

# SYSTÉM MERANIA AERODYNAMICKÝCH SÍL V DEMONŠTRAČNOM VETERNOM TUNELI

## AERODYNAMIC FORCE MEASUREMENT SYSTEM IN DEMONSTRATION WIND TUNNEL

**Patrik Veľký**

Air Transport Department, University of Zilina, Slovakia  
patrik.velky98@gmail.com

**Pavol Pecho**

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

**Abstract** - The purpose of the article was to solve a part of the wind tunnel, specifically part of the measurement of wind forces. The work deals with the mechanism by which it is possible to determinate the values of bouyancy, downforce and drag of the object, which is attached to the system. The work takes into account the conditions under which the mechanism had to be constructed. Selection of suitable material due to price and quality, dimensional conditions, method of measurement system itself and output from the mechanism. In addition to the design itself, the scope of work also included a summary of the current state in the field of aerodynamics and wind tunnels, an analysis of current requirements for the operation of wind tunnels and a final summary from a technical and economic point of view. At the beginning of the work are summarized the basics of general aviation and the importance of aerodynamics associated with it. The second part of the work is a wind tunnel, its importance for aviation and then its design and construction of a functional mechanism for measuring the required parameters. Due to the fact that the wind tunnel was built by students and employees of the University, the work includes its own practical experience.

**Key words:** wind tunnel, aerodynamic force measurement system, test section.

### I. ÚVOD

Účelom tejto bakalárskej práce bolo vytvorenie plne funkčného systému, ktorý by bol schopný v požadovaných parametroch merať aerodynamické sily, pôsobiace na teleso, umiestnené vo veternom tuneli.

Dôležitou časťou tohoto systému je ale samotný veterný tunel, pretože vzhľadom naň je potrebné prispôbiť ako rozmerové tak aj funkčné parametre. Pred začatím návrhu systému, bolo teda potrebné navrhnuť veterný tunel, prípadne ho aj postaviť, aby bol merací systém dokonale prispôbený podmienkam tunelu. Podmienkou bakalárskej práce bola aj účasť

na návrhu a realizácii aerodynamického tunela a v neposlednom rade tiež znalosť elementárnych poznatkov z oblasti aerodynamiky, elektrotechniky, fyziky a mechaniky.

### II. AERODYNAMIKA

Aerodynamika je vedný odbor zaoberajúci sa pohybom a vplyvom tekutín v relácii s prostredím. Z histórie vieme, že jednou z najdôležitejších častí leteckého vývoja je štúdium aerodynamického pôsobenia tekutín na teleso. Z počiatku sa používali dve metódy a to: analytická a experimentálna. Postupom času sa zapojila aj výpočtová metóda, podmienená vývojom výpočtovej techniky. Dodnes však zostávajú problémy hlavne s turbulentným prúdením, na ktoré sa musia používať mimoriadne výkonné počítače. Spojením týchto troch metód sa dostávame k aerodynamickému tunelu, ktorý umožňuje spojiť všetky výhody používaných metód. [1]

Experiment je jedna z najdôležitejších vedeckých metód. Počas experimentu zasahuje riešiteľ do problému a snaží sa zreprodukovať získané výsledky. [2] Letecká doprava si v súčasnosti udržuje vedúce postavenie ako v rýchlosti a pohodlí tak aj v bezpečnosti, ktorá je najdôležitejším aspektom. [3]

Aerodynamika sa stala oblasťou, pred ktorou stoja výzvy, neprebádané miesta ďalšieho vývoja, čím poskytuje neskutočný priestor na realizáciu aj tých najodvážnejších pokusov a ideí. [4] Aj to je jedným z dôvodov stavby aerodynamických tunelov.

### III. NÁVRH VETERNÉHO TUNELA

Návrh takého zariadenia ako je práve veterný tunel si vyžaduje množstvo výpočtov, znalostí a kompromisov. Je dôležité si určiť spôsob využitia tunela a následne od toho odvodiť konštrukčné riešenia. Ďalej je potrebné brať do úvahy rozmerové parametre a tiež finančné náklady. Základom všetkého je voľba testovacej sekcie a jej rozmery, ktoré musia byť dostatočné na to, aby sa v nej dokázali robiť experimenty, ktorých

výsledky budú relevantné a porovnateľné príp. rovnaké s reálnymi hodnotami.

Na výber je testovacia sekcia otvorená alebo zatvorená, príp. veľmi moderná tzv. štrbinová. Vzhľadom na budúce využitie, konštrukčnú jednoduchosť a finančné náklady je najvhodnejšou voľbou uzatvorená testovacia sekcia. Jej rozmery sa určili na tvar ležiaceho kvádra so štvorcovým vstupom o rozmeroch 600 mm x 350 mm x 350 mm. Testovacia sekcia je teda dostatočne veľká na umiestnenie objektov na meranie, ktoré dokážu simulovať skutočné podmienky a tiež dostatočne malá na to, aby v nej nevznikali veľké tlakové straty.

Ďalšou voľbou bolo navrhnutie zvyšnej časti tunela. Existujú 2 základné typy tunelov vzhľadom na spôsob prúdenia tekutiny. Obydva typy, otvorený a zatvorený, majú svoje výhody aj nevýhody, ktoré museli byť zohľadnené.

Tabuľka 1: Otvorený okruh

Výhody	Nevýhody
Nižšie náklady na návrh a stavbu	Možnosť nasatia nečistôt
V prípade použitia dymu v tuneli, pre vizualizáciu toku, nie je problém s preplachovaním, výfuk pôjde do atmosféry	Pre danú veľkosť tunela a rýchlosti v ňom je potrebné oveľa väčšie množstvo energie na prevádzku
	Hlučnosť prevádzky

Tabuľka 2: Uzatvorený okruh

Výhody	Nevýhody
Jednoduchšia indikácia kvality toku a nezávislosť na podmienkach v budove či miestnosti	Vyššie počiatočné náklady na návrh a stavbu
Menšie množstvo energie potrebnej pre prevádzku pri daných rozmeroch a rýchlosti tekutiny	V prípade vizualizácie toku pomocou dymu je potrebné riešenie ako tunel vyčistiť
	Pri vyššom využití je potrebné chladenie a výmena vzduchu

Zohľadnením všetkých kritérií je lepšou voľbou stavba tunela s otvoreným okruhom.

#### IV. STAVBA TUNELA

Po návrhu, nákupe všetkých potrebných materiálov a prístrojov sa mohla uskutočniť samotná stavba tunela, ktorá prebiehala v dielňach Žilinskej univerzity v Žiline, na Katedre leteckej dopravy.

Stavba bola rozdelená do niekoľkých etáp. Prvou etapou bola príprava podkladov a makiet na presné vyrobenie všetkých častí tunela. Na ich vytvorenie sa používali pevné drevené materiály, opracovávané príslušnými nástrojmi do potrebného tvaru.

Následne sa zhotovovali všetky časti tunela, formou laminovaných preglejok. Hrúbka jednej steny tunela dosahuje 15 mm. Nasávací časť má tvar štvorca o ploche 1 m<sup>2</sup>, ktorý sa zužuje a napája na testovaciu sekciu. Týmto konfúznym tvarom sa dosiahne potrebné zrýchlenie tekutiny.

Testovacia sekcia je vytvorená z kovových rámov a stien z plexiskla. Zváranie konštrukcie nebolo uskutočňované v dielňach katedry, ale vo firme vyučeným pracovníkom. Po dodaní tejto holej konštrukcie k nej boli pripevnené plexisklá a potrebná elektronika.

Výstup z testovacej sekcie je vedený cez difúzor. Táto časť tunela je štvorcového tvaru, priliehajúceho z jednej strany k testovacej sekcii, voľne prechádzajúceho do tvaru kruhu, a to z dôvodu, že pohonná jednotka, ktorá je pripevnená na konci difúzora je ventilátor kruhového tvaru. Difúzny účinok má za následky spomalenie prúdu vystupujúceho vzduchu.

Pohonná jednotka má vlastný stojan a je pripevnená k difúznej časti rozoberateľnými spojmi. Formou ventilátora umožňuje chod tunela a v najužšom mieste dosahuje rýchlosť prúdiacej tekutiny 107 km/h.

Po dokončení stavby sa tunel nalakoval a vybrúsil, a to z dôvodu zníženia možnosti zvrátenia prúdu tekutiny.

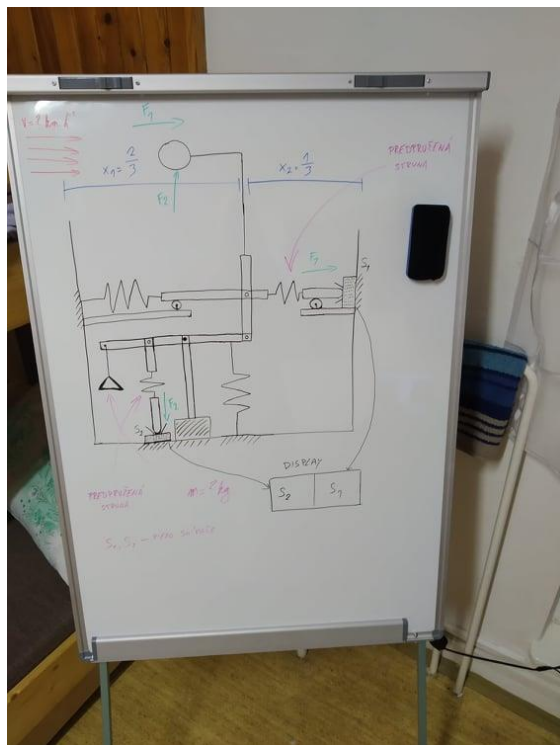


Obrázok 1: Veterný tunel (zdroj: Michal Hríz)

## V. NÁVRH SYSTÉMU MERANIA AERODYNAMICKÝCH SÍL

Počas dokončovacích prác stavby tunela, bolo možné navrhnuť systém, ktorý by rozmerovo súhlasil s konkrétnym tunelom. Návrh spočíval v dosiahnutí čo najpresnejších výsledkov, ktoré by bolo možné dosiahnuť v určitých rozmeroch, zložitosti a finančných nákladoch. Vzhľadom na vysokú cenu samotnej konštrukcie tunela, musela byť zvolená veľmi jednoduchá ale nie menej účinná metóda merania.

Prvotné návrhy boli príliš nákladné a zložité. Skvelým riešením sa zdala možnosť použitia silomerov pripevnených na testovaný objekt. Teleso, ktoré by sa vplyvom pôsobenia tekutiny pohybovalo, by pomocou prevodov naťahovalo stupnicu silomera, ktorá by ukazovala momentálnu silu. Na presné odmeranie vertikálnych ale aj horizontálnych síl by však bolo za potreby troch silomerov, čo by malo za následok zložitosť a možné predimenzovanie systému. Okrem toho, v závislosti od veľkosti telesa a síl na neho pôsobiacich by sa museli pravidelne meniť silomery a ich stupnice. Veľké sily by mohli spôsobiť poškodenie systému zatiaľ čo veľmi malé by neboli relevantne odčítateľné.



Obrázok 2: Prvý návrh systému merania aerodynamických síl (zdroj: Patrik Veľký)

Problémom sa stal aj samotný pohyb telesa v testovacej sekcii. Riešením bolo využitie elektronického systému, ktorý by dokázal zaznamenať aj príliš veľké a aj príliš malé pôsobiace sily bez nutnosti výmeny častí systému. Použitím diferenciálnych snímačov sa tiež vyriešil pohyb telesa v testovacej sekcii, ktorý sa obmedzil iba na pružnosť materiálu. Výstupom takýchto snímačov je elektrický signál, vhodný na počítačové spracovanie.

S využitím softvéru Arduino sa môžu signály zo snímačov využiť na vypracovanie jednoduchých grafov a hodnôt v reálnom čase.

Jednoduchosť konštrukcie si vyžadovala vytvorenie pákového mechanizmu, cez ktorý by sa prenášali sily pôsobiace na teleso v testovacej sekcii, priamo na diferenciálne snímače. Navrhnutá konštrukcia je schopná prenášať a zaznamenávať pôsobiace sily vo vertikálnej aj horizontálnej rovine, zodpovedajúce vztľaku, prítlaku a odporu telesa.

Princíp činnosti takéhoto snímača je jednoduchý. Prechodom napätia snímačov sa vstupné hodnoty voči výstupným nelíšia. Vplyvom zaťaženia sa deformuje snímač, vzniká vnútorný odpor, ktorý mení hodnotu napätia výstupu voči vstupu. Vyhodením závislosti hodnôt zaťaženia voči hodnotám zmeny napätia sa dá dostať jednoduchá stupnica vyjadrujúca veľkosť pôsobiacej sily na snímač.

## VI. STAVBA SYSTÉMU MERANIA AERODYNAMICKÝCH SÍL

Pod testovacou sekcii veterného tunela bola špeciálne pre potreby systému vytvorená plošina, ku ktorej môže byť pripevnený. Pre zaistenie pevnosti, jednoduchšej opravovateľnosti a možnosti ľahkej montáže a demontáže bol pre základnú konštrukciu použitý hliník. Hliník je svojimi vlastnosťami vhodným materiálom pre tento systém, nakoľko vytváranie či vyvíjanie a vytvorenie závitov je veľmi jednoduché. Prevodový mechanizmus je so snímačmi prepojený skrutkovicami M4. Prenos síl je teda zabezpečený pevným materiálom, schopným prenášať malé a veľké zaťaženia.

Prepojenie pákového prevodu a samotného telesa je použitím železnej gulatiny o priemere 8 mm. Táto gulatina je vedená do testovacej sekcii, zlomená o 90°, pričom stabilitu zlomenia udržiavajú 2 skrutky, ktoré zamedzujú akémukoľvek pohybu. Pripojenie telesa ku gulatine je zabezpečené závitom M8, ktorý bol pre potreby ručne vyrobený.

Sily pôsobiace na teleso sú prenášané pákovými prevodmi na snímače, ktorých výstupy sú vedené do systému Arduino, ktorý ich spracováva a vyhodnocuje na zobrazovacej jednotke typu LCD. Výstupom systému je teda graf vztľaku, resp. prítlaku a odporu telesa. Z vypočítaných hodnôt je určený maximálny a minimálny možný odpor, ktorý sa dá vo veternom tuneli dosiahnuť. Tieto hodnoty sú pre:

- Maximálny odpor dutej polgule: 66,99 N.
- Minimálny odpor kvapky:  $2,66 \cdot 10^{-3}$  N.

Kalibrácia systému sa vykonáva počítačovo po osadení telesa do testovacej sekcii, kde sa hodnota tiaže telesa rovná jeho prítlaku a resetuje sa na hodnotu 0. V opačnom prípade by sa namerané hodnoty vo vertikálnej rovine líšili od tej skutočnej o veľkosť tiaže telesa.

Do úvahy treba brať aj chyby, ktoré môžu pri takomto meraní vzniknúť. Môžu to byť chyby spôsobené experimentátorom či chybou prístroja. Chyby prístroja sa dajú odstrániť prípadným použitím kvalitnejších prístrojov, ktoré by mali väčšiu citlivosť či kratšiu dobu odozvy. Ľudské chyby, ako napríklad chyba odčítania sa musia pri každom meraní brať do úvahy.

### Chyby merania

Ako pri každom systéme na svete, aj pri tomto sa vyskytujú určité chyby. Za tieto chyby sa považuje rozdiel medzi skutočnou hodnotou a hodnotou nameranou. Dôvodom tejto odchýlky je množstvo faktorov a ich obmedzením či iba minimalizáciou sa výsledky približujú k čo najpresnejšiemu údaju o skutočnej hodnote. Táto presnosť nie je daná iba chybou prístroja ale aj pozorovateľom. Zatiaľ čo chyby prístroja sa dajú odstrániť použitím kvalitnejších materiálov, chyby pozorovateľa rieši problematika ľudského faktora.

Ľudský faktor je široký pojem, ktorý skúma interakciu medzi ľuďmi, strojmi a prostredím s cieľom zlepšiť ľudskú výkonnosť a minimalizovať chyby. [5]

Celková chybovosť, resp. odchýlka systému merania aerodynamických síl dosahuje hodnôt približne 0,25%. Takáto presnosť je postačujúcou pri meraní v experimentálnom veternom tuneli a hodnoty sa môžu považovať sa presné a užitočné.



Obrázok 3: Systém merania aerodynamických síl  
(zdroj: Patrik Veľký)

## VII. ZÁVER

Výsledkom tejto bakalárskej práce je porozumenie základnej problematike v oblasti aerodynamických tunelov, schopnosť riešenia problémov a vyhotovenie funkčného systému na meranie aerodynamických síl vo veternom tuneli. Vytvorenie takéhoto veľkého projektu si vyžaduje prácu všetkých členov, využitie ich vedomostí a zručností. Pre stavbu tunela sa využívali peniaze z udeleného grantu vo výške 1500€ a tiež príspevkov našich sponzorov či samotných členov projektu.

### PodĎakovanie

Práca v dielňach Katedry leteckej dopravy ma obohatila o množstvo skúseností a preto by som sa chcel poďakovať ľuďom, ktorí nám to umožnili. Menovite sa chcem poďakovať členom projektu, bez ktorých by nebolo možné postaviť tento tunel. Ďakujem Ing. Pavlovi Pechovi PhD. Ing. Ivete Škvarekovej, Ing. Viliamovi Ažaltovičovi, Bc. Michalovi Hruzovi a študentovi 1. stupňa leteckej dopravy Davidovi Rilkovi.

### 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] Anderson J. D., J. (1991). *Fundamentals of Aerodynamics, 2nd ed.* New York.
- [2] Ažaltovič, V. (2018). Riadiace systémy a avionika pre UAV. *Diplomová práca.* Žilina.
- [3] Bugaj, M. (2012). Možnosti redukcie aerodynamického odporu lietadla. *Habilitačná práca.* Žilina.
- [4] Škvareková, I. (2016). Negatívne dopady leteckých nehôd na cestujúcich. Žilina.
- [5] Škvareková, I. (2018). Objektívne meranie pozornosti pilota pomocou technológie eye track pri IFR letoch. *Diplomová práca.* Žilina.
- [6] Bugaj, M. 2015. *Aeromechanika 1: základy aerodynamiky.* Bratislava : DOLIS, 2015. - 208 s., ilustr. - ISBN 978-80-970419-3-9.
- [7] Bugaj, M. 2005. Aircraft maintenance - new trends in general aviation. *Promet - Traffic - Traffico*, 17(4), pages 231-234.

Patrik Veľký – narodený 4.3.1998 v Šali, vyštudoval Strednú odbornú školu letecko-technickú v Trenčíne ako mechanik – avionik. V roku 2017 nastúpil na Žilinskú univerzitu v Žiline v odbore letecká doprava.