

NÁVRH IMPLEMENTÁCIE SENZOROV SYSTÉMU ARDUINO V MODELI DEMONŠTRAČNÉHO VETERNÉHO TUNELA

IMPLEMENTATION DESIGN OF ARDUINO SENSORS IN DEMONSTRATIVE WIND TUNNEL

Dávid Rilko

Air Transport Department, University of Zilina, Slovakia
david.rilko@gmail.com

Pavol Pecho

Air Transport Department, University of Zilina, Slovakia
pavol.pecho@fpedas.uniza.sk

Abstract – The intention of the paper is to acquaint the reader with the basics of aerodynamics and to clarify the theory of wind tunnels, their division, construction, functionality and today's use. The work also documents the construction process of a wind tunnel, which took place on Žilina Airport with cooperation with employees of the Department of Air Transport and its students. The work captures the process of tunnel design until its completion. The main point is the design of the wind tunnel measuring system. The work thoroughly explains the procedure for designing, connecting, programming and calibrating measuring elements and creating an overall system for measuring data for a closer understanding of aerodynamic events. The conclusion of the work is a comparison of the measuring system used in construction and the systems used in world research centres from a technical as well as an economical point of view.

Key words – aerodynamic tunnel, aerodynamic, measuring system, Arduino, elektrotechnic.

I. ÚVOD

Dizajn a navrhovanie nových prepravných prostriedkov nie len v leteckej doprave je v dnešnej dobe sprevádzané sériami simulácií a testov. S ich pomocou je možné navrhovať výsledný dopravný prostriedok do aerodynamicky dokonalého tvaru. To všetko sa odohráva ešte predtým, než sa vytvorí prvý reálny koncept. Veterné tunely prinášajú možnosť pochopenia aerodynamických javov už do samých začiatkov lietania. Sú neoddeliteľnou súčasťou pri pochopení dejov odohrávajúcich sa desiatky kilometrov vo vzduchu a to bez potreby odlepenia nôh od zeme.

Táto práca bližšie oboznamuje čitateľa so základnými zákonmi potrebnými pre pochopenie toku kvapalín ako aj aerodynamickými veličinami, ktoré sú neoddeliteľnou súčasťou aerodynamických tunelov. Taktiež je v práci vysvetlený princíp funkcie veterných tunelov, ich rozdelenie, popis jednotlivých častí ako aj spôsob určenia a mnoho ďalších. Približuje čitateľovi pohľad na aerodynamické tunely využívané vo výskumných centrách spoločne s rozvojom leteckého ako aj vesmírneho priemyslu.

Súčasťou práce je aj popis procesu výroby veterného tunela, ktorý sa uskutočnil na pôde Žilinského letiska

v spolupráci zamestnancov a študentov katedry leteckej dopravy. Práca zahŕňa popis výroby jednotlivých častí tunela s dôrazom na návrh a výrobu meracieho systému. Bližšie oboznamuje s meracími prvkami tunela ako sú senzory a výpočtová technika. Podrobne sleduje jednotlivé prvky systému z hľadísk ako sú ich programovanie, navrhovanie, kalibrovanie a realizácia zapojenia. Tak tiež rieši problémy vzniknuté v procese výstavby.

V závere je zohľadnenie výstavby ako aj návrhu meracieho systému z technického ako a ekonomického hľadiska a porovnanie kvality vytvoreného systému so systémami používanými v moderných aerodynamických tuneloch.

II. SÚČASNÝ STAV RIEŠENIA PROBLEMATIKY

Aerodynamický tunel používa jednoduchú teóriu podobnosti; všetky veterné polia tvorené tunelom sú rovnaké ako prirodzené prostredia skúmaných objektov tj. lietadiel, áut, rakiet. Prírodu je však ťažké replikovať no aj napriek tomu, ak pri objekte vystavenom určitej rýchlosti zachováme niekoľko podmienok, môžeme dostať spoľahlivé výsledky.

NASÁVACIA SEKCIA

Vstupná časť tunela konfuzorného tvaru slúži v prvom rade na nasmerovanie a kontrolovanie rýchlosti vzduchu vstupujúceho do testovacej sekcie. Zmenou pomeru plochy na vstupe a výstupe nasávania sa dosahuje požadované zrýchlenie. Nasávacia sekcia veterného tunela ďalej zabezpečuje stabilizáciu vzduchu na vstupe do testovacej sekcie. Stabilizácia je zabezpečená hladkým prechodom a plynulým zakrivením. Dôležitými parametrami sú dĺžka a výška nasávacej sekcie. Dĺžka by mala byť čo najväčšia aby sa minimalizoval vznik medznej vrstvy a tým sa zabránilo vzniku turbulencii.[3][15]

DIFÚZNA SEKCIA

Je umiestnená medzi testovacou sekciou a ventilátorom. Pri ťažnom type je pohon tunela umiestnený na jeho konci, keďže ma veľký vplyv na tvorenie turbulencii. Pri navrhovaní je dôležité zabezpečiť to, aby sa pri prechode vzduchu na takúto krátku vzdialenosť neoddelila medzná vrstva. Uhol a pomer medzi vstupnou a výstupnou časťou charakterizujú celkovú geometriu difúznej časti. [3][15]

TESTOVACIA SEKCIA

Je hlavnou časťou každého veterného tunela. Priamo v nej sú umiestnené skúmané objekty. Postupom rokov boli odskúšané rôzne tvary testovacích sekcií no žiadnemu sa nevyrovná obdĺžniková. Tento tvar je v rámci inštalácie skúmaných modelov, funkčnosti a umiestnenia senzorov najpraktickejší. Rozmery testovacej sekcie úzko súvisia s rozmermi iných častí tunela a cieľených dosahovaných rýchlostiach prúdenia. Kvalita toku vzduchu v testovacej sekcií reprezentuje celkový výkon veterného tunela.

POHONNÁ JEDNOTKA

Slúži ako pohon tunela pomocou ktorého je vzduch hnaný jeho časťami. Ak je tunel ťažného typu, smer prúdu je opačný a vzduch je naopak nasávaný cez všetky časti tunela. Na pohon sa zväčša používajú ventilátory s elektromotormi. Pri nadzvukových tuneloch je prúdenie zabezpečené pomocou tlakovej nádoby, ktorá sa po svojom naplnení plynom vypúšťa cez priestory tunela.

III. MERACIE VYBAVENIE AERODYNAMICKÝCH TUNELOV IDEÁLNY MERACÍ SYSTÉM

Jedným zo spôsobov ako začať navrhovanie systému pre meranie je popísať ho ako ideálny systém pre dosahovanie potrebných výsledkov. Ten by mal byť schopný zaznamenávať namerané dáta nepretržite s absolútnou presnosťou a prezentovať ich bez vzniku chýb. Medzi základné otázky patria: Aké problémy sa budeme snažiť riešiť a aké významné dáta bude systém generovať? V akom množstve a pri akej rýchlosti majú byť dáta merané? Ako majú byť získané dáta ďalej spracované? V akej forme majú byť prezentované? Aké chyby sú prípustné? Odpovede na tieto otázky nám objasnia: Požadovaný režim činnosti: statický, dynamický alebo oboje. Tvar vstupných údajov; tlak, teplota, požadovaná rýchlosť merania, deformácia atď. Potrebnú kapacitu dátového kanála. Rýchlosť a veľkosť pamäte procesora. Nástroje na prezentovanie dát a presnosť systému.

MERACIE PRVKY MODERNÝCH AERODYNAMICKÝCH TUNELOV

Firmy zaoberajúce sa ponukou vysoko-citlivých senzorov ako aj výpočtovej techniky nie len pre meranie vo veterných tuneloch, sú podniky HBM či PCB Piezotronics. Produkty týchto firiem pokrývajú senzory ako sú akcelerometre, prevodníky, tenzometre, zosilňovače, snímače zaťaženia a krútiaceho momentu či systémy na zber dát. Tak tiež ponúkajú služby spojené s meraním ako sú zisťovanie štruktúrálnej pevnosti, testovanie, analyzovanie dát či obsluha softwaru. Ich zameranie ma širokú škálu použitia v technickom odvetví, energiách, výskume a pod. Konkrétne firma PCB Piezotronics disponuje ponukou produktov určených výlučne pre veterné tunely od subsonických až po transonické.



Obrázok 56: Senzory firmy PCB Piezotronics
(zdroj: <https://www.pcb.com/Contentstor>)

3-KOMPONENTNÉ SENZORY SILY

Piezoelektrické senzory sily sú určené na meranie dynamiky a kvazistatických síl. Vyznačujú sa vysokou tuhosťou, rýchlou odozvou a opakovateľným výkonom ktorý im umožňuje zachytiť vysoké frekvencie a rýchlo sledovať prechodové udalosti ako sú napríklad nárazy. Ich vysoká tuhosť im umožňuje pretrvať opakujúce sa cykly bez únavy.

AKUSTICKÉ TLAKOVÉ MIKROFÓNY

Snímače merajú pulzovanie, prechodové a turbulentné akustické javy na leteckých prostriedkoch resp. iných konštrukciách. Taktiež sa používajú na meranie dynamického a akustického tlaku v lietadlách a raketách. Slúžia pre nízky odpor, vysoké výstupné napätie a vydržia aj nárazy počas oddelenia jednotlivých stupňov rakety.

TLAKOVÉ SENZORY

Na meranie tlakových impulzov s krátkou vlnovou dĺžkou je piezoelektrický snímač tlaku vybavený 0,5 ms odozvou. Čas odozvy snímača presne meria tlakové špičky z rýchlo stúpajúcich nárazových vln a javov veľmi vysokých frekvencií tlaku. Snímací prvok s priemerom 1 mm umožňuje meranie dopadajúcich tlakových vln s krátkou vlnovou dĺžkou.

AEROLAB

Popredná firma na výrobu malých veterných tunelov profesionálnej kvality pre akademické, súkromné a vojenské účely. Pobočka s rozlohou 20 000 štvorcových stôp zahŕňa projektovanie, obrábanie, zváranie, lakovanie a elektroniku výlučne pre vývoj a výstavbu širokého spektra aerodynamických tunelov a aerodynamických prístrojov. Ich výrobky pokrývajú otvorené aj uzatvorené tunely s rýchlosťami od nízkorychlostných až po podzvukové.[9]



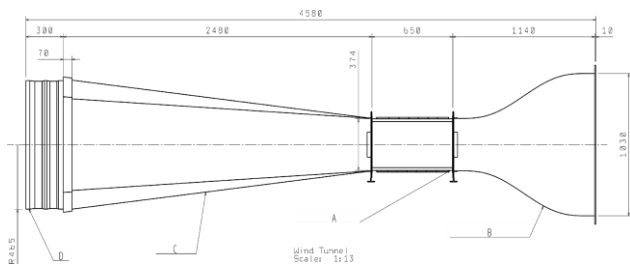
Obrázok 57: Otvorený tunel firmy AeroLab
(zdroj: www.aerolab.com)

IV. VÝSTAVBA TUNELA

Cieľom projektu bolo zostaviť aerodynamický tunel pre demonstračné edukačné účely a zhotoviť merací systém na sledovanie dejov, ktoré sa v tuneli počas experimentov odohrávajú. Proces výstavby sa odohrával na pôde Žilinskej Univerzity konkrétne v zrekonštruovaných dielňach na Žilinskom letisku. Prvým krokom výstavby tunela bol jeho návrh. Celkový dizajn tunela a s ním aj všetkých drevených komponentov tunela vypracoval vedúci práce Ing. Pavol Pecho PhD.

STAVBA DREVENÝCH SÚČASTÍ

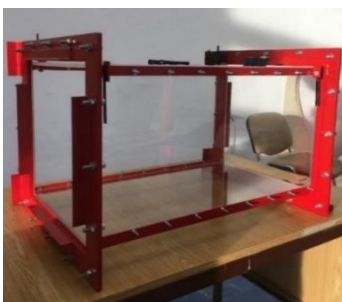
Jednotlivé časti tunela boli vytvorené prevažne z dreva, tvarovaného do požadovaných tvarov a rozmerov. Na nasávaciu a difúziu čast' boli použité tri milimetrové preglejky, ktoré boli ohýbané a lepené pomocou foriem a po zaschnutí vytvorili ¼ spomínaných častí. Na zlepenie 4 súčastí do celku bolo použité lepidlo na namáhané spoje. Konečná dĺžka tunela predstavovala 4500 milimetrov s prierezom ventilátora o veľkosti 940 milimetrov a nasávacou časťou v tvare štvorca s hranou dlhou 1000 milimetrov. Na Obrázku 2 je možné vidieť rozmery jednotlivých častí tunela.



Obrázok 58: Rozmery veterného tunela (zdroj: Ing. Pavol Pecho PhD.)

STAVBA KOVOVÝCH SÚČASTÍ

Zváranie všetkých kovových pásovín do tvaru testovacej sekcie bolo zabezpečené firmou Kobaltsky Welding. Konštrukcia sa skladala z dvoch rámov a vnútornej konštrukcie, ktoré boli medzi sebou spojené 8 mm skrutkami a maticami. Rámy boli skonštruované do tvaru písmena „L“, aby bolo možné ich pripojenie so zvyšnými časťami. Súčasťou testovacej sekcie boli aj štyri kusy plexiskiel z ktorých tri boli s konštrukciou spojené pomocou 4 mm skrutkami a maticami. Hlavičky matic sme z vnútornej strany zapustili aby bolo prúdenie čo najmenej turbulentné. Pre lepšiu viditeľnosť dymu bolo zavedené osvetlenie použitím LED pásov.



Obrázok 59: Testovacia sekcia (zdroj: autor)

VÝSTAVBA OPORNEJ KONŠTRUKCIE

Na vytvorenie podstáv pre všetky časti boli použité drevené hranoly. Hranoly boli povrchovo opracované hobl'ovačkou a narezané na požadované dĺžky a uhly. Takto vytvorené podstavy boli spojené s nasávacou a difúznou časťou pomocou závrtných matic, umiestnenými do hranolov a skrutkami prechádzajúcimi cez spomínané časti. Takýto spôsob bol použitý aj na spojenie s testovacou sekciou. Do rámov bolo vyvŕtaných 12 dier cez, ktoré viedli skrutky do závrtných matic umiestnených v drevných častiach. Posledným krokom výstavby bola konzervácia dreva použitím laku.



Obrázok 60: Zhotovený veterný tunel (zdroj: autor)

V. NÁVRH A IMPLEMENTÁCIA MERACIEHO VYBAVENIA

Pred začiatkom výstavby bolo potrebné rozvrhnúť, ktoré veličiny majú byť skúmané a následne vybrať všetky potrebné senzory, výstupné zariadenia a od ich náročností aj výpočtovú techniku. Ako alternatíva bol vybraný programovateľný mikropočítač Arduino. Jeho úlohou je zaznamenávať atmosférickú teplotu a tlak v testovacej sekcií. Pre ich porovnanie by mal systém merať aj hodnoty teploty a tlaku z nerušeného pol'a. Taktiež má zaznamenávať a vyhodnocovať rýchlosť prúdenia pomocou celkového a statického tlaku, a zaznamenávať sily vytvárajúce telesom, vznikajúce v dôsledku prúdu vzduchu. Všetky nemerné dáta má následne vypísať prostredníctvom výstupných zariadení.

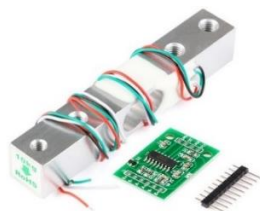
ARDUINO

Vývoj Arduina začal v roku 2005, keď sa v talianskom Interaction Design Insitute v meste Ivrea rozhodli vytvoriť lacný a jednoduchý vývojový set pre študentov. Medzi študentmi sa Arduino rýchlo uchytilo a tvorcovia ho rozšírili do celého sveta. Vďaka svojej open-source platforme a rozmanitosti zariadení má všestranné použitie. Na tento projekt bola použitá vývojová doska Arduino Mega 2560. Zväčšením rozmerov prináša Mega priestor pre väčší a výkonnejší čip a zároveň priestor pre viac použiteľných vstupov.

MERANIE SÍL VYTVORENÝCH MODELOM

Systém merania má zabezpečovať snímanie síl vytváraných telesom v dôsledku prúdu vzduchu v smere prúdenia a kolmo naň. Vytvorený prevodový mechanizmus prenáša sily pôsobiace telesom na senzory. Šlo o dva digitálne senzory hmotnosti, fungujúce na princípe malého menenia odporu pri ohybe materiálu. Z miesta ohybu materiálu sú vedené 4 vodiče

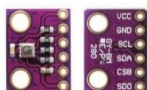
z ktorých sa signály musia previesť z analógových na digitálne pomocou 24 bitového AD prevodníka HX711. Pri použití správnej pracovnej frekvencie dosahuje senzor presnosť $\pm 0,0002\%$.



Obrázok 61: Senzor hmotnosti s AD prevodníkom HX711 (zdroj: <https://www.banggood.com/HX711-Module-20kg-Aluminum>)

MERANIE ATMOSFÉRICKEHO TLAKU A TEPLA

Digitálny senzor BMP280 od firmy Bosch zabezpečuje meranie celkového atmosférického tlaku a teploty. Senzor dokáže merať tlak v rozsahu od 300 do 1100hPa s presnosťou ± 1 hPa a okolitú teplotu v rozsahu -40 až $+85^{\circ}\text{C}$ s presnosťou 1°C . Komunikácia s doskou môže byť zabezpečená dvoma spôsobmi a to prostredníctvom I2C Bus alebo SPI pinov.



Obrázok 62: Senzor atmosférického tlaku a teploty BMP280 (zdroj: <https://forum.arduino.cc/index.php?topic=654763.0>)

MERANIE RÝCHLOSTI PRÚDENIA VZDUCHU

Na meranie rýchlosti prúdu vzduchu v testovacej sekcii sa okrem Arduino senzora použil aj kvapalinový manometer. Ten, na určenie dynamického tlaku sleduje tlak celkový a statický, ktoré získava z pitot-statickej trubice. Dôvodom použitia aj analógového merania je získanie údajov pre porovnanie dát z elektronických senzorov, ich korekciu a tým dosahovanie presnejších výsledkov. Elektronický snímač dynamického tlaku pracuje na rovnakom princípe, teda výpočte rozdielu tlakov.

V projekte bol použitý senzor typu MPXV5004DP s rozšírením na pripojenie k Arduino doske. Pracovný tlak senzora je 3,93 kPa kde s presnosťou $\pm 1,5\%$, s rozsahom do 16kPa.



Obrázok 63: Senzor dynamického tlaku s pitot-statickou trubicou (https://hobbyking.com/en_us/hk-pilot-analog-air-speed-sensor-and-pitot-tube-set-update-pitot-tube.html?)

MERANIE OTÁČOK VENTILÁTORA

Použitý bol senzor fungujúci na princípe vyžarovania infračerveného žiarenia. Súčasťou senzora je dvojica diód Tx a Rx, slúžiacich ako vysielateľ a prijímač infračerveného žiarenia. Úlohou senzora je zaznamenať prítomnosť objektu nachádzajúceho sa pred ním a podľa toho vypísať hodnotu 0 alebo 1. Úlohou programu je spočítať všetky zaznamenané hodnoty 1 v priebehu jednej sekundy. Ich vypísaním dostaneme RPS alebo inak otáčky za sekundu.



Obrázok 64: Infračervený senzor (zdroj: <https://techfun.sk/produkt/infracervený-senzor-pre-vyhybanie-sa-prekazkam/>)

VÝPIS ÚDAJOV PROSTREDNÍCTVOM LCD DISPLEJOV

LCD displeje sú lacnou a efektívnou alternatívou pre výpis údajov pri práci s arduino doskou. Vypisujú len slovné a číselné informácie, založený na vkladaní do riadkoch a stĺpcoch. Na projekt boli použité dva displeje o veľkosti 20x4 pričom jeden vypisoval hodnoty otáčok za sekundu, otáčok za minútu a percentuálny výkon pohonnej jednoty. Druhý slúži pre pridanie sledovania vibrácií v budúcnosti.



Obrázok 65: LCD displej 20x4 (zdroj: <https://circuit.rocks/lcd-20x4-character-module-blue-backlight.html>)

VÝPIS ÚDAJOV PROSTREDNÍCTVOM TFT DISPLEJA NEXTION

Dotykové TFT displeje ponúkajú omnoho viac možností výpisu a vytvárania užívateľského rozhrania ako spomínané LCD. Na rozdiel od nich dokážu okrem číselných a slovných údajov vytvárať aj mnoho ďalších nástroj pre výstup informácií. Ako vhodný bol použitý displej NX8048T070 od firmy Nextion so 7 palcovou obrazovkou. Súčasťou displeja je aj softvér Nextion Editor, pomocou ktorého je možné vytváranie užívateľského prostredia pre displeje značky Nextion. Tie si stačí vybrať z rôznych možností ako sú text, číslo, desatinné číslo, obrázok, graf, budík, časovač, tlačidlo, QR kód atď. Na displeji sú vypisované údaje tlaku a teploty v testovacej sekcii, teploty a tlaku mimo tunela, hodnoty vzlaku a odporu a rýchlosť prúdenia vzduchu.

EXPORT ÚDAJOV

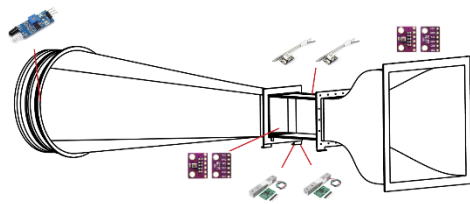
Na prácu s nameranými dátami mimo veterného tunela prípadne pre ich použitie na ďalší výskum je potrebné ich exportu z arduino dosky do tabuľkového softwaru. V ňom je možné sledovať konkrétne zmeny teploty, tlaku, vztlaku a odporu so zmenou rýchlosti prúdenia. Vhodným softvérom je PLX-DAQ, ktorý prevádza dáta z dosky priamo do programu Microsoft Excel. Dáta sú odosielané s frekvenciou na ktorej beží celkový program. Softvér ponúka aj možnosť časovača, ktorý sa spustí po začatí zaznamenávania dát.



Obrázok 66: Zhotovená riadiaca skrinka (zdroj: autor)

NÁVRH RIADIACEJ SKRINKY A CELKOVÉ ZAPOJENIE MERACIEHO SYSTÉMU

Pre bezpečné uschovanie dosky a displejov bola navrhnutá riadiaca skrinka zhotovená 3D tlačou. Takto vytvorená skrinka dosahuje potrebnú pevnosť na uschovanie potrebných zariadení, keďže sa na vyplnenie jej stien použila metóda tlačenia v mriežke, patriaca k najpevnejším. [10] Súčasťou skrinky je aj potenciometer pripojený k frekvenčnému meniču. Ním je možné meniť otáčky ventilátora a tým regulovať rýchlosť prúdenia v tuneli. Na prepojenie medzi doskou a senzormi boli použité sieťové UTP káble. Umiestnenie senzorov je bližšie zobrazené na obrázku nižšie.



Obrázok 67: Umiestnenie senzorov v rámci veterného tunela (zdroj: Ing. Pavol Pecho PhD.)

VI. KALIBRÁCIA SENZOROV

Pri kalibrácii sa bolo potrebné zamerať na senzor dynamického tlaku, kde poloha pitot-statickej trubice vplyva na výsledné dáta. Potrebné bolo aj určiť hustotu vzduchu vztiahnutú na výšku letiska a teplotu vzduchu v pracovných dielňach.

Pri kalibrácii váh bolo potrebné určiť, či majú byť vypísané hodnoty tiaže vytvárajúce vloženým modelom do prevodového mechanizmu, alebo majú po vložení vypisovať hodnotu 0. Z merania bolo taktiež potrebné odčítať váhu spomínaného mechanizmu.

VII. ZHODNOTENIE NÁVRHOV

Realizácia projektu trvala skupine šiestich ľudí približne 3 mesiace a viac ako 1500 pracovných hodín práce. Boli použité finančné zdroje vo výške približne 3500€, ktoré boli získané z grantového projektu Žilinskej univerzity pre doktorandov a mladých vedcov. Ďalšie prostriedky boli získané z katedry leteckej dopravy a súkromných sponzorov. Na meracie vybavenie boli použité prostriedky vo výške 325,6€. Proces programovania, navrhovania, zapojenia a ostatných úkonov spojených pri vytváraní trval niekoľko mesiacov.

NÁVRH VYLEPŠENIA A OPTIMALIZÁCIE SYSTÉMU

Pre presnejšie údaje je jedným z návrhov vylepšenia použitie kvalitnejších a presnejších senzorov. Použitím mikropočítača s výšou frekvenciou a rozlišovacou schopnosť je možné zvýšiť tok dát a skvalitniť výsledky. Ďalšou možnosťou rozšírenia systému je pridanie možnosti sledovania vibrácií skúmaného modelu a následne použitie dát na vytvorenie vibračných charakteristík. Tie sú dôležité v leteckej sfére pri výrobe nových typov lietadiel ako resp. ich jednotlivých častí.

K ďalším možným rozšíreniam tunela patrí aj vytvorenie prídavnej časti, v ktorej by bolo možné skúmať vplyv vetra na malé bezpilotné lietajúce prostriedky. Výsledkom by boli korekcie a následná kalibrácia týchto prostriedkov pre civilné aj vojenské účely.

VIII. ZÁVER

Výsledkom bakalárskej práce „Návrh implementácie senzorov systému v modeli demonštračného veterného tunela“ je návrh a s ním aj popis procesu výstavby aerodynamického tunela so zameraním na vytvorenie meracieho systému. Výstavba bola realizovaná na pôde Žilinského letiska LVVC v novo zrekonštruovaných dielňach.

V práci je opísaný postup vytvorenia meracieho systému a môže slúžiť ako podrobný návod pri vytváraní rovnakých resp. podobných systémov obsahujúcich použité senzorové vybavenie. Výstupom tohto systému sú hodnoty rýchlosti prúdenia vzduchu, ich atmosférické veličiny ako sú teplota a tlak. Taktiež sú sledované hodnoty síl vytvorených skúmaným modelom vplyvom prúdom vzduchu a otáčky pohonnej jednotky. Všetky sledované dáta sú vypisované prostredníctvom výstupných zariadení. Prílohy obsahujú použitý program pre ďalšiu prácu. Vytvorený systém spĺňa všetky podmienky určené pri jeho počiatočnom navrhovaní a je plne kompatibilný s vytvoreným tunelom. Výkonnostné obmedzenia systému sú v limitácii pre účely edukačné a demonštračné, ako bolo určené. Priemerná presnosť jednotlivých zariadení sa pohybuje na vysokej úrovni čo vytvára systém s celkovou presnosťou $\pm 0.25\%$. S dosahovanou presnosťou je výbornou pomôckou pre ďalší rozvoj a výskum študentov Žilinskej univerzity.

Skupina ľudí ako aj autor práce, podieľajúcim sa na projekte, sa aj po dokončení výstavby ďalej participujú na jeho vylepšení a zdokonalení, medzi ktoré patria: použitie výkonnejšej pohonnej jednotky pre dosahovanie vyšších rýchlostí, pridanie senzora vibrácií na skúmanie vibračných charakteristík a pridanie prídavnej časti na sledovanie vplyvu vetra na UAV.

PodĎakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu **KEGA 048ŽU-4/2020** s názvom "Zvyšovanie kľúčových kompetencií v oblasti technológie údržby lietadiel prostredníctvom transferu progresívnych metód do vzdelávacieho procesu".

REFERENCIE

- [1] Bugaj, Martin. *Aeromechanika I*. Bratislava : DOLIS, 2015. ISBN 978-80-970419-3-9.
- [2] Zbyšek, Voda. *Průvodce světem arduino*. s.l. : HW Kitchen , 2015. ISBN 978-80-87106-90-7.
- [3] Jewel B. Barlow, William H. Rae, Alan Pope. *Low-speed wind tunnel testing*. s.l. : John Wiley & Sons, 1999. ISBN 0-471-55774-9 .
- [4] D.M.Sykes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. A new wind tunnel for industrial aerodynamics*. 2, 1977, Zv. I.
- [5] Piezotronics, PCB. PCB Piezotronics. www.PCB.com. [Online],2020.https://www.pcb.com/Contentstore/mktgcontent/LinkedDocuments/Aerospace/AD_WindTunnel_LOWRES.pdf.
- [6] NASA. Pitot-static tube. *resources.saylor* . [Online] 2011. <https://resources.saylor.org/wwwresources/archived/site/wp-content/uploads/2011/07/ME301-7.2.2.pdf>.
- [7] Arduino. Arduino Forum. *Arduino* . [Online] 2020. <https://forum.arduino.cc>.
- [8] Covey, Robert E. *Wind tunnel data processing*. s.l. : AGARDograph 85, 1964.
- [9] LLC, AeroLab. AeroLab. www.aerolab.com. [Online] 2020. <https://www.aerolab.com/products/educational-wind-tunnel-ewt/>.
- [10] Pavol Pecho, Viliam Ažaltovič, Branislav Kandra, Martin Bugaj,. Introduction study of design and layout of UAVs 3D printed wings in relation to optimal lightweight and load distribution. *Transportation Research Procedia*. 2019, Zv. 40.
- [11] Chanetz, Bruno. A century of wind tunnels since Eiffel. *Comptes Rendus Mécanique*. 8, 2017, Zv. 345, ISSN 1631-0721.
- [12] NASA.gov. NASA. [Online] NASA Ames Research Center, 03.02.2005. <https://www.nasa.gov/centers/ames/multimedia/images/2005/nfac.html>.
- [13] Kandra, Branislav. *Letecké prístroje 2*. Žilina : EDIS, 2001. ISBN 80-7100-824-9.
- [14] Smith, Alan. G. *Introduction to Arduino: A piece of cake!* s.l. : Alan. G. Smith, 2011. ISBN-13: 978-1463698348.
- [15] Bradshaw, R.C. Pankhurst. The design of low-speed wind tunnels. *Progress in Aerospace Sciences*. 1964, Zv. 5, ISSN 0376-0421.
- [16] Zanon, E.-S. Flow characteristics in low-speed wind tunnel contractions: Simulation and testing. *Alexandria Engineering Journal*. 4, 2018, Zv. 57, ISSN 1110-0168.
- [17] Bugaj, M. 2011. Systémy údržby lietadiel. vyd. - V Žiline : Žilinská univerzita, 2011. - 142 s., ilustr. - ISBN 978-80-554-0301-4
- [18] Bugaj, M. 2005. Aircraft maintenance - new trends in general aviation. *Promet - Traffic - Traffico*, 17(4), pages 231-234.
- [19] Holoda, Š., Pecho. P., Janovec M. & Bugaj, M. 2017. Modification in Structural Design of L-13 "blanik" Aircraft's Wing to Obtain Airworthiness. *Transport Problems* 7(1), pages 77-86

Bc. Dávid Rilko – narodený v Bardejove absolvoval v roku 2017 Súkromné Gymnázium v Bardejove, následne od roku 2017 študoval na Žilinskej univerzite v Žiline odbor letecká doprava.