tehnična dokumentacija, http://www.i2c-bus.org/fileadmin/ftp/i2c_bus_specification_1995.pdf, dostopnost preverjena oktobra 2010
- [8] Fefer, Dušan in Jeglič, Anton: Senzorji in pretvorniki, Založba FE in FRI, Ljubljana, 2006
- [9] Karba, Rihard: Gradniki sistemov vodenja, Založba FE in FRI, Ljubljana, 1994
- [10] Halton, Halton clean air - Product catalogue, 2009
- [11] Zajec, Peter: Elektronske naprave (osnutek), Ljubljana, 2008
- [12] Zupančič, Borut: Zvezni regulacijski sistemi I. del, Založba FE in FRI, Ljubljana 1996
- [13] Cypress Semiconductor Corporation, 16-Bit pulse width modulator, Tehnična dokumentacija, <http://www.cypress.com/?docID=19558>, dostopnost preverjena oktobra 2010
- [14] Cypress Semiconductor Corporation, CY8C29466-24PXI, Tehnična dokumentacija, <http://www.cypress.com/?docID=24691>, dostopnost preverjena oktobra 2010
- [15] Cypress Semiconductor Corporation, <http://www.cypress.com/?id=2522>, dostopnost preverjena oktobra 2010
- [16] VTT Technical research center of Finland, Determination of the filtration performance of air filter CL-66-10-F8 LK L=635 according to EN 779:2002, Poročilo testiranja, Espoo, oktober 2005

Izjava

Izjavljam, da sem diplomsko delo izdelal samostojno pod vodstvom mentorja doc. dr. Boštjana Murovca, univ. dipl. inž. el. Izkazano pomoč drugih sodelavcev sem v celoti navedel v zahvali.

Kobarid, december 2010

Blaž Makuc