

**57. SREČANJE MLADIH RAZISKOVALCEV
SLOVENIJE**

**PITOT-PRANDTLOVA CEV ZA
MAJHNE BREZPILOTNE LETALNIKE**

Astronomija ali fizika

Raziskovalna naloga

Avtor:

Dino Đonlagić

Mentor:

Jure Pikl

Šola: OŠ Bojana Ilicha Maribor

Maribor, april 2023

KAZALO

Vsebina

| | |
|---|----|
| Zahvala | 1 |
| 1. UVOD..... | 2 |
| 1.1 Opredelitev problema | 3 |
| 1.2 Hipoteze in cilji..... | 4 |
| 2. PITOT – PRANDTLOVA CEV..... | 5 |
| 2.1 Zgodovina..... | 5 |
| 2.2 Bernoullijeva enačba | 6 |
| 2.3 Bernoullijeve načelo | 7 |
| 2.4 Delovanje cevi | 8 |
| 3. NAČRTOVANJE IN IZDELAVA PITOT – PRANDTLOVE CEVI | 10 |
| 4. SESTAVA ELEKTRONSKEGA VEZJA..... | 12 |
| 5. PROGRAMIRANJE KRMILNIKA..... | 18 |
| 5.1 Program za merjenje razlike tlaka in kalibracijo cevi | 18 |
| 5.2 Program za merjenje hitrosti..... | 22 |
| 5.3 Program za merjenje hitrosti in prenos podatkov s frekvenco | 26 |
| 5.4 Program za sprejem frekvence in pretvorbo v hitrost | 30 |
| 6. IZVEDBA MERITEV | 32 |
| 6.1 Prvi poizkus – kalibracija merilnika | 32 |
| 6.2 Drugi poizkus – preizkus delovanja in ocena merilnega pogreška..... | 34 |
| 6.3 Tretji poizkus – let z letalom | 37 |
| 7. Ocena stroškov izdelave Pitot-Prandtlove cevi | 38 |
| 8. ZAKLJUČEK..... | 40 |
| 9. DRUŽBENA ODGOVORNOST | 42 |
| 10. PRILOGE..... | 43 |

| | |
|---|----|
| 10.1 Fotografije..... | 43 |
| 10.2 Mere Pitot-Prandtlove cevi..... | 52 |
| 11. VIRI | 56 |
| 11.1 Viri slik s spleta..... | 56 |
| 11.2 Elektronski viri..... | 58 |
| 11.3 Elektronski viri za kupljene izdelke | 61 |

| | |
|---|----|
| Slika 1 : Fotografija Pitotove cevi..... | 9 |
| Slika 2 : Fotografija Pitot - Prandtlove cevi..... | 9 |
| Slika 3: Model Pitot-Prantlove cevi (lasten vir)..... | 10 |
| Slika 4: Pitot-Prandtlova cev (lasten vir) | 11 |
| Slika 5: Vezje št.1 (lastno narejeno v programuu LTspice) | 13 |
| Slika 6: Vezje št. 2 (lastno narejeno v programuu LTspice)..... | 14 |
| Slika 7: Vezje št. 3 (lastno narejeno v programuu LTspice)..... | 16 |
| Slika 8: Simulacija signala na nožici D3, ko FPV proizvaja signal s frekvenco 1 kHz (lastno simulirano v programu LTspice)..... | 17 |
| Slika 9: Pitot Prandtlova cev pred izvedeno kalibracijo (lasten vir) | 32 |
| Slika 10: Graf 1, ki prikazuje izračunano hitrost (vr) v odvisnosti od izmerjene hitrosti (vi) | 34 |
| Slika 11: Graf 2, ki prikazuje izračunano hitrost (vr) v odvisnosti od izmerjene hitrosti (vi) | 35 |
| Slika 12: Graf 3 prikazuje hitrost v odvisnosti od časa. | 37 |
| Slika 13: Bosch BMP280 senzor..... | 43 |
| Slika 14: Flysight FPV monitor | 43 |
| Slika 15: oddajnik TS832 | 44 |
| Slika 16: Pitot-Prandtlova cev (lasten vir) | 44 |
| Slika 17: Pitot-Prandtlova cev (lasten vir) | 45 |
| Slika 18: Pitot-Prandtlova cev (lasten vir) | 45 |
| Slika 19: Pitot-Prandtlova cev (lasten vir) | 46 |
| Slika 20: Pitot-Prandtlova cev (lasten vir) | 47 |
| Slika 21: Pitot-Prandtlova cev z vezjem št. 1(lasten vir)..... | 47 |
| Slika 22: Oddajno vezje (vezje št. 2) (lasten vir) | 48 |
| Slika 23: Sprejemno vezje (vezje št. 3) (lasten vir)..... | 49 |
| Slika 24: Oddajno vezje , FPV in računalnik (lasten vir) | 49 |
| Slika 25: Letalo s Pitot-Prandtlovo cevjo (lasten vir) | 50 |
| Slika 26: Pitot Prandtlova cev pred kalibriranjem (lasten vir)..... | 50 |
| Slika 27: Pitot Prandtlova cev pred kalibriranjem (lasten vir)..... | 51 |
| Slika 28: Pitot Prandtlova cev pred kalibriranjem (lasten vir)..... | 51 |
| Slika 29: Tloris Pitot-Prandtlove cevi (lastni vir) | 52 |
| Slika 30: Naris Pitot-Prandtlove cevi (lastni vir) | 52 |
| Slika 31: Stranski ris Pitot-Prandtlove cevi iz ene strani (lastni vir)..... | 53 |
| Slika 32: Stranski ris Pitot-Prandtlove cevi iz druge strani (lastni vir) | 53 |
| Slika 33: Naris sprednjega pokrova Pitot-Prandtlove cev (lasten vir) | 54 |

| | |
|--|----|
| Slika 34: Naris zadnjega pokrova Pitot-Prandtlove cevi (lasten vir) | 54 |
| Slika 35: Tloris sprednjega pokrova Pitor-Prandtlove cevi (lasten vir) | 55 |
| Slika 36: Tloris zadnjega pokrova Pitot-Prandtlove cevi (lasten vir) | 55 |

Povzetek

V nalogi je predstavljena preprosta, majhna in učinkovita Pitot-Prandtlova cev, ki omogoča meritve hitrosti brezpilotnih letalnikov. Cev smo natisnili s pomočjo 3D tiskalnika in vanjo vgradili par senzorjev za merjenje tlaka. Merilnika tlaka smo nato povezali z mikrokrmlnikom (Arduino), ki smo ga uporabili za zbiranje podatkov, izračun hitrosti in tvorbo signala s spremenljivo frekvenco, ki smo ga nato posredovali na zvočni vhod video oddajnika na daljinsko vodenem letalu. Za izračun hitrosti iz razlike izmerjenih tlakov smo uporabili Bernoullijevo načelo, ki smo ga izrazili iz Bernoullijeve enačbe. Na zvočni izhod zemeljskega video sprejemnika smo priključili drugi mikrokrmlnik (prav tako Arduino), ki je meril frekvenco sprejetega signala in iz nje določili hitrost. Tako smo vzpostavili daljinski prenos informacije o hitrosti iz letala na zemeljski sprejemnik.

Izvedli smo tri nize meritev. V prvem nizu meritev smo izvedli kalibracijo, s katero smo izboljšali točnost meritve hitrosti. V drugem nizu meritev smo preverili in primerjali delovanje merilnega sistema tako, da smo namestili Pitot-Prandtlovo cev na avtomobil, in primerjali izmerjene vrednosti z vrednostmi, ki smo jih pridobili iz avtomobilskega merilnika hitrosti. V tretjem nizu meritev smo izdelan merilnik namestili na daljinsko vodeno letalo in s pomočjo video oddajnika na letalu ter zemeljskega video sprejemnika na tleh uspeli sproti meriti in prenašati podatek o hitrosti iz letala na zemljo med letom letala.

S to nalogo smo pokazali, da je možno izdelati učinkovit merilnik hitrosti z uporabo enostavnih in nizkocenovnih komponent, ki jih srečamo v široki rabi. Izdelan merilnik omogoča merjenje hitrosti majhnih letalnikov in istočasen prenos podatkov o hitrosti na daljavo.

Zahvala

Zahvalil bi se rad mentorju, ki me je pri raziskovalni nalogi vodil in podal nasvete in lektorici, ki je nalogo pregledala in obdelala. Prav tako bi se rad zahvalil svojim staršem za podporo in pomoč pri izvedbi poskusov.

1. UVOD

V zadnjem času so se močno razvili različni avtonomni ali brezpilotni letalniki. Z razvojem umetne inteligence in računalnikov lahko pričakujemo, da bo njihov pomen naraščal. Že danes mnoga podjetja napovedujejo (npr. Amazon Prime Air), da nam bodo s pomočjo brezpilotnih letalnikov dostavljali različne predmete, pakete, izdelke, itd. Brezpilotni letalniki že danes opravljajo različne nevarne naloge, kot so nadzor iz zraka v prometu, pri požarih, pri naravnih nesrečah in drugih dogodkih. Pomembno vlogo imajo tudi v vojski, saj so izvidniško sredstvo ali orožje (MQ-9 Reaper). O močnem in naraščajočem pomenu brezpilotnih letalnikov pričajo tudi dogodki v aktualnih vojnah. Vpliv brezpilotnih letalnikov bo zagotovo naraščal še naprej na mnogih drugih področjih.

Horizontalna hitrost brezpilotnega letalnika je poleg višine, vertikalne hitrosti in naklona eden izmed najbolj pomembnih parametrov letenja. Horizontalna hitrost je posebej pomembna, ker je odgovorna za določanje velikosti aerodinamičnih sil, ki omogočajo letenje. Avtonomno in varno upravljanje brezpilotnega letalnika ni mogoče brez poznavanja njegove hitrosti. Zato obstaja potreba po majhni, lahki in nizkocenovni pripravi za merjenje hitrosti brezpilotnih letalnikov. V okviru predstavljene naloge bomo prikazali izdelavo in načrtovanje merilnika hitrosti, primerenega za merjenje hitrosti brezpilotnih letalnikov.

1.1 Opredelitev problema

Namen raziskovalne naloge je načrtovati in izdelati majhen, lahek in nizkocenovni meritnik hitrosti za letala na daljinsko upravljanje, drone in druge letalnike.

Rešitev lahko najdemo v obliki Pitot-Prandtlove cevi, ki jo prilagodimo tako, da bo uporabljala enostavne in poceni senzorje tlaka, ki jih srečamo v vsakdanji rabi (npr. v domačih vremenskih postajah).

Teoretičen del bo vseboval razlago Bernoullijeve enačbe in načela, predstavitev Pitotove cevi in Pitot-Prandtlove cevi.

Praktičen del bo vseboval raziskavo razpoložljivih senzorjev tlaka, načrtovanje in izdelavo Pitot-Prandtlove cevi, sestavljanje elektronskega dela, programiranje krmilnika in izvedbo meritve ter izdelavo sistema za daljinski prenos podatkov hitrosti. Izdelan meritnik bo nato preizkušen med vožnjo z avtom in med letom letala na daljinsko upravljanje.

1.2 Hipoteze in cilji

- I. Z uporabo dveh preprostih senzorjev absolutnega tlaka, ki jih najdemo v preprostih napravah, kot so hišne vremenske postaje, pametne ure, telefoni in podobne naprave, je možno izdelati majhno in enostavno Pitot-Prandtlovo cev za merjenje hitrosti majhnih letal, dronov in drugih letalnikov.
- II. Z uporabo enostavnega mikrokrmilnika bomo iz razlike absolutnih tlakov izračunali hitrost z mersko napako, ki bo manjša od 5%.
- III. Celotno merilno cev je možno izdelati za manj kot 30 €.

2. PITOT – PRANDTLOVA CEV

Pitot –Prandtlova cev je naprava oz. ovira, ki je vstavljeni v pretok tako, da lahko na njej izmerimo zastojni in statični tlak. Statični tlak je tlak tekočine v prostoru, medtem ko zastojni tlak nastane na čelu ovire oz. vrhu Pitot - Prandtlove cevi, kjer se tekočina ustavi. Razlika oben tlakov je tako sorazmerna s hitrostjo pritekajoče tekočine. Hitrost pritekajoče tekočine lahko izračunamo iz razlike med statičnim in zastojnim tlakom s pomočjo Bernoullijevega načela. Bernoullijevo načelo dobimo iz Bernoullijeve enačbe, ki pravi, da je vsota vseh energij v tekočini stalna. Merilniki na osnovi Pitot-Prandtlove cevi se sicer danes uporabljajo na letalih, najdemo jo pa tudi na ladjah. Poimenovana je po francoskem inženirju Henriju Pitotu in nemškemu fiziku Ludwigu Prandtlu. [18-23, 29]

2.1 Zgodovina

Pitotovo cev je iznašel Henri Pitot leta 1732, da bi z njo izmeril hitrost tekočine. Uporabil jo je za merjenje hitrosti toka reke Sene. Henry Darcy je v drugi polovici 19. stoletja objavil 4 dela, kako izboljšati Pitotovo cev. Ludwig Prandtl je v začetku 20. stoletja združil Pitotovo cev in piezometrično cev. Pitotova cev je merila celotno vrednost tlaka, medtem ko je piezometrična cev merila statični tlak. Razlika teh dveh je bil dinamični tlak in jo danes poznamo kot Pitot-Prandtlovo cev. [15, 18-23, 29]

2.2 Bernoullijeva enačba

Daniel Bernoulli je bil švicarski matematik in fizik [10]. Določil je povezavo med hitrostjo in tlakom tekočine v cevi. Ugotovil je, da za idealno tekočino (tj. tekočino, kateri gostota ostane enaka ne glede na tlak) velja povezava, ki ji danes pravimo Bernoullijeva enačba:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = \text{konstanta} \quad (1)$$

kjer je P_1 tlak v točki 1 (Pa), ρ gostota tekočine oz. plina (kg/m^3), v_1 hitrost toka v točki 1(m/s), g gravitacijski pospešek (10 m/s^2) in h_1 višina v točki 1(m).

Pri tem velja, da je člen $\frac{1}{2}\rho v^2$ dinamični tlak oz. gostota kinetične energije, ρgh pa gostota potencialne energije.

Če te količine opazujemo na dveh mestih, velja:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (2)$$

Bernoullijeva enačba (enačba 1) nam pove, da je v idealni tekočini vsota energij stalna. To pomeni, da se ob povečanju hitrosti zmanjša ali potencialna energija ali delo, ki ga opravlja tlak. Zato velja, da povečanje kinetične energije in/ali potenciale energije vodi v zmanjšanje tlaka. [7, 8, 21]

2.3 Bernoullijevo načelo

Bernoullijevo načelo lahko izrazimo iz Bernoullijeve enačbe, kadar lahko predpostavimo, da sta točki za odvzem tlaka na enakih (nadmorskih) višinah [7]. V tem primeru se oba člena ρgh okrajšata in v tem primeru lahko zapišemo Bernoullijevo načelo v obliki:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \quad (3)$$

2.4 Delovanje cevi

Poznamo Pitotovo in Pitot-Prandtlovo cev, imenovano tudi Pitot-Statična cev [11]. Cevi sta si podobni, saj obe delujeta na principu računanja razlike med zastojnim in statičnim tlakom. Razlikujeta se v sestavi, saj ima Pitotova cev (slika 1) eno luknjo, ki meri zastojni tlak oz. stagnacijski tlak (tlak, izmerjen ob stagnacijski točki tj. točki, kjer je hitrost = 0) ter drugo luknjo, ki meri statični tlak nekje drugje. Pitot-Prandtlova cev (slika 2) meri oboje v isti cevi. Sestavljena je iz dveh lukenj. Notranja luknja je imenovana stagnacijska luknja in meri zastojni oz. stagnacijski tlak, medtem ko zunanjega luknja, imenovana statična luknja, meri statični tlak. Razlika stagnacijskega tlaka in statičnega tlaka imenujemo dinamičen tlak.

Pri tem se Bernoullijevo načelo spremeni:

$$P_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (4)$$

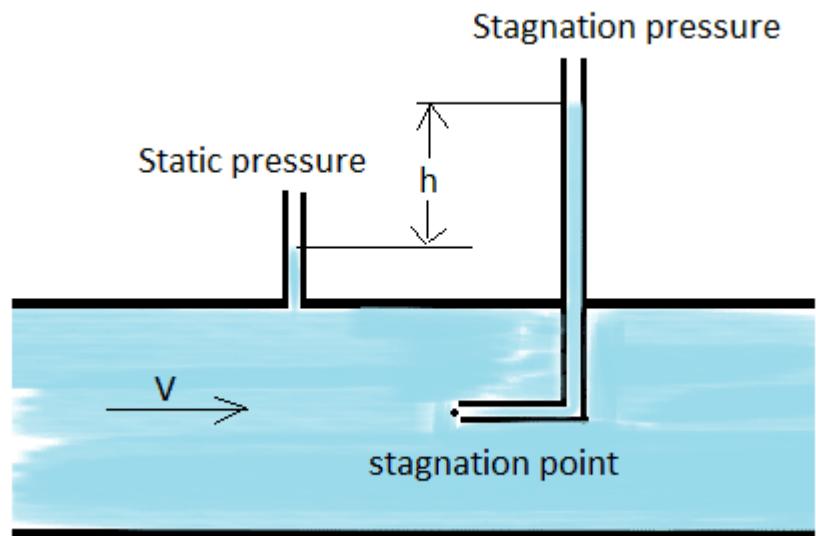
Iz Bernoullijevega načela je možno izraziti hitrost:

$$v^2 = \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho} \quad (5)$$

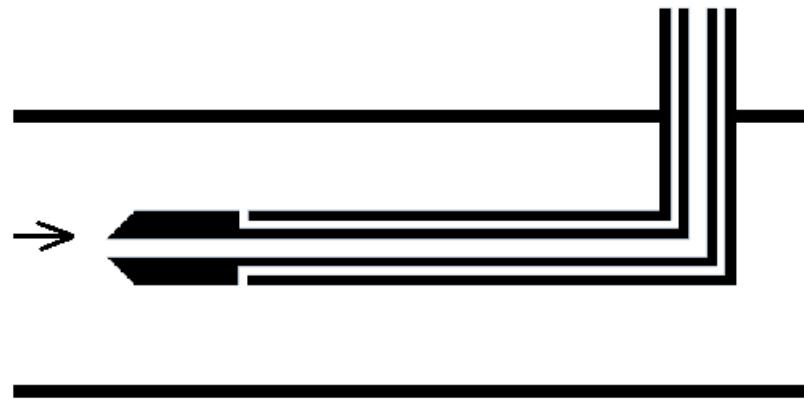
oziroma

$$v = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (6)$$

Ugotovili smo, da je hitrost v Pitot-Prandtlovi cevi enaka kvadratnemu korenju količnika dvakratnika dinamičnega tlaka in gostote zraka.



Slika 1 : Fotografija Pitotove cevi

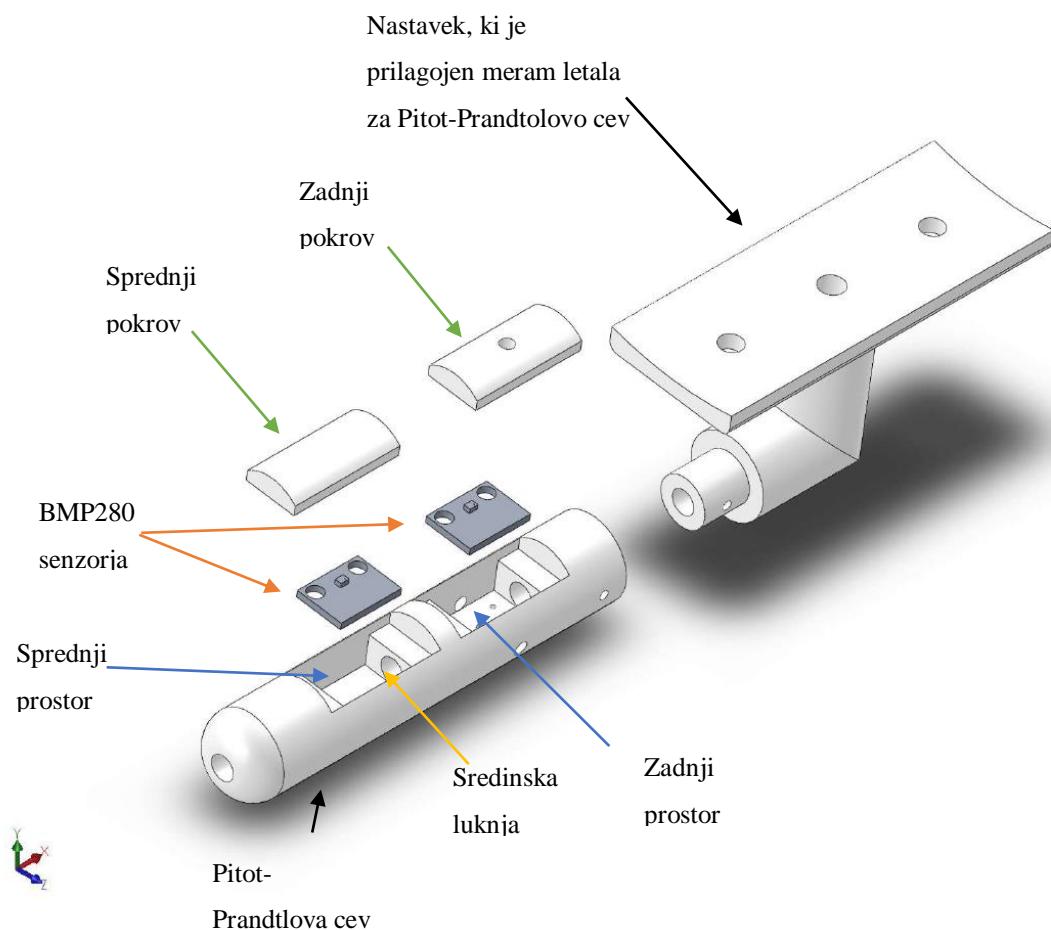


Pitot-staic tube

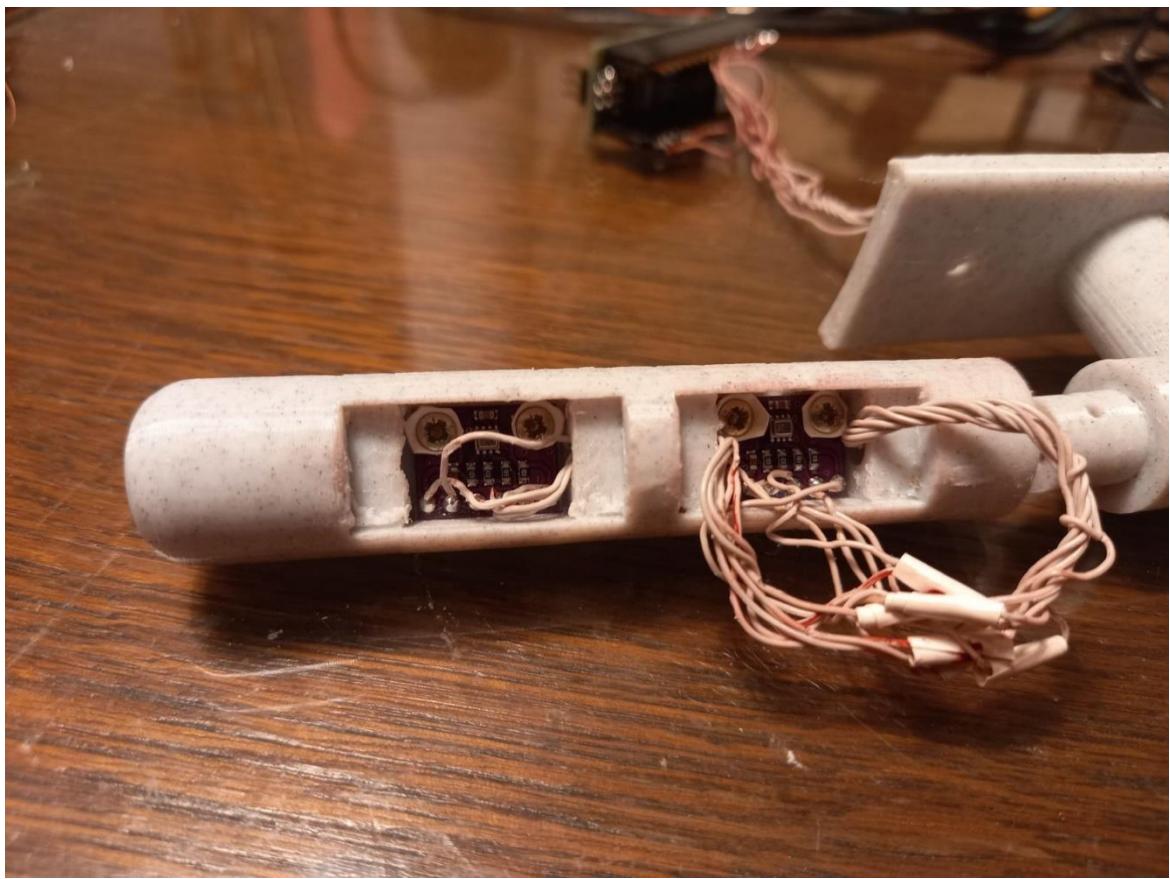
Slika 2 : Fotografija Pitot - Prandtlove cevi

3. NAČRTOVANJE IN IZDELAVA PITOT – PRANDTLOVE CEVI

Za načrtovanje Pitot-Prandtlove cevi smo izbrali program Solidworks in za njen izdelavo uporabili 3D tiskalnik Flashforge Creator Pro. Tiskali smo s polilaktidno plastiko. V našo cev smo vgradili dva senzorja tlaka Bosch BMP280. BMP280 je senzor absolutnega tlaka, ki je zmožen meriti absolutni tlak med 300 hPa in 1100 hPa z visoko ločljivostjo (0,12 hPa) in absolutno točnostjo (1 hPa). Senzor, ki meri stagnacijski tlak, smo namestili v sprednji prostor, ki je povezan s čelom cevi, kot kaže slika 3. Senzor, ki meri statični tlak, smo namestili v zadnji prostor. Povezovalne vodnike smo nato napeljali skozi sredinsko luknjo, ki smo jo nato zapolnili s silikonom, da preprečimo stik tekočine med sprednjim in zadnjim prostorom. Žice ob teh vezij smo napeljali še skozi zadnjo luknjo, kjer smo jih povezali na mikrokrmilnik. Oba prostora smo zaprli s pokrovimi in jih ob robovih silikonizirali. Zaradi potrebe po pritrditvi cevi na letalo in na avto smo naredili še dva nastavka. En nastavek je ustrezal meram palice, ki je bila uporabljena v poizkusih z avtom, medtem ko je drugi nastavek ustrezal meram letala. Mer nastavkov v nalogu nismo vključili, ker so prilagojene meram v poizkuusu uporabljeni palice in letala.



Slika 3: Model Pitot-Prantlove cevi (lasten vir)



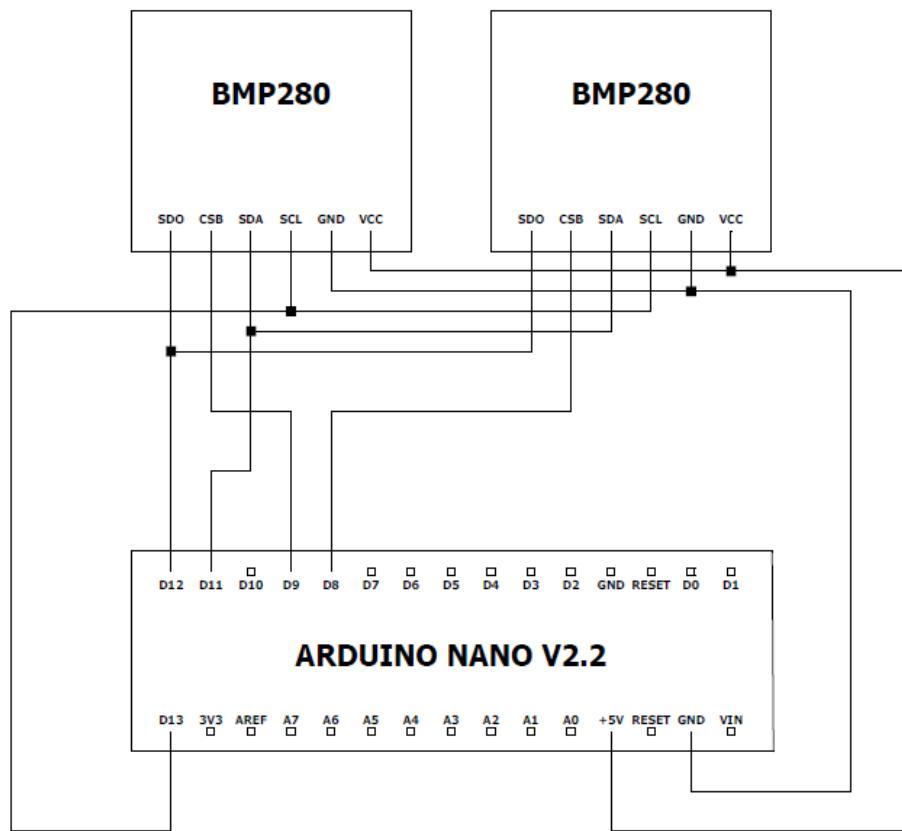
Slika 4: Pitot-Prandtlova cev (lasten vir)

4. SESTAVA ELEKTRONSKEGA VEZJA

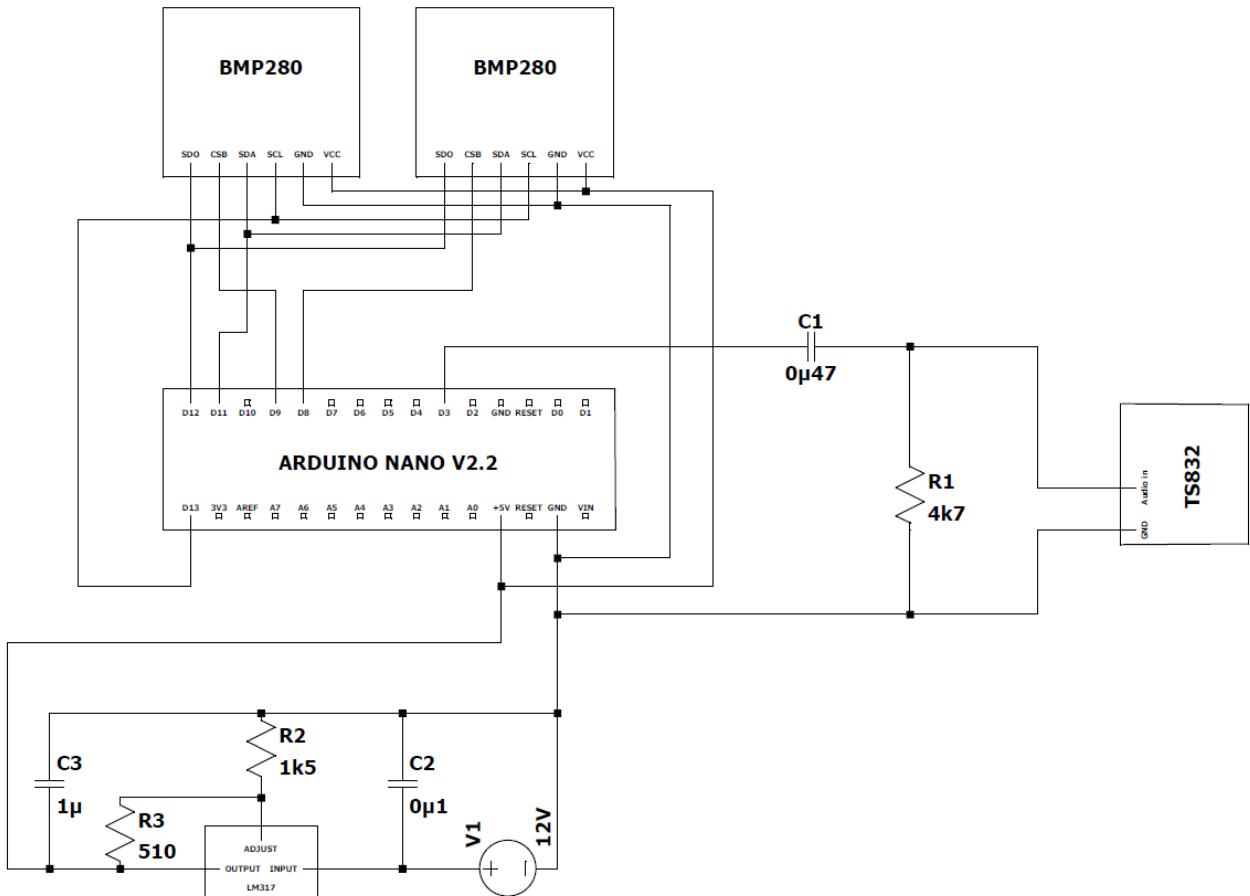
Elektronski del raziskovalne naloge je razdeljen na elektronsko vezje Pitot-Prandtlove cevi in oddajnika ter elektronsko vezje sprejemnika.

V Pitot-Prandtlovo cev smo vgradili dva senzorja tlaka Bosch BMP280, ki lahko merita absolutni tlak v merilnem območju med 300 hPa in 1100 hPa.

Za prenos podatkov smo uporabili radijski sistem za prenos slike in zvoka, ki ga srečamo na mnogih sodobnih letalnikih, ki mu s kratico pravimo FPV (ang. First Person View oz. pogled iz prve perpspektive). FPV tako sestavlja radijski oddajnik, ki oddaja video signal, ki ga pridobi iz kamere, omogoča pa tudi sočasen prenos zvočnega signala ter zemeljski video sprejemnik, ki omogoča sprejem in prikaz video in zvočnega signala. V naši nalogi nas je predvsem zanimala zmožnost FPV za prenos zvočnega signala, saj smo jo porabili za prenos podatkov o hitrosti, in sicer tako da smo podatek o hitrosti spremenili v električni signal s frekvenco, ki je bila odvisna od izračunane hitrosti, nato pa smo ta signal povezali z radijskim oddajnikom. Na zvočni izhod video sprejemnika smo povezali drug dodaten mikrokrmlnik, ki je meril frekvenco sprejetega signala in ga nato pretvoril nazaj v podatek o hitrosti. Za povezavo med mikrokrmlnikom in oddajnikom ter med sprejemnikom in drugim mikrokrmlnikom je bilo potrebno dodati ustrezna elektronska prilagoditvena vezja. Predvsem je bilo potrebno izdelati vezje na strani video sprejemnika, saj ima signal na izhodu video sprejemnika majhno amplitudo, na vhod mikrokrmlnika pa je potrebno pripeljati pravokotne signale, ki se spreminjajo med 0 V in 5 V. Delovanje elektronskih vezij je bilo najprej preizkušeno in optimirano v simulacijskem programu LTspice, ki je brezplačno simulacijsko orodje podjetja Analog Devices in omogoča učinkovito računalniško simulacijo delovanja elektronskih vezij.



Slika 5: Vezje št.1 (lastno narejeno v programu LTspice)



Slika 6: Vzje št. 2 (lastno narejeno v programu LTspice)

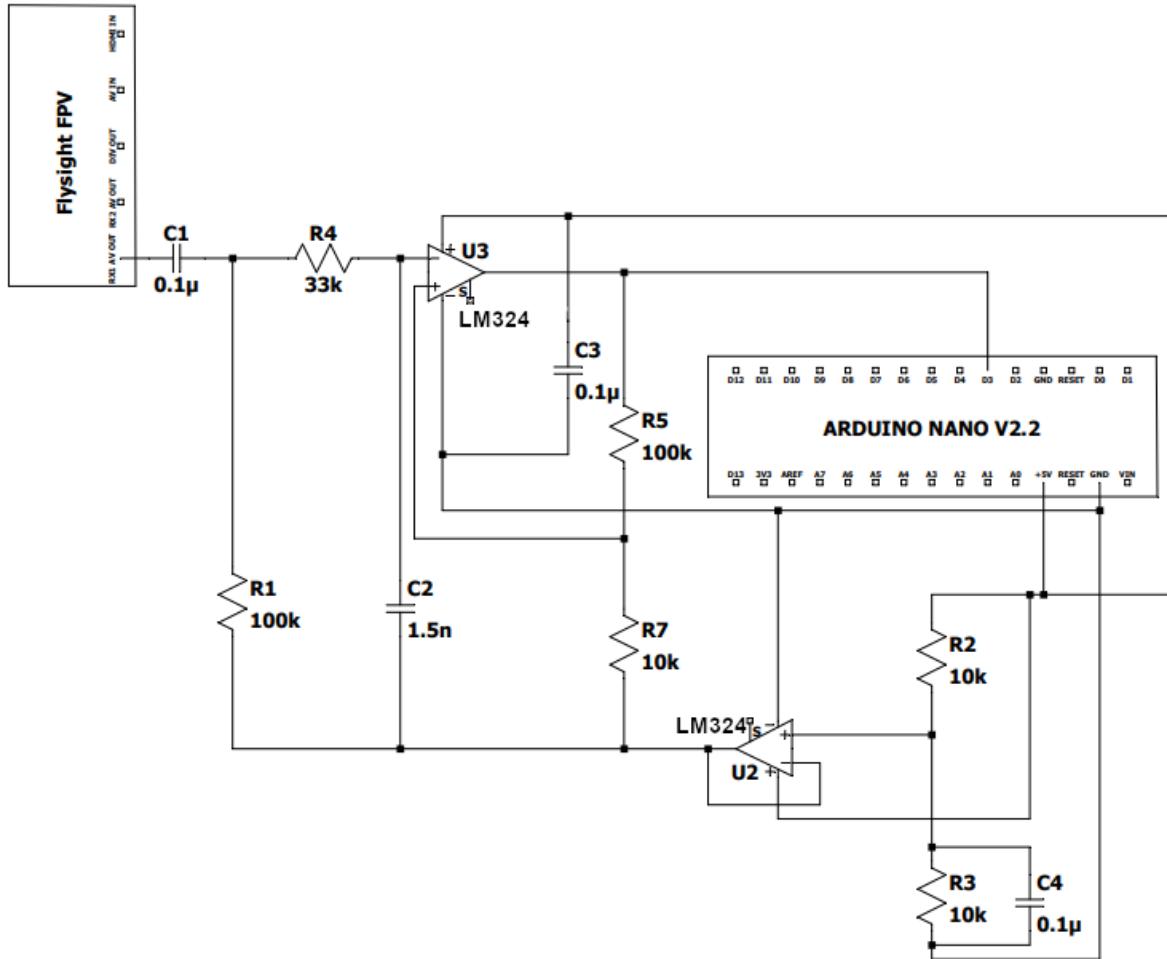
Slika 6 prikazuje celotno vezje, ki se nahaja na letalniku. Osrčje vezja predstavlja digitalna meritnika tlaka Bosch BMP 280, ki sta prispevani na dve miniaturni tiskanini, ki imata dimenzijs 15 mm x 11,5 mm. Na tiskaninah se, poleg čipov, nahajajo še upori, ki določijo napetost na vhodnih nožicah čipov. Oba BMP senzorja sta neposredno povezana z mikrokrmlnikom na vezju Arduino Nano. Oba BMP senzorja sta povezana z Arduinom Nanom preko serijskega vodila, ki ustreza SPI standardu. Povezovalne linije med senzorjem in Arduinom Nanom zajemajo, poleg napajalnih linij, še uro (SCL), podatkovno linijo za prenos podatkov iz senzorja h krmilniku (SDO), linijo za prenos podatkov iz krmilnika k senzorju (SDA) in linijo za izbor senzorja-čipa (CSB).

Oba senzorja sta bila povezana na krmilnik po ustaljeni in predlagani shemi tako, da smo lahko uporabili obstoječe knjižnice, ki smo jih navedli pod elektronskimi viri. Izhodno nožico krmilnika (izhod D3) smo povezali z mikrofonskim vhodom FPV oddajnika. FPV oddajnik je namenjen daljinskemu prenosu slike in zvoka iz letalnika na zemeljski sprejemnik z zaslonom. Ker je prenos zvoka iz letalnika na zemljo neuporaben, smo zmožnost prenosa zvočnih frekvenc (zvoka) uporabili za prenos podatka o hitrosti, kot je opisano v elektronskih vezjih na slikah 6

in 7. Na izhodu D3 se ustvari signal, kateremu se je spreminja frekvenca med 500 in 2000 Hz. Ta signal smo preko kondenzatorja pripeljali na vhod FPV oddajnika. Kondenzator in upor sta potrebna za to, da prepustimo na mikrofonski vhod FPV le izmenične signale¹.

Kombinacija kondenzatorja in upora v vezju prepušča signale s frekvenco, ki je višja od $1/(2 \pi \cdot 4,7k\Omega \cdot 0,47 \mu F) \doteq 72 \text{ Hz}$. Celotnemu vezju pa je potrebno zagotoviti še napajanje. Arduino in BMP senzorji za delovanje potrebujejo 5 V, medtem ko je napetost, ki jo dobimo neposredno iz baterije letalnika okoli 12 V. Zato smo dodali med baterijo in napajanjem Arduina Nano napetostni regulator. Napetostni regulator LM317 je bil povezan po priporočilu proizvajalca. Napetost na izhodu regulatorja smo nastavili s parom uporov, ki smo jih izračunali po navodilu proizvajalca.

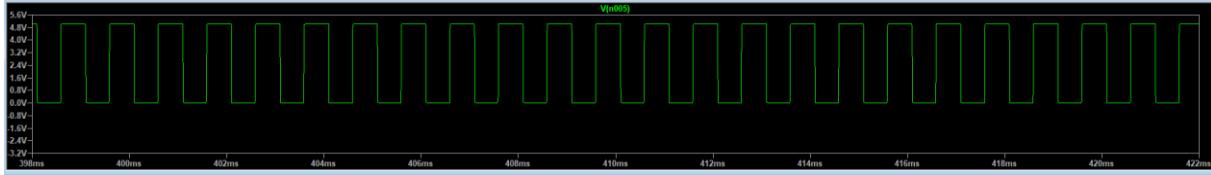
¹ Na izhodu D3 se napetost spreminja med dvema različnima pozitivnima vrednostma izhodne napetosti in zato vedno vsebuje enosmerno vrednost napetosti. Na vhod FPV-ja pa je potrebno pripeljati izmenične signale.



Slika 7: Vezje št. 3 (lastno narejeno v programu LTspice)

Slika 7 prikazuje sprejemno vezje. Izhod za slušalke iz FPV sprejemnika (avdio izhod) je bilo potrebno pretvoriti v pravokotne signale s spodnjo vrednostjo 0 V in zgornjo vrednostjo 5 V. Kljub temu da gre za dokaj enostaven radijski oddajnik in sprejemnik, je bil prisoten šum. Zato smo z nekaj poskušanja sestavili vezje, ki je na sliki 7. Vezje sestavlja prvi par upora in kondenzatorja, ki prepušča le tiste izmenične signale, ki imajo frekvence višje od $1/(2\pi \cdot 100k \Omega \cdot 0,1\mu F) \doteq 1,6Hz$. Nato sledi filter, ki odreže visoke frekvence. Tega sestavlja upor R4 in kondenzator C2 tako, da znese frekvenca, pri kateri začne vezje slabiti signal $1/(2\pi \cdot 33k \Omega \cdot 1,5 nF) \doteq 3215 Hz$. Vhodno vezje, ki je sestavljeno iz uporov R1 in R4 ter kondenzatorjev C1 in C2, prepušča le frekvence med 1,6 in 3215 Hz, kar pomaga omejiti šum. Kljub temu to ni bilo dovolj, saj je bila meritev frekvence še zmeraj nezanesljiva. Zato smo dodali še vezje, ki mu pravimo Schmittov sprožilec (sestavljata ga upora R5 in R7). Deluje

tako, da se preklaplja med dvema izhodnima napetostma. Napetost, pri kateri pride do priklopa, je odvisna od trenutnega stanja (napetosti) izhoda. To pomeni: če je napetost na izhodu visoka, mora vhodna napetost pasti na zelo nizko vrednost, da se izhod preklopi iz visoke napetosti na nizko napetost. Ko je napetost nizka, se mora vhodna vrednost bistveno povečati, da pride do ponovnega preklopa v visoko stanje. Na ta način majhne spremembe v vhodni napetosti ne morejo povzročiti preklopa v Schmittovem sprožilcu, kar naredi vezje bistveno manj občutljivo na šume. Omeniti je potrebno, da je bila amplituda, s katero smo prenašali frekvenco, okoli 1 V. Za delovanje celotnega vezja je bilo potrebno poskrbeti, da napetost na vhodu operacijskega ojačevalnika LM324 nikoli ne pade pod 0 V. To smo dosegli tako, da smo si ustvarili nov referenčni ničelni potencial ali maso. To smo naredili, da smo napajalno napetost delili z 2 (upora R2 in R3), nato pa smo uporabili drugi ojačevalnik iz istega ohišja, s katerim smo napetost iz delilnika ojačili z 1 in jo uporabili kot nov referenčen ničelni potencial². Kondenzator C3 in C4 služita za filtriranje motenj, ki so prisotne v napajanju, saj se na letalniku nahaja močan elektromotor, ki povzroča dosti motenj.



Slika 8: Simulacija signala na nožici D3, ko FPV proizvaja signal s frekvenco 1 kHz (lastno simulirano v programu LTspice)

² Na ta potencial smo priklopili tako R1 in C2, ki sestavljajo naš vhodni filter.

5. PROGRAMIRANJE KRMILNIKA

5.1 Program za merjenje razlike tlaka in kalibracijo cevi

```
*****
```

This is a library for the BMP280 humidity, temperature & pressure sensor

Designed specifically to work with the Adafruit BMP280 Breakout

---> <http://www.adafruit.com/products/2651>

These sensors use I2C or SPI to communicate, 2 or 4 pins are required to interface.

Adafruit invests time and resources providing this open source code,
please support Adafruit and open-source hardware by purchasing products
from Adafruit!

Written by Limor Fried & Kevin Townsend for Adafruit Industries.

BSD license, all text above must be included in any redistribution

```
***** /
```

```
//Zacetek prvega dela programa
#include <SPI.h>
#include <Adafruit_BMP280.h>
//Konec prvega dela programa
```

```
//Zacetek drugega dela programa
// assign the SPI bus to pins
#define BMP_SCK 13
#define BMP_MISO 12
#define BMP_MOSI 11
#define BMP1_CS 9
#define BMP2_CS 8
```

```
Adafruit_BMP280 bmp1(BMP1_CS, BMP_MOSI, BMP_MISO, BMP_SCK);
Adafruit_BMP280 bmp2(BMP2_CS, BMP_MOSI, BMP_MISO, BMP_SCK);
//Konec drugega dela programa
```

```
//Zacetek tretjega dela programa
void setup() {
```

```

Serial.begin(9600);
Serial.println(F("bmp280 test"));

bool status;

// default settings
status = bmp1.begin();
if (!status) {
    Serial.println("bmp280 senzor 1 ni bil najden.");
}

// default settings
status = bmp2.begin();
if (!status) {
    Serial.println("bmp280 senzor 2 ni bil najden.");
}

Serial.println("Zacetek testa");
delay(1000);

Serial.println();

bmp1.setSampling(Adafruit_BMP280::MODE_NORMAL,
    Adafruit_BMP280::SAMPLING_X2,
    Adafruit_BMP280::SAMPLING_X16,
    Adafruit_BMP280::FILTER_X16,
    Adafruit_BMP280::STANDBY_MS_1);

bmp2.setSampling(Adafruit_BMP280::MODE_NORMAL,
    Adafruit_BMP280::SAMPLING_X2,
    Adafruit_BMP280::SAMPLING_X16,
    Adafruit_BMP280::FILTER_X16,
    Adafruit_BMP280::STANDBY_MS_1);

}

//Konec tretjega dela programa

//Zacetek cetrtrega dela programa
float preberi_tlak1()
{
    int i;
    float k,tlak;

```

```

k=0;
for(i=1;i<=100;i++){
k += bmp1.readPressure();
}

tlak = k / 100;
return (tlak);

}

```

```

float preberi_tlak2()
{

int i;
float k,tlak;

k=0;
for(i=1;i<=100;i++){
k += bmp2.readPressure();

}

tlak = k / 100;
return(tlak);

```

```

}

//Konec cetrtega dela programa

```

```

//Zacetek petega dela programa
void loop() {

float tlak1,tlak2,offset = 0,razlika;

tlak1 = preberi_tlak1();
tlak2 = preberi_tlak2();
for(int h = 0; h < 10; h++)
{
offset += tlak1-tlak2;
}
offset = offset / 10;

while(1){
razlika = 0;

```

```

tlak1 = preberi_tlak1();
tlak2 = preberi_tlak2();

for(int i = 0; i < 100; i++)
{
    razlika += tlak1 - tlak2 - offset;
}

razlika = razlika / 100;
Serial.println(razlika);
Serial.println();

}

//Konec petega dela programa

```

Zgornji program smo razdelili na pet delov za lažjo razlago (začetek in konec dela je zapisan v komentarju).

V prvem delu programa smo vključili 2 knjižnici. SPI.h knjižnica nam omogoča komunikacijo senzorjev preko SPI povezave (povezava opisana v vezju št.1), medtem ko nam knjižnica Adafruit_BMP280.h omogoča dostop do funkcij BMP280 senzorjev.

V drugem delu smo definirali nožice (ang. pins), na katere smo povezali senzorja preko SPI povezave in nato te definirane nožice še dodelili obema senzorjema.

V tretjem delu naše kode smo preverili stanje obeh senzorjev, tj. ali sta pravilno prepoznavna oz. ju mikrokrnilnik prepozna. Če sta oba senzorja prepoznana, se program nadaljuje.

V četrtem delu smo vstavili funkciji za vsak senzor, ki povprečita rezultate merjenja tlaka za natančnejši rezultat.

Peti del vključuje nastavitev odmične točke³ (ang. offset). Zato smo morali pred vsakim izvajanjem poskusa zagotoviti, da se ob začetku izvajanja programa objekt, na katerem bomo izvajali meritev, ne premika. Do konca merjenja smo izvajali ponavljajočo zanko. Ta zanka vsebuje branje obeh senzorjev in računanje razlike med njima (ter odmično točko). Zanko smo zaključili z izpisom razlike.

³ To vrednost moramo izračunati, da vemo, kolikšna je razlika tlaka, ko se predmet še ne premika.

5.2 Program za merjenje hitrosti

```
*****
```

This is a library for the BMP280 humidity, temperature & pressure sensor

Designed specifically to work with the Adafruit BMP280 Breakout

----> <http://www.adafruit.com/products/2651>

These sensors use I2C or SPI to communicate, 2 or 4 pins are required to interface.

Adafruit invests time and resources providing this open source code,
please support Adafruit and open-source hardware by purchasing products
from Adafruit!

Written by Limor Fried & Kevin Townsend for Adafruit Industries.

BSD license, all text above must be included in any redistribution

```
***** /
```

```
//Zacetek prvega dela programa
#include <SPI.h>
#include <Adafruit_BMP280.h>
//Konec prvega dela programa

//Zacetek drugega dela programa
// assign the SPI bus to pins
#define BMP_SCK 13
#define BMP_MISO 12
#define BMP_MOSI 11
#define BMP1_CS 9
#define BMP2_CS 8

Adafruit_BMP280 bmp1(BMP1_CS, BMP_MOSI, BMP_MISO, BMP_SCK);
Adafruit_BMP280 bmp2(BMP2_CS, BMP_MOSI, BMP_MISO, BMP_SCK);
//Konec drugega dela programa

//Zacetek tretjega dela programa
void setup() {

    Serial.begin(9600);
    Serial.println(F("bmp280 test"));
```

```

bool status;

// default settings
status = bmp1.begin();
if (!status) {
    Serial.println("bmp280 senzor 1 ni bil najden.");
}

// default settings
status = bmp2.begin();
if (!status) {
    Serial.println("bmp280 senzor 2 ni bil najden.");
}

Serial.println("Zacetek testa");
delay(1000);

Serial.println();

bmp1.setSampling(Adafruit_BMP280::MODE_NORMAL,
    Adafruit_BMP280::SAMPLING_X2,
    Adafruit_BMP280::SAMPLING_X16,
    Adafruit_BMP280::FILTER_X16,
    Adafruit_BMP280::STANDBY_MS_1);

bmp2.setSampling(Adafruit_BMP280::MODE_NORMAL,
    Adafruit_BMP280::SAMPLING_X2,
    Adafruit_BMP280::SAMPLING_X16,
    Adafruit_BMP280::FILTER_X16,
    Adafruit_BMP280::STANDBY_MS_1);

}

//Konec tretjega dela programa

//Zacetek cetrtrega dela programa
float preberi_tlak1()
{

    int i;
    float k,tlak;

    k=0;
    for(i=1;i<=100;i++){

```

```

k += bmp1.readPressure();
}

tlak = k / 100;
return (tlak);

}

float preberi_tlak2()
{

int i;
float k,tlak;

k=0;
for(i=1;i<=100;i++){
k += bmp2.readPressure();

}

tlak = k / 100;
return(tlak);

}

//Konec cetrtega dela programa

//Zacetek petega dela programa
void loop() {

float tlak1,tlak2,offset = 0,razlika, hitrost;

tlak1 = preberi_tlak1();
tlak2 = preberi_tlak2();
for(int h = 0; h < 10; h++)
{
offset += tlak1-tlak2;
}
offset = offset / 10;

while(1){
razlika = 0;

tlak1 = preberi_tlak1();

```

```

tlak2 = preberi_tlak2();

for(int i = 0; i < 100; i++)
{
    razlika += tlak1 - tlak2 - offset;
}

hitrost = 1/1.1368*sqrt((2/1.27)*razlika) * 3.6;
Serial.println(hitrost);
Serial.println();

}
}

//Konec petega dela programa

```

Zgoraj opisani program je podoben programu iz poglavja 5.1 z izjemo v petem delu. V njem smo dodali izpis hitrosti po Bernoullijevem načelu, ki smo ga dopolnili s koeficientom 1/1,308 in faktorjem 3,6. O koeficientu bomo več povedali v poglavju 6.1. Faktor 3,6 smo uporabili, ker smo izvajali meritve v km/h, v obdelavi podatkov pa smo jih pretvorili v m/s. Peti del se konča z izpisom hitrosti.

5.3 Program za merjenje hitrosti in prenos podatkov s frekvenco

```
*****
```

This is a library for the BMP280 humidity, temperature & pressure sensor

Designed specifically to work with the Adafruit BMP280 Breakout

----> <http://www.adafruit.com/products/2651>

These sensors use I2C or SPI to communicate, 2 or 4 pins are required
to interface.

Adafruit invests time and resources providing this open source code,
please support Adafruit and open-source hardware by purchasing products
from Adafruit!

Written by Limor Fried & Kevin Townsend for Adafruit Industries.

BSD license, all text above must be included in any redistribution

```
***** /
```

```
//Zacetek prvega dela programa
#include <SPI.h>
#include <PWM.h>
#include <Adafruit_BMP280.h>
//Konec prvega dela programa
```

```
//Zacetek drugega dela programa
// assign the SPI bus to pins
#define BMP_SCK 13
#define BMP_MISO 12
#define BMP_MOSI 11
#define BMP1_CS 9
#define BMP2_CS 8
```

```
Adafruit_BMP280 bmp1(BMP1_CS, BMP_MOSI, BMP_MISO, BMP_SCK); // software SPI
Adafruit_BMP280 bmp2(BMP2_CS, BMP_MOSI, BMP_MISO, BMP_SCK); // software SPI
//Konec drugega dela programa
```

```
//Zacetek tretjega dela programa
void setup() {
```

```
    InitTimersSafe ();
    pinMode(3, OUTPUT);
```

```

Serial.begin(9600);
Serial.println(F("bmp280 test"));

bool status;

// default settings
status = bmp1.begin();
if (!status) {
    Serial.println("bmp280 senzor 1 ni bil najden.");
}

// default settings
status = bmp2.begin();
if (!status) {
    Serial.println("bmp280 senzor 2 ni bil najden.");
}

Serial.println("Zacetek testa");
delay(1000);

Serial.println();

bmp1.setSampling(Adafruit_BMP280::MODE_NORMAL,
    Adafruit_BMP280::SAMPLING_X2,
    Adafruit_BMP280::SAMPLING_X16,
    Adafruit_BMP280::FILTER_X16,
    Adafruit_BMP280::STANDBY_MS_1);

bmp2.setSampling(Adafruit_BMP280::MODE_NORMAL,
    Adafruit_BMP280::SAMPLING_X2,
    Adafruit_BMP280::SAMPLING_X16,
    Adafruit_BMP280::FILTER_X16,
    Adafruit_BMP280::STANDBY_MS_1);

}

//Konec tretjega dela programa

//Zacetek cetrtrega dela programa
float preberi_tlak1()
{
    int i;
    float k,tlak;

```

```

k=0;
for(i=1;i<=100;i++){
k += bmp1.readPressure();
}

tlak = k / 100;
return (tlak);

}

float preberi_tlak2()
{

int i;
float k,tlak;

k=0;
for(i=1;i<=100;i++){
k += bmp2.readPressure();

}

tlak = k / 100;
return(tlak);

}

//Konec cetrtega dela programa

//Zacetek petega dela programa
void loop() {

float tlak1,tlak2,offset = 0,razlika,hitrost,frekvenca;

tlak1 = preberi_tlak1();
tlak2 = preberi_tlak2();
for(int h = 0; h < 10; h++)
{
offset += tlak1-tlak2;
}
offset = offset / 10;

while(1){
razlika = 0;

```

```

frekvenca = 500;

tlak1 = preberi_tlak1();
tlak2 = preberi_tlak2();

for(int i = 0; i < 100; i++)
{
    razlika += tlak1 - tlak2 - offset;
}

razlika = razlika / 100;
hitrost = 1/1.1368*sqrt((2/1.28) * razlika);
frekvenca += hitrost * 40;
SetPinFrequencySafe(3,frekvenca);
pwmWrite(3, 127);
Serial.println(razlika);
Serial.println(frekvenca);

}
}

//Konec petega dela programa

```

Program pod to točko je nadgraditev prejšnjega programa. Na začetku smo vključili knjižnico PWM.h, ki nam omogoča generiranje frekvence. Za prenos hitrosti iz letala do upravljalca letala smo se odločili uporabiti oddajnik in sprejemnik, ki smo ga v našem primeru imeli vgrajenega v FPV sistem in iz katerega smo lahko z navadnim avdio kablom prenesli frekvenco na vezje št. 4. Odločili smo se, da bo začetna frekvencia prenosov podatkov 500 Hz in da bo sprememba ene enote pomenila spremembo frekvence za 40 Hz. To smo naredili v programu tako, da smo definirano spremenljivko *frekvenca*, ki smo ji dodelili vrednost 500. Nato smo to vrednost povišali za zmnožek vrednosti hitrosti, ki je naravno število, saj je tipa *integer*, in števila 40. Vrednost frekvence smo v končnem delu petega dela programa izpisali na nožico D3, ki je bil na začetku definirana kot izhod.

5.4 Program za sprejem frekvence in pretvorbo v hitrost

```
//Zacetek prvega dela programa
unsigned long int cas;
unsigned long int frekvenca, temp;
int hitrost;

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    pinMode(3, INPUT);
}

//Konec prvega dela programa

//Zacetek drugega dela programa
void loop() {

    hitrost = 0;
    temp = 0;

    for(int i = 0; i < 10; i++)
    {
        noInterrupts();
        cas = pulseIn(3, HIGH) + pulseIn(3, LOW);
        interrupts();

        frekvenca = 1000000/cas;

        temp += frekvenca;
    }

    frekvenca = temp / 10;
    if(frekvenca % 40 > 20)
    {
        frekvenca = frekvenca + 20;
    }
    hitrost = (frekvenca - 500) / 40;
    Serial.println(hitrost);

}

//Konec drugega dela programa
```

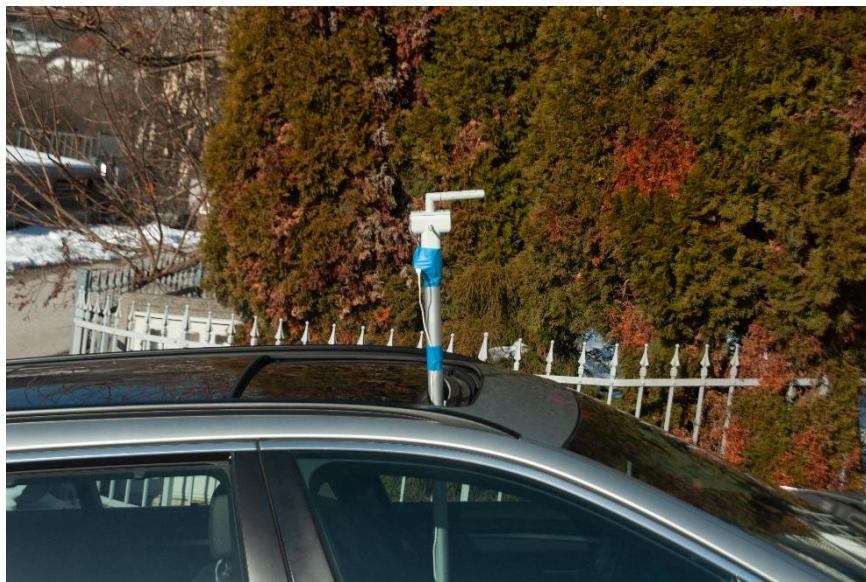
V tem programu smo v prvem delu programa definirali začasno spremenljivko, spremenljivke za čas, frekvenco in hitrost ter nastavili nožico D3 za branje podatkov (oz. smo jo nastavili na

možnost vhoda). V drugem, ponavljajočem se delu programa, se izvede branje frekvence, med katerim smo onemogočili prekinitve. Branje frekvence je povprečeno. V nadaljevanju smo uvedli sistem zaokroževanja, kjer smo frekvenci, ki je bila bližje višji vrednosti deljivi z 40, prišteli 20 Hz. Hitrost smo iz frekvence dobili tako, da smo od frekvence odšteli 500 Hz (saj smo frekvenco začeli generirati pri 500 Hz) in nato dobljeni rezultat delili z 40. Ker je hitrost tipa integer, bo rezultat predhodno naravno število deljivo s 40.

6. IZVEDBA MERITEV

6.1 Prvi poizkus – kalibracija meritnika

V prvem poizkusu smo preverili in kalibrirali Pitot-Prandtlovo cev. Uporabili smo vezje št. 1 in program za kalibracijo Pitot-Prandtlove cevi. Najbolje bi bilo kalibracijo izvesti v nadzorovanih pogojih. Za takšne pogoje bi potrebovali zračni tunel, vendar ga nismo imeli. Posledično smo se odločili poskus izvesti tako, da smo cev pritrdili na približno 2 metra dolgo palico in nato palico pritrdili v avto tako, da je bila Pitot-Prandtlova cev približno 60 cm nad streho avtomobila, kot kaže slika 9. Poskrbeti smo morali, da je bila cev oddaljena od avta dovolj, da ne bi tlak, ki se je ustvaril pri ohišju avta med vožnjo, vplival na rezultate meritve. Zagotoviti smo morali tudi, da je bila cev vzporedna s tokom zraka. Kalibracijo smo poskusili izvesti v razmerah brez vetra, vendar zaradi vožnje na odprtih cestah tega nismo imeli zagotovljenega skozi celoten postopek kalibracije. Da bi zmanjšali napake zaradi vpliva vetra, smo kalibracijo izvajali na istem odseku ceste, vendar z izmenično vožnjo v nasprotnih smereh. Pridobljene podatke smo nato povprečili. Vozili smo se pri 8-ih različnih hitrostih: 30 km/h, 40 km/h, 50 km/h, 60 km/h, 70 km/h, 80 km/h, 90 km/h, 100 km/h.



Slika 9: Pitot Prandtlova cev pred izvedeno kalibracijo (lasten vir)

Rezultati poskusov so prikazani v tabeli 1 in na grafu 1, ki je prikazan na sliki 10. Razlike tlakov v poskusu smo zapisali večkrat in potem izračunali njihovo povprečje. Dobili smo naslednje rezultate:

| Izmerjena hitrost [km/h] | Izmerjena hitrost [m/s] | Povprečna razlika tlakov [Pa] |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 30 | 8,333333 | 60,4 |
| 40 | 11,11111 | 106,5 |
| 50 | 13,88889 | 160,8 |
| 60 | 16,66667 | 228,5 |
| 70 | 19,44444 | 311,1 |
| 80 | 22,22222 | 409,0 |
| 90 | 25 | 507,9 |
| 100 | 27,77778 | 621,9 |

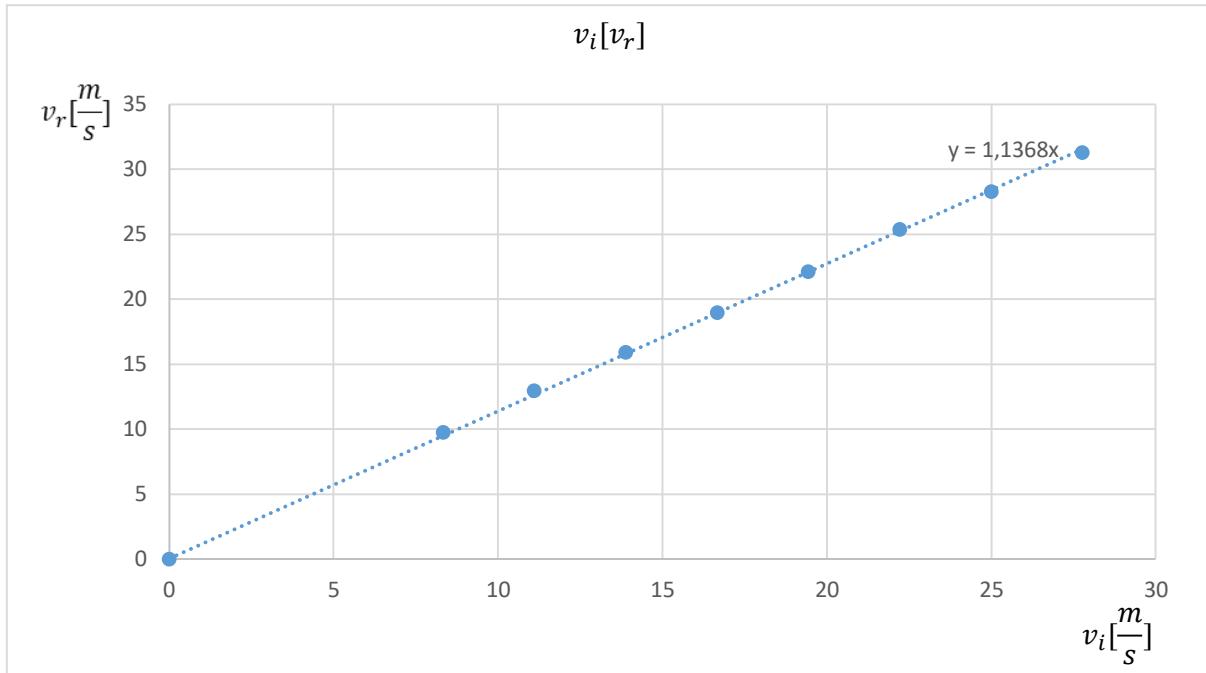
Tabela 1

Če razlike tlakov po Bernoullijevem načelu izračunamo v hitrost, dobimo naslednje hitrosti:

| Izmerjena hitrost [m/s] | Izračunana hitrost[m/s] |
|-------------------------|-------------------------|
| 0 | 0 |
| 8,333333 | 9,8 |
| 11,11111 | 12,9 |
| 13,88889 | 15,9 |
| 16,66667 | 19,0 |
| 19,44444 | 22,1 |
| 22,22222 | 25,4 |
| 25 | 28,3 |
| 27,77778 | 31,3 |

Tabela 2

Zaradi odstopanj smo narisali graf izmerjene hitrosti v odvisnosti od izračunane hitrosti, skozi katerega smo narisali trendno črto. Ugotovili smo, da je izračunana hitrost po enačbi $\sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}$ večja od dejanske hitrosti za količnik, ki ustreza 1,1368. Zato ima tudi funkcija na spodnjem grafu smerni koeficient 1,1368.



Slika 10: Graf 1, ki prikazuje izračunano hitrost (v_r) v odvisnosti od izmerjene hitrosti (v_i). Prostor izvedbe poskusa: cesta Borova vas med krožiščem z Lackovo cesto in krožiščem pri Illichovi ulici (koordinate: 46.540364, 15.617106) Čas: 24.1.2023 ob 23.00, Temperatura: 0 °C, veter: okoli 8.5 km/h med 360 ° in 45 ° (Podatki: ARSO Vreme) (graf lastno narejen).

Do odstopanja pride, ker Bernoullijevo načelo velja za neskončno veliko oviro pravokotnega preseka. Ker Pitot-Prandtlova cev ni tak predmet, je potrebno izraz za izračun hitrosti popraviti s korekcijskim koeficientom, ki ga lahko odčitamo iz zgornjega grafa in ustreza obratni vrednosti smernegga koeficiente, to je v našem primeru $1/1,1368 \doteq 0,8797$. Naša popravljena enačba za izračun hitrosti se glasi:

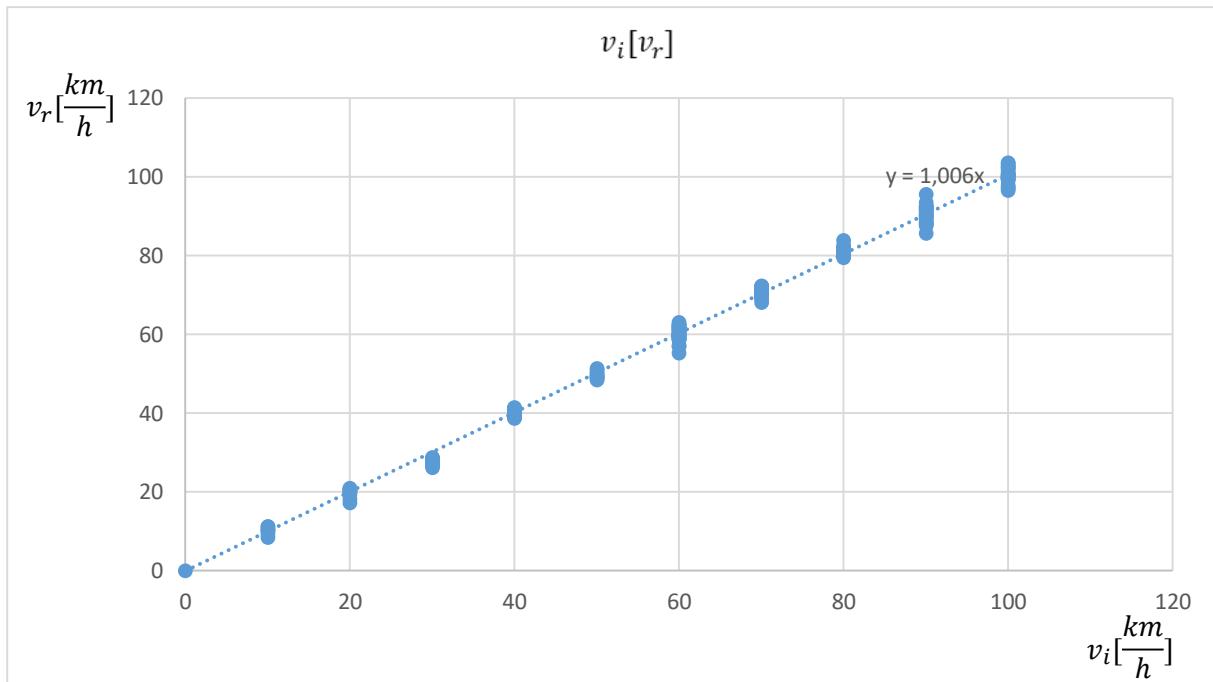
$$v = 0,8797 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} \quad (7)$$

Enačbo (7) smo v nadaljevanju uporabili za izračun hitrosti.

6.2 Drugi poizkus – preizkus delovanja in ocena merilnega pogreška

Drugi poizkus smo izvajali štiri dni kasneje. Namen tega poizkusa je bil preizkus celotnega merilnega sistema z oceno merilnega pogreška. Pitot-Prandtlovo cev smo ponovno pritrdirili na streho avtomobila in se vozili po različnih cestah v različnih smereh. Pri tem smo primerjali hitrost, ki jo je kazal avtomobilski števec, s hitrostjo, ki jo je prikazoval naš merilni sistem.

Ker smo hoteli pokazati natančnost naše Pitot-Prandtlove cevi, v nadaljevanju nismo računali povprečja za vsako izračunano hitrost, ampak smo vsem izmerjenim hitrostim pripisali ustrezeno izračunano hitrost, tako da smo dobili naslednji graf:



Slika 11: Graf 2, ki prikazuje izračunano hitrost (v_r) v odvisnosti od izmerjene hitrosti (v_i). Prostor izvedbe poskusa: cesta Borova vas med krožiščem z Lackovo cesto in krožiščem pri Illichovi ulici (koordinate te ceste: 46.540364, 15.617106). Čas: 28.1.2023 ob 23.00, Temperatura: 0 °C, veter: 6 km/h 180° (Po podatkih ARSO Vreme) (graf lastno narejen).

V grafu 2 so opazna nihanja. V nadaljevanju je predstavljen niz podatkov, iz katerih so zarisane točke pri 60 km/h:

| Izmerjena hitrost [km/h] | Izračunana hitrost [km/h] |
|--------------------------|---------------------------|
| 60 | 57,1 |
| 60 | 60,18 |
| 60 | 60,26 |
| 60 | 59,12 |
| 60 | 58,7 |
| 60 | 59,09 |

| | |
|----|-------|
| 60 | 59,68 |
| 60 | 60,02 |
| 60 | 60,08 |
| 60 | 59,56 |
| 60 | 59,12 |
| 60 | 58,86 |
| 60 | 55,39 |
| 60 | 57,15 |
| 60 | 63,1 |
| 60 | 60,41 |
| 60 | 61,72 |
| 60 | 60,9 |
| 60 | 61,99 |
| 60 | 62,76 |
| 60 | 62,3 |
| 60 | 62,22 |
| 60 | 61,72 |
| 60 | 61,56 |
| 60 | 62,25 |
| 60 | 61,61 |
| 60 | 61,42 |
| 60 | 61,12 |

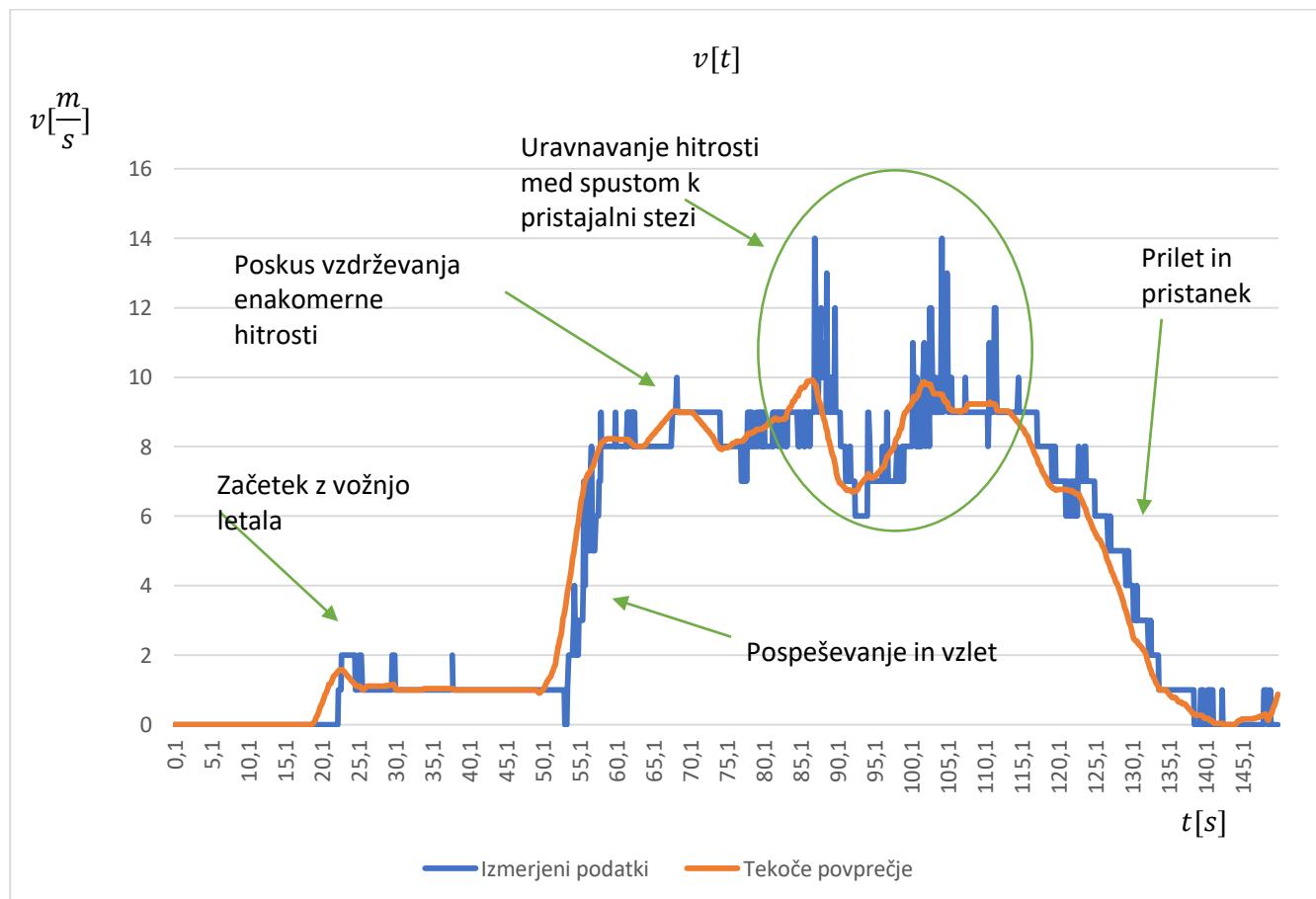
Tabela 3

Zaradi vpliva vetra smo podatke merili takrat, ko smo se vozili proti jugozahodu in severovzhodu. Puščica predstavlja mejo izračunane hitrosti glede na smer vožnje. Vse hitrosti nad to mejo so bile izračunane med vožnjo v smeri jugozahoda, medtem ko so bile hitrosti pod to mejo izračunane v smeri vožnje proti severovzhodu.

Iz pridobljenih podatkov je lepo razvidno (sipanje izmerjenih vrednosti, ki je odvisno od smeri vožnje), kako težavno je izmeriti hitrost zraka, saj na meritve vplivajo zunanji dejavniki (jakost in smer vetra). Posledično je bilo opravljeno veliko število meritev. Povezavo med izmerjeno in izračunano hitrostjo smo ponazorili v zgornjem grafu, v katerem smo tudi izrisali trendno črto. Smerni koeficient v tem grafu je bil blizu 1, natančneje 1,006. Zaradi težav z vplivi iz okolja (veter) merske napake nismo mogli zanesljivo določiti, lahko pa opazimo, da se naš smerni koeficient, ki je pridobljen z velikim številom meritev, le malo razlikuje od 1. Na osnovi opravljenega velikega števila meritev, bi lahko sklepali, da je verjetno relativni merski pogrešek okoli 0,6 %. K temu pogrešku je potrebno prišteti pogrešek avtomobilskega števca, ki je bil tu uporabljen kot referenčni merilnik.

6.3 Tretji poizkus – let z letalom

V tretjem poizkusu smo uporabili vezje št. 2 in vezje št. 3 ter Pitot-Prandtlovo cev. Cev smo pritrdili na spodnji del trupa letala (slika 25) in jo povezali z vezjem št. 2, ki se je nahajalo v letalu. Na vezje št. 2 smo naložili program pod poglavjem 5.3 Vezje št. 3 smo imeli povezano z računalnikom in FPV-jem na sprejemni strani poizkusa. Izvedli smo let z letalom in shranili hitrosti izpisane med letom. Kasneje smo obdelane hitrosti vstavili v graf 3, ki je prikazan spodaj. Narisali smo tudi tekoče povprečje za vsakih 40 meritev. Zaradi skokov v hitrosti smo ta graf tudi komentirali.



Slika 12: Graf 3 prikazuje hitrost v odvisnosti od časa. Prostor izvedbe poskusa: Vrbanski plato, Pod hipodromom 25, Kamnica. Čas: 30.1.2023 ob 17.00, temperatura: 1,7 °C, veter: 5 km/h 360° (Po podatkih ARSO Vreme) (graf lastno narejen).

7. Ocena stroškov izdelave Pitot-Prandtlove cevi

V začetku naloge smo si postavili hipotezo, da bo izdelava Pitot-Prandtlove cevi stala pod 30€. Izdelke za izdelavo smo kupili preko spletne trgovine eBay. V nadaljevanju smo naredili pregledno tabelo, kjer je za vsak izdelek zapisana količina kupljenega izdelka, cena na količino kupljenega izdelka, količina izdelka uporabljenega v poskusu in končna cena izdelka (cena količine uporabljenega izdelka). Za izračun materiala, uporabljenega v poskusu, smo uporabili aplikacijo FlashPrint, ki nam je ocenila težo izdelka glede na dolžino porabljenega filamenta. Za izdelke, ki se dobijo v večjih količinah (npr. upori), smo količino, ki smo jo potrebovali, delili s količino izdelka, ki smo ga kupili, in s tem pridobili ceno uporabljenega v poskusu. Izjema v izračunu je bila edino pri ceni mikrokrmilnika, saj smo zaradi imetja Arduino mikrokrmilnika na zalogi, v poskusu uporabili dražjo različico mikrokrmilnika, kot je v nadaljevanju omenjeno. Cene so prikazane v spodnji tabeli:

| Izdelek | Količina kupljenega izdelka | Cena na količino kupljenega izdelka (€) | Količina izdelka, uporabljenega v poskusu | Končna cena (€) |
|---|-----------------------------|---|---|-----------------|
| Material za Pitot-Prandtlovo cev | 1 kg | 13,28 | 0,02091 kg | 0,2776848 |
| Material za pokrov prvega prostora Pitot-Prandtlove cevi | 1 kg | 13,28 | 0,00162kg | 0,0215136 |
| Material za pokrov drugega prostora Pitot-Prandtlove cevi | 1 kg | 13,28 | 0,00161kg | 0,0213808 |
| BMP 280 senzor | 2 | 5,3 | 2 | 5,3 |
| Mikrokrmilnik (Arduino Nano Compatible) | 2 | 17,5 | 2 | 17,5 |

| | | | | |
|--------------------------|-----|------|---|-------------|
| Kondenzator (0,47 µF) | 2 | 1,49 | 1 | 0,745 |
| Kondenzator (0,1 µF) | 4 | 2,98 | 4 | 2,98 |
| Kondenzator (1 µF) | 20 | 3,41 | 1 | 0,1705 |
| Kondenzator (1,5 nF) | 10 | 4,1 | 1 | 0,41 |
| Upor (4,7 kΩ) | 100 | 3,21 | 1 | 0,0321 |
| Upor (510 Ω) | 100 | 2,06 | 1 | 0,0206 |
| Upor (1,5 kΩ) | 100 | 2,06 | 1 | 0,0206 |
| Upor (10 kΩ) | 100 | 3,21 | 3 | 0,0963 |
| Upor (100 kΩ) | 100 | 4,59 | 2 | 0,0918 |
| Upor (33 kΩ) | 100 | 1,28 | 1 | 0,0128 |
| Ojačevalnik (LM324) | 85 | 7,97 | 2 | 0,187529412 |
| Plošča za spajanje | 10 | 6,72 | 2 | 0,672 |
| Avdio mono kabel | 1 | 0,99 | 1 | 0,99 |
| Regulator | 10 | 3,67 | 1 | 0,367 |

Tabela 4

Skupna končna cena (cena količin vseh izdelkov uporabljenih v poskusu) je bila 29,91680861 €, ki smo jo zaokrožili na dve decimalki. Torej smo v naši nalogi porabili 29,92 €.

8. ZAKLJUČEK

V raziskovalni nalogi smo iskali načine, kako narediti nizkocenovno Pitot-Prandtlovo cev, ki bi merila z mersko napako, manjšo od 5%.

Cev smo natisnili s pomočjo 3D tiskalnika in vanjo vstavili poceni senzorje tlaka, ki bi jih sicer lahko uporabili v domačih vremenskih postajah ipd. Pred izvajanjem meritev jo je bilo potrebno kalibrirati, saj so rezultati meritev brez kalibracije odstopali od dejanskih rezultatov za več kot 10 %. Zaradi pomanjkanja vetrovnika smo kalibracijo izvedli tako, da smo Pitot-Prandtlovo cev namestili nad streho avtomobila in nato z avtomobilom vozili po cestah z različnimi hitrostmi. Kalibracijo smo izvedli tako, da smo med vožnjo z avtom po cestah primerjali hitrost, ki jo je kazal avtomobilski števec z izračunano hitrostjo. Ugotovili smo, da moramo izračunano hitrost pomnožiti s koeficientom 0,8797. Po končani kalibraciji smo po nekaj dnevih izvedli poizkus, kjer je bila cev ponovno pritrjena na avto, da bi preverili natančnost naših meritev. Zaradi vpliva iz okolja (vetra) nismo uspeli zanesljivo določiti merske napake, smo pa lahko primerjali smerni koeficient v grafu povprečne izračunane hitrosti v odvisnosti od hitrosti, ki jo je kazal avtomobilski števec (graf 2). Ugotovili smo, da je smerni koeficient znašal le 1,006, kar bi ustrezalo relativni merski napaki 0,6 % (pri tem nismo upoštevali napake avtomobilskega števca). Cev smo nato pritrdili na letalo in izvedli let, po katerem smo meritve vstavili v graf in s tem prikazali spreminjanje hitrosti med letom daljinsko vodenega letala. Izmerjene hitrosti so bile skladne z našimi pričakovanji (grafu 3).

Ovrednotenje naših hipotez in ciljev:

- I. Z uporabo dveh preprostih senzorjev absolutnega tlaka, ki jih najdemo v preprostih napravah, kot so hišne vremenske postaje, pametne ure, telefoni in podobne naprave, je možno izdelati majhno in enostavno Pitot-Prandtlovo cev za merjenje hitrosti majhnih letal, dronov in drugih letalnikov.

Zgornjo trditev lahko potrdimo, saj nam je uspelo izdelati majhno, preprosto in učinkovito Pitot-Prandtlovo cev z Bosch BMP 280 senzorji – senzorji, ki so nizkocenovni in se uporablajo v hišnih (domačih) vremenskih postajah.

- II. Z uporabo enostavnega mikrokrnilnika bomo iz razlike absolutnih tlakov izračunali hitrost z mersko napako, ki bo manjša od 5%.

Domnevo št. 2 bomo pustili odprto, saj nismo uspeli zanesljivo določiti merske napake, vendar bi ta bila verjetno 0,6 % (če ne upoštevamo merske napake avtomobilskega števca).

III. Celotno merilno cev je možno izdelati za manj kot 30 €.

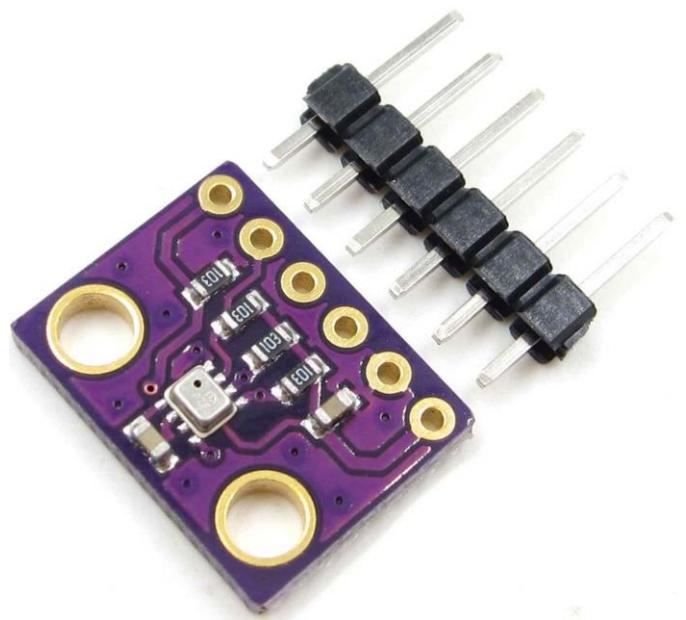
Zadnjo predpostavko lahko potrdimo, ker smo v izračunu ugotovili, da smo za izdelavo naše Pitot-Prandtlove cevi odšteli 29.92 €.

9. DRUŽBENA ODGOVORNOST

V raziskovalni nalogi smo prikazali, da je možno izdelati nizkocenovni meritni instrument, ki ga lahko vsak posameznik izdela ob prisotnosti 3D tiskalnika. Tak meritni instrument bi bilo industrijsko še ceneje izdelati. S tem smo prispevali k varnejšemu letenju daljinsko vodenih letal in drugih letalnikov, saj Pitot-Prandtlova cev upravitelja ozavešča o hitrosti upravljanega letalnika. Izdelano cev se lahko uporabi tudi na avtu, ladji oz. kateremkoli premikajočem se vozilu. S tem smo voznikom vozil omogočili pripomoček za merjenje hitrosti v primeru, da nimajo dostopa do njihovega primarnega instrumenta za merjenje hitrosti. Tovrstni izdelek lahko bistveno pripomore k razvoju in varnosti avtonomnih letalnikov in plovil, katerih pomen v zadnjem desetletju močno narašča. Pri pisanju naloge smo se, predvsem v teoriji, zanašali na elektronske vire, ki smo jih tudi navedli in s tem upoštevali avtorske pravice.

10. PRILOGE

10.1 Fotografije



Slika 13: Bosch BMP280 senzor



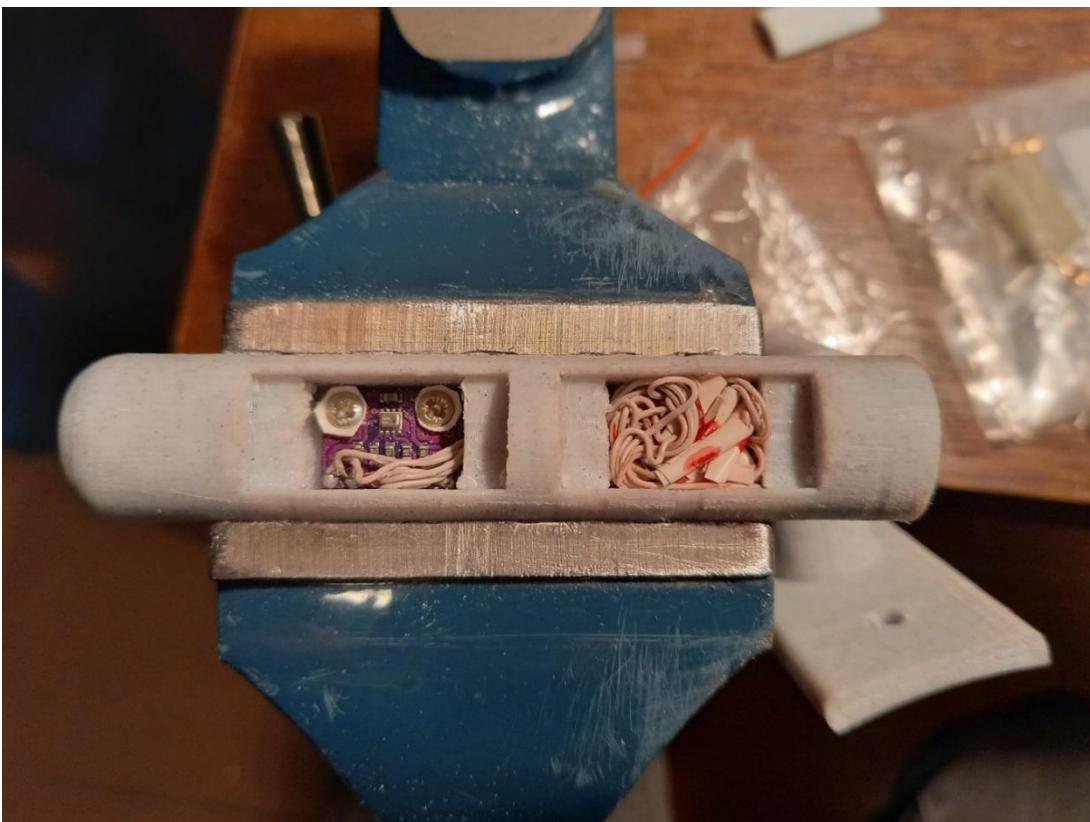
Slika 14: Flysight FPV monitor



Slika 15: oddajnik TS832



Slika 16: Pitot-Prandtlova cev (lasten vir)



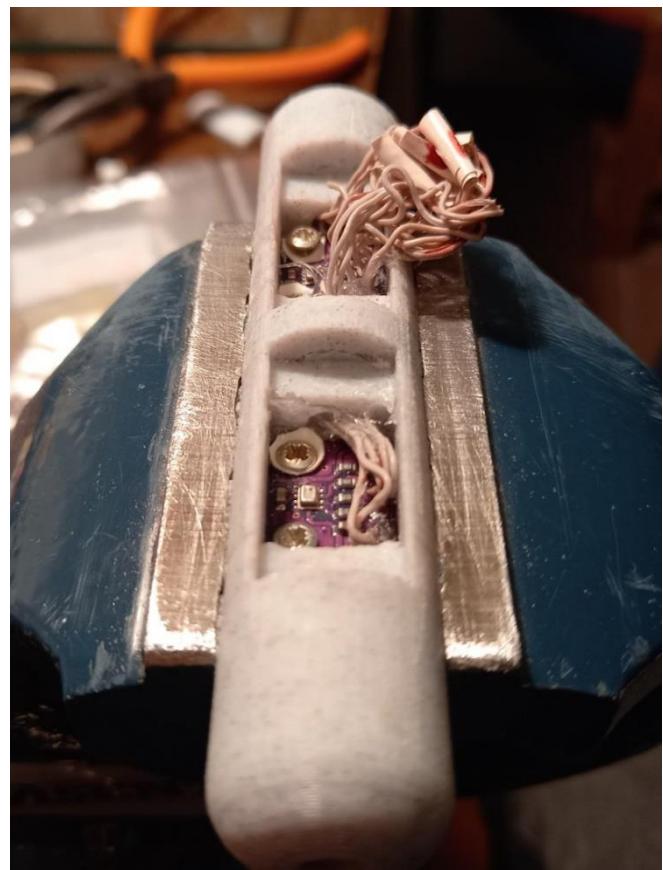
Slika 17: Pitot-Prandtlova cev (lasten vir)



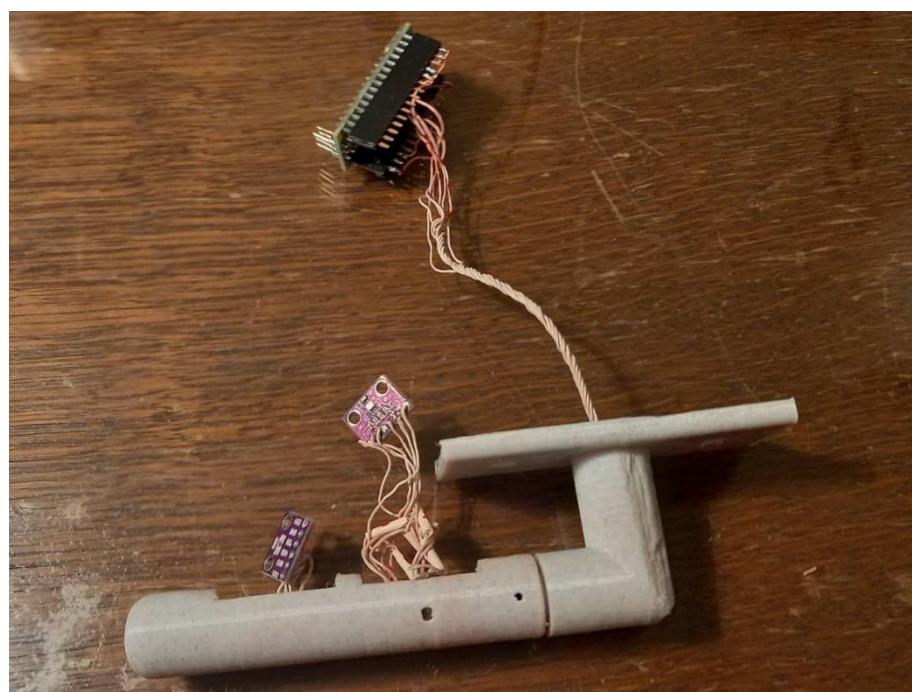
Slika 18: Pitot-Prandtlova cev (lasten vir)



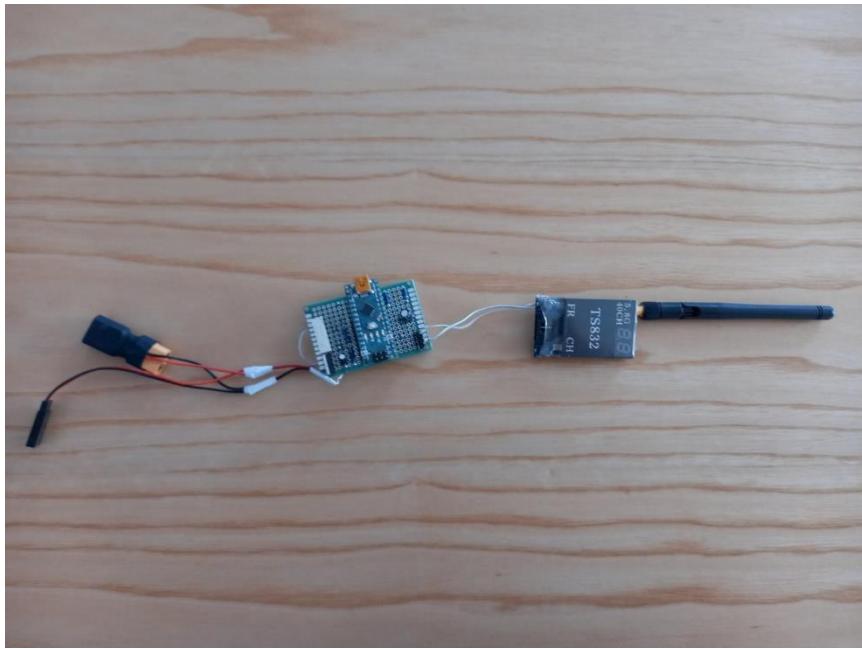
Slika 19: Pitot-Prandtlova cev (lasten vir)



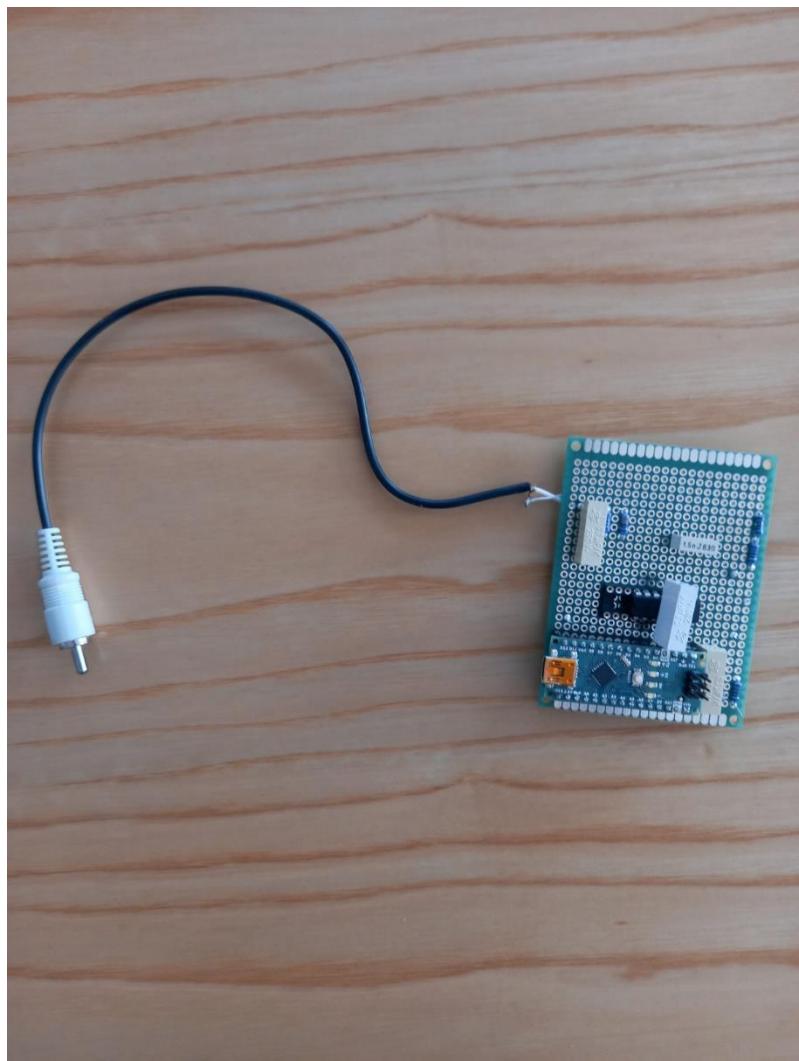
Slika 20: Pitot-Prandtlova cev (lasten vir)



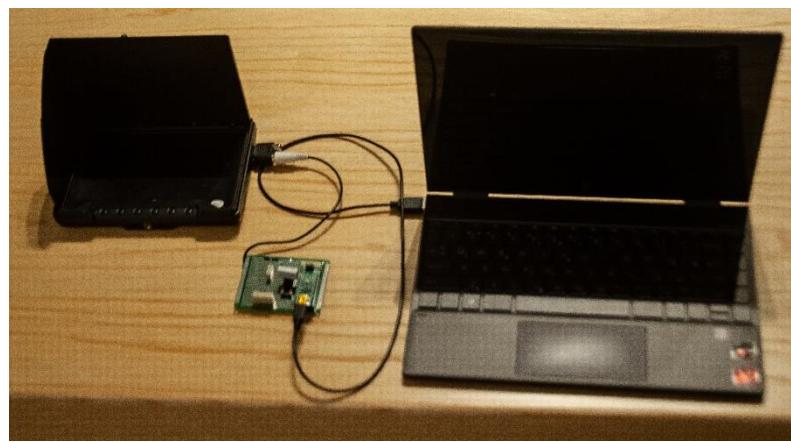
Slika 21: Pitot-Prandtlova cev z vezjem št. 1 (lasten vir)



Slika 22: Oddajno vezje (vezje št. 2) (lasten vir)



Slika 23: Sprejemno vezje (vezje št. 3) (lasten vir)



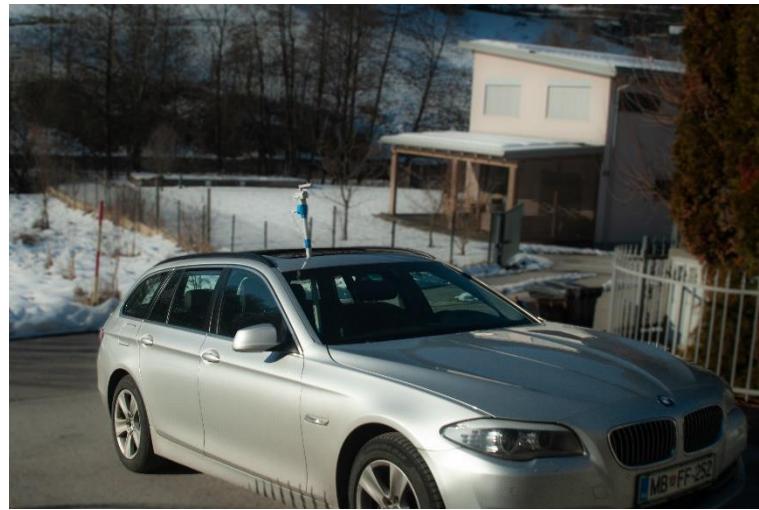
Slika 24: Oddajno vezje , FPV in računalnik (lasten vir)



Slika 25: Letalo s Pitot-Prandtlovo cevjo (lasten vir)



Slika 26: Pitot Prandtlova cev pred kalibriranjem (lasten vir)

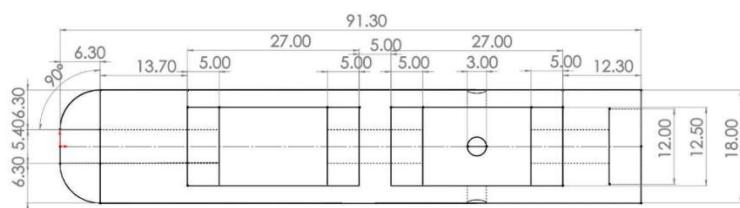


Slika 27: Pitot Prandtlova cev pred kalibriranjem (lasten vir)

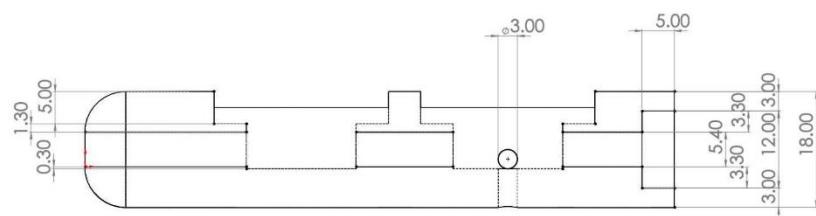


Slika 28: Pitot Prandtlova cev pred kalibriranjem (lasten vir)

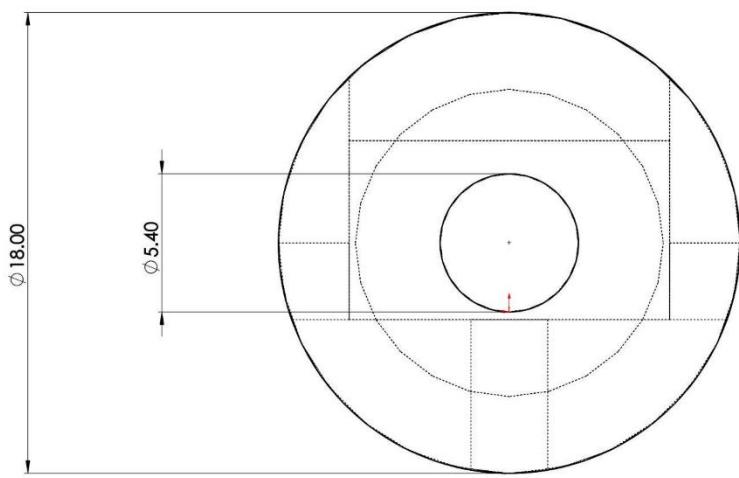
10.2 Mere Pitot-Prandtlove cevi



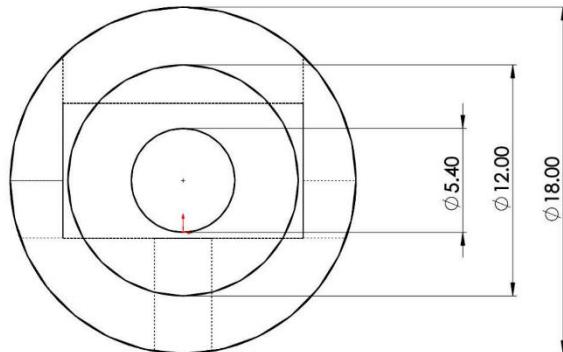
Slika 29: Tloris Pitot-Prandtllove cevi (lastni vir)



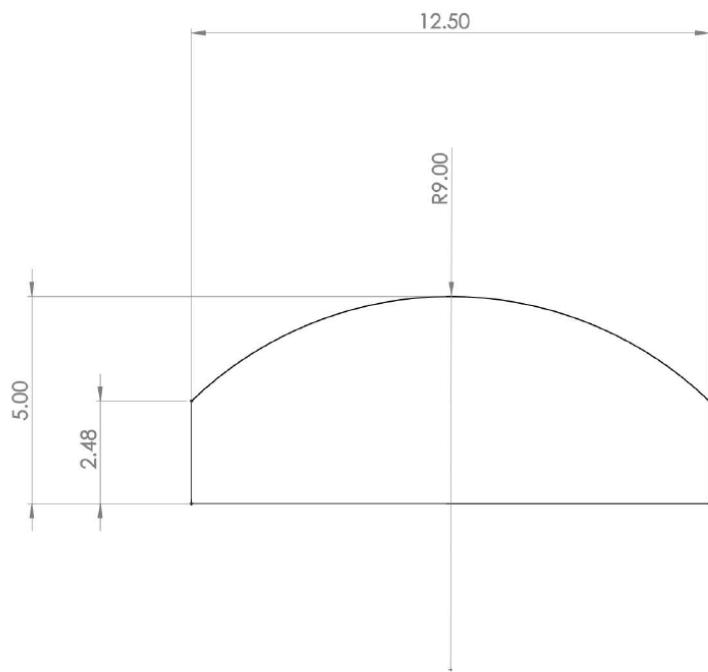
Slika 30: Naris Pitot-Prandtllove cevi (lastni vir)



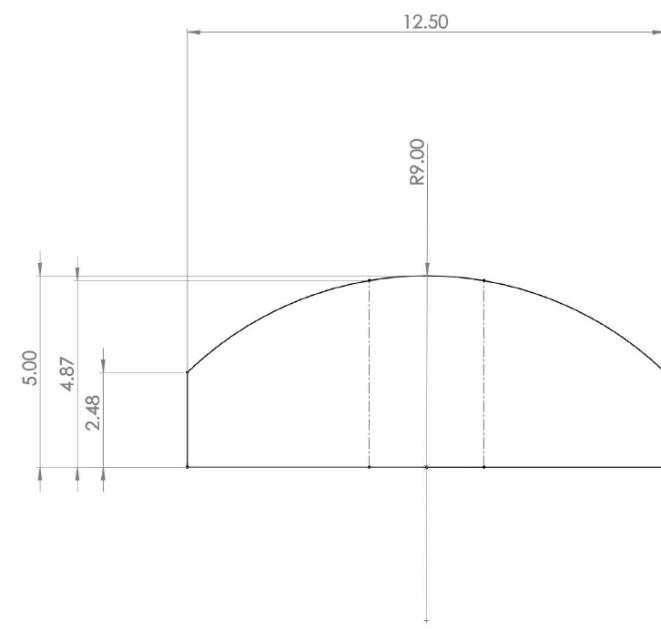
Slika 31: Stranski ris Pitot-Prandtlove cevi z ene strani (lastni vir)



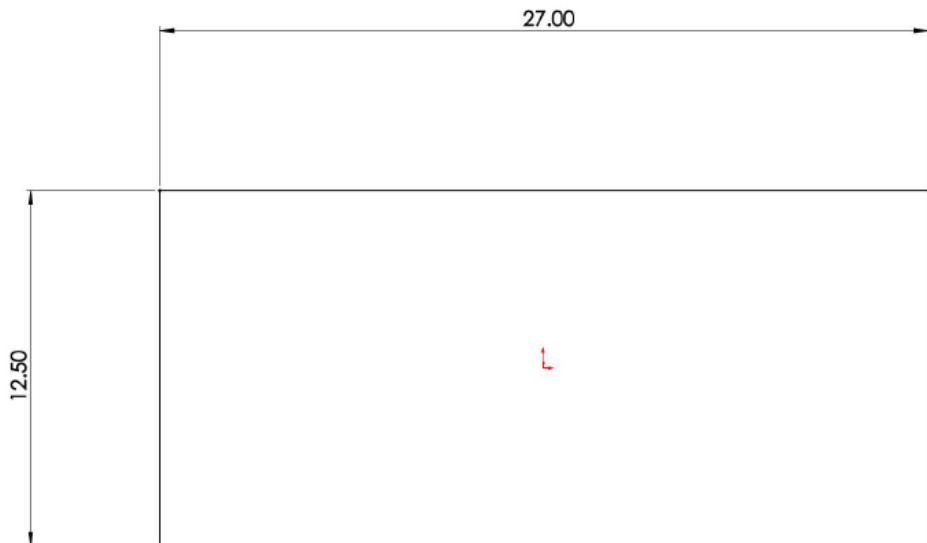
Slika 32: Stranski ris Pitot-Prandtlove cevi z druge strani (lastni vir)



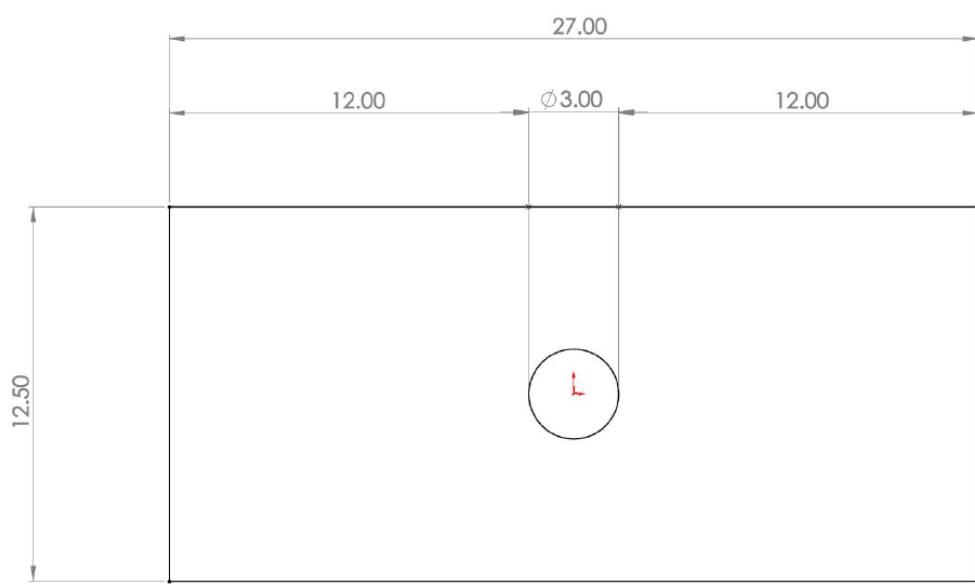
Slika 33: Naris sprednjega pokrova Pitot-Prandtlove cev (lasten vir)



Slika 34: Naris zadnjega pokrova Pitot-Prandtlove cevi (lasten vir)



Slika 35: Tloris sprednjega pokrova Pitor-Prandtlove cevi (lasten vir)



Slika 36: Tloris zadnjega pokrova Pitot-Prandtlove cevi (lasten vir)

11. VIRI

11.1 Viri slik s spleta

Slika 1: Fotografija Pitotove cevi

<https://2.bp.blogspot.com/-j8ycdwHV6qQ/WQsJdRTPNmI/AAAAAAAABz4/U1kPZAGGvv4X5rQicmfI9uL08-2nlyj7wCLcB/w1280/single%2Btip%2Bpitot%2Btube.png> (2.12.2021, dostopno na https://www.mecholic.com/2017/05/pitot-tube-construction-working-principle.html#Working_principle_of_Pitot_tube)

Slika 2: Fotografija Pitot - Prandtlove cevi

https://3.bp.blogspot.com/-BGsnRH-ieq8/WQtmHz8QW2I/AAAAAAAAB0c/QU7jlHnGngMBTIL_9qdhYtmxaQSX5cxxQCLcB/w1280/pitot%2Bstatic%2Btube.png (13.12.2021, dostopno na <https://www.mecholic.com/2017/05/prandtl-tube-double-tip-pitot.html>)

Slika 3: Model Pitot-Prantlove cevi (lastno narejeno v programu SolidWorks)

Slika 4: Pitot-Prandtlova cev (oseben arhiv avtorja) **Napaka! Zaznamek ni definiran.**

Slika 5: Vezje št.1 (lastno narejeno v programu LTspice) **Napaka! Zaznamek ni definiran.**

Slika 6: Vezje št. 2 (lastno narejeno v programu LTspice)

Slika 7: Vezje št. 3 (lastno narejeno v programu LTspice)

Slika 8: Simulacija signala na nožici D3, ko FPV proizvaja signal s frekvenco 1 kHz (lastno simulirano v programu LTspice)

Slika 9: Pitot Prandtlova cev pred izvedeno kalibracijo (oseben arhiv avtorja)

Slika 10: Graf 1, ki prikazuje izračunano hitrost (vr) v odvisnosti od izmerjene hitrosti (vi). Prostor izvedbe poskusa: cesta Borova vas med krožiščem z Lackovo cesto in krožiščem pri Ilichovi ulici (koordinate: 46.540364, 15.617106) Čas: 24.1.2023 ob 23.00, Temperatura: 0 °C, veter: okoli 8.5 km/h med 360 ° in 45 ° (Podatki: ARSO Vreme) (graf lastno narejen).

Slika 11: Graf 2, ki prikazuje izračunano hitrost (vr) v odvisnosti od izmerjene hitrosti (vi). Prostor izvedbe poskusa: cesta Borova vas med krožiščem z Lackovo cesto in krožiščem pri Ilichovi ulici (koordinate te ceste: 46.540364, 15.617106). Čas: 28.1.2023 ob 23.00, Temperatura: 0 °C, veter: 6 km/h 180° (Po podatkih ARSO Vreme) (graf lastno narejen).

Slika 12: Graf 3 prikazuje hitrost v odvisnosti od časa. Prostor izvedbe poskusa: Vrbanski plato, Pod hipodromom 25, Kamnica. Čas: 30.1.2023 ob 17.00, temperatura: 1,7 °C, veter: 5 km/h 360° (Po podatkih ARSO Vreme) (graf lastno narejen).

Slika 13: Bosch BMP280 senzor

<https://i.ebayimg.com/images/g/-TEAAOSwHOZb4ig9/s-l1600.jpg> (29.1.2023, dostopno na [Slika 14: Flysight FPV monitor](https://www.ebay.com/itm/255283194264?hash=item3b70106998:g:-TEAAOSwHOZb4ig9&amdata=enc%3AAQAHAAAA4EB6YYTlnks7dQUgc7SoKg0bmZPL9a4%2FZzkHz90l%2FMYlf55OdCFrNw4m1oGrdPqdfzPKPiLzdT9ahnFYjxumayUcFGvg4GE7oZa%2Bv11hwhVH3xxaEQJ%2Fj JPG2%2FiXP0OoGM4TSPqTp3HO0pxHkpwSv gS RGSep95QzsZepfHCJKKmX2MOUQW2uNnxEWMV6kD45KrQVgUBERVqSERhfG1jep1t1JxI4v6%2FPppePq0ZOVX1XILn%2BZWVzTPEYcofW6UQKXlrgLW5Qd7dthNAsLsNP1TWHeqe5s%2FN9LqUOyhV%2BM%2BtJ%7Ctkp%3ABk9SR7ieuMC-YQ)</p></div><div data-bbox=)

https://www.flysight.com/upfile/2017/11/13/20171113165302_466.jpg (29.1.2023, dostopno na <https://www.flysight.com/ghz-fpv-diversity-monitor-black-pearl-rc-26.html>)

Slika 15: oddajnik TS832

<https://cdn.getfpv.com/media/catalog/product/cache/b4872d6d0ceb3d2181c291dd3ccc7b81/t/s/ts832-sma-antenna.jpg> (29.1.2023, dostopno na <https://www.getfpv.com/5-8ghz-32ch-a-v-600mw-video-transmitter-ts832-international-version.html>)

Slika 16: Pitot-Prandtlova cev (oseben arhiv avtorja)

Slika 17: Pitot-Prandtlova cev (oseben arhiv avtorja)

Slika 18: Pitot-Prandtlova cev (oseben arhiv avtorja)

Slika 19: Pitot-Prandtlova cev (oseben arhiv avtorja) **Napaka! Zaznamek ni definiran.**

Slika 20: Pitot-Prandtlova cev (oseben arhiv avtorja)

Slika 21: Pitot-Prandtlova cev z vezjem št. 1 (oseben arhiv avtorja)

Slika 22: Oddajno vezje (vezje št. 2) (oseben arhiv avtorja)

Slika 23: Sprejemno vezje (vezje št. 3) (oseben arhiv avtorja) **Napaka! Zaznamek ni definiran.**

Slika 24: Oddajno vezje , FPV in računalnik (oseben arhiv avtorja)

Slika 25: Letalo s Pitot-Prandtlovo cevjo (oseben arhiv avtorja)

Slika 26: Pitot Prandtlova cev pred kalibriranjem (oseben arhiv avtorja)

Slika 27: Pitot Prandtlova cev pred kalibriranjem (oseben arhiv avtorja)

Slika 28: Pitot Prandtlova cev pred kalibriranjem (oseben arhiv avtorja)

Slika 29: Tloris Pitot-Prandtlove cevi (oseben arhiv avtorja)

Slika 30: Naris Pitot-Prandtlove cevi (oseben arhiv avtorja)

Slika 31: Stranski ris Pitot-Prandtlove cevi iz ene strani (lastno narejeno v programu SolidWorks)

Slika 32: Stranski ris Pitot-Prandtlove cevi iz druge strani (lastno narejeno v programu SolidWorks)

Slika 33: Naris sprednjega pokrova Pitot-Prandtlove cev (lastno narejeno v programu SolidWorks) **Napaka! Zaznamek ni definiran.**

Slika 34: Naris zadnjega pokrova Pitot-Prandtlove cevi (lastno narejeno v programu SolidWorks)

Slika 35: Tloris sprednjega pokorva Pitor-Prandtlove cevi (lastno narejeno v programu SolidWorks)

Slika 36: Tloris zadnjega pokrova Pitot-Prandtlove cevi (lastno narejeno v programu SolidWorks)

11.2 Elektronski viri

[1] 5.8GHz FPV Diversity Monitor Black Pearl RC801. Flysight.

<https://www.flysight.com/ghz-fpv-diversity-monitor-black-pearl-rc-26.html> (28.1.2023)

[2] 5.8GHz 32CH A/V 600mW Video Transmitter (TS832) - (International Version).

GetFPV. <https://www.getfpv.com/5-8ghz-32ch-a-v-600mw-video-transmitter-ts832-international-version.html> (28.1.2023)

- [3] Adafruit_BMP280_Library. GitHub.
https://github.com/adafruit/Adafruit_BMP280_Library (28.1.2023)
- [4] Amazon Prime Air prepares for drone deliveries. About Amazon.
<https://www.aboutamazon.com/news/transportation/amazon-prime-air-prepares-for-drone-deliveries> (21.1.2023)
- [5] An Introduction to Pitot Tubes and Probes. Omega. <https://www.omega.com/en-us/resources/pitot-tube> (12.12.2021)
- [6] Basics of the spi communication protocol. Circuit basics.
<https://www.circuitbasics.com/basics-of-the-spi-communication-protocol/> (28.1.2023)
- [7] Bernoulli's Equation. Course Hero. <https://courses.lumenlearning.com/physics/chapter/12-2-bernoullis-equation/> (12.12.2021)
- [8] Bernoullijeva enačba. Openprof.
https://si.openprof.com/wb/bernoullijeva_ena%C4%8Dba?ch=1174 (12.12.2021)
- [9] BMA150 data sheet Rev. 1.4. Adafruit.
<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP280-DS001-11.pdf> (31.12.2021)
- [10] Daniel Bernoulli. MacTutor. https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Bernoulli_Daniel/ (12.12.2021)
- [11] Difference Between Pitot Tube And Pitot-Static Tube. Mecholic.
<https://www.mecholic.com/2017/05/difference-between-pitot-tube-prandtl-tube.html> (12.12.2021)
- [12] FlashForge Creator Max Dual Extruder 3D Printer. FlashForge USA. https://flashforge-usa.com/products/flashforge-creatormax-dual-extruder-3d-printer?_pos=1&_sid=83e9d3eeb&_ss=r (28.1.2023)
- [13] FlashPrint Software. FlashForge USA. <https://flashforge-usa.com/pages/download> (28.1.2023)
- [14] HENRI PITOT. University of Houston. <https://www.uh.edu/engines/epi2213.htm> (12.12.2021)
- [15] Henry Darcy's Perfection of the Pitot Tube. ResearchGate.
https://www.researchgate.net/publication/228938856_Henry_Darcy's_Perfection_of_the_Pitot_Tube (12.12.2021)
- [16] Letalstvo. ARSO Vreme. <https://www.meteo.si/met/sl/aviation/> (29.1.2023)

- [17] LM317 Datasheet (PDF) - ARTSCHIP ELECTRONICS CO.,LMITED. ALLDATASHEET. <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/1147586/ARTSCHIP/LM317/445/1/LM317.html> (28.1.2023)
- [18] Pitot – Static Tube – Speedometer. Nasa. <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/pitot-static-tube-speedometer/> (28.1.2023)
- [19] Pitot-Prandtlova cev. Znanje sveta. https://www.znanjesveta.com/o/Pitot-Prandtlova_cev (12.12.2021)
- [20] Prandtlsonde. Second Wiki. <https://second.wiki/wiki/prandtlsonde> (10.12.2021)
- [21] Pitot Tube. Nasa. <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/pitot.html> (12.12.2021)
- [22] Prandtl tube - Tubo de Prandtl. Second Wiki. https://second.wiki/wiki/tubo_de_prandtl (12.12.2021)
- [23] Prandtlsonde. Academic. <https://de-academic.com/dic.nsf/dewiki/1128010> (12.12.2021)
- [24] PWM. GitHub. <https://github.com/terryjmyers/PWM> (28.1.2023)
- [25] SolidWorks. SolidWorks. <https://www.solidworks.com/> (19.10.2022)
- [26] SPI. GitHub. <https://github.com/PaulStoffregen/SPI> (28.1.2023)
- [27] What is Bernoulli's equation?. Khan Academy.
<https://www.khanacademy.org/science/physics/fluids/fluid-dynamics/a/what-is-bernoullis-equation> (28.1.2023)
- [28] What is Schmitt Trigger | How It Works. How To Mechatronics.
<https://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/schmitt-trigger/> (30.1.2023)
- [29] What Is Pitot tube? Construction, Working Principle of Pitot tube. Mecholic.
https://www.mecholic.com/2017/05/pitot-tube-construction-working-principle.html#Working_principle_of_Pitot_tube (12.12.2021)

11.3 Elektronski viri za kupljene izdelke

V poglavju 7.1 smo naredili izračun stroškov celotne naloge. V nadaljevanju so navedeni viri prodajalcev teh izdelkov.

1/6W 1/8W 1% 240 270 300 330 360 390 430 470 510 560 620 ohm Metal Film Resistor.

Ebay.

<https://www.ebay.com/itm/393836907877?hash=item5bb2824d65:g:JLkAAOSwW0lhzw9&amdata=enc%3AAQAHAAAA8FkxBQJGY0hqBd9DMLRP4pkOvqbBqLr%2FIVNiaeWx9WJzUa%2BUhAAHZGgCW3eAwi71BGiP%2BdW1UStSYUxIPPxU0iSLtOix7MmdiOdGQndJrOo7B1b2jfB%2F2CPcuCNSTUljvHtIYdXXIIgm4cJk2Uf421h1gdC1uT8jjvljzUoBSGSglEJHrd78fc84xZDdGhxBF1Y1E%2FdRDuj%2BZPplZLdhhdAyzDvU5uLeIjqh7CFGxUFPzrs9lxgbp4lhiolKVAOZUPdXFowaaCh6GBfxJ0KYynzQq8YL73E2uXDpyjt40FZlmsBZ%2BFCYBrRXkkzxggczFDA%3D%3D%7Ctkp%3ABFBMIOHaw75h> (28.1.2023)

1/6W 1/8W 1% 680 750 820 910 1K 1.2K 1.5K 1.8K 2K 2.2K ohm Metal Film Resistor.

Ebay.

<https://www.ebay.com/itm/234359240549?hash=item3690e63765:g:vegAAOSwh0xhz-zJ&amdata=enc%3AAQAHAAAA8H5JCE1550n%2FjUdulzgiV3eTQK2%2BTsG8qGA2%2FTuxA0sJGS3iBcvGN28FrFS3vC17vtfVv3rz%2FBV1gaMwY0NWVISOh1RL8mz67xZAgHfNt9bpBJmz97a5631QA51sHaPLVSN0Bkn116YZbjRC0xBP%2FLS95dClndjKHfqTphMnVBKsUhHJWQxkxGdIzPCcYlQfuNC6Ilzo5UZOSAykqXOYLEicNh4uuyjXYbZcoh%2BI F5o2CHcpR514qFsLrmqjhP2VtwdJFCYDf604SnunZFyiPdcbeWQv7IodBPqKizbL51HRXK4NEaix6UE5QM pomXRGag%3D%3D%7Ctkp%3ABk9SR8iJ78O-YQ> (28.1.2023)

1uf 63V electrolytic capacitor -1U Aluminium radial 20% 105 deg - Pack of 20. Ebay.

<https://www.ebay.com/itm/113742153468?hash=item1a7b8f86fc:g:-50AAOSwMthjyV5I&amdata=enc%3AAQAHAAAA4CUPPKKii2VCrDgWR1Tcyw%2FsNprPyom0BiWkXfA5IX14xxK6qqxUTh8ApOkcjmvxspaJ%2BMEfiwvAavRHI%2BgTIjoCsDaB%2B8ua6D0mYZX95iJXJ88hGzCVN5sHOI44rQgtIjZWw5R0hG31hGcLmwWCUsacdiQhUnMJIQ%2BYsoIb17mMnjqnM6eEM1MDQr3lL9iNx%2BN%2F3zT9YoDOBbFtcfcX5nu74XdLDFPCxHUVy4oScRe2%2BD6GZVXSmpvaeGBR9WzV4ppraShOIRIKf6xGRq%2BdN%2BYVdXsNEWKfbIJnS%2BPtDpA%7Ctkp%3ABk9SR9bWj8O-YQ> (28.1.2023)

1.5nF / 500V (10-Piece) Ceramic Capacitor. Ebay.

https://www.ebay.com/itm/334009070019?hash=item4dc47df1c3:g:AuIAAOswqklgp-z3&amdata=enc%3AAQAHAAAoEiQ7RTkHUyFJtijXc8MpkpwAdTwxdlusvDEKA7t%2B8nQK97SFjnVhsDyoqq12gTyCPeJjw%2BTBYr0FwzReRagOpVFqK%2BkkmKPUzI%2Fv74w5%2F9e3WGplPvpfMcYdF8UBEf9DInGiyC3v9mDMzLGaZofVIHaECBIBz3tIG%2FvIHhwbwLpkQNwTiq9M%2BRP5rd%2BqQoP9KtVvyCM0q%2F7hxA2RQNp9s%3D%7Ctkp%3ABk9SR_zQs8O-YQ (28.1.2023)

2pin 3.5mm mono Male female connector Plug Audio Cable wire Charger Line 25cm. Ebay.

https://www.ebay.com/itm/114725888253?hash=item1ab63220fd:g:cfcAAOSw65lgSyR6&amdata=enc%3AAQAHAAA4Jot5abwYGLQsHxILqYCUxhs1Wx1BpmalfErvQ7mh74maRddFPPSXbWC6wgwX0wq%2BYJC83iGwD0yC0LnIhD05nqpvADXyqvTHZpK75el1RxyuiAJYajFJZwPFWCFCUKClzwhedoX056MFoJzofANMPmdriYUCya9A6YODX2DvQgNA_CprocAGfdBIHaagS9f%2BcYMt2hGZfOnl4SMgkIh%2BYzjFBr9%2BdHruIEmJxpNwPYo%2FsN8k2GUSy49bz18hF3uMsdoFphh4Njd6Mo4S%2BYG1fepChnkHej478QJQofDxwRo%7Ctkp%3ABk9SR9zHvMi-YQ (28.1.2023)

10pcs lm317t lm317 to-220 voltage regulator ic. Ebay.

<https://www.ebay.com/itm/391849852231?hash=item5b3c123d47:g:EoAAAOSwUxlibWi8&amdata=enc%3AAQAHAAA4LeF47hpZGD1SYu971AEHSATiEgMVUj78giHwkCu3882sQqGcLgxumqj8Fqna%2FaARp4z8%2BC2xUOYKld0eP91qGm1LS5Ca%2FYCjdWTZKrtPnHi6kDmYLTwLp5cjrZ7xKCeZ92YAwxdYEKprF66n89fMpnRuV7iewK%2F%2FTpg0vk%2BmEqic6aYY4IgvXp9w1%2F1tf8YiOIredM%2F7MXs0i8DXlnyeASbBDQW%2FIvPQU9v01Kny%2B0JqCLvLsLqIhzwePy6acxXezCeR%2Fx%2F%2B33QHVYo5M89UvYJDQ0MG02rw76%2B0GdE5%7Ctkp%3ABFBMjuXeyL5h> (28.1.2023)

10PCS Prototype PCB Double Sided Board Circuit Breadboard 4x6 5x7 6x8 7x9cm. Ebay.

<https://www.ebay.com/itm/223407152927?var=522175083746&trkparms=amclksrc%3DITM%26aid%3D1110006%26algo%3DHOMESPLICE.SIM%26ao%3D1%26asc%3D245144%26meid%3D8d9ed500d5f84db1b81349ae0efbdec1%26pid%3D101195%26rk%3D2%26rkt%3D12%26sd%3D223407152927%26itm%3D522175083746%26pmt%3D1%26noa%3D0%2>

[6pg%3D2047675%26algv%3DSimplAMLv11WebTrimmedV3MskuWithRevOptLambda85KnnRecallV1UpdatedPrice%26brand%3DUnbranded&_trksid=p2047675.c101195.m1851&amdata=cksum%3A2234071529278d9ed500d5f84db1b81349ae0efbdec1%7Cenc%3AAQAHAAABIATTvUhf9weceaKbX5LvBjvPjEhDzrCECR1YF2hmJp%252BY3cKnSDVzdwt2NHzOMyyyOoavCkbiJbFyLOYBO2W7CrGDBuYXI8rNvv%252BrI0%252BehEeav1W5c%252FPSZYsLK6nJxPdiSgPqOBdGYgUzgPUoRdC1wsDfUvIL%252FFDjPjv9WLDbTE4Xo4fBDT4ZZ5BUL%252FJ8hHTQkSCZtG6u0adSHEmD28pHzWAEISRK%252B2BT%252BQP](#)
[N3ScjoISTneFY9Jz5Gorliyz4x8wQniVgneFODEAhO6U7aEP7aB6MSUM35W0SomwUflZRyMITWROByJgHnwFsIV8fxpEl0ceuDY4A6iKeNf0VNrz1wIs6kTStBrC%252BSLazRi3FHxmcGDlx3%252FHEfx%252B1jTWWzdBeg%253D%253D%7Campid%3APL_CLK%7Cclp%3A2047675](#) (28.1.2023)

85Pcs 10 Types Integrated Circuit Chip IC Chips Assortment Kit Opamp LM324. Ebay.

<https://www.ebay.com/itm/265746747028?hash=item3ddfbd8e94:g:g0UAASwLOZisV2H&amdata=enc%3AAQAHAAAA4PE%2F4T22BMswxa7J61KAFKlApWIY%2BmlO4jjRh0oXCaqcgYLiURnL1wcZbho8jGjgXJoaObBe71ljj%2BamnXA9Vo3CyISslkiBTCb1a1ln0NX3K7rWrg7jIj9Pk2N49NDM4hhFAo0hjWxHElHbE1sveFJAaN4smWxp0RRNYcyih2ZiRUf4JMjuSD5ryBFPFj3BXJnP6nytW64IW3I73%2BIJOr8easipWw%2F8m2AC%2Fqane6F3aXXnd2u62Nq8u9MzpC8dPRSaqUVFI4iROhEnhTmVNCpbR83TLXYRWBuO8ve6Ry%7Ctkp%3ABFBMls6ByL5h>

(28.1.2023)

100Pcs 1/2W 1/2 Watt 1% Metal Carbon Film Resistor Resistance Kit 1 ohm - 1M ohm.

Ebay.

<https://www.ebay.com/itm/374008707481?hash=item5714a7f999:g:2nIAASwHipjpWpZ&amdata=enc%3AAQAHAAAA4PZNYzXjpjpGT1Hz0ekz67J3d%2Ft9iyxFqdJGkMrbpTaOf8TQUuUHg1f%2Bj5DjnoljXtaDU%2FfRzdBA8oMXnsqN4ND6EAhUZNeVFu%2FojTVdGRIAwlyoExQbCnUyawHzLivX9Z5fIXNCZ9eSAV1C5JXNfIzh%2BDDIJHX83LpZQJlm3azR%2B5%2B5ByTUlDO%2Bxewv6lnoVi3a1Yjs5NkXCG%2F6voSXQoF4Ep57GhYqfUWTYBUvm0Mhg%2B4oFgqm20nKLgseKsUw3vN880BfzRdrzoHk7b5mEq2ReBNKhwJpCbq9GlzDcTQ%7Ctkp%3ABFBMnKjx75h> (28.1.2023)

100Pcs 1/4W 0.25W Metal Film Resistor ±1% 1K -910K Ω Ohm 1K 10K 100K 47K 22K 33K. Ebay.

<https://www.ebay.com/itm/192901341321?hash=item2ce9d0e089:g:6pcAAOSwjDZYd168&amdata=enc%3AAQAHAAAA4K1i2exx7pVFpTfunDu74oPxzPDUGrXEbbR5jJYU7osRQ%2Fj3VxoLsXBur%2BywxwCoqov04u8iBOcqbxeeol5vWibXA2gh1SbsskH5jCU3SW0GvgvNSRBJm5nva0Jz3yaoSBdqctJd5JihNr8UJg05PprmFFpMDn3NmsFRu0Jzh%2BZQpOUEzusVnuR7GYzY8zUmLuAeI3WIB%2FC%2FfLtoSj%2F53E3%2Bc8r%2B11CBKoGWw2HK09DfTQ2GytlejXvSjFs2%2BjcM0bfUBY98oUU8JnNvcynXDrkNpW0RzqYfN5Z8xCk6NiP1%7Ctkp%3ABk9SR-6S8Me-YQ> (28.1.2023)

100pcs 4.7K ohm Ω 4K7 1/4W 0.25W +/-1% Metal Film Resistor. Ebay.

<https://www.ebay.com/itm/234285706818?hash=item368c842e42:g:wLUAAOSwJGRhhUcS&amdata=enc%3AAQAHAAAA4AYiO%2Fo%2FIxFNy4uLh%2FSbGNTY6EK8wOuzFdE9dEZft4Y8xuIX05zovACt33ZiT%2FsLeKLba%2FKXvIXF8P7H%2FaQfnoYnIJb8BB0uNs4c99wSi6TtHvIYytwBvoQUo8EV1viRrNof%2FZoEBO7Yzr0jVEP3ehdxgEEabckVDa2tCOOKrNMEkUk3eB1N37rA2%2BGyOAhNoQFxk5WXV%2BIo11X7tyG58agr7Rma2iejHnQNGvfDWnxmY0gqqYiyXNAUglccuMSbWWvpVaQyIJrpjjsLGHGe1ZfoUecwKGxmNor61%2FleIS%2F%7Ctkp%3ABk9SR9CryMO-YQ> (28.1.2023)

100pcs 10K ohm Ω 1/4W 0.25W +/-1% Metal Film Resistor. Ebay.

<https://www.ebay.com/itm/393700627134?hash=item5baa62d2be:g:wLUAAOSwJGRhhUcS&amdata=enc%3AAQAHAAAA4KtJfAUrqpDjnxfur7xyX55oshRbVaR3ROVuucsMzjvqgGxwKRuMrBaXRV6wRktkd5WasIn9F3Qvu9DDRPkI2x34rzL1nUFGvFtvFTvcjYn%2F98PvsxcZK4duCTjKuDwMSDLvdmOHXIRC3Zsc%2Bv0WA%2FIwfdaagEMdfkJaqZMyywkJvh ejgrsPwysXSNQRvvdB1t2EHhfQluVPPreax3xkE%2Bd9%2BKZQWM%2FhWCoWjm061M60dUIIU8N7rnXGHQJn925U7ZkWl9DXYZqk%2FAL%2FWvOoGIZkGMBnYwnyX7ShSM53gdPt%7Ctkp%3ABFBMoLzVx75h> (28.1.2023)

BMP280 Luftdruck Temperatur I2C Sensor Barometer Arduino Raspberry Pi Modul. Ebay.

<https://www.ebay.com/itm/255283194264?hash=item3b70106998:g:-TEAAOSwHOZb4ig9&amdata=enc%3AAQAHAAA4EB6YYTlnks7dQUgc7SoKg0bmZPL9a4%2FZzkHz90l%2FMYlf55OdCFrNw4m1oGrdPqdfzPKPiLzdT9ahnFYjxumayUcFGvg4GE7oZa%2Bv11hwhVH3xxaEQJ%2FjJPG2%2FiXP0OoGM4TSPqTp3HO0pxHkpwSVgSRGSep95QzsZepfHCJKKmX2MOUQW2uNnxEWMV6kD45KrQVgUBERVqSERhfG1jep1t1JxI4v6%2FPppePq0ZOvx1XILn%2BZWVzTPEYcofW6UQKXlrgLW5Qd7dthNAsLsNP1TWHeqe5s%2FN9LqUOyhV%2BM%2BtJ%7Ctkp%3ABk9SR7ieuMC-YQ> (28.1.2023)

EVOX 0.47uF 250V Metalised Polyester Capacitor - (Pack of 2). Ebay.

<https://www.ebay.com/itm/201832940851?hash=item2efe2e4533:g:GhkAAOSwax5YsYhN&amdata=enc%3AAQAHAAAoC6%2FPMnTDEv9ELOMUyQNPjr3HioHrq2%2FqiH1pmkdoyIDQKBMwHFIwHZyI%2FxCQMP1HcdUbozm%2F7a%2FbHuPf%2BCefleNBLUu9LB6G5JW> (28.1.2023)

GEEETECH Filament 1,75 mm 1 kg PLA+Silk PLA+PETG+TPU+Sparkly PLA für 3D-Drucker. Ebay.

<https://www.ebay.com/itm/234548973308?hash=item369c354efc:g:otQAAOSw7pFiYWgp&amdata=enc%3AAQAHAAA4OD2E2XGky2DLFGUv8CucqDdxV1tOAuLQjTl8QQ8EINGfLBhz9o%2BgyIPaps9PY3CYNAejTrJWgtqQdttdlM6dT%2FdD74%2FbsZ2eH2F%2F1Mz%2FNY6kgQm%2FrCtTx82%2BQk7qXqJAXILzGxmoIo844eisEISupLi22vDLgfh6smPD5zVNV4SEzHDs%2B22dPjEqBUyA9dM7ZkhNzrN%2FKfk16JTUUOj6ePt%2Bz8IMgGZmBmxWiYfpCMCMY7wl%2F7i%2FKIQZXg6Cf0Uc6OHzmRAG2x%2FUf06KJJb2R2dLJy2%2BbxQzpPmhSD%2Bma%7Ctkp%3ABFBMwtXev75h> (28.1.2023)

Nano ATmega328 V3.2 Board CH340 USB Chip Arduino Kompatibel. Ebay.

<https://www.ebay.com/itm/255283163551?epid=23026890904&hash=item3b700ff19f:g:tWA-AAOSwDdBgsmKA&amdata=enc%3AAQAHAAA4BS8qL79FpwE1gX6o%2F46uuWX7Yi9AKJQJ0lSpLtXyhR7J2mSVaObdtJ9uLVijpLgiNoUNW0lPEFZ3yyPayRmhxOi89mSj%2BLi39R> (28.1.2023)

Wima MKS-4 Metalised Polyester Capacitor X2 0.1uF 250V (Pk of 2). Ebay.

<https://www.ebay.com/itm/192117705913?hash=item2ccb1b8cb9:g:sU0AAOSw4URd~jkf&amdata=enc%3AAQAHAAAoDxYL9xbFljGFNCpSJ4TqnBSP1qPzUfxZc2Gl82lA0zpNiG4DnSU6mbMYUs7IvjYPtdtsn7MkoJGtdXuw17gA3QE3fuAJJywYpMt1%2B4kvssZHA8ym5VBQt8w%2BTUDGfTdUKi2RDVnz3VWdf9AQQyiIM1JYjYItm4YcNJABMn42M1Cs4>

[p%2B1KtZC7qoWMkQdp%2BA0HyGQTF%2FqIhIrwvB2IEF%2BT8%3D%7Ctkp%3ABk9SR-DP6sK-YQ](#) (28.1.2023)