



SYSTÉM PRE MERANIE VYBRANÝCH VELIČÍN VO VETERNOM TUNELI

Kateryna Antoniuk
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Pavol Pecho
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

The article focuses on the design and implementation of a system for measuring selected quantities intended for application in a wind tunnel. The theoretical part includes a detailed description of the development of a mechanical transmission system, whose task is to convert aerodynamic forces into an analog signal, which can be measured and processed using Arduino microcomputers. Another part of the work involves the development of software that subsequently processes the analog signal and converts it into a digital format. The result of this conversion is the final display of the necessary data on an external screen in the form of numbers and graphs. Significant attention is given to the calibration of scales and the correct integration of sensors for measuring flow speed, to enhance the accuracy and reliability of measuring the aerodynamic characteristics of tested objects. The output presents a functional prototype of the system and its demonstration on specific examples. The system is expected to be further used for research projects.

Keywords

Wind tunnel, Arduino, Microcomputer, Sensor, Lift, Drag

1. Úvod

Tento článok sa zameriava na návrh a realizáciu meracieho systému pre veterný tunel nachádzajúci sa na Katedre leteckej dopravy Žilinskej univerzity v Žiline. Tento veterný tunel bol doteraz využívaný predovšetkým na vizuálne sledovanie prúdenia vzduchu pomocou laseru a zadymenia. Chýbala mu však možnosť kvantitatívneho merania základných aerodynamických veličín, ako sú vztlak a odpor. A okrem toho bola potreba zlepšiť možnosti sledovania rýchlosti prúdenia vzduchu.

Hlavným cieľom práce bolo navrhnúť funkčný systém snímačov, ktorý túto nevýhodu odstráni. Riešenie zahŕňa výber a inštaláciu vhodných senzorov, návrh mechanického nosného systému, ako aj vývoj riadiaceho softvéru. Výsledkom je zariadenie, ktoré dokáže zbierať a spracovávať údaje v reálnom čase a poskytovať grafický aj číselný výstup pre analýzu aerodynamických javov.

Práca tak významne rozširuje možnosti využitia veterného tunela pri výučbe a výskume. Nový merací systém umožní študentom aj výskumníkom presnejšie skúmať aerodynamické vlastnosti rôznych objektov, čo podporí vývoj efektívnych dizajnov v letectve a príbuzných odboroch.

2. Teoretické poznatky o veterných tuneloch a senzorech

Na vytvorenie funkčného systému na meranie vybraných veličín vo veternom tuneli je nevyhnutné dôkladné preskúmanie teoretických poznatkov z oblasti aerodynamiky, senzorových technológií a princípov fungovania veterných tunelov.

2.1. Veterný tunel

Veterný tunel – je špeciálne zariadenie, ktoré slúži na testovanie aerodynamických vlastností objektov. Najčastejšie sa používa na skúmanie aerodynamických vlastností lietadiel ako celku, ale aj

ich konkrétnych častí, v kozmickom priemysle a zároveň aj v automobilovom. Môžu byť skonštruované v reálnej veľkosti pre testovanie predmetov v ich používanom rozmere a zároveň aj v malej mierke, ktorá bude vhodná pre modely.

Hlavné rozdelenie veterných tunelov:

- S otvoreným okruhom (obr.1) – majú otvorené konce na oboch stranách testovacej oblasti a nasávajú vzduch priamo z prostredia, v ktorom sa nachádza tunel. Tunel s otvoreným okruhom má konvergentne divergentný tvar na to aby sa uskutočnila zmena tlaku a rýchlosti prúdenia. (Nagel, 2023)



Obrázok 1 Veterný tunel KLD. Zdroj: Autor

- S uzavretým okruhom – na rozdiel od tunelov s otvoreným okruhom vzduchu používajú uzavretý obvod. Ten istý vzduch je recyklovaný v rámci tunela a prechádza cez testovaciu oblasť. (Nagel, 2023) Rýchlosť vzduchu sa kontroluje zmenou rýchlosti otáčania vrtúľ alebo úpravou uhla nábehu lopatiek. V tuneloch s vysokou rýchlosťou sú v sekciách s nízkou rýchlosťou inštalované vodné chladiace systémy na ochladenie recyklovaného vzduchu. (Lewis, 2018)

Okrem rozdelenia veterných tunelov podľa konštrukcie existuje aj rozdelenie podľa rýchlosti prúdenia v tuneli.

Tradičné veterné tunely sú klasifikované podľa rýchlosti vzduchu prechádzajúceho cez testovaciu sekciu vzhľadom na rýchlosť zvuku (Mach 1). Rozdelené sú do štyroch kategórií (Nagel, 2023):

- podzvukové (Mach <0,8);
- transonické (Mach 0,8 – 1,2);
- nadzvukové (Mach 1,2 – 5,0);
- hypersonické (Mach >5,0).

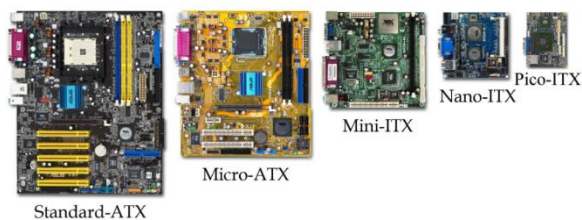
Ďalej sa hovorí iba o veternom tuneli s otvoreným návratom vzduchu a podzvukovými rýchlosťami nakoľko práve taký tunel sa nachádza v laboratóriu Katedry leteckej dopravy a do takého tunelu bol vytvorený systém senzorov.

Aby však mohol takýto veterný tunel slúžiť na meranie a analýzu prúdenia, musí byť vybavený základnými komponentmi – testovacou sekciou s kvalitným prístupom na meranie, systémom na reguláciu prietoku vzduchu, sústavou senzorov, ako aj riadiacou a záznamovou elektronikou. Dôležitou súčasťou je aj vhodný systém spracovania nameraných údajov, ktorý zabezpečuje presnosť a spoľahlivosť výsledkov meraní.

V tejto súvislosti zohráva významnú úlohu mikroprocesorová technika, ktorá umožňuje efektívne riadenie tunela a spracovanie dát. Sa hovorí iba o veternom tuneli s otvoreným návratom vzduchu a podzvukovými rýchlosťami.

2.2. Mikropočítač

Mikropočítač je zariadenie založené na mikroprocesore na jednom čipe. V systéme snímačov, ktorý bol vytvorený mikropočítač slúži ako mozog a riadi celý proces. Mikropočítač používa jeden integrovaný polovodičový čip ako svoju centrálnu procesorovú jednotku (CPU). Obsahujú pamäť vo forme pamäte len na čítanie (ROM) a pamäte s priamym prístupom (RAM), vstupné/výstupné (I/O) porty a zbernicu alebo systém prepojovacích vodičov. Všetko je umiestnené v jednej jednotke, ktorá sa zvyčajne nazýva základná doska (Shea, 2018). Na obrázku 2 sú znázornené príklady mikropočítačov.



Obrázok 2 Príklady mikropočítačov. Zdroj: (Uttam, 2022)

Pri návrhu mechanického prenosného systému merania údajov vo veternom tuneli boli použité mikropočítače od výrobcu Arduino. Produkcia Arduino je známa svojou jednoduchosťou v použití, spoľahlivosťou a dostupnosťou z pohľadu ceny. Konkrétne pri tvorbe systému senzorov bol použitý mikropočítač Arduino NANO. Táto základná doska bola zvolená ohľadom na svoje rozmery a schopnosť splnenia nasledovných úloh:

- spracovanie vstupov – čítanie rôznych druhov vstupov z externých zariadení, ako sú napríklad senzory,

tlačidla, potenciometre atď. Vstupy môžu byť informácie o teplote, vlhkosti vzduchu, pohybe, tlaku a ďalšie;

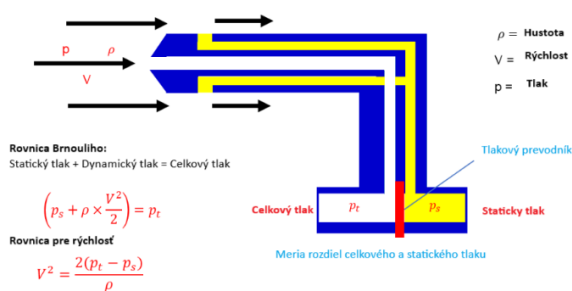
- vykonávanie pokynov – na základe prijatých vstupov vykonanie vopred naprogramovaných postupov;
- generovanie výstupov – po spracovaní vstupov nasleduje ovládanie rôznych výstupných zariadení. Výstupnými zariadeniami môžu byť LED diódy, displeje, motory a iné;
- automatizácia – možnosť vytvárať automatické systémy, ktoré by vykonávali úlohy bez zásahu človeka. Napríklad automatické vynulovanie váh pri zmene testovaného objektu, udržiavanie rovnakej rýchlosti prúdenia vzduchu prostredníctvom otáčok vrtule.

Po zvolení mikropočítača nasledovala časť zvolenia vhodných snímačov.

2.3. Pitot-statická trubica

Vo väčšine prípadov, keď človek hľadá čo je pitot-statická trubica nájde informácie, ktoré povedia, že je to prístroj na meranie rýchlosti lietadla. Správna definícia pitotovej trubice je prístroj, ktorý meria celkový tlak latky ako napríklad je kvapalina alebo plyn. Pitot-statická trubica meria statický a celkový tlak, na základe čoho sa vypočíta dynamický tlak. Na základe týchto veličín prostredníctvom Bernoulliho rovnice sa vypočíta rýchlosť objektu. (Tokyo Aircraft Instrument CO.,LTD. , 2021).

Výpočet dynamického tlaku umožňuje určiť rýchlosť prúdenia vzduchu na základe Bernoulliho rovnice, ako je znázornené na obrázku č. 3. Tento výpočet je kľúčový pri aerodynamických meraniach, pretože rýchlosť prúdenia je jedným zo základných parametrov ovplyvňujúcich aerodynamické sily, ako sú vztlak a odpor.



Obrázok 3 Pitot-statická trubica. Zdroj: (Hall, 2024)

V kontexte experimentov realizovaných vo veternom tuneli však získaná hodnota rýchlosti nepredstavuje rýchlosť pohybu samotného testovaného objektu, keďže ten je fixne umiestnený v testovacej sekcii. Namiesto toho ide o rýchlosť prúdenia vzduchu, ktorý obteká daný objekt.

Pitot-statická trubica sama o sebe neumožňuje priame prepojenie s elektronickým systémom, ako je mikrokontrolér. Preto je potrebné použiť vhodný senzor tlaku, ktorý dokáže tieto hodnoty spracovať a previesť do digitálnej podoby vhodnej na

ďalšie spracovanie. V tomto prípade bol zvolený tlakový senzor MPXV7002DP, ktorý je kompatibilný s vývojovou platformou Arduino. Tento senzor je prepojený s Pitot-statickou trubicou pomocou dvoch flexibilných tlakových hadičiek, pričom jedna slúži na meranie dynamického tlaku a druhá na meranie statického tlaku.

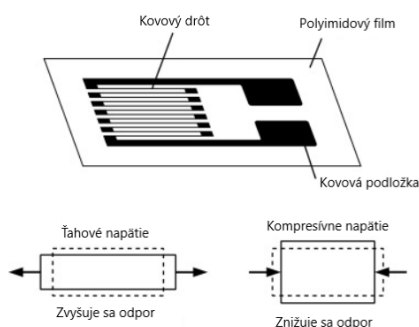
2.4. Senzor hmotnosti

Senzor hmotnosti je typ prevodníka, ktorý mení vstupnú mechanickú silu na inú fyzikálnu veličinu. V našom prípade vstupná mechanická sila je hmotnosť a fyzikálna veličina – elektrický výstupný signál, ktorý sa dá merať a prevádzať. S nárastom sily, ktorá pôsobí na senzor sa elektrický signál úmerne mení. V kombinácii s vhodnou elektronikou, ako je napríklad zosilňovač signálu a mikrokontrolér (napr. Arduino). Tieto je možné dáta spracovať a využiť v rôznych aplikáciách – od meracích systémov až po riadiace algoritmy v automatizovaných zariadeniach. (Futek, 2020)

Hmotnostný senzor funguje na princípe merania mechanickej deformácie pomocou tenzometra. Tenzometer je snímač, ktorého elektrický odpor sa mení v závislosti od mechanickej sily pôsobiacej na jeho povrch. Tento princíp je založený na fyzikálnom jave známeho ako piezorezistivita – teda schopnosť materiálu meniť svoj elektrický odpor pri deformácii. (Futek, 2020)

Pozrieme sa bližšie na štruktúru takého prevodníka (obrázok 4). Zvyčajne je vyrobený z kovového tela (kovový drôt), na ktoré sú pripevnené tenzometre. Kovový drôt je najčastejšie vyrobený z hliníka alebo nehrdzavejúcej ocele. (Futek, 2020) Má dve dôležité vlastnosti:

1. dostatočnú pevnosť, aby odolávalo vysokým zaťaženiám; (Futek, 2020)
2. elasticitu, ktorá mu umožňuje minimálne sa deformovať a vrátiť sa do pôvodného tvaru po odstránení sily. (Futek, 2020)



Obrázok 4 Štruktúra hmotnostného prevodníka. Zdroj: (John X.J. Zhang, 2019)

Keď je aplikovaná sila (napätie alebo kompresia), kovové telo sa mierne deformuje ako pružina. Ak nedôjde k preťaženiu, vráti sa do pôvodného tvaru. Každý taký senzor má svoje obmedzenia maximálnej váhy, kým ju neprekročíme tak nemalo by dôjsť k preťaženiu a poškodeniu prevodníka.

Okrem toho musí byť aj zosilňovač signálu, hlavne z toho dôvodu, že signál poskytovaný tenzometrom nie je dostatočne silný na to aby mikropočítač ho mohol spracovať. Senzor má vysokú presnosť, podľa výrobcu pravdepodobnosť chyby merania je iba $\pm 0,05\%$.

Tento senzor je použitý na meranie vztlaku a odporu, použili sme dva snímače – jeden na meranie vztlaku, ktorý je umiestnený vodorovne a druhý, vertikálny na meranie odporu.

2.5. Senzor teploty a tlaku vzduchu

Posledným dôležitým komponentom pri snímaní a výpočte rýchlosti prúdenia je senzor teploty a tlaku vzduchu.

V kombinácii s Pitot-statickou trubicou tento senzor BMP 180 umožňuje prepočítať tlak na rýchlosť prúdenia vzduchu v dvoch krokoch prostredníctvom základných rovníc:

1. Určenie hustoty vzduchu:

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (1)$$

kde:

R – plynová konštanta (pre suchý vzduch má hodnotu 287,11, J/kgK);

T – teplota vzduchu (K) ;

p - tlak vzduchu (hPa).

2. Určenie rýchlosti prúdenia:

$$v = \sqrt{\frac{2(p_t - p_s)}{\rho}} \quad (2)$$

kde:

p_t – stagnačný tlak (alebo celkový);

p_s – statický tlak;

ρ – hustota vzduchu.

Kombinácia týchto snímačov umiestnených vo veternom tuneli vie zabezpečiť komplexné sledovanie premenných a presné výsledky pri experimentoch smerovaných na zistenie aerodynamických vlastností objektov. Ale pred tým ako systém snímačov bude schopný plniť svoju funkciu je nevyhnutné každý z nich naprogramovať podľa potreby. Na programovanie hardvéru slúži programovací jazyk C/C++.

2.6. Základné znalosti o programovacom jazyku C/C++

Programovacie jazyky C a C++ patria medzi najrozšírenejšie a najplyvnejšie nástroje v histórii softvérového vývoja. Vďaka svojej vysokej efektivitve, rýchlosti a schopnosti nízkoúrovňového programovania sú široko využívané v systémovom programovaní a pri vývoji hardvérov. Práve tieto vlastnosti ich predurčujú na použitie pri práci s produktami spoločnosti Arduino, ktorá predstavuje jednu z najdostupnejších a najpoužívanejších platforiem pre prototypovanie a riadenie elektronických zariadení.

Jazyk C je procedurálne orientovaný, čo znamená, že programová logika je rozdelená do jednotlivých funkcií a riadiacich štruktúr s dôrazom na postupnosť krokov. Naproti tomu C++ rozširuje jazyk C o prvky objektovo orientovaného programovania, čím umožňuje vytváranie zložitejších a modularejších softvérových riešení (W3 Schools, 2024). Sú charakteristické vysokou efektivitou a rýchlosťou, schopnosťou systémového programovania (napr. operačné systémy) a sú dostatočne jednoduché na pochopenie.

Arduino IDE využíva syntax týchto jazykov a ponúka užívateľsky prívetivé prostredie s množstvom dostupných knižníc. (Maker.io Staff, 2021). Tie umožňujú jednoduché prepojenie s rôznymi senzormi, aktuátormi či komunikačnými modulmi, čím výrazne urýchľujú vývoj a zvyšujú spoľahlivosť systému.

V rámci vývoja meracieho systému pre veterný tunel boli použité existujúce knižnice, ktoré zabezpečili základné funkcie ako čítanie a spracovanie údajov. Softvér má základnú štruktúru postavenú na funkciách `setup()` (inicializácia) a `loop()` (nepretržité vykonávanie kódu), ktoré sú nevyhnutné pre chod každého Arduino programu (Arduino, 2024).

Existuje veľké množstvo dodatočných podfunkcií, ktoré budú vhodne pre rôzne potreby, ale vždy musia byť použité základné funkcie, bez toho celý systém nebude fungovať.

2.7. Základné znalosti o programovacom jazyku Python

Keď bol celý systém snímačov vytvorený, hardvérová časť bola poskladaná a naprogramovaná, vznikla otázka ako jednoducho a prehľadne sa dostať k výsledkom meraní, uložiť ich a zároveň aj sledovať údaje priamo počas experimentov.

Na vývoj aplikácie schopnej ukladať, spracovávať a zobrazovať výsledky meraní bol použitý aj ďalší programovací jazyk – Python. Ide o jeden z najpopulárnejších programovacích jazykov súčasnosti, ktorý si získal obľubu vďaka svojej jednoduchosti, flexibilitě a rozsiahlej komunite vývojárov. Vďaka týmto vlastnostiam je mimoriadne vhodný pre rýchly vývoj prototypov, automatizáciu, prácu s dátami, vizualizáciu a interakciu so zariadeniami ako sú mikrokontroléry.

Medzi ďalšie dôležité vlastnosti jazyka programovania Python patrí (Diwan, 2022):

1. Podpora rôznych programovacích paradigiem – Python umožňuje procedurálne, funkcionálne aj objektovo orientované programovanie (OOP).
2. Všestranné použitie – možno ho využívať ako skriptovací jazyk na automatizáciu alebo prekladať do bytekódu na tvorbu komplexných aplikácií.
3. Dynamické dátové typy a kontrola typov – dátové typy sa určujú za behu programu, čo prispieva k rýchlemu vývoju.
4. Automatická správa pamäte – jazyk obsahuje vlastný systém na zber nepoužívaných objektov (garbage collection), čím odbreňuje programátora od manuálneho uvoľňovania pamäte.

Hlavné princípy písania kódu v jazyku Python (GeeksForGeeks, 2024):

- Premenné – je to spôsob definície hodnoty, ktorá sa môže následne používať v celom kóde prostredníctvom definovaného symbolu pre túto hodnotu;
- Dátové typy v Pythone (Purple Tutor, 2023) : čísla, reťazce, zoznamy, tuply, none, boolean a slovníky.
- Odsadenie kódu – na rozdiel od C/C++ na označenie blokov kódu namiesto zložených zátvoriek sa používa odsadenie;
- Podmienky a cykly – na rozhodovanie slúžia `if`, `elif`, `else`, na opakovanie úloh – `for`, `while`;
- Funkcie – definované pomocou kľúčového slova `def`;
- Moduly a knižnice.

Tých základných znalostí o Pythone je postačujúce na písanie jednoduchých kódov a postupného rozvoja ich zložitosti a oblasti použitia.

3. Návrh prenosného systému merania vybratých veličín

Po dostačujúcej teoretickej znalosti práce veterného tunelu, snímačov a spôsobov programovania a vývoja softvérov nasleduje časť implementácie týchto znalostí do praktického použitia.

3.1. Systém snímačov

Každý zo senzorov bol postupne mechanicky pripojený k základnej doske a následne naprogramovaný.

Postup tvorenia systému snímačov:

1. Senzor hmotnosti – sám o sebe nepoužiteľný, musel sa navrhnuť taký systém usporiadania senzorov, na ktorý by sa dalo pripojiť modul HX711 a namontovať skúmaný model. Riešenie problému usporiadania senzorov, ktoré by zahŕňalo umiestnenie senzorov a následné umožnenie napájania objektov skúmania na snímače, umiestnenie celého systému do veterného tunelu takým spôsobom aby to neovplyvnilo výsledky merania sa vyriešilo následne (obrázok 5):

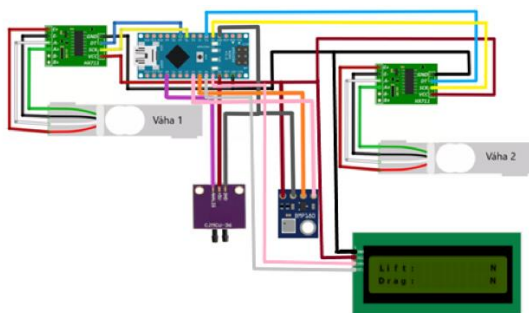


Obrázok 5 Váhy. Zdroj: Autor

Princíp fungovania: model skúmaného objektu je pevne prichytený ku konštrukcii senzorov a následne vystavený riadenému prúdeniu vzduchu vo veternom tuneli. Pôsobením prúdu vzduchu vznikajú aerodynamické sily. Vztlaková sila spôsobuje vertikálny pohyb objektu, čo sa prejavuje ako zmena zdanlivej hmotnosti zachytená horizontálnym senzorom. Po konverzii tejto zmeny pomocou kalibračných koeficientov na silovú veličinu je možné odvodiť hodnotu vztlaku. Odporová sila pôsobí v smere prúdenia a má za následok pozdĺžny posun testovaného objektu smerom k vertikálne orientovanému senzoru. Zaznamenáva tlakovú zmenu, ktorú rovnako možno prepočítať na pôsobiacu silu odporu. Poslednou časťou týkajúcej sa priamo váh je pripojenie dvojiadkovej zobrazovacej LCD jednotky, ktorá slúži iba ako pomôcka na sledovanie ukazovateľov vztlaku a odporu.

2. Pitot-statická trubica a meranie rýchlosti prúdenia - meraní vztlaku a odporu ako základných aerodynamických síl je ďalšou kľúčovou veličinou v rámci experimentov vo veternom tuneli rýchlostí prúdenia vzduchu, ktorá priamo ovplyvňuje veľkosť aerodynamických síl pôsobiacich na model. Presné meranie tejto veličiny je nevyhnutné pre spoľahlivú interpretáciu výsledkov a ich porovnateľnosť. Na tento účel bol použitý tlakový senzor MPXV7002DP v kombinácii s pitot-statickou trubicou. Na dosiahnutie vyššej presnosti hodnoty rýchlosti prúdenia vo veternom tuneli je vhodné použitie nie tabuľkovej hodnoty hustoty vzduchu ale vypočítanú hustotu podľa aktuálnej teploty a tlaku vzduchu. Na dosiahnutie tohto cieľu bol použitý senzor BMP180, ktorý vie vykonať meranie tlaku a teploty vzduchu.

Na obrázku 6 je znázornená výsledná schéma zapojenia senzorov do systému.



Obrázok 6 Finálna schéma. Zdroj: Autor

Každý senzor bol postupne naprogramovaný podľa potreby a overený na funkčnosť.

3.2. Aplikácia na ovládanie systému snímačov

Aj keď samotný program Arduino IDE je schopný grafickému a dátovému zobrazovaniu výsledkov pre prijaté riešenie vytvorí zvlášť softvér, ktorý bude môcť nie len zobrazovať výsledky ale aj ukladať ich. Ukladanie dát je dôležité hlavne pre analýzu, hodnotenie a ďalšiu prácu s nameranými hodnotami. Na

vytvorenie takého softvéru bol použitý program PyCharm a jazyk programovania Python.

Samotný program PyCharm je schopný vykonať požiadané funkcie. Aplikácia je hlavne dôležitá v prípade zmeny zariadenia, prostredníctvom ktorého bude nastavené spojenie s veterným tunelom a snímačmi, nakoľko bude stačiť stiahnuť iba jednu aplikáciu bez komplikovaných krokov.

Výsledkom programovania je počítačová aplikácia na obrázku 7.

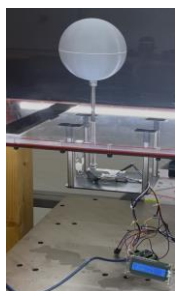


Obrázok 7 Aplikácia

V hornej časti používateľského rozhrania sa nachádzajú polia pre výber portu, na ktorý je pripojený systém senzorov a nastavenie rýchlosti komunikácie. V ďalších poliach sú zobrazené aktuálne namerané hodnoty vztlaku, odporu a rýchlosti prúdenia vzduchu vo veternom tuneli. V dolnej časti obrazovky je zobrazený grafický priebeh týchto hodnôt: zelená krivka predstavuje rýchlosť prúdenia, modrá krivka zobrazuje hodnotu vztlaku a červená krivka reprezentuje odpor. Okrem toho je k dispozícii možnosť nastavenia, ktoré krivky sa majú zobraziť. Tlačidlá „Lift“, „Drag“ a „Velocity“ slúžia na zapínanie a vypínanie zobrazenia príslušných hodnôt v grafe, čo umožňuje používateľovi sledovať a zobrazovať jednotlivé parametre počas merania.

4. Praktická realizácia a overenie funkčnosti systému

Keď je systém a softvér hotový nasleduje etapa testovania senzorov s cieľom overiť ich funkčnosť a presnosť merania. Skúmanie prebiehalo prostredníctvom experimentov vo veternom tuneli, kde sa hodnotila schopnosť systému zaznamenávať a analyzovať aerodynamické parametre rôznych objektov. Dôraz sa kládol na presnosť nameraných údajov, stabilitu meracieho procesu a opakovateľnosť výsledkov, pričom boli získané dáta porovnávané s teoretickými výpočtami a referenčnými modelmi. Na testovanie boli vybrané tri odlišné objekty: kocka, guľa a aerodynamický profil NLF-0416.



Obrázok 8 Systém senzorov a meranie vlastností gule.

Aby bolo možné objektívne vyhodnotiť presnosť senzorov, vykonali sa matematické výpočty aerodynamických charakteristík jednotlivých objektov na základe teoretických rovníc. Výsledky sa následne porovnali s údajmi získanými priamo zo senzorov. Na zabezpečenie presného porovnania boli merania vykonané pri piatich vybraných rýchlostiach prúdenia.

Každé meranie bolo vykonané pri stanovenej rýchlosti prúdenia vzduchu (9,13 m/s, 12,91 m/s, 14,43 m/s, 15,81 m/s a 18,26 m/s) a trvalo 25 sekúnd. V riadiacom kóde pre mikrokontrolér Arduino bolo prednastavené časové oneskorenie 100 ms, čo zodpovedá času 0,1 sekúnd. V dôsledku toho sa počas jednej meracej periódy do výstupného CSV súboru zaznamenalo 250 riadkov údajov obsahujúcich hodnoty vztlačovej a odporovej sily pre danú rýchlosť prúdenia. Neskôr bola z týchto údajov vypočítaná priemerná hodnota vztlaku a aerodynamického odporu (tabuľka 3), ktorá následne slúžila na ďalšiu analýzu aerodynamických charakteristík objektu.

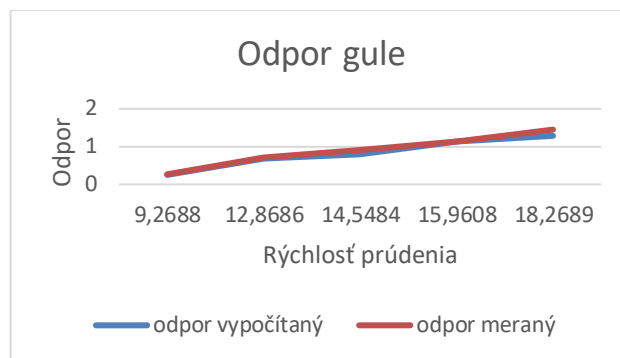
5. Výsledky

Počas vykonania praktickej časti práce bolo vykonané sériu meraní pre rôzne objekty, poddané testovaniu pri rôznych testovacích podmienkach. Nastal čas na vyhodnotenie výsledkov meraných a vypočítaných hodnôt.

5.1. Vyhodnotenie výsledkov pre guľu

Čo sa týka aerodynamického vztlaku gule, ešte pri teoretickom výpočte bol vykonávaný predpoklad zanedbateľnosti tejto hodnoty berúc do úvahy symetrický geometrický tvar objektu. V konečnom výsledku bol tento predpoklad správny, aj teoretické aj merané hodnoty sa pohybovali medzi hodnotami 0.01-0.06 v závislosti od rýchlosti prúdenia a také malé hodnoty môžu sa vnímať ako zanedbateľne.

Z odporom sa predpokladalo, že ten už bude mať významné hodnoty. Vypočítaný a meraný odpor sa zhoduje. Sú malé odlišnosti, ktoré môžu byť spôsobené vonkajšími podmienkami ako sú aktuálny tlak, teplota a vlhkosť vzduchu, nerovnomernosť prúdenia a drsnosť povrchu samotného objektu. Avšak tie odlišnosti, ktoré vznikli nie sú tak veľké a dá sa povedať, že sú v tolerancii do 10-15%.



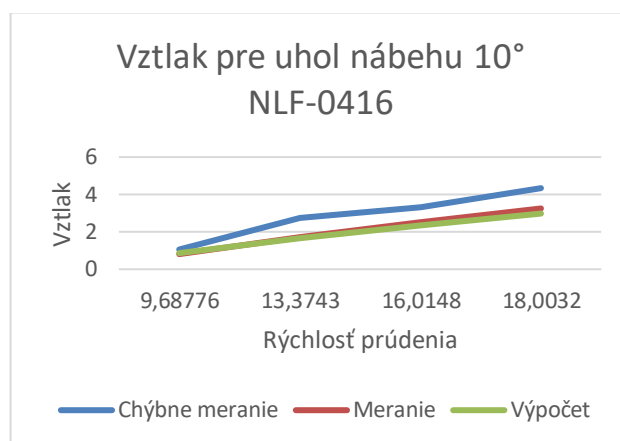
Graf „Odpor gule“ jednoznačne dokazuje, že navrhnutý systém merania aerodynamického odporu poskytuje relevantné a kvalitné dáta, najmä pre objekty s jednoduchým tvarom, ako je guľa

5.2. Vyhodnotenie výsledkov pre profil NLF-0416

Profil NLF-0416 bol podrobený sérii meraní pod vybranými uhlami nábehu a rýchlosťami prúdenia. Bolo zvolených 5 uhlov nábehu (0°, 5°, 10°, 15° a 20°). Pre vyhodnotenie výsledkov meraní boli vybraté najvýznamnejšie hodnoty patriace ku konkrétnym uhlom nábehu.

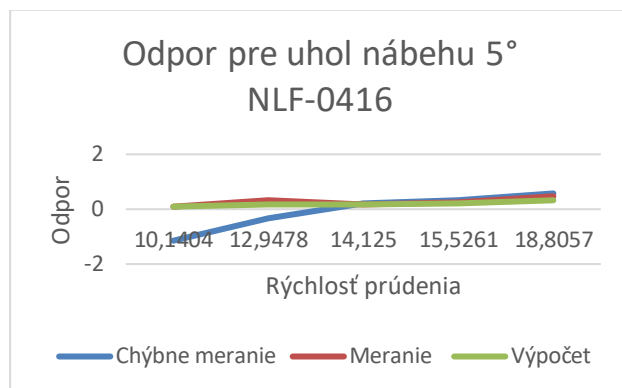
Okrem hlavného merania bolo vykonané aj iné s porušením postupov používania veterného tunelu.

Výsledky ukázali očakávaný nárast vztlaku so zvyšujúcim sa uhlom nábehu a len minimálne odchýlky (do 10–15 %) medzi meraniami a výpočtami. Pri väčších uhloch (10° a 15°) boli namerané hodnoty mierne vyššie, pravdepodobne v dôsledku lokálnej turbulencie. Porovnanie správnych a chybných meraní pri 10° ukázalo, že nesprávne nastavenie meracích podmienok vedie k výraznému skresleniu výsledkov. Naopak, experimenty za kontrolovaných podmienok preukázali vysokú zhodu s teoretickými modelmi a potvrdili spoľahlivosť meracieho systému aj kvadratickú závislosť vztlaku od rýchlosti prúdenia.



Odpor profilu NLF-0416 rovnako ako vztlak rastie so zvyšujúcim sa uhlom nábehu, pričom odchýlky medzi meranými a vypočítanými hodnotami neprekračujú 5 %. Pri väčších uhloch sa výsledky odporu zhodovali lepšie. Vyhodnotenie meraní pri uhle 5° ukázalo vplyv experimentálnych chýb – nesprávne merania viedli k nerealistickým záporným hodnotám odporu, zatiaľ čo

správne vykonané merania korešpondovali s teoretickými modelmi.



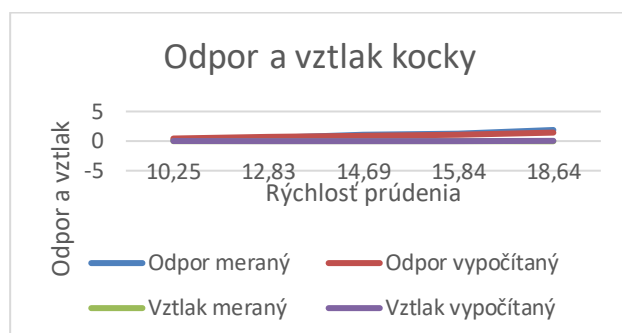
Výsledky potvrdzujú presnosť meracieho systému a spoľahlivosť veterného tunela na experimentálne overenie aerodynamických veličín.

5.3. Vyhodnotenie výsledkov pre kocku

Pre kocku boli merania uskutočnené rovnakým spôsobom ako aj pre predošle objekty a rovnakým spôsobom bolo vypočítané aj teoretické hodnoty.

S kockou sa predpokladala rastúca tendencia odporu, hlavne ohľadom na plochu, ktorá priečila prúdeniu vzduchu a aj na tvar objektu. Pri kocke sú nevýraznejšie odchýlky hodnôt teoretických a meraných, stále sa pohybujú podobne ako pri gule do 15%. Na rozdiel sa od gule vo viacerých prípadoch dosahuje horná hranica tolerancie. Nepresnosti môžu byť spôsobené nie len vyššie opísanými vonkajšími podmienkami ale aj v prvom rade správnosťou umiestnenia kocky v testovacej zóne tunela.

Graf „Odpor kocky“ aj vizuálne znázorňuje, že reálne namerané hodnoty odporu sú častejšie vyššie než teoreticky vypočítané hodnoty (hlavne pri vyšších rýchlostiach prúdenia), čo je v experimentoch bežné v dôsledku zložitosti reálnych podmienok. Dôležité je však, že trend oboch údajových radov je konzistentný.



Situácia so vztlakom je nie menej zaujímavá, nakoľko merané hodnoty sú záporné a vypočítané kladne. Výsledok takéhoto merania je spôsobený tým, že počas montovania kocky na upevňovaciu tyč, závit pokrivil polohu kocky smerom na dol, tým pádom keď vzduch začal prúdiť, namiesto vyvolávania vztlakovej sily začal pritláčať kocku nadol. Rovnako ako pri profiloch so záporným uhlom nábehu. V oboch prípadoch veľkosť

hodnoty vztaku je tak mala, že sa pohybuje okolo hodnoty 0, čo je vidieť aj na grafe.

Prípád s kockou preukázal dôležitosť správneho umiestnenia objektu v tuneli podľa postupov a to, ako umiestnenie môže ovplyvniť finálny výsledok.

6. Metodika a metódy skúmania

V teoretickej fáze boli zozbierané poznatky z oblasti aerodynamiky, sensoriky a meracích systémov. Informácie z odbornej literatúry boli analyzované, porovnávané a využité ako základ pre návrh praktickej časti práce.

Praktická realizácia prebiehala v niekoľkých krokoch. Najprv boli zostavené mechanické a elektronické časti systému, pričom dôraz sa kládol na spoľahlivé spojenia medzi senzormi a mikropočítačom. Následne sa pristúpilo k programovaniu snímačov v prostredí Arduino, pričom každý senzor bol individuálne nastavený a otestovaný.

Ďalšou fázou bol vývoj softvéru v jazyku Python na vizualizáciu a ukladanie dát z meraní. Po dokončení a otestovaní jednotlivých funkcií bol systém inštalovaný do veterného tunela a vykonané experimentálne merania na modeli profilu NLF 0416, kocke a gule.

Výstupy z meraní boli spracované do grafickej a analytickej podoby a porovnané s teoretickými očakávaniami.

7. Záver

Hlavným cieľom bol návrh, zostrojenie a experimentálne overenie systému senzorov vo veternom tuneli, vrátane vývoja softvérového rozhrania na zber, vizualizáciu a spracovanie údajov v reálnom čase. V rámci riešenia boli úspešne implementované metódy dátovej analýzy a syntézy, kombinujúce mechanickú montáž, programovanie a softvérový vývoj. Dôsledná teoretická príprava výrazne prispela k plynulej realizácii praktickej časti.

Porovnanie teoretických výpočtov so získanými experimentálnymi údajmi preukázalo vysokú mieru zhody, pričom odchýlky vztaku a odporu sa vo všetkých prípadoch pohybovali v rámci tolerancie do 15%. Identifikované rozdiely možno pripísať presnosti senzorov, lokálnym turbulenciám a drobným experimentálnym chybám. Významným faktorom presnosti meraní bolo presné dodržiavanie metodiky, najmä stabilizácia prúdenia a správna fixácia objektu. Nesprávne experimentálne postupy v úvodných meraniach viedli k nerealistickým hodnotám, čo zdôraznilo citlivosť systému na podmienky merania.

Navrhnutý systém preukázal vysokú funkčnosť, presnosť a nákladovú efektívnosť. Použité komponenty poskytujú dostatočnú stabilitu pre výučbové a výskumné účely, pričom softvérové rozhranie bolo navrhnuté pre prehľadné a efektívne spracovanie údajov. Celkovo práca úspešne naplnila stanovené ciele, významne prispela k rozšíreniu možností využitia veterného tunela a pripravila základy pre budúce experimentálne a výskumné projekty.

Pod'akovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky KEGA 024ŽU-4/2023 s názvom "Integrácia najnovších vedných poznatkov v rámci zvyšovania kvality praktickej a laboratórnej výučby študijného programu Letecká doprava".

Referencie

Arduino. 2024. docs.arduino.cc. *setup() and loop()*. [Online] 16. 05 2024. [Dátum: 04. 12 2024.] <https://docs.arduino.cc/language-reference/en/structure/sketch/loop/>.

Diwan, Amit. 2022. What are the basic concepts of Python? *tutorialspoint*. [Online] 15. 9 2022. [Dátum: 27. 1 2025.] <https://www.tutorialspoint.com/what-are-the-basic-concepts-of-python>.

Futek. 2020. Futek. *Weight Sensor*. [Online] Futek, 2020. [Dátum: 16. 09 2024.] <https://www.futek.com/weight-sensor>.

GeeksForGeeks. 2024. Learn Python Basics. *geeksforgeeks*. [Online] 20. 11 2024. [Dátum: 27. 1 2025.] <https://www.geeksforgeeks.org/python-basics/>.

Hall, Nancy. 2024. Glenn Research Center. *Pitot-Static Tube-Speedometer*. [Online] 8. Júl 2024. [Dátum: 8. September 2024.] <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/pitot-static-tube-speedometer/#>.

John X.J. Zhang, Kazunori Hoshino. 2019. Science Direct. *Metal Strain Gauge*. [Online] 2019. [Dátum: 16. September 2024.] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/metal-strain-gauge>.

Lewis, Robert. 2018. Wind tunnel. *Encyclopaedia Britannica*. [Online] 07. Jún 2018. [Dátum: 29. Júl 2024.] <https://www.britannica.comhttps://www.britannica.com/technology/wind-tunnel>.

Maker.io Staff. 2021. Maker.io. *An Introduction to Arduino Libraries*. [Online] 21. 04 2021. [Dátum: 04. 12 2024.] <https://www.digikey.sk/en/maker/tutorials/2021/an-introduction-to-arduino-libraries>.

Nagel, Lauren. 2023. Types of Wind Tunnels and How They Work 2024. *TYTO ROBOTICS*. [Online] 15. August 2023. [Dátum: 5. August 2024.] <https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/types-of-wind-tunnels>.

Purple Tutor . 2023. Basic Concepts od Python Programming. *Purpletutor*. [Online] 1. 2 2023. [Dátum: 27. 1 2025.] <https://purpletutor.com/coding/basic-concepts-python/>.

Shea, Sharon. 2018. TechTarget. *techtarget.com*. [Online] December 2018. [Dátum: 3. September 2024.] <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/microcomputer>.

Tokyo Aircraft Instrument CO.,LTD. . 2021. Tokyo Aircraft Instrument CO.,LTD. . *What Is a Pitot Tube*. [Online] 2021. [Dátum: 09. 09 2024.] <https://www.tkk-air.co.jp/english/aerospace/air-data/pitot-tubes.html>.

Uttam, Raj Kumar. 2022. Types of Motherboards. *Geeks for geeks*. [Online] 24. Marec 2022. [Dátum: 3. September 2024.] <https://www.geeksforgeeks.org/types-of-motherboards/>.

W3 Schools. 2024. w3schools. *C++ Introduction*. [Online] W3 Schools, 2024. [Dátum: 4. 12 2024.] https://www.w3schools.com/cpp/cpp_intro.asp.