



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav letadlové techniky

**System pro měření sil v řízení letadla –
elektronika**

**Control Force Measurement Module –
Electronics**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2021

Helena CHMELÍČKOVÁ

Studijní program: LETECTVÍ A KOSMONAUTIKA
Studijní obor: Letadlová a kosmická technika
Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Pačes, Ph.D.

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Chmeličková** Jméno: **Helena** Osobní číslo: **457267**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Letectví a kosmonautika**
Studijní obor: **Letadlová a kosmická technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Systém pro měření sil v řízení letadla - elektronika

Název diplomové práce anglicky:

Control Force Measurement Module - Electronics

Pokyny pro vypracování:

Cílem projektu je zprovoznit dva prototypy systému pro sběr dat ze souboru tenzometrů, které se připevňují na řídicí prvky letadla (řídicí páka a nožní ovládní směrovky). Systém je funkční a jeho první varianta je otestovaná. V projektu se předpokládá změna senzorů, DAQ systému sběru dat z tenzometrů, AD převodníků, systému zpracování dat a SW vybavení. Součástí práce je zobrazovací modul realizovaný jako aplikace na platformě Android. Systém by měl být na konci práce otestován a zkalibrován.
Téma může být upraveno podle aktuálního zaměření studentů.

Seznam doporučené literatury:

Detailní změny zadání a jeho alternativy je možné najít na:
https://docs.google.com/document/d/1-60ccJOHHA-Z67IDQs3QJNU2C893EE6pf8zs_lbE0Vo/edit?usp=sharing
Pačes: Projektová dokumentace k modulu, schémata elektronických modulů, SW moduly a knihovny.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Pavel Pačes, Ph.D., 13138

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **30.07.2021**

Platnost zadání diplomové práce: _____

doc. Ing. Pavel Pačes, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Robert Theiner, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „System pro měření sil v řízení letadla – elektronika“ vypracovala samostatně pod vedením doc. Ing. Pavla Pačese, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze

.....

Helena Chmelíčková

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat svému vedoucímu diplomové práce, kterým je doc. Ing. Pavel Pačes, Ph.D., především za jeho ochotu, trpělivost, připomínky, spolupráci a věnování svého času během práce a konzultací. Zvláštní poděkování patří také Ing. Robertu Theinerovi, Ph.D. za podporu a spolupráci.

V Praze

.....

Helena Chmelíčková

Anotační list

Jméno autora:	Helena CHMELÍČKOVÁ
Název DP:	Systém pro měření sil v řízení letadla – elektronika
Anglický název:	Control Force Measurement Module – Electronics
Rok:	2021
Studijní program:	Letectví a kosmonautika
Obor studia:	Letadlová a kosmická technika
Ústav:	Ústav letadlové techniky
Vedoucí DP:	doc. Ing. Pavel Pačes Ph.D.
Bibliografické údaje:	počet stran 74
	počet obrázků 40
	počet tabulek 12
	počet příloh 2
Klíčová slova:	měření sil, letoun, tenzometr, váhový senzor, řízení letadla
Keywords:	force measurement, airplane, strain gauge, weight sensor, aircraft control

Anotace: Cílem této diplomové práce je zprovoznit dva prototypy systému pro sběr dat ze souboru tenzometrů, které se připevňují na řídicí prvky letadla (řídicí páka a nožní ovládání směrovky). Systém měří síly vnášené pilotem do řízení letounu během letu nebo při pozemních zkouškách. V projektu jsou použity váhové senzory, DAQ systém sběru dat z tenzometrů, AD převodníků, systému zpracování dat a SW vybavení. Systém je zkalibrován a je ověřeno, že je funkční.

Abstract: This diploma thesis aims on assembling and testing of two prototypes of strain gage measurement systems, which are attached to the aircraft controls (control lever and pedal control of the rudder). The system measures forces introduced by the pilot into the airplane controls during the flight or during ground tests. In the project are used weight sensors, DAQ strain gage system, AD converter, data processing system and SW equipment. The system is calibrated and verified to be functional.

Obsah

1. ÚVOD	8
2. SÍLY V ŘÍZENÍ STANOVENÉ DLE PŘEDPISŮ	9
2.1. MEZNÍ HODNOTY SIL OD PILOTA	9
2.2. ZATÍŽENÍ SILAMI OD PILOTA	9
2.3. POŽADAVKY NA KONSTRUKCI A PEVNOST PRVKŮ V ŘÍZENÍ	11
3. PRINCIP MĚŘENÍ SÍLY V ŘÍZENÍ	12
3.1. PRINCIP ODPOROVÝCH TENZOMETRŮ.....	13
3.1.1. <i>Geometrická deformace vodiče</i>	13
3.1.2. <i>Vlastnosti a druhy odporových tenzometrů</i>	14
3.2. POŽADOVANÉ VLASTNOSTI.....	16
3.3. RUŠIVÉ VLIVY PŘI MĚŘENÍ TENZOMETRICKÝMI SNÍMAČI	16
3.4. VZNIK MECHANICKÉHO NAPĚTÍ	17
3.5. PRINCIP UMÍSTĚNÍ SENZORŮ	17
3.6. PRINCIP UMÍSTĚNÍ SENZORŮ PRO RŮZNÉ DEFORMACE	18
3.7. MĚŘÍCÍ MŮSTKY	19
3.7.1. <i>Wheastoneův můstek</i>	20
4. ANALOGOVĚ-DIGITÁLNÍ PŘEVOD	23
4.1. DĚLENÍ A/D PŘEVODNÍKŮ A JEJICH CHYBY.....	24
4.2. PRINCIPY A/D PŘEVODNÍKŮ	24
5. POŽADAVKY NA KONSTRUKCI A PEVNOST	26
5.1. ANALÝZA ŘIDIDEL.....	26
6. MOŽNÉ ZPŮSOBY ŘEŠENÍ	27
6.1. MOŽNÉ ŘEŠENÍ SYSTÉMU PRO RUČNÍ ŘÍZENÍ	27
6.2. MOŽNÉ ŘEŠENÍ SYSTÉMU PRO NOŽNÍ ŘÍZENÍ	29
6.3. MOŽNÝ ZPŮSOB ŘEŠENÍ Z HLEDISKA ZAPOJENÍ	31
7. VYBRANÝ NÁVRH A ZPŮSOB VLASTNÍHO ŘEŠENÍ	32
7.1. VYBRANÝ NÁVRH PRO RUČNÍ ŘÍZENÍ.....	32
7.2. VYBRANÝ NÁVRH PRO NOŽNÍ ŘÍZENÍ	33
7.3. VYBRANÁ ELEKTRONIKA	33
8. REALIZACE SYSTÉMU	35
8.1. BLOKOVÉ SCHÉMA	42
8.2. VÝVOJOVÝ DIAGRAM	42
9. POPIS KALIBRACE	44
9.1. VLASTNÍ MĚŘENÍ	44
9.1.1. <i>Systém zapojení do dvou pŕlmůsteků</i>	44
9.1.1. <i>Systém zapojení senzorů do plného můstku</i>	46
9.1.2. <i>Měření zatížení senzorů pro ruční řízení</i>	48
9.2. OVĚŘENÍ FUNKCE	51
9.2.1. <i>Systém zapojení do dvou pŕlmůsteků</i>	51

9.2.2. <i>Systém zapojení senzorů do plného můstku</i>	52
9.2.3. <i>Senzory pro ruční řízení</i>	52
10. ZÁVĚR	55
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	56
SEZNAM OBRÁZKŮ	58
SEZNAM TABULEK	60
PŘÍLOHA 1	61
PŘÍLOHA 2	64

1. Úvod

Cílem této práce je navrhnout, vyrobit a zprovoznit dva prototypy systému pro sběr dat ze souboru tenzometrů, které se připevňují na řídicí prvky letadla – řídicí páka a nožní ovládání směrovky. To spočívá ve výběru akčních členů a jejich připevnění na konstrukci letadla. V budoucnu by toto zařízení mělo pomoci leteckým technikům v ověření funkčnosti a dostatečné tuhosti a pevnosti řididel nových letounů, ale hlavně umožnit ověřit, zda je systém přenosu sil navržený tak, že síly, které pilot musí překonávat, spadají do rozsahů předepsaných předpisy. Maximální síly, které se mohou na řididlech vyskytnout, vycházejí z předpisů UL-2, LTF-UL, CS VLA a FAR-23.

První část této diplomové práce je věnována teoretickým poznatkům, které jsou nezbytně nutné pro vývoj vlastního systému pro měření sil v řízení letadla.

Ve druhé části práce je popsáno, jaké jsou možné způsoby řešení, vybraný vlastní návrh, jeho následná realizace, kalibrace a ověření funkce.

2. Síly v řízení stanovené dle předpisů

Tato kapitola je věnována požadavkům na síly v řízení, které jsou stanoveny předpisy.

Pro výpis velikosti jednotlivých sil v řízení se vychází ze čtyř předpisů a to UL-2, LTF-UL, CS VLA a FAR-23. Pokud se jeví potřebné síly pilota nepříjemně vysoké, musí být dodržení mezních hodnot sil od pilota prokázáno kvantitativními zkouškami.

2.1. Mezní hodnoty sil od pilota

Síly od pilota nesmí v žádném případě překročit maximální hodnoty pro soustavy řízení aerodynamicky uvedené v tabulce 1.

Tabulka 1 Mezní hodnoty sil od pilota

Síly [daN]	Podélné				Příčné				Směrové				Klápky, podvozek apod.			
	UL2	CS VLA	FAR 23	LTF UL	UL2	CS VLA	FAR 23	LTF UL	UL2	CS VLA	FAR 23	LTF UL	UL2	CS VLA	FAR 23	LTF UL
Krátkodobě	20			20	10			10	40			40	10			10
Řídicí páka		20	26,7			10	13,3									
Volant – obě ruce		25	33,4			20	22,2									
Volant – jedna ruka		25	22,2			20	11,1									
Nožní										40	66,7					
Jiné ovladače														20		
Dlouhodobě	2	2	4,45	2	1,5	1,5	2,2	1,5	10	10	8,9	10				

2.2. Zatížení silami od pilota

Všechny řídicí soustavy k bezprostřednímu řízení letounu kolem jeho podélné, příčné nebo svislé osy a jiné soustavy řízení, které mají vliv na chování letounu za letu, stejně tak jako místa jejich uchycení nebo podepření, musí být navrženy až po dorazy na provozní zatížení, která jsou definována v tabulkách 2 a 3 sil od pilota. Pro nekonvenční soustavy řízení (např. řízení postranní řídicí pákou) mohou být odpovědným úřadem připuštěny nižší síly od pilota, jestliže bude prokázáno, že síly v uvedené tabulkách 2 a 3 nemohou být použity [1].

Tabulka 2 Provozní zatížení dle UL-2 a LTF-UL

Řízení	Působící síla [daN]		Způsob zavedení sil (předpokládá se použití jednoduché řídicí páky)
	UL-2	LTF-UL	
Výškové řízení	20	35	Tahem a tlakem na řídicí páku
Příčné řízení	15	20	Boční příčný pohyb řídicí páky
Směrové řízení a jiná řízení ovládaná nohama	30	90	Tlak směrem dopředu na pedál směrového řízení
pomocné řízení	15	-	-

V předpise UL 2 je dále uvedeno, že řídicí soustava pro zatáčení musí být navržena pro zatížení 600 N na každý pedál, při současném působení na oba pedály dopředu.

Tabulka 3 Provozní zatížení dle CS-VLA a FAR-23

Řízení		Maximální síly nebo kroutící momenty (D=průměr volantu) [daN]		Minimální síly nebo kroutící momenty [daN]		
		CS-VLA	FAR-23	CS-VLA	FAR-23	
Křídélka	Řídicí páka	30	30,418	17,8	18,16	
	Volant	22,2 D	22,7 D	17,8 D	18,16 D	
Výškové kormidlo	Řídicí páka	74	75,818	44,5	45,4	
	Volant	Symetrický	89	90,8	44,5	45,4
		Nesymetrický			44,5	45,4
Směrové kormidlo		89	90,8	58	68,1	

V tabulkách 2 a 3 jsou uvedeny síly provozní. Pro pevnostní výpočty je třeba tyto hodnoty vynásobit příslušnými koeficienty bezpečnosti.

2.3. Požadavky na konstrukci a pevnost prvků v řízení

V předpisech jsou také uvedeny požadavky na konstrukci a pevnost prvků v řízení. Je potřeba, aby byla zajištěna co nejnižší hmotnost při zachování dostatečné pevnosti a také aby byla zajištěna dostatečná tuhost. Nízká tuhost by totiž měla nepříznivý vliv na kritické rychlosti a vysoká tuhost by způsobila špatnou citlivost prvků v řízení [1].

Rozsah pohybu řídicích ploch, který může pilot použít, nesmí být v žádném případě nebezpečně zmenšen pružnou deformací řídicího obvodu [1].

Každé řízení a všechny ovládací prvky musí být tak uzpůsobeny a označeny, aby umožňovaly snadné ovládání a bylo zabráněno záměně zřejmé funkce nebo nechtěné činnosti [1].

3.Princip měření síly v řízení

Tato kapitola je věnována teorii o principech měření sil v řízení.

Při letových a pozemních zkouškách se na měření síly na řídicí páku, v příčném řízení, měření zatížení táhla v podélném a příčném řízení a ověření síly na řídicí páce používají tenzometrické snímače. Jsou to přístroje pro měření tenze, mechanického namáhání a jím vyvolaného mechanického napětí [2].

Pro účely měření síly se využívá princip elektronického vážení. Během působení síly je nutné tuto fyzikální veličinu převést na elektronicky zpracovatelný signál. Schéma převodu analogového signálu na digitální je u všech snímačů stejný. Nejprve je snímána informace ve formě signálu přímo nebo nepřímo odpovídající síle působící na snímač, následuje zesílení signálu a jeho digitalizace v A/D převodníku. Číslicový signál se následně zpracuje na podobu vhodnou pro přenos. Přenosový modul pošle informaci na zobrazovací část, kde dojde k vyhodnocení, uložení nebo zobrazení údajů uživateli [3].

Základem běžného elektrického tenzometru bývá odporový tenzometr, což je pasivní čidlo, které měří mechanické prodloužení. Změny prodloužení jsou v tenzometru převáděny na změny elektrického odporu. Je-li vodič tenzometru pevně spojený s povrchem měřeného namáhaného objektu, má stejné deformace jako objekt. Tedy při natahování se zvětšuje jeho délka, zmenšuje průřez a podle použitého materiálu se mění i jeho měrný elektrický odpor [2].

U kovových odporových tenzometrů je měrný elektrický odpor jejich materiálu prakticky nezávislý na deformaci, tedy rezistivita ρ je konstantní. Na změny odporu kovového tenzometru mají pak vliv jen rozměry jeho vodiče. U polovodičových odporových tenzometrů, v nichž vodičem je například křemíkový pásek, se výrazněji projevuje piezorezistivní jev, tj. závislost měrného odporu na mechanické deformaci [3].

3.1. Princip odporových tenzometrů

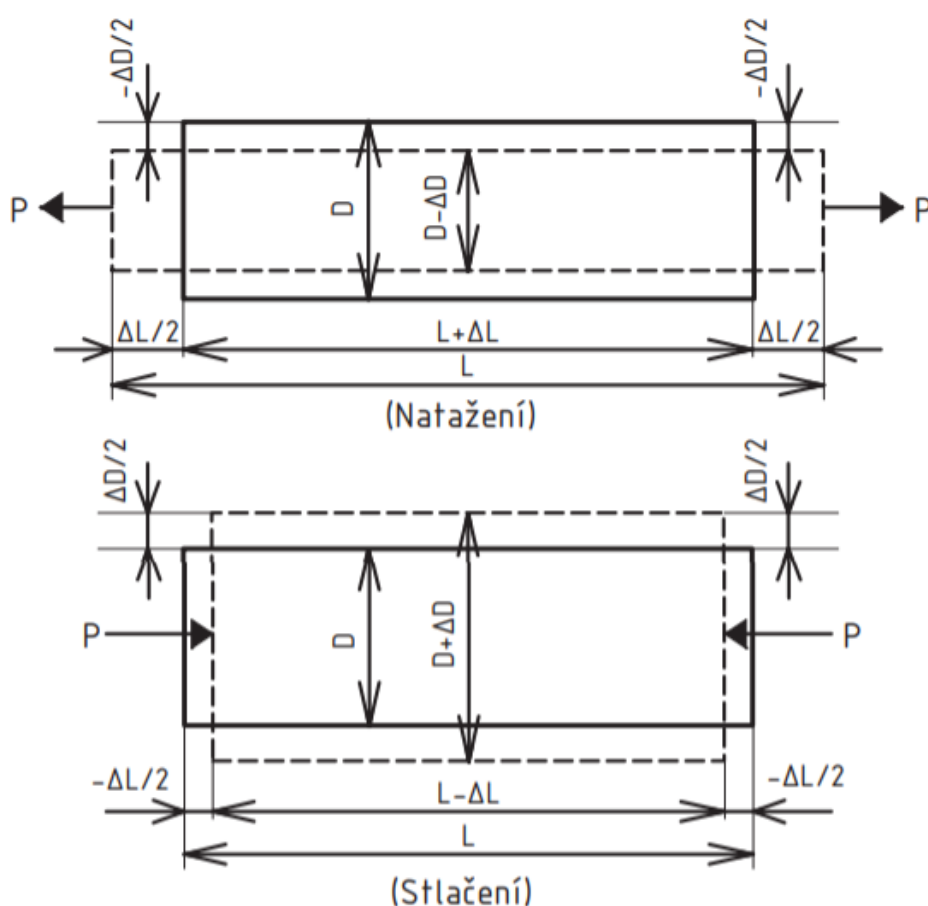
V následující kapitole je popsán princip změny odporu tenzometru vlivem deformací, vznik mechanického napětí v objektech, jeho druhy a možnosti připojení samotného tenzometru do měřícího obvodu [4].

3.1.1. Geometrická deformace vodiče

Princip geometrické deformace vodiče je na obrázku 1 a spočívá v tom, že vlivem tlakové nebo tahové síly ve směru osy vodiče se délka vodiče l zmenší nebo zvětší o rozdíl Δl , zatímco průměr vodiče D se zvětší nebo zmenší o hodnotu D . Tím se změní i odpor vodiče, který je dán vztahem:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad [\Omega, \Omega, m, m, m^2] \quad (1)$$

Mění se tedy délka vodiče l a průřez vodiče S [4].



Obrázek 1 Princip geometrické deformace vodiče [4]

3.1.2. Vlastnosti a druhy odporových tenzometrů

Důležitým parametrem odporových tenzometrů je tenzometrická konstanta K , která je dána poměrem relativní změny odporu snímače k relativní změně délky:

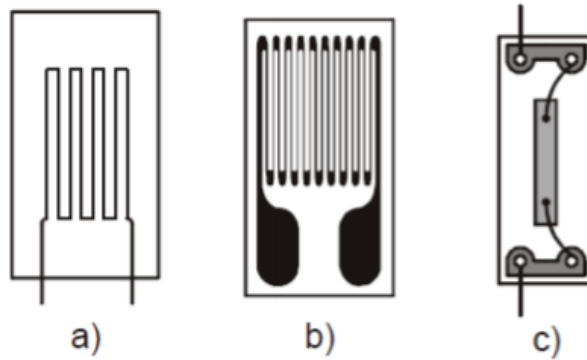
$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} [-] \quad (2)$$

Tenzometrická konstanta se liší podle materiálu. U kovových tenzometrů je kladen důraz na minimální mikrostrukturální změny a minimální teplotní závislost. Tyto tenzometry se vyrábějí z konstantanu ($K = 2,05$), karmy ($K = 2,1$) nebo platiny a wolframu ($K = 4$). Vedle kovových tenzometrů existují i polovodičové, které mají vyšší tenzometrickou konstantu K (125 pro křemík typu P), ale také větší teplotní závislost [2].

Co se týká provedení kovových odporových tenzometrických snímačů, existují tři základní uspořádání:

- drátkové,
- fóliové,
- naprašované [2].

Všechny zmíněné typy jsou ukázány na obrázku 2. Vždy se jedná o destičku, na které je různým způsobem provedena odporová cesta. Nejčastěji se používají fóliové tenzometry vyráběné z fólií tloušťky řádově mikrometrů umístěných na pružných izolačních podložkách. K nalepení na deformovaný objekt slouží speciální lepidla zaručující přenos deformací z měřeného objektu na tenzometr. Maximální možná měřená deformace je do 0,5 %, protože za touto mezí může dojít ve struktuře odporového materiálu snímače k nevratným změnám, které změní parametry tohoto snímače. Typický základní odpor kovových tenzometrů je 120 Ω , 350 Ω nebo 1000 Ω [3, 4, 5].



Obrázek 2 Mechanické provedení tenzometrických snímačů:
 a) drátkový, b) fóliový, c) naprašovaný [6]

První tenzometry, které se začaly používat, byly kovové drátkové. Drátky tenzometru mívají průměr okolo 0,01 mm, jsou přilepeny na nevodivé podložce, jedná se o speciální papír a jejich konce jsou s přívodními vodiči spojeny svařením. Po drátkových tenzometrech přišly tenzometry fóliové, u nichž je na místo drátku přilepena k papíru naleptaná fólie, na které leptáním dostaneme požadovaný tvar. Fólie jsou vyráběny ze stejných materiálů jako drátkové, mezi ně patří například konstantan. Fólie mají tloušťky v rozmezí od 0,001 mm do 0,01 mm. Všude kde je nutné měřit se zvýšenou přesností, se využívají fóliové tenzometry. Dalšími odporovými tenzometry jsou tenzometry polovodičové. Základem těchto snímačů jsou pásy vyříznuté z monokrystalů germania nebo křemíku. Hlavním rozdílem oproti fóliovým a drátkovým tenzometrům je ten, že velikost odporu nezávisí na rozměrech snímače, ale na množství nečistot v krystalu snímače. Krom toho, že polovodičové tenzometrické snímače mají vysokou citlivost, je jejich velkou výhodou, že můžeme vyrobit velmi malý polovodičový snímač, který bude mít odpor větší než velké drátkové snímače [2].

3.2. Požadované vlastnosti

Tenzometrický odporový snímač se používá k měření povrchového napětí materiálu součásti. Vlastnosti snímače jsou ovlivněny použitým odporovým materiálem, který musí splňovat určité podmínky:

- Citlivost jednotlivých snímačů vyjádřená poměrnou změnou odporu, musí být co největší.
- Celkový odpor snímače musí být co největší, aby se co nejvíce eliminoval vliv odporu v měřicím obvodu a jejich změny byly co nejmenší. Jedná se hlavně o kabely a svorky.
- Snímač by měl mít co nejmenší teplotní koeficient odporu, aby byly chyby vzniklé vlivem kolísání teploty co nejmenší.
- Termoelektrický efekt se nesmí projevit na místech, kde je drátek připájen k přívodu.
- Drátek musí být správně tepelně zpracován, aby nebyl křehký a dal se připájet k součásti.
- Důležité je, aby měl drátek, pokud možno, v co největším rozmezí lineární závislost mezi poměrnou deformací a změnou odporu drátku.

Je nutné vybrat materiál, který bude vyhovovat co nejvíce výše uvedeným požadavkům [7, 8].

3.3. Rušivé vlivy při měření tenzometrickými snímači

- Teplota: Ovlivňuje nejen vodivost materiálu tenzometru, ale její změna způsobuje i teplotní roztažnost tenzometru. Nejčastějším způsobem kompenzace vlivu teploty je vhodné spojení více tenzometrů do můstku. Proud tekoucí tenzometrem z vyhodnocovacích obvodů musí být také zvolen dostatečně malý, aby tenzometr zahříval jen zanedbatelně.
- Tečení (creep): Tenzometr, na který působí konstantní mechanické zatížení, po čase ztrácí citlivost. Je to způsobeno jevy v materiálech tenzometru, měřeného objektu a lepidla.
- Hystereze: Samotný tenzometr má obvykle zanedbatelnou hysterezi. Větší hysterezi může vykazovat materiál, na který je tenzometr nalepen.
- Vlhkost: Hygroskopická nosná podložka mění s obsahem vody své rozměry. Také některá lepidla mění s vlhkostí své vlastnosti. Po

nalepení tenzometru je třeba jej překrýt ochrannou proti vlhkosti. Pro tento účel se užíval i včelí vosk.

- Elektromagnetické pole: Elektrickou složku pole lze snadno odstínit. Problémy může způsobovat silné střídavé magnetické pole a s ním spojená indukce v přívodních kabelech [7, 8].

3.4. Vznik mechanického napětí

Deformace pevného tělesa ε je výsledkem působení mechanického napětí σ , což je síla působící na jednotkovou plochu tělesa. Vztah mezi mechanickým napětím a deformací se řídí Hookovým zákonem:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \text{ [Pa]} \quad (3)$$

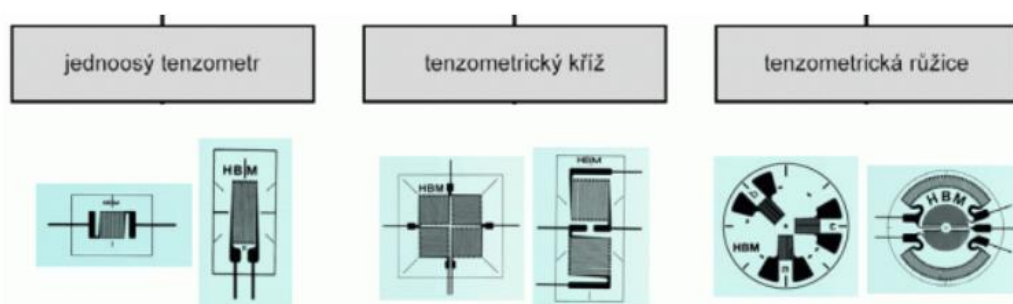
kde σ je mechanické napětí, ε je deformace tělesa a E je Youngův modul pružnosti materiálu, což je materiálová konstanta, jejíž typické hodnoty pro hlavní průmyslové materiály můžeme vidět v tabulce 1. Pokud je tedy materiál podroben tahové nebo tlakové síle, prodlouží se nebo se zkrátí v podélném směru a v příčném se smrští, popřípadě roztáhne. Poměr mezi relativním prodloužením nebo zkrácením v podélném směru a relativním zkrácením nebo prodloužením v příčném směru se nazývá Poissonův poměr a je vyjádřen takto [4, 9]:

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right| [-] \quad (4)$$

kde $\varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L}$ nebo $-\frac{\Delta L}{L}$ a $\varepsilon_2 = \frac{\Delta D}{D}$ nebo $-\frac{\Delta D}{D}$.

3.5. Princip umístění senzorů

Při měření působících sil je nutné vždy správně natočit tenzometr do daného směru působení. Pokud je nutné najednou měřit působící sílu či deformace ve více směrech, využívá se dnes tenzometrů obsahujících již více meandrů natočených do různých směrů. Znázorněno na obrázku 3 [2].



Obrázek 3 Rozdělení fóliových tenzometrů pro různé druhy měření [2]

Základní je jednoduchý tenzometr umožňující měřit pouze v jednom směru (např. v ose x), zatímco tenzometrický kříž již umožňuje měřit směry x i y . Pro měření v různých úhlech (např. 45°) pak slouží tenzometrická růžice nebo někdy seskupení například tří klasických tenzometrů na jedné podložce vzájemně pootočených o 45° [2].

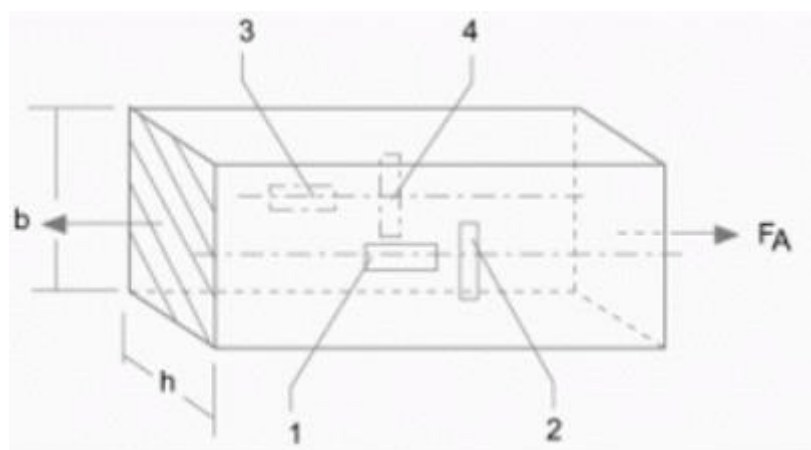
3.6. Princip umístění senzorů pro různé deformace

Pro to, aby se tenzometry mohly využít, musí se nejdříve správně připevnit. K tomu se používají speciální tmely a lepidla, které nezvětšují chybu měření svou teplotní roztažností. Obvykle je dodává každý výrobce a prodejce tenzometrů. Pro měření různých sil a deformací se používá určitého vhodného zapojení termistorů s co největší citlivostí a přesností. Na obrázcích 4, 5 a 6 je naznačeno měření čtyřmi tenzometry 1 až 4, obvykle zapojených do můstku, upevněných na namáhaném nosníku, který je ohýbán silou F_v . Podle toho, v jaké směru jsou tenzometry upevněny, měří různé působící síly. Různé pozice připevnění tenzometrů 1 až 4 měří různé deformace nosníku [2].

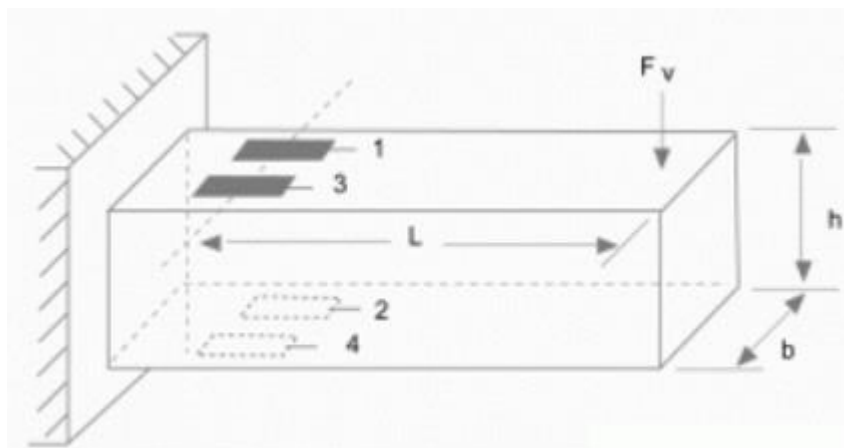
Existují tři možnosti, jak může působící síla deformovat měřený objekt:

- ohybová deformace,
- smyková deformace,
- torzní deformace [2].

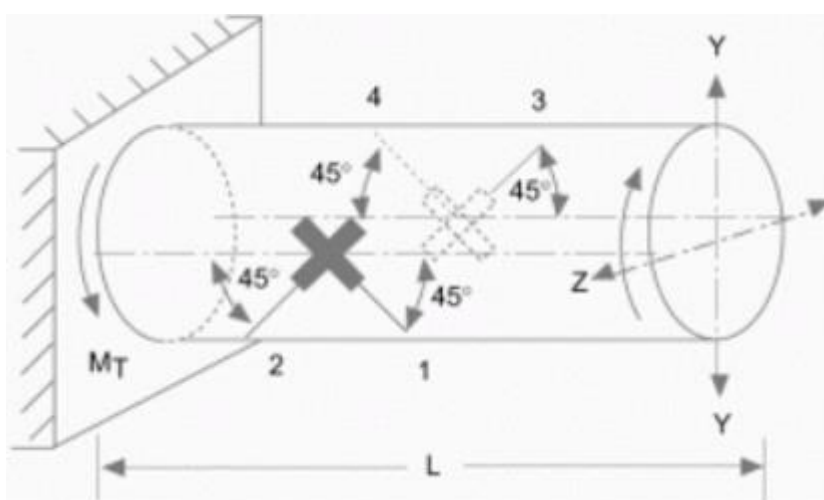
Tomu pak odpovídají i způsoby měření, a především vztahy pro výpočet potřebných veličin [2].



Obrázek 4 Měření axiální deformace [2]



Obrázek 5 Měření ohybu na nosníku [2]



Obrázek 6 Měření torzní deformace použitím dvou "dvojitých" křížových tenzometrů pootočených o 45° [2]

3.7. Měřicí můstky

Protože změny odporu tenzometrického odporového snímače vyvolané v důsledku jeho deformace jsou velmi malé (řádově $m\Omega$), je nutné tyto snímače zapojovat do měřicích můstků. Metoda vyhodnocení velikosti odporu pomocí měřicího můstku patří do tzv. nulových metod měření při kterých měřicí přístroj má funkci nulového indikátoru [3].

Existují 2 nejčastější typy měřicích můstků vhodných pro měření odporů:

- Thompsonův můstek – vhodný pro měření odporů malých hodnot,
- Wheatstoneův můstek – vhodný pro měření odporů středních hodnot.

Pro přesné měření se tenzometry obvykle zapojují do Wheatstonova můstku, ve kterém nevyhodnocujeme celkovou hodnotu odporu, ale pouze její změnu [3].

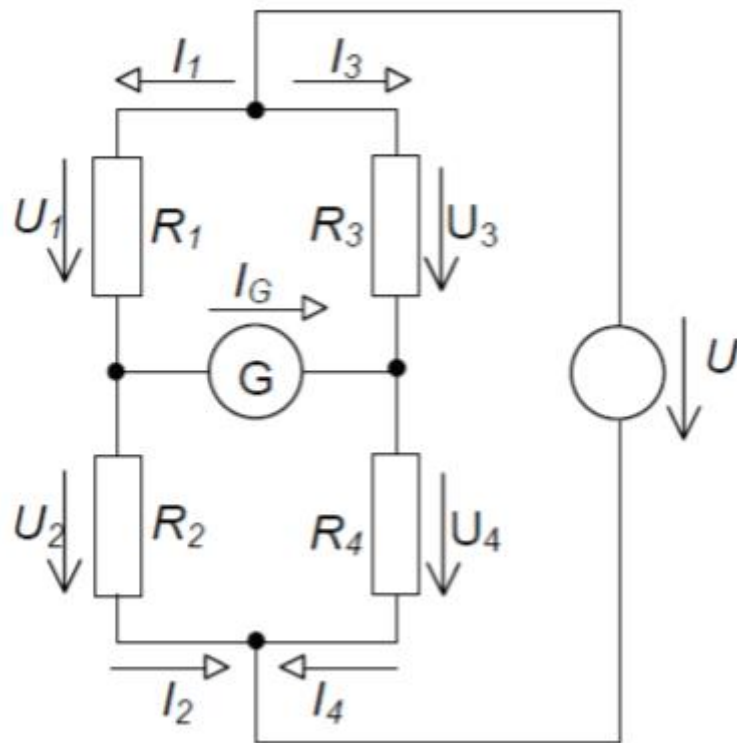
Existují tři způsoby můstkového zapojení:

- čtvrtmostové,
- půlmostové,
- plnomostové [3].

Pro účely přesného měření s vysokou stabilitou u statického zatížení se ve velké míře využívá plnomostové zapojení. Většina komerčně vyráběných tenzometrických snímačů se prodává v konfiguraci čtyř čidel s možností variabilního zapojení. Plnomostové zapojení poskytuje výhody anulujícího činitele nelinearity, čtyřnásobné citlivosti, nulové chyby vlivem teploty i zanedbatelné chyby přívodů. Zapojením tenzometrů do plného můstku se omezí vlivy rušení jako je rozdílná teplotní roztažnost materiálů nebo parazitní teplotní závislosti odporu tenzometru [3].

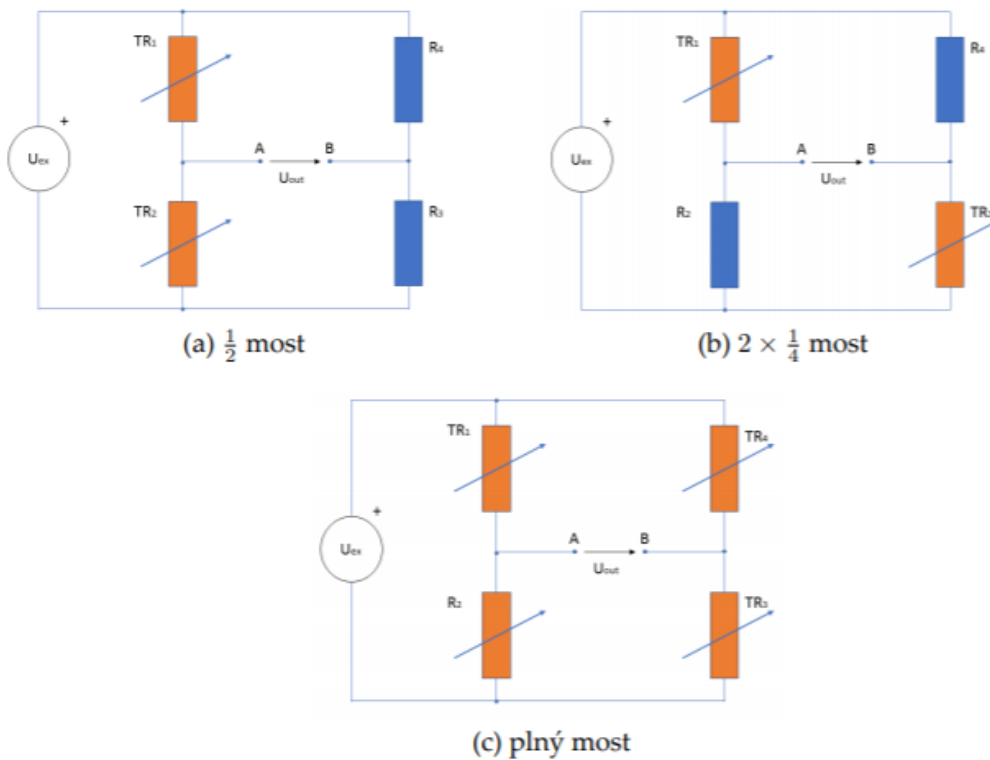
3.7.1. Wheastoneův můstek

Jedná se o nejznámější můstek používaný k měření odporů. Je vhodný k měření odporů středních hodnot (10^{-1} až $10^6 \Omega$). Je tvořen čtyřmi odpory a nulovým indikátorem. Napájen může být zdrojem napětí nebo proudu. Dosahuje přesnosti až 0,01 % pro laboratorní můstek a pro technický můstek dosahuje přesnosti až 1 %. Schéma Wheatstoneova můstku je na obrázku 7 [3].



Obrázek 7 Wheastoneův můstek [6]

Další způsoby můstkového zapojení jsou znázorněny na obrázku 8.



Obrázek 8 Možné konfigurace Wheastoneova můstku [10]

Plný můstek je složený ze dvou větví obsahující rezistory o odporech R_1 a R_3 a rezistory o odporech R_2 a R_4 , které jsou připojeny ke stejnosměrnému zdroji napětí U . Tyto větve lze považovat za dělič napětí. V případě vyváženého můstku nesmí procházet ampérmetrem v obvodu elektrický proud. To znamená, že ve shodě se schématem zobrazeným na obrázku 7, ve kterém jsou vyznačeny elektrické proudy, musí platit

$$I_A = 0 \quad (5)$$

Mezi uzly musí být nulový rozdíl potenciálů, takže napětí na rezistorech R_1 a R_3 musí být stejné a současně napětí na rezistorech o odporech R_2 a R_4 musí být stejné. Pak platí

$$U_1 = U_2 \text{ a současně } U_3 = U_4 \quad (6)$$

$$R_1 \cdot I_1 = R_2 \cdot I_2 \text{ a současně } R_3 \cdot I_3 = R_4 \cdot I_4 \quad (7)$$

Na základě prvního Kirchhoffova zákona platí

$$R_1 \cdot I_1 = R_2 \cdot I_2 \text{ a současně } R_3 \cdot I_1 = R_4 \cdot I_2 \quad (8)$$

Výsledná podmínka pro vyvážený můstek

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} \quad (9)$$

V případě nevyváženého můstku prochází ampérmetrem elektrický proud a napětí mezi uzly bude:

$$\Delta U = U \left(\frac{R_3}{R_1 + R_3} - \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) \quad (10)$$

kde U je napětí zdroje [3].

4. Analogově-digitální převod

V této kapitole je popsán princip převodu analogového signálu do digitální podoby. AD převodníky totiž tvoří nezbytnou součást měřicího řetězce, kde se data interpretují digitálně. Slouží tedy pro převod analogového signálu na vstupu převodníku do digitální podoby. U AD převodníků, jakožto komplexních součástek, se udává velké množství parametrů. Pro výběr do konkrétní aplikace jsou důležité následující:

- rozlišení,
- vzorkovací frekvence,
- princip převodu,
- komunikační rozhraní [3, 10].

Rozlišení převodníku je udáváno v bitech a udává šířku digitální hodnoty na výstupu AD převodníku, která odpovídá jeho vstupnímu rozsahu. Například převodník s rozlišením 12 bitů a vstupním rozsahem 0 až 5 V je schopen vstupní napětí rozlišovat po skocích o velikosti 1,2 mV. V případě, že bychom chtěli rozlišovat vstupní signál na úrovni μV , 12bitové rozlišení je nedostačující [3, 10].

Vzorkovací frekvence nám říká, jak často je převodník schopen vzorkovat vstupní signál. Udává se v počtu vzorků za sekundu (SPS – samples per second). Je to důležitá informace z hlediska vlastností měřeného signálu. Při volbě nízké vzorkovací frekvence může docházet k tzv. aliasingu, tedy podvzorkování signálu. Dle Nyquistova teorému by vzorkovací frekvence měla být alespoň dvojnásobkem nejvyšší frekvence, která je obsažena ve spektru měřeného signálu [3, 10].

Princip převodu popisuje vnitřní funkci převodníků. Existuje několik principů k převodu signálu na digitální hodnotu, avšak dvě jsou nejpoužívanější. Těmi jsou AD převodníky označované jako SAR a $\Sigma\Delta$ [3, 10].

Komunikační rozhraní je způsob, jakým AD převodník předá převedené digitální hodnoty nadřazenému prvku, který je potom dál zpracovává. AD převodníky se vyrábí jako externí součástky, které disponují komunikačním rozhraním kompatibilním například se sběrnicemi SPI, nebo I²C. Ale i běžné mikrokontroléry mají AD převodník jako integrovanou periférii, takže předání dat probíhá interně po hlavní sběrnici [3, 10].

4.1. Dělení A/D převodníků a jejich chyby

A/D převodníky se dělí podle různých kritérií. Jedním z kritérií je **rozsah akceptovaných vstupních napětí**. Podle tohoto kritéria dělíme A/D převodníky na *unipolární* a *bipolární*. Unipolární mají rozsah 0 až U_R a bipolární mají rozsah $-U_R$ až U_R . Dalším kritériem je **způsob převodu**. Podle způsobu převodu dělíme A/D převodníky na komparační, kompenzační a integrační. *Komparační a kompenzační* převádějí na číslo okamžitou hodnotu napětí v době převodu, jsou rychlé, vyžadují na vstupu vzorkovač. *Integrační* převádějí na číslo průměrnou hodnotu napětí za určitý časový interval. Jsou pomalejší, ale jejich výhodou je schopnost potlačit některé rušivé signály. Používají se v číslicových měřicích přístrojích. Posledním kritériem je rozdělení podle **počtu bitů** [3].

Jelikož žádný převodník není ideální, mají **A/D převodníky chyby**, které se dělí na statické a dynamické.

Statické chyby jsou:

- chyba zesílení, tedy odchylka sklonu skutečné převodní charakteristiky od ideální,
- chyba nuly, která je dána posunem charakteristiky ve směru dané osy,
- chyba linearity převodu [3].

4.2. Principy A/D převodníků

Analogově-digitální převod je postup, při kterém je analogová vstupní veličina převedena do číslicové podoby. Proces probíhá ve třech krocích:

- vzorkování,
- kvantování,
- kódování [3, 10].

První fází AD převodu je vzorkování. AD převodník v taktu vzorkovací frekvence sbírá diskrétní vzorky vstupního analogového signálu. Děje se tak prostřednictvím spínání a rozpínání vzorkovacích kondenzátorů uvnitř AD převodníku. Jak už bylo zmíněno, důležitá je volba vzorkovací frekvence, aby nedošlo k podvzorkování a tím ztrátě informace o vstupním signálu [3, 10].

Dalším krokem po navzorkování vstupního signálu je kvantování. Během kvantování se ke každé diskrétní hodnotě vstupního signálu přiřazuje digitální hodnota. V této fázi má důležitou roli rozlišení převodníku. To totiž určuje, kolik

kvantizačních úrovní může převodník využít k přiřazení hodnoty ke vzorku. Protože je ale počet kvantizačních úrovní konečný, dochází ke kvantizační chybě, která se zmenšuje s rostoucím rozlišením [3, 10].

Posledním krokem převodu je kódování, což je převedení číselné hodnoty získané kvantováním na některý z používaných kódů (nejčastěji binární) [3, 10].

5. Požadavky na konstrukci a pevnost

V této kapitole jsou uvedeny požadavky na konstrukci a pevnost prvků v řízení.

Systémy řízení letadla se ovládají dvěma způsoby, a to buďto ručně pákovým nebo volantovým řízením, anebo nožně pedálovým řízením.

Na prvky v řízení jsou v předpisech uvedeny požadavky na konstrukci a pevnost. Pro co nejlepší výsledky měření by tyto požadavky měly být dodrženy i u systému pro měření sil v řízení letadla. Je potřeba, aby podle požadavků na konstrukci a pevnost dle předpisu UL2, byla zajištěna co nejnižší hmotnost při zachování dostatečné pevnosti a současně i dostatečná tuhost. Malá tuhost by totiž měla nepříznivý vliv na kritické rychlosti a příliš vysoká tuhost by způsobila špatnou citlivost systému [1].

5.1. Analýza řídel

Pro připevnění měřících členů na konstrukci letadla je nutné znát tvary a rozměry řídel letounů. Průměry trubek se pohybují u kniplu okolo 22 mm a u pedálů je to rozmezí mezi 18 a 20 mm [11].

Ukázka tvarů řídel je na obrázku 9.



Obrázek 9 Cockpit letounu Dynamic 86 [12]

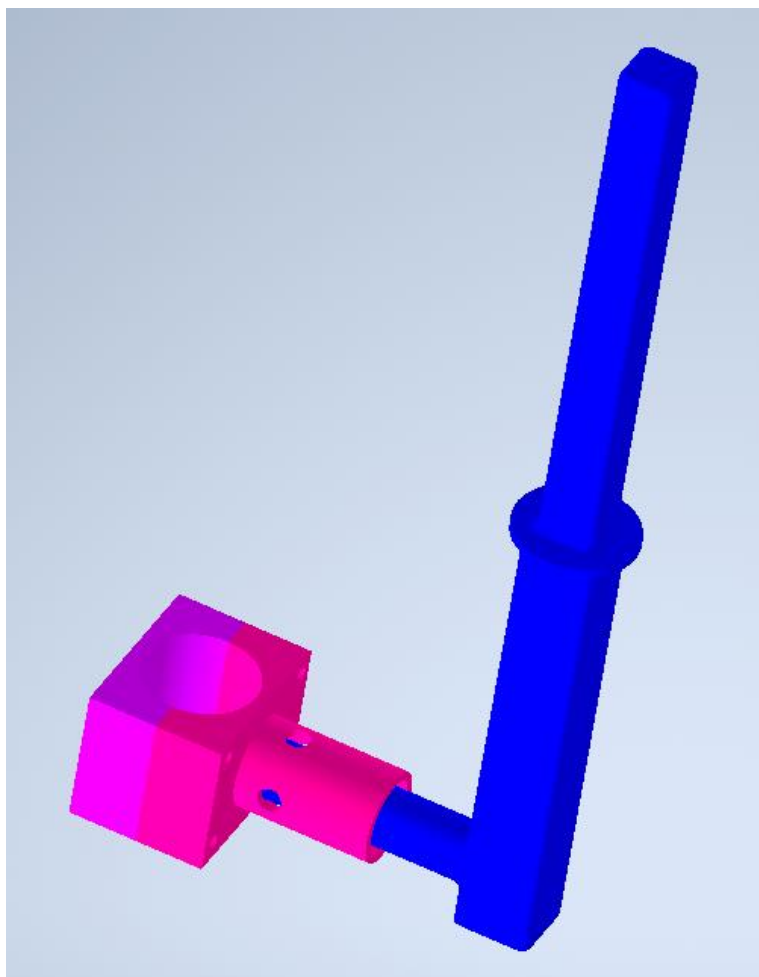
6. Možné způsoby řešení

V této kapitole rozebereme možné způsoby řešení systému pro měření sil v řízení letadla. A to z mechanického a elektronického pohledu.

Jak již bylo zmíněno, systém musíme rozdělit na ruční a pedálový.

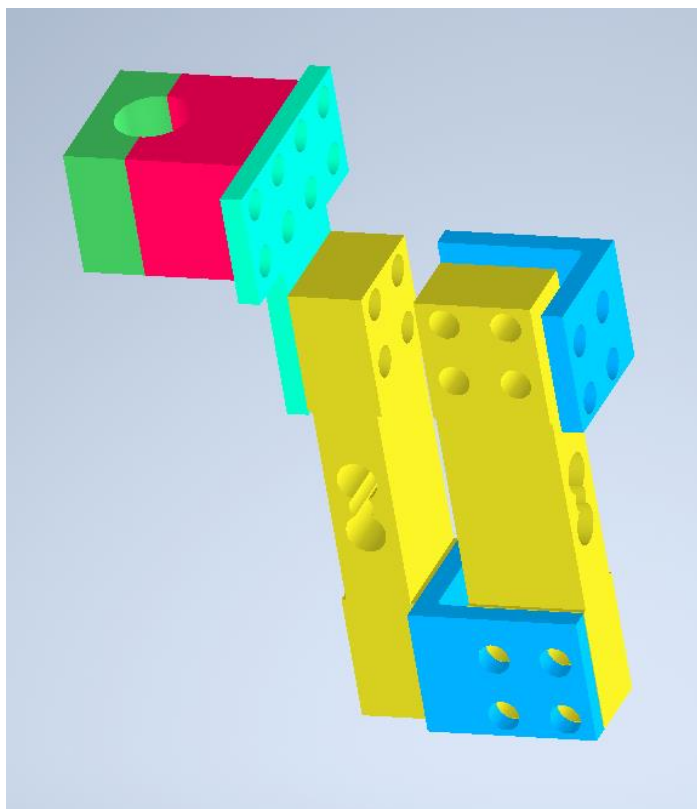
6.1. Možné řešení systému pro ruční řízení

První variantou je výroba jednoduché páky, která se připevní na řídicí páku. Na vyrobenou páku se pak nalepí tenzometry, které budou měřit síly, které pilot vnáší do řízení. Návrh je zobrazen na obrázku 10. Jakým způsobem se lepí tenzometry, je rozebráno v kapitole 2.



Obrázek 10 Návrh ručního systému vytvořený v programu Autodesk Inventor

Druhá varianta je použití dvou zakoupených váhových senzorů, které se k sobě přišroubují tak, že jeden měří síly v příčném a druhý v podélném směru. Návrh je zobrazen na obrázku 11.



Obrázek 11 Druhý návrh ručního systému vytvořený v programu Autodesk Inventor

Pro tuto variantu byl vybrán váhový senzor znázorněný na obrázku 12. Na senzoru je uvedena zatížitelnost až 150 kg.



Obrázek 12 Váhový senzor – elektronická váha [13]

6.2. Možné řešení systému pro nožní řízení

Pro realizaci systému měření sil v řízení letadla pedály je možné vyvinout systém, který se připevní na pedál, anebo pilotovi k noze. Popřípadě jak na pedál, tak i k noze.

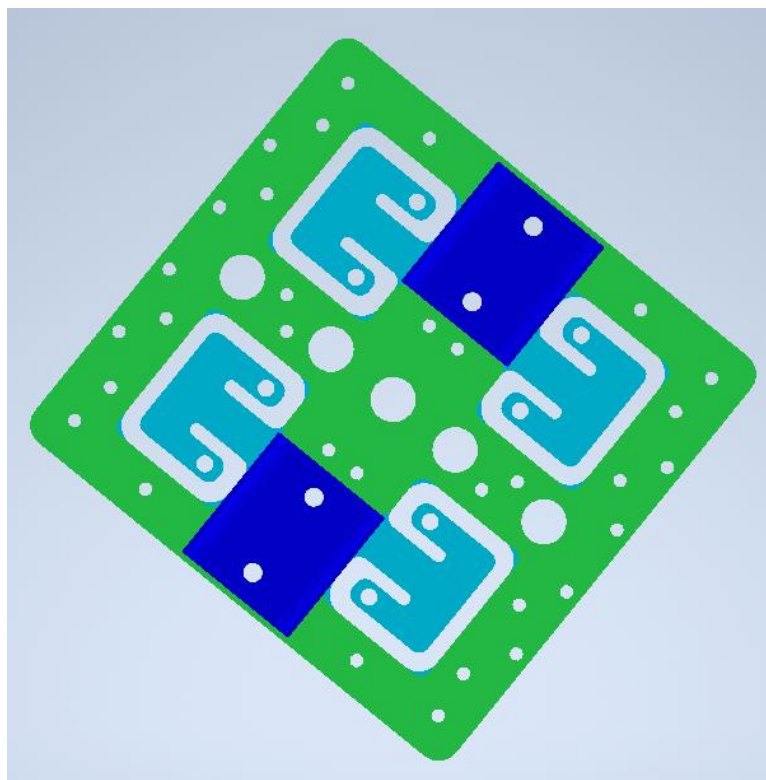
Nejjednodušším způsobem je upevnění váhových senzorů na jednoduchou desku. Pro rovnoměrné stlačování senzorů bude zapotřebí druhá deska, která se na senzory připevní z druhé strany – horní. Tato druhá deska by měla mít obdélníkový tvar, to je stejný jako deska má mít spodní, anebo tvar chodidla pro ergonomičtější užívání.

V obou případech by systém pro měření sil v pedálovém řízení měl být navržen tak, aby se na něj umístily čtyři tenzometrické váhové senzory zobrazené na obrázku 13. Potřeba budou čtyři, jelikož rozsah jednoho senzoru je 50 kg. Rozsah jedné šlápoty pak se všemi čtyřmi senzory bude 200 kg a bude složena ze dvou desek.



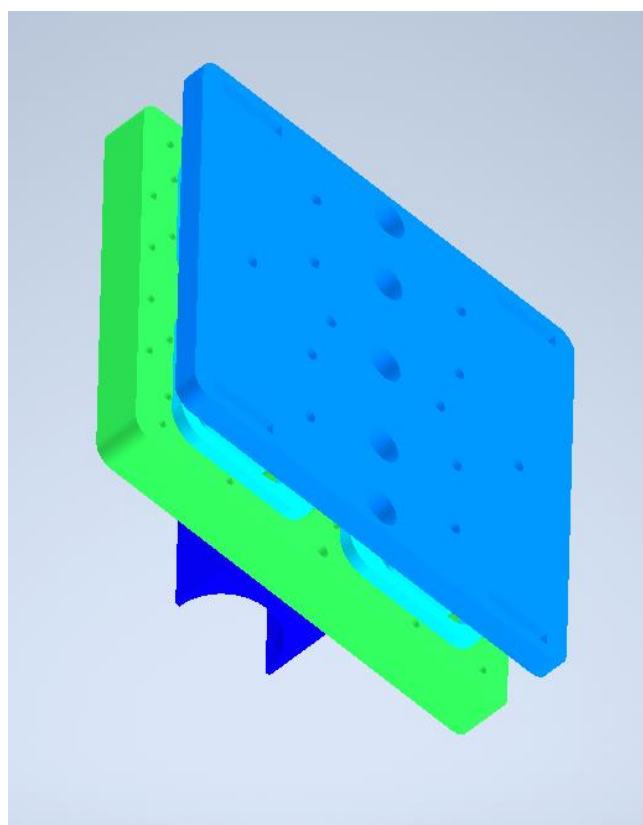
Obrázek 13 Váhový tenzometrický senzor se zatížitelností do 50 kg [14]

Spodní deska, na kterou se budou senzory upevňovat by měla mít 4 otvory, aby se do nich měřící člen mohl prohýbat. Zobrazení spodní desky s objímkou pro připevnění k pedálům a s umístěnými senzory je vidět na obrázku 14.

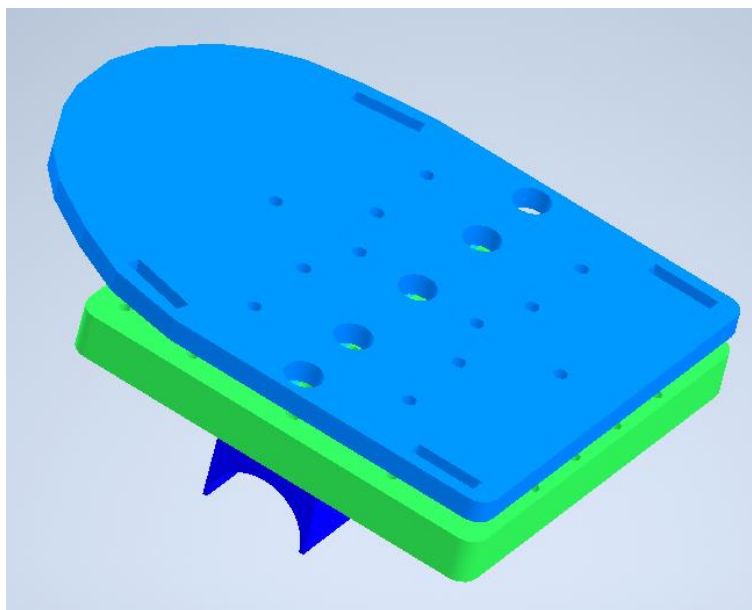


Obrázek 14 Spodní část měřicího systému vytvořená v programu Autodesk Inventor

Horní část systému se pak k sensorům připevní, bude mít v prvním případě stejný tvar jako spodní část (obr. 15), anebo tvar chodidla (obr. 16).



Obrázek 15 Horní část měřicího systému vytvořená v programu Autodesk Inventor



Obrázek 16 Systém s horní částí ve tvaru chodidla vytvořený v programu Autodesk Inventor

6.3. Možný způsob řešení z hlediska zapojení

První možná realizace výsledného systému spočívá v zapojení plného můstku na diferenciální zesilovač, AD převodník a na procesor.

Druhým řešením je připojení plného můstku na zakoupený modul pro váhové senzory HX711, který převádí signál z váhového čidla s 24bit přesností na digitální a má v sobě zabudovaný zesilovač. Tento modul se pak připojí na procesor.

Váhové senzory lze připevnit na desku více způsoby. Jeden ze způsobů je zapojení senzorů do dvou půlmůstků. Dalším způsobem je zapojení všech čtyř senzorů do jednoho plného můstku.

V případě zapojení do dvou půlmůstků budou vést z desky výsledného systému dva kabely, které se připojují každý na A/D převodník zvlášť. Pro výslednou hodnotu silového působení se budou muset hodnoty z obou převodníků sečíst.

Pokud se všechny senzory zapojí do jednoho plného můstku, tak z výsledného systému povede pouze jeden kabel k jednomu A/D převodníku.

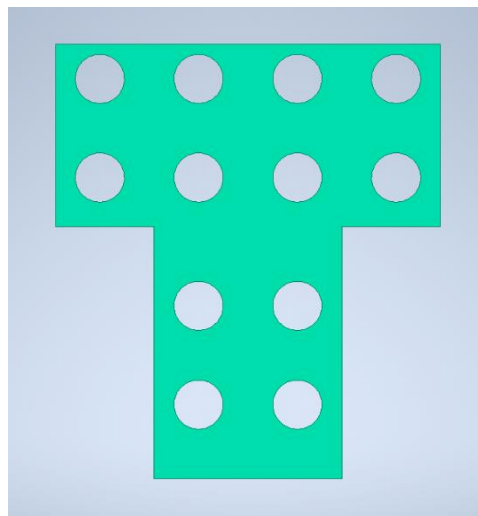
Z tohoto pohledu je konstrukčně jednodušší druhá varianta, kdy se všechny senzory propojí do jednoho plného můstku a z výsledného systému vede pouze jeden kabel na jednu desku HX711.

7. Vybraný návrh a způsob vlastního řešení

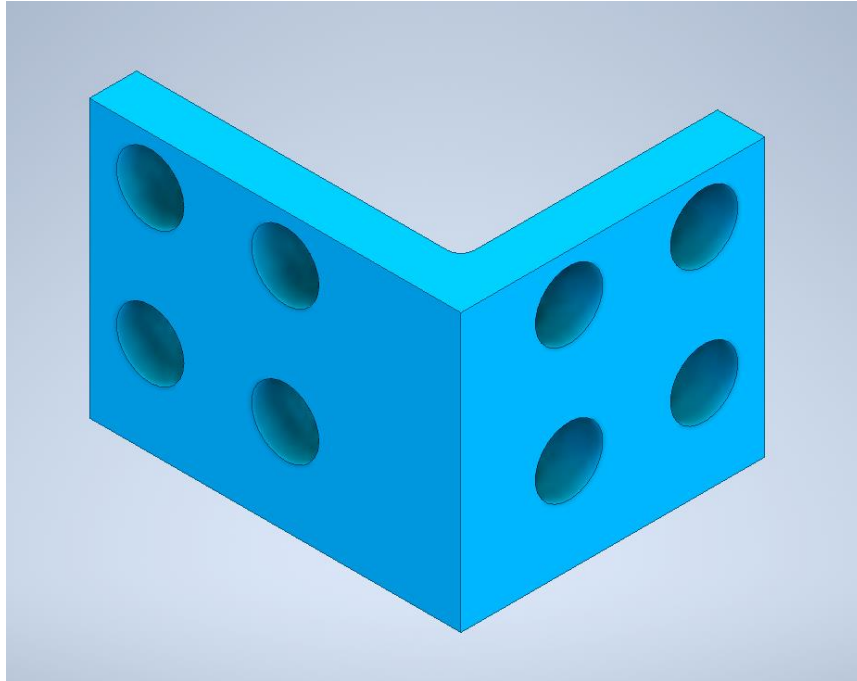
V této kapitole jsou popsány vybrané způsoby řešení výsledného systému a odůvodnění výběru způsobu řešení pro ruční i nožní řízení.

7.1. Vybraný návrh pro ruční řízení

Pro výrobu ručního zařízení byl vybrán druhý způsob uvedený v kapitole 4.1. Tento návrh je oproti první variantě jednodušší jak z hlediska výroby, tak i z hlediska zapojení. Co se týče výroby, nemusí se vyrábět složitější tvar systému. K zakoupeným váhovým sensorům postačí vyrobit jednoduché díly, jeden ve tvaru T s dírami (obr. 17) a dva díly tvaru L s dírami (obr. 18). Jelikož se zapojují dva váhové senzory, od každého povede kabel k jednomu A/D převodníku. Takže budou vycházet dvě výsledné hodnoty měření – tedy jedna pro podélné a druhá pro příčné působení sil. Pro tento způsob se už navíc nemusí řešit lepení tenzometrů.



Obrázek 17 Díl tvaru T vytvořený v programu Autodesk Inventor



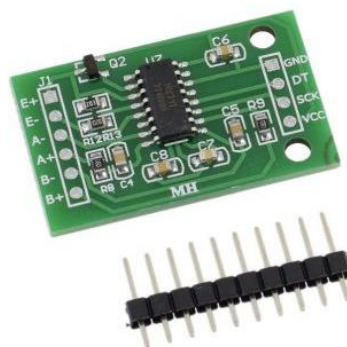
Obrázek 18 Díl tvaru L vytvořený v programu Autodesk Inventor

7.2. Vybraný návrh pro nožní řízení

Celý systém je postaven na váhových tenzometrických snímačích, které jsou umístěny na navržené desce. Vzhledem k tomu, že způsoby řešení jsou jen minimálně odlišné (orientace senzorů, vývod drátů a tvar horní desky), budou realizovány všechny návrhy řešení.

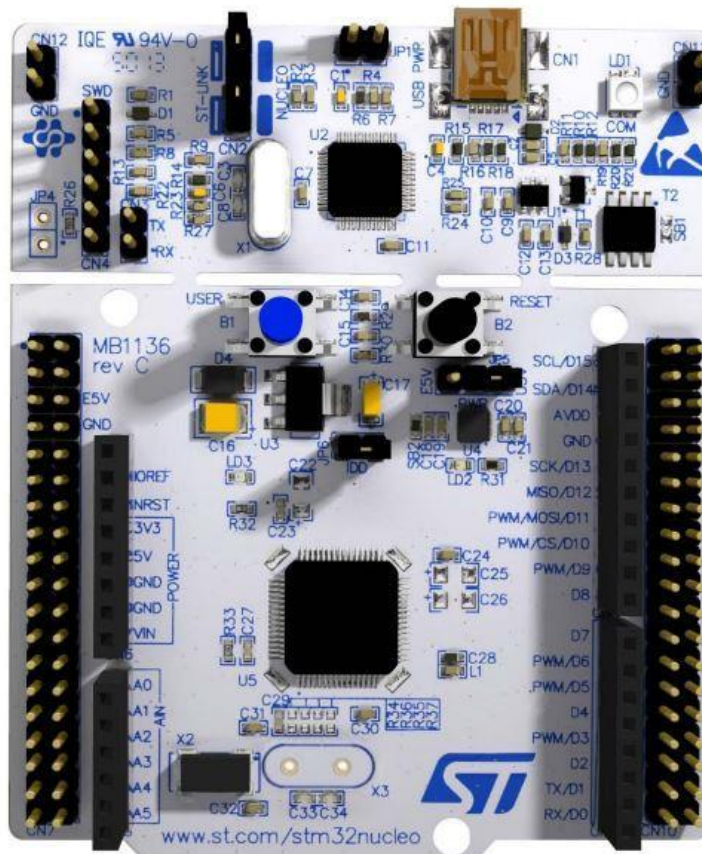
7.3. Vybraná elektronika

Celý systém je postaven na váhových tenzometrických snímačích, které jsou pro nožní řízení umístěny na navržené desce a pro ruční řízení k sobě připevněny díly ve tvaru L. Signál ze snímačů je veden na A/D převodník HX711 (obr.19), který má v sobě zabudovaný zesilovač.



Obrázek 19 Modul HX711 [15]

Následně je signál zpracován mikro počítačem NUCLEO-F446RE (obr. 20). Výsledná data se zobrazují na obrazovce počítače přes Tera Term. Programování softwaru probíhá v jazyce C, konkrétně v programu STM32CubeIDE.



Obrázek 20 NUCLEO-F446RE

8. Realizace systému

V této kapitole je popsána realizace vlastního systému pro měření sil v řízení.

Pro systém měření sil byl vybrán váhový tenzometrický senzor se zatížitelností do 50 kg. Jelikož k senzoru chybí technické informace, změřila jsem jeho rozměry, abych mohla navrhnout přesný tvar desek. Ty pak dostaly konečný rozměr 90x95 mm.

Desky byly vyrobeny z duralu, spodní deska o tloušťce 10 mm a horní deska o tloušťce 5 mm. Ve spodní desce jsou díry se závity pro šrouby o velikosti M3, kterými jsem senzory připevnila k desce. V horní desce jsou udělány díry pro šrouby velikosti M2,5, kterými se připevní horní deska k senzorům (obr. 21).



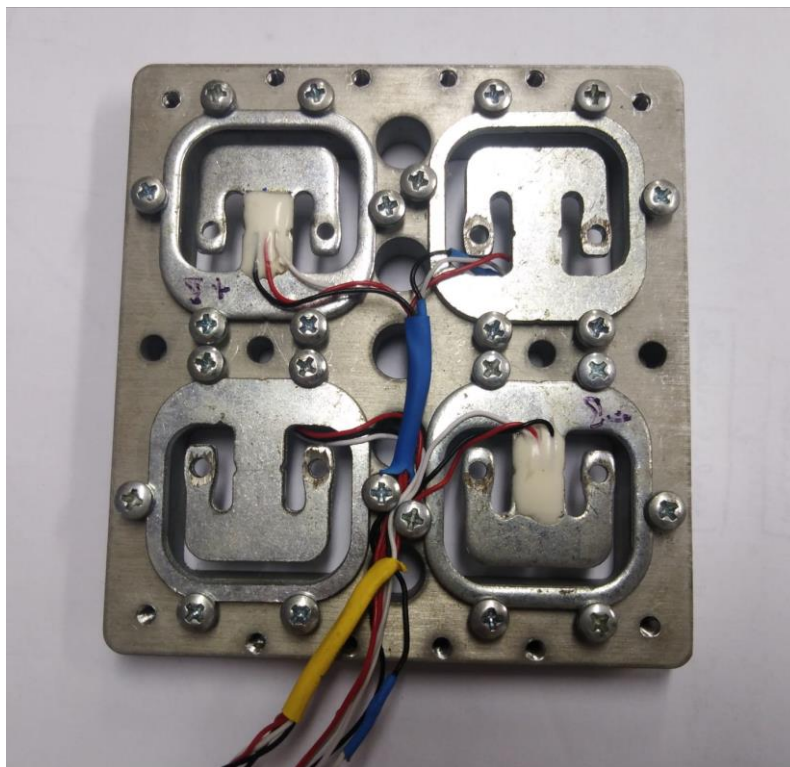
Obrázek 21 Desky s připevněnými senzory

Dále jsem změřila odpory, aby bylo jasné, který drátek vyvedený ze senzoru se pro zapojení do můstku napájí na který. Změřené odpory váhového tenzometrického senzoru jsou uvedeny v tabulce 4.

Tabulka 4 Změřený odpor

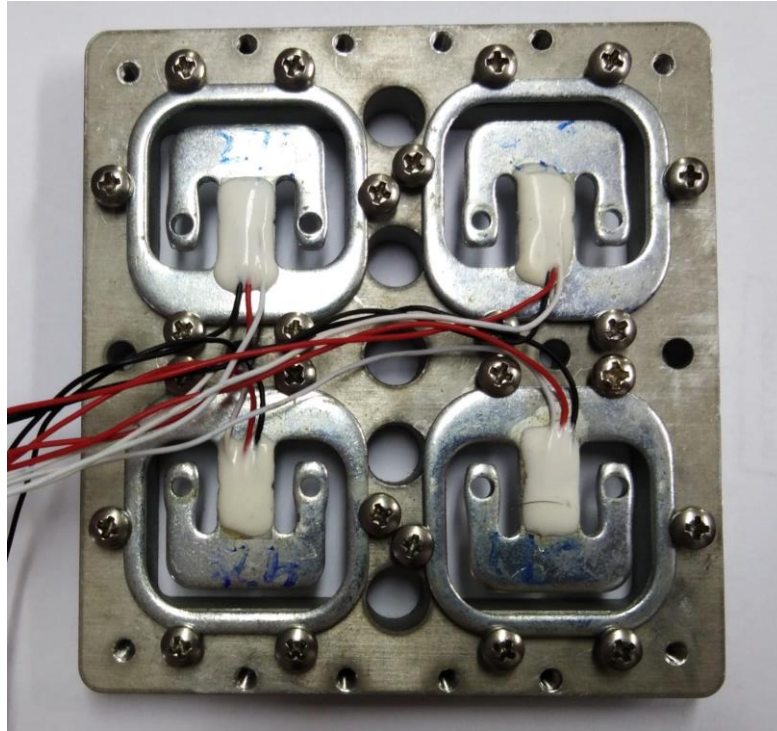
drátky	odpor [k Ω]
černý+bílý	2
černý+červený	1
červený+bílý	1

Z naměřených hodnot odporů vyplývá, že při zapojení senzorů do dvou půlmůstků se musí senzory připevnit tak, že budou orientované opačně, aby mohly být drátky zapojeny stejně. Pokud by se senzory připevňovaly k desce tak, že budou orientovány stejně, musely by se drátky zapojit opačně. Jelikož se mi první varianta zapojení zdá logičtější, rozhodla jsem se pro tento způsob zapojení. Připevnění na desku i s pájenými drátky je znázorněno na obrázku 22.

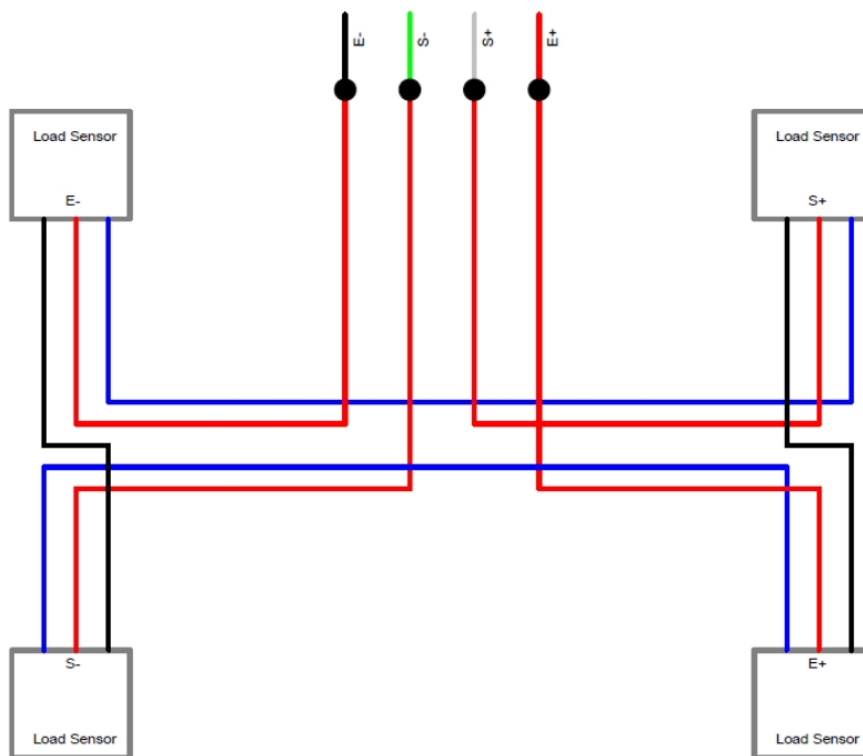


Obrázek 22 Zapojení senzorů jako dva půlmůstky

V případě zapojení všech čtyř senzorů do jednoho plného můstku se připevní na desku všechny čtyři stejnou stranou (obr.23). Jak se k sobě připájí drátky je znázorněno na obrázku 24.

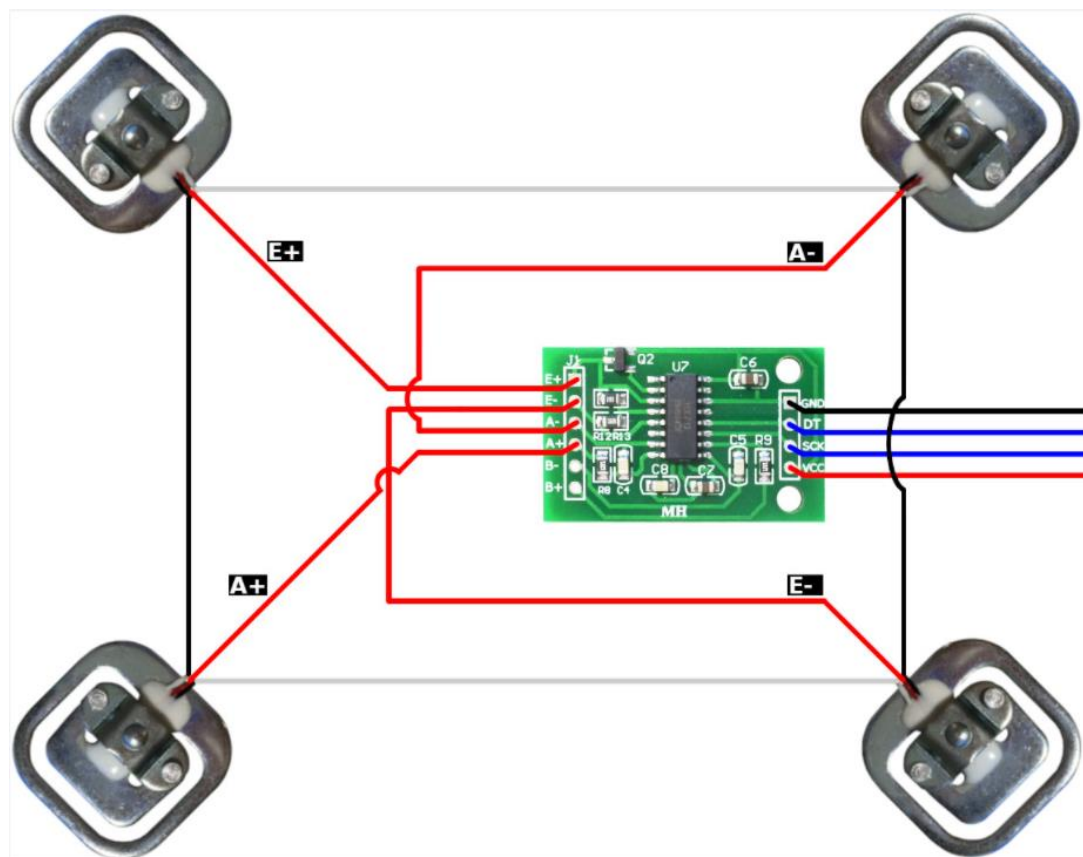


Obrázek 23 Připevnění senzorů při zapojení do plného můstku



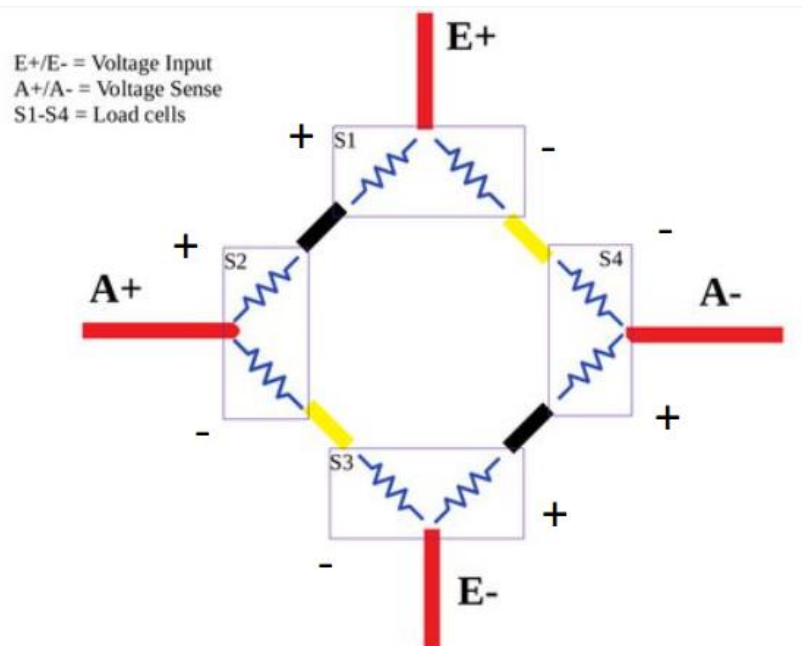
Obrázek 24 Propojení senzorů při zapojení do plného můstku [17]

Senzory se na převodník HX711 zapojují vyvedenými drátky na vývody E a A. Na vývody E se zapojuje buzení, na vývody A se zapojuje signál. Nezapojuje se na vývody B, protože na kanálu A je totiž defaultně nejvyšší citlivost (obr. 25).



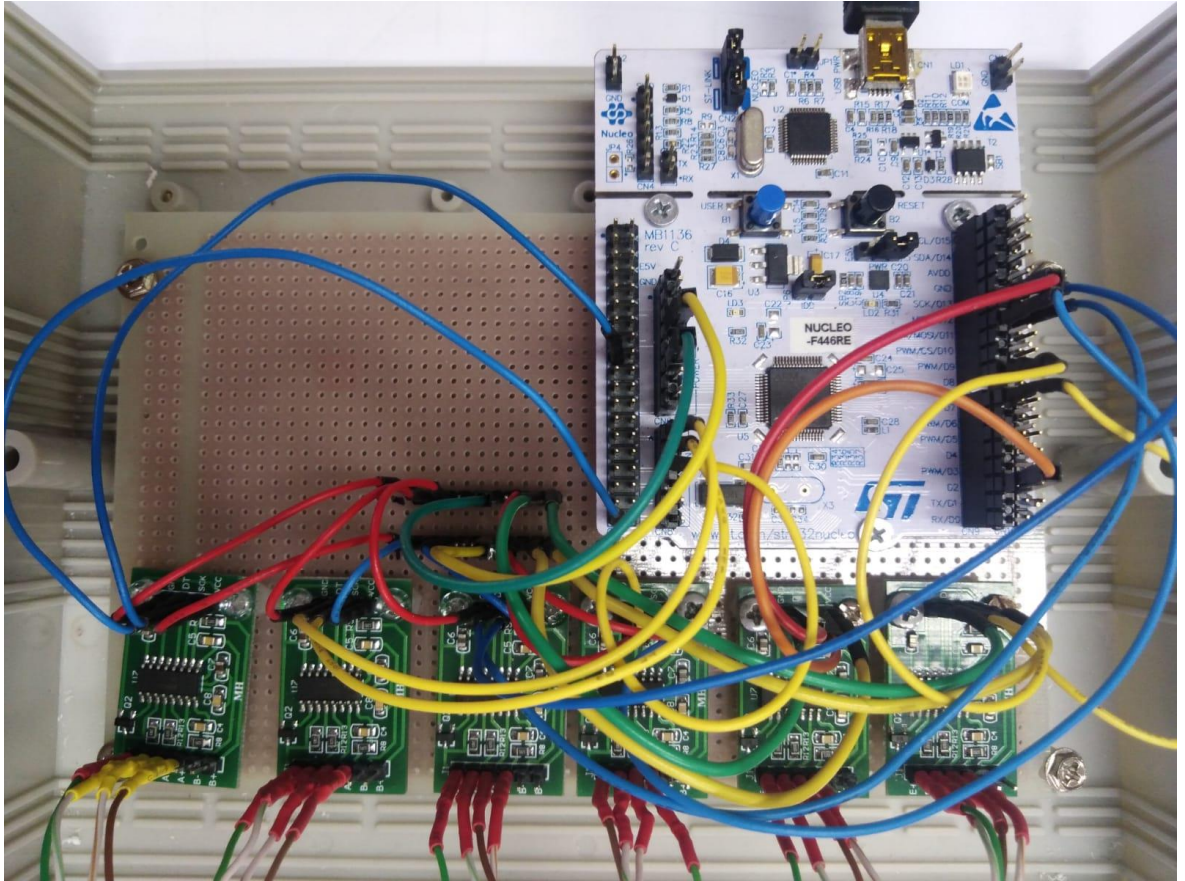
Obrázek 25 Ukázka zapojení senzorů na převodník HX711 [17]

Při tomto zapojení váhových senzorů jsou senzory zapojeny tak, aby odpory odpovídaly označení na obrázku 26.



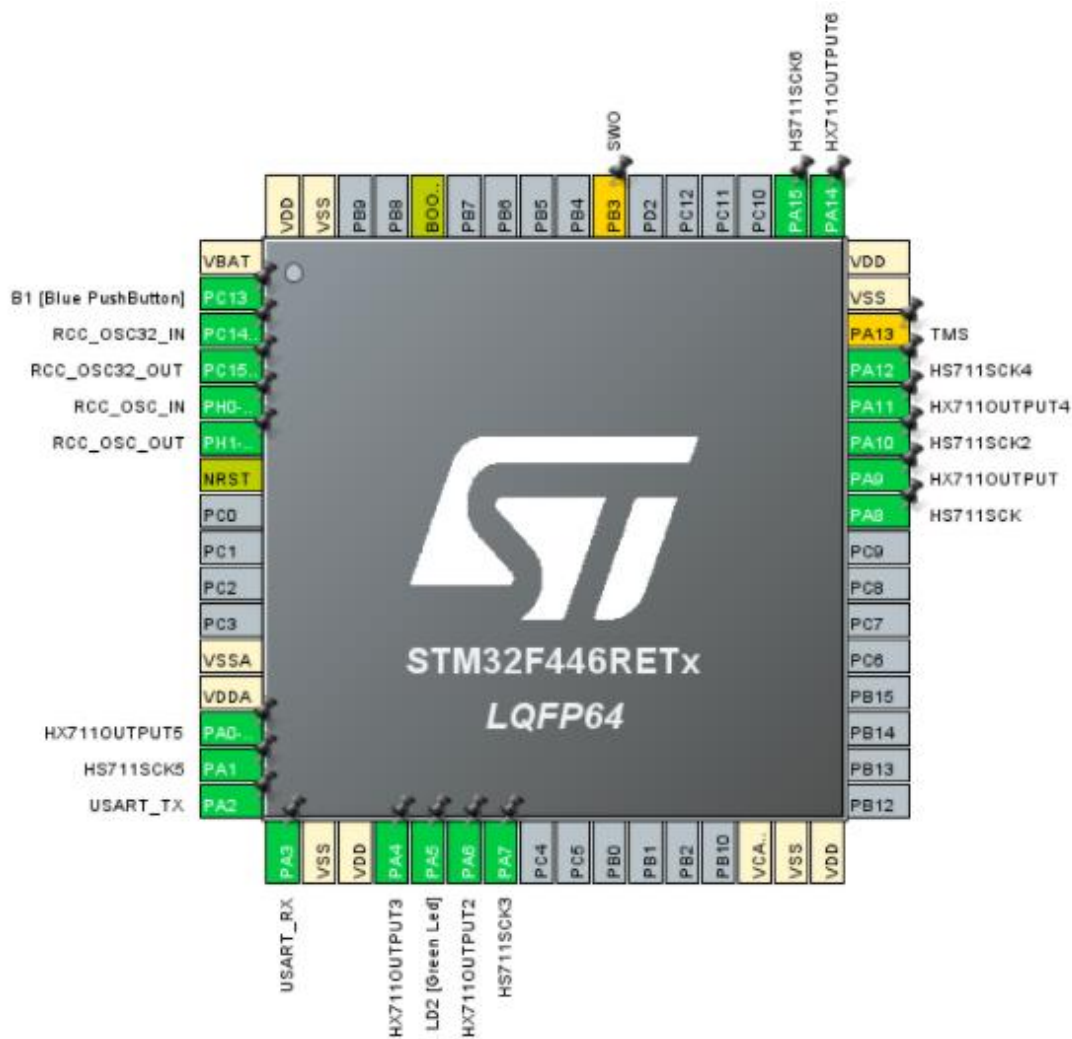
Obrázek 26 Odporů váhových senzorů a jejich vývod na převodník HX711 [17]

Propojení s procesorem obstarávají dva digitální piny DT – Data Out a SCK – Synchronous clock. VCC se připojí na pin napájení 3V3 a GND na zem. Výsledné zapojení všech převodníků HX711 s procesorem NUCLEO-F446RE je na obrázku 27.



Obrázek 27 Zapojení převodníků HX711 s procesorem

Zapojení všech destiček HX711 na všechny piny NUCLEO-32F446RE je uvedeno v tabulce 5. V programu STM32CubeIDE lze zapojení na piny popsat v obrázku (obr. 28) a program si pak sám vygeneruje skript main.h (Příloha 2).



Obrázek 28 Zobrazení procesoru s vyznačenými zvolenými piny

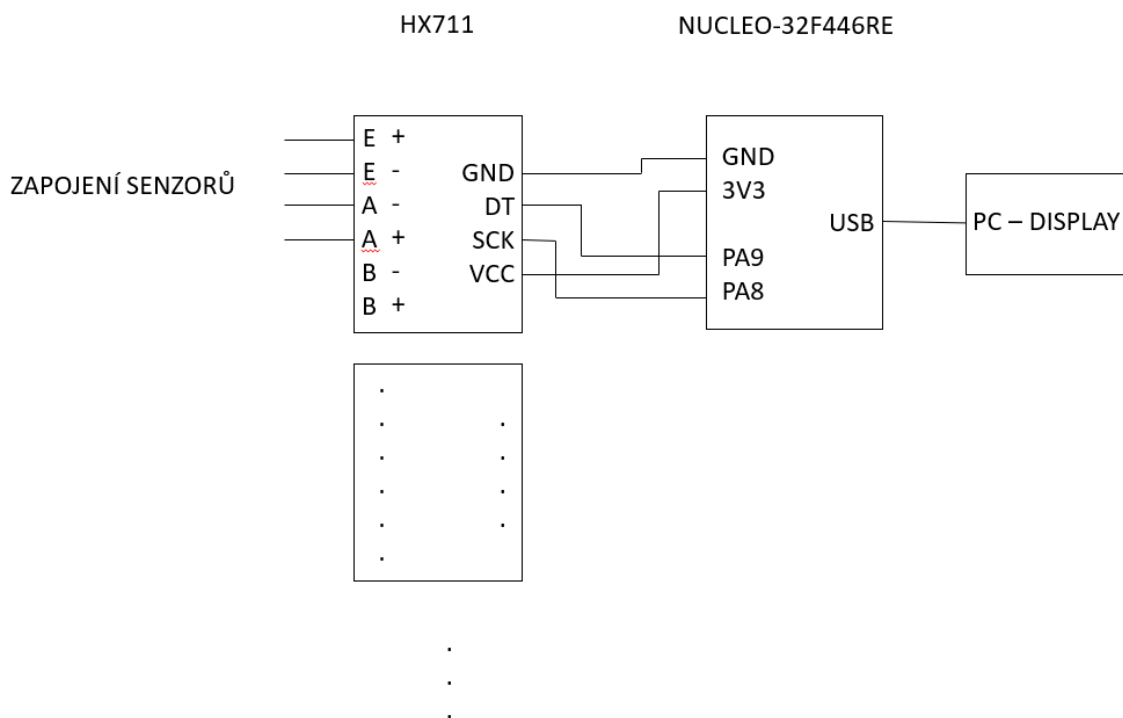
Tabulka 5 Propojení převodníků 1 až 6 s procesorem NUCLEO-32F446RE

HX711	1	2	3	4	5	6
DT	PA9	PA6	PA4	PA11	PA0	PC3
SCK	PA8	PA10	PA7	PA12	PA1	PA15

Pro měření sil v ručním řízení je použito řešení za využití dvou váhových senzorů připevněných k sobě tak, aby měřily síly jak v příčném, tak i v podélném směru. Z tohoto systému vedou dva kabely, jsou tedy potřeba dvě destičky HX711.

8.1. Blokové schéma

Blokové schéma navrženého tenzometrického měřicího systému je na obrázku 29. Samotný tenzometrický odporový snímač je zapojen do měřicího můstku, jehož výstupní diferenční napětí je zesíleno a následně zpracováno A/D převodníkem HX711. Ten je propojen s procesorem NUCLEO-F446RE.



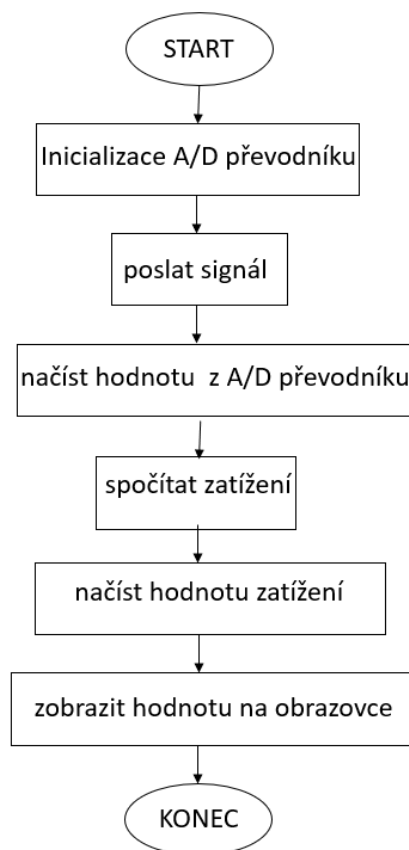
Obrázek 29 Blokové schéma

8.2. Vývojový diagram

Nastavení softwaru probíhá v jazyce C. Prostředí představuje několik skriptů, které provádějí požadované akce.

Pro programování byly použity skripty `hx711.h` a `hx711.c` z knihovny GitHub. Ty jsou společně s hlavním skriptem uvedeny jako Příloha 2 a zároveň jsou přiloženy na disku.

Vývojový diagram programu je na obrázku 30.



Obrázek 30 Vývojový diagram

9. Popis kalibrace

V této kapitole je popsána kalibrace vlastního systému měření sil v řízení letadla.

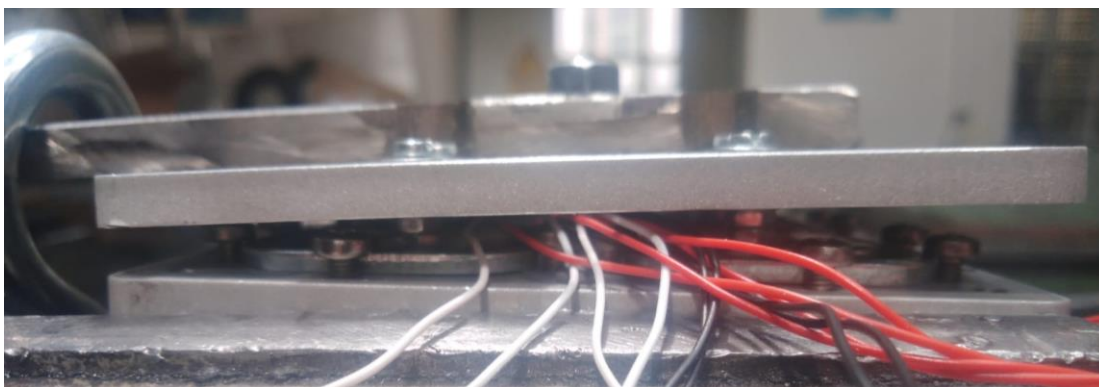
9.1. Vlastní měření

Vlastní měření se provedlo na čtyřech typech zapojení senzorů. Zatížení bylo provedeno za pomoci závaží od 0 N až do 1000 N postupně po 100 N. Po zatížení na 1000 N jsem začala opět postupně po 100 N odlehčovat až na 0 N. Ke každému zapojení byl přiřazen jeden vstup, pro který pak byl každý systém zvlášť kalibrován.

9.1.1. Systém zapojení do dvou půlmůstků

Měření pro první a druhý vstup, tedy jako první a druhý převodník HX711 (dál označuji jako D1 a D2) jsem zvolila pro systém zapojený se senzory do dvou půlmůstků.

Nejdřív jsem zatěžovala desku se senzory středem za pomoci háku. Poté jsem na desku připevnila páku a zatěžovala jsem ji opět za pomoci háku 50 mm od okraje, abych zjistila, jak měření ovlivní, když bude pilot tlačít do desky jinak než středem. Protože pokud zatlačí do některého z krajů, za senzory na jedné straně bude systém tahat a do druhých tlačít (obr. 31).



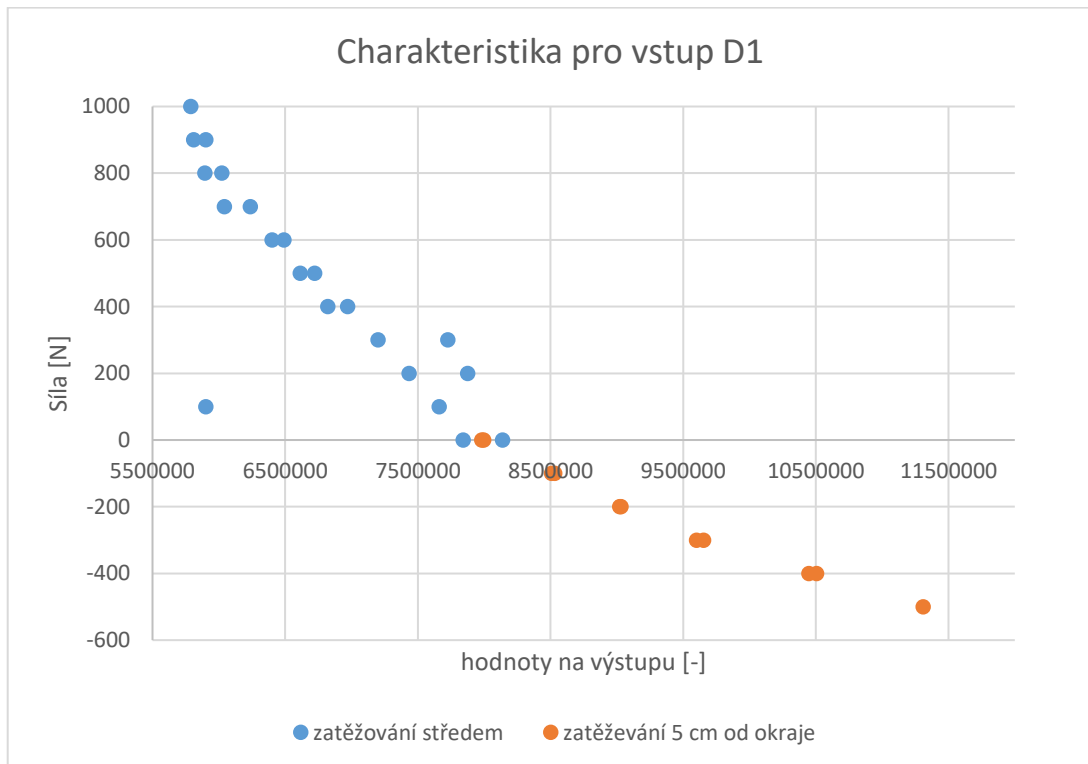
Obrázek 31 Detail zatížení senzorů při zatěžování 5 cm od okraje

Toto měření mělo také ověřit, zda je možné použít horní desku ve tvaru chodidla, kdy je pravděpodobné, že by pilot tlačil do desky právě na jejím kraji. Zatěžování systému je znázorněno na obrázku 32.

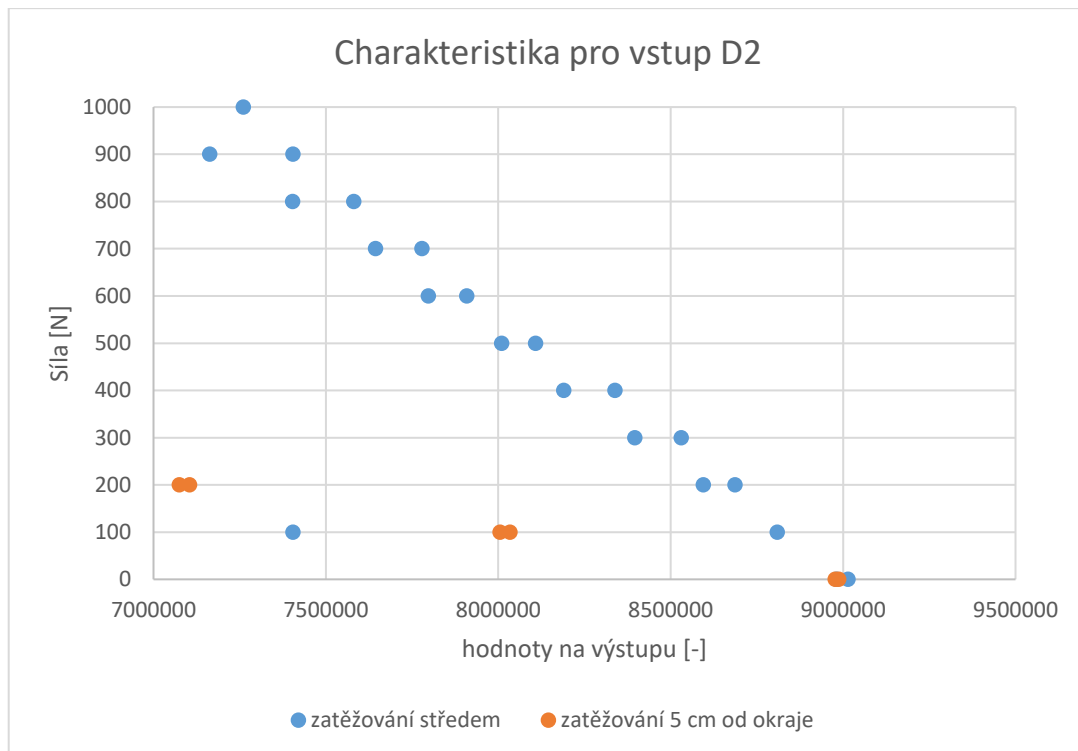


Obrázek 32 Zatěžování měřicího systému

Průběh zatížení a odlehčení pro každý půlmístek na jednotlivých vstupech je znázorněn na obrázku 33 a 34.



Obrázek 33 Průběh měření zatížení a odlehčení na D1



Obrázek 34 Průběh měření zatížení a odlehčení na D2

Z naměřených hodnot je evidentní, že toto zapojení se nedá využít s deskou ve tvaru chodidla. Protože pro toto zapojení je rozhodující, na jaké části desky pilot působí, musel by si dát pozor, aby tlačil do desky na jejím středu.

9.1.1. Systém zapojení senzorů do plného můstku

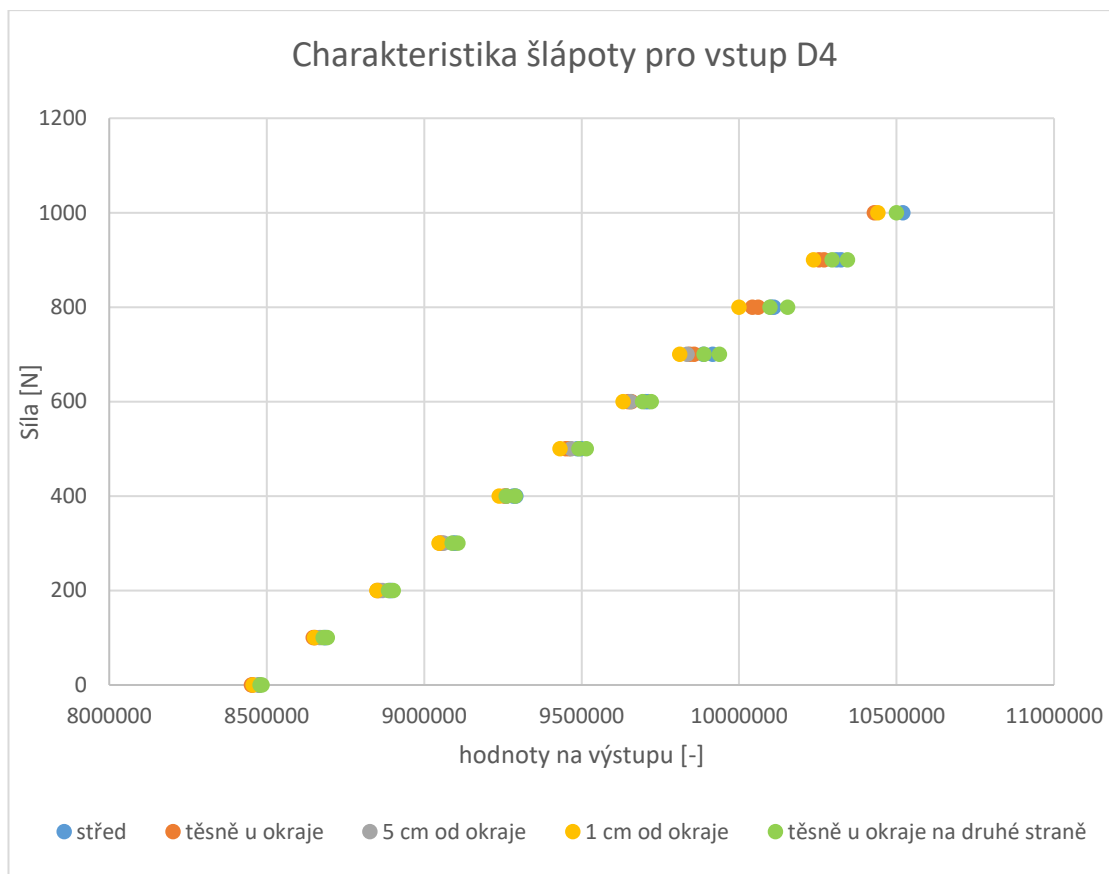
Pro měření desky, na které jsou zapojeny všechny čtyři senzory do plného můstku, jsem vybrala čtvrtý převodník HX711 (dál označuji jako D4).

Desku jsem opět zatěžovala středem za pomoci háku. Poté jsem opět na desku připevnila páku a znovu jsem ji zatěžovala jsem pomocí háku 50 mm od okraje. Výsledná charakteristika byla v obou případech měření velice podobná, proto následně u desky s tímto zapojení proběhlo více měření. Desku jsem zatěžovala pomocí páky těsně u okraje (obr. 35) na jedné i druhé straně, abych ověřila, s jakými odchylkami se charakteristika zapojení mění.



Obrázek 35 Zatěžování senzorů na okraji desky

Průběh zatěžování a odlehčování systému všemi zmíněnými způsoby je znázorněn na obrázku 36.



Obrázek 36 Průběh měření zatížení a odlehčení na D4

Pro toto zapojení by se tak dala použít deska ve tvaru chodidla, protože systém měří s menšími odchylkami stejně, ať se zatěhuje na jakékoli jeho části.

9.1.2. Měření zatížení senzorů pro ruční řízení

Při zatěžování senzorů, které byly vybrány pro použití měření sil v řízení v příčném a podélném směru, vychází jejich charakteristika jako lineární. Sensory byly zatěžovány dvěma způsoby. Na senzorech je označení šipkou, takže jsem nejdřív zatěžovala senzor ve směru šipky a poté proti směru šipky, abych věděla, jak se mění měřicí konstanty, když bude pilot tlačit v jejím směru nebo proti.

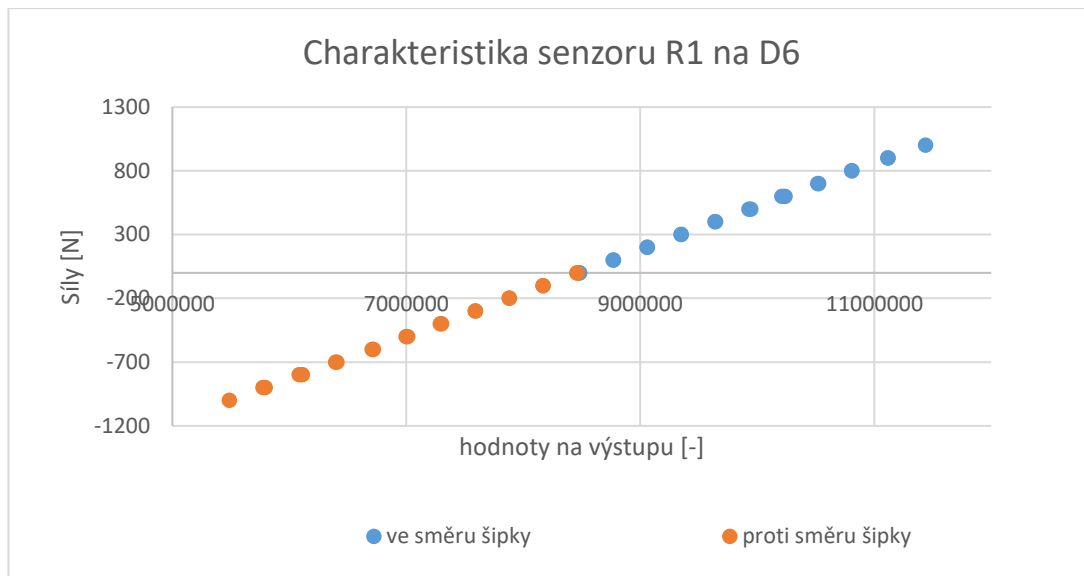
První senzor má označení R1 a druhý má označení R2. Pro měření se senzorem R1 jsem vybrala šestý převodník HX711 (dál označuji jako D6) a pro měření se senzorem R2 jsem vybrala pátý převodník HX711 (dál označuji jako D5).

Zatěžování obou senzorů opět probíhalo pomocí zavěšení závaží, které jsem zavěšovala na hák (obr. 37).

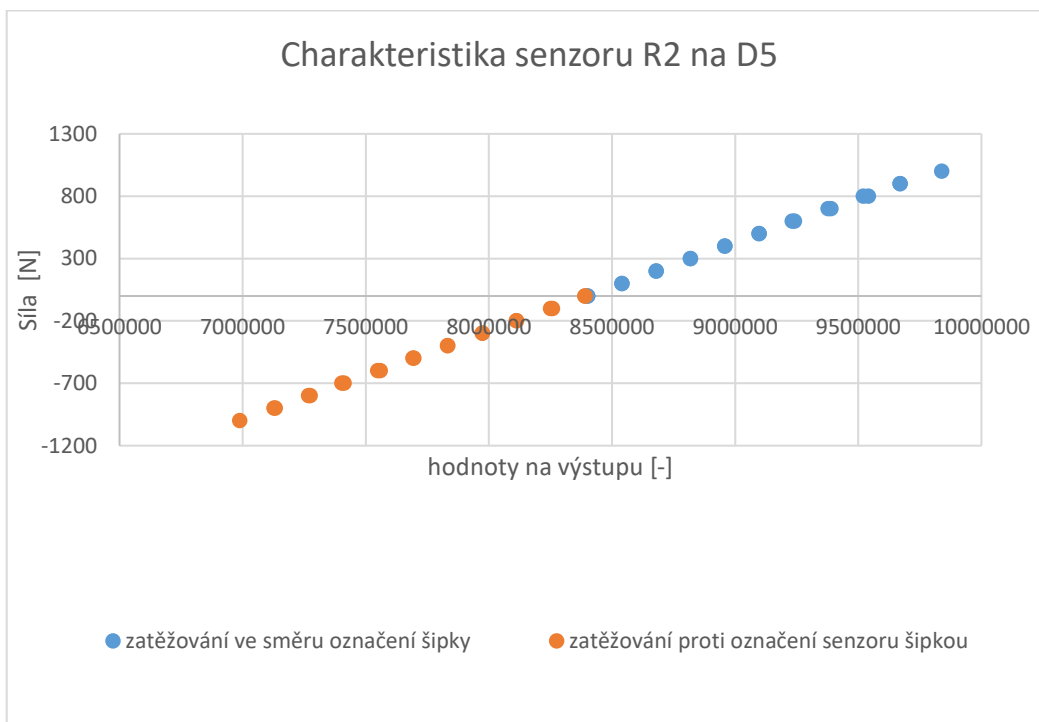


Obrázek 37 Zatěžování senzoru R1

Průběh zatěžování a odlehčování senzorů R1 a R2 je znázorněn na obrázcích 38 a 39.



Obrázek 38 Průběh měření zatížení a odlehčení na D6



Obrázek 39 Průběh měření zatížení a odlehčení na D5

Při zatěžování senzorů, které byly vybrány pro použití měření sil v řízení v příčném a podélném směru, vychází jejich charakteristika lineární.

9.2. Ověření funkce

Kalibrace systému je stejná pro řízení podélného sklonu, příčného náklonu a směru letu. Rozdílné jsou pouze výstupní hodnoty odpovídající stejnému zatížení na jednotlivých vstupech do A/D převodníků HX711.

Systém pro měření sil je kalibrován pomocí kalibračních závaží. Vlastní měření bylo popsáno v kapitole 9.1.

Po získání výstupních hodnot A/D převodníků odpovídajících určitému zatížení byla do skriptu dopsána kalibrační funkce.

Naměřené hodnoty na jednotlivých vstupech odpovídající konkrétnímu zatížení jsou přiloženy jako Příloha 1.

Na konci této podkapitoly je na obrázku 40 znázorněno zobrazení hodnot v programu Tera Term.

9.2.1. Systém zapojení do dvou pŕlmůstků

Systém mi na konci zatěžování upadl a jeden z drátků se téměř ze senzoru vytrhl. Proto mi při následném pokusu o zatěžování po kalibraci vycházely nesmyslné hodnoty (tab. 6) a správnost kalibrace se mi tak nepodařilo ověřit. I tak si ale můžu dovolit hodnotit toto řešení jako méně perspektivní, jelikož jak jsem již zmínila, při zatěžování ve vzdálenosti 5 cm od okraje obdélníkové desky byla charakteristika naprosto odlišná oproti zatěžování středem. V tomto případě by se proto nedala použít deska ve tvaru chodidla a pilot by si musel dát pozor, aby tlačil do desky na jejím středu.

Tabulka 6 Měřené hodnoty sil na vstupech D1 a D2

skutečné zatížení [N]	síla na vstupu D1 [N]	síla na vstupu D2 [N]	výsledná hodnota [N]
0	-741,0	189,2	-551,8
100	205,4	164,8	370,2
200	146,3	142,9	289,2
300	90,7	114,5	205,2
400	32,4	89,6	122,0
500	495,3	64,4	559,7

9.2.2. Systém zapojení senzorů do plného můstku

Po vytvoření kalibrační funkce byl systém opět zatěžován. Naměřené hodnoty sil při zatěžování a následném odlehčování jsou srovnány se skutečným zatížením v tabulce 7. Přesnost měření této šlápoty je tedy podle výsledků měření asi 9 N.

Tabulka 7 Měřené hodnoty sil při zatěžování na vstupu D4

skutečné zatížení [N]	naměřené hodnoty při zatěžování [N]	naměřené hodnoty při odlehčování [N]	průměrná hodnota [N]
0	2,4	2	2,25
100	103,9	104	103,95
200	205,3	205	205,15
300	306,1	308	307,05
400	404,6	409	406,80
500	500,6	505	502,80
600	605,5	608	606,75
700	702,6	702	702,30
800	802,4	808	805,20
900	903,7	907	905,35
1000	997,6	998	997,80

9.2.3. Sensory pro ruční řízení

Po vytvoření kalibrační funkce byly zatěžovány a následně odlehčovány i senzory R1 a R2 pro ruční řízení. Naměřené hodnoty sil při zatěžování a odlehčování jsou srovnány se skutečným zatížením v tabulce 8 a 9. Přesnost měření senzoru R1 je podle výsledků měření asi 7 N a senzoru R2 asi 6 N.

Tabulka 8 Měřené hodnoty na senzoru R1

skutečné zatížení [N]	naměřené hodnoty při zatěžování ve směru označení šipkou [N]	naměřené hodnoty při odlehčování ve směru označení šipkou [N]	naměřené hodnoty při zatěžování v opačném směru označení šipkou [N]	naměřené hodnoty při odlehčování v opačném směru označení šipkou [N]
0	5,2	5	-0,5	-0,3
100	103,0	103	-100,2	-100,0
200	201,0	200	-199,8	-199,8
300	299,0	299	-299,4	-299,6
400	397,0	398	-396,4	-396,5
500	496,0	496	-493,6	-493,7
600	594,5	594	-599,2	-593,7
700	693,0	694	-696,0	-698,6
800	795,0	799	-794,0	-793,6
900	893,0	895	-897,0	-899,5
1000	993,0	993	-995,5	-996,0

Tabulka 9 Měřené hodnoty senzoru R2

skutečné zatížení [N]	naměřené hodnoty při zatěžování ve směru označení šipkou [N]	naměřené hodnoty při odlehčování ve směru označení šipkou [N]	naměřené hodnoty při zatěžování v opačném směru označení šipkou [N]	naměřené hodnoty při odlehčování v opačném směru označení šipkou [N]
0	0,2	0,1	-2,9	-5,6
100	100,0	100,0	-105,0	-104,0
200	200,0	199,5	-204,0	-204,0
300	299,0	299,0	-302,0	-302,0
400	397,0	397,0	-402,0	-402,0
500	494,0	494,0	-500,0	-500,0
600	595,0	596,0	-601,0	-601,5
700	695,2	696,2	-701,0	-701,5
800	795,0	796,0	-800,5	-800,7
900	894,6	898,0	-900,1	-901,0
1000	994,7	995,0	-999,8	-1000,1

Tera Term - (disconnected) VT		File	Edit	Setup	Control	Window	Help																		
D1	7885836	D2	9297704	D3	8389047	D4	8485782	D5	8400298	D6	8468562	D7	-739.8	D2	-665.7	(Fu1	-1405.5)	D3	0.0	D4	0.1	D5	0.2	D6	1.9
D1	7885967	D2	9297717	D3	8389072	D4	8485880	D5	8400213	D6	8468553	D7	-739.8	D2	-665.7	(Fu1	-1405.5)	D3	0.0	D4	0.2	D5	0.1	D6	1.9
D1	7885751	D2	9297847	D3	8389054	D4	8485889	D5	8400195	D6	8468517	D7	-739.9	D2	-665.7	(Fu1	-1405.5)	D3	0.0	D4	0.2	D5	0.1	D6	1.9
D1	7885875	D2	9298081	D3	8389046	D4	8485849	D5	8400176	D6	8468562	D7	-739.8	D2	-665.6	(Fu1	-1405.4)	D3	0.0	D4	0.2	D5	0.1	D6	1.9
D1	7885769	D2	9280473	D3	8389068	D4	8485958	D5	8400946	D6	8468513	D7	-739.8	D2	-670.3	(Fu1	-1410.1)	D3	0.0	D4	0.2	D5	0.6	D6	1.9
D1	7885896	D2	9552573	D3	8389038	D4	8485973	D5	8400942	D6	8468475	D7	-739.8	D2	-597.9	(Fu1	-1337.7)	D3	0.0	D4	0.2	D5	0.6	D6	1.9
D1	7885894	D2	9460221	D3	8389027	D4	8485971	D5	8397965	D6	8468429	D7	-739.8	D2	-622.5	(Fu1	-1362.3)	D3	0.0	D4	0.2	D5	-0.7	D6	1.9
D1	7885745	D2	9404577	D3	8389030	D4	8485956	D5	8399140	D6	8468429	D7	-739.9	D2	-637.3	(Fu1	-1377.1)	D3	0.0	D4	0.2	D5	-0.3	D6	1.9
D1	7885870	D2	9322615	D3	8389056	D4	8485905	D5	8399040	D6	8468524	D7	-739.8	D2	-659.1	(Fu1	-1398.9)	D3	0.0	D4	0.2	D5	-0.4	D6	1.9
D1	7885798	D2	9440014	D3	8389037	D4	8486022	D5	8398896	D6	8468453	D7	-739.8	D2	-627.8	(Fu1	-1367.7)	D3	0.0	D4	0.3	D5	-0.4	D6	1.9
D1	7885843	D2	9539956	D3	8389044	D4	8486010	D5	8399077	D6	8468488	D7	-739.8	D2	-601.3	(Fu1	-1341.1)	D3	0.0	D4	0.2	D5	-0.4	D6	1.9
D1	7885699	D2	9538700	D3	8389033	D4	8485964	D5	8398997	D6	8468502	D7	-739.9	D2	-601.6	(Fu1	-1341.5)	D3	0.0	D4	0.2	D5	-0.4	D6	1.9
D1	7885796	D2	9556899	D3	8389038	D4	8485980	D5	8398915	D6	8468508	D7	-739.8	D2	-596.7	(Fu1	-1336.6)	D3	0.0	D4	0.2	D5	-0.4	D6	1.9
D1	7885793	D2	9554728	D3	8389034	D4	8485946	D5	8398932	D6	8468418	D7	-739.8	D2	-597.3	(Fu1	-1337.2)	D3	0.0	D4	0.2	D5	-0.4	D6	1.9
D1	7885698	D2	9554048	D3	8389054	D4	8485902	D5	8398953	D6	8468404	D7	-739.9	D2	-597.5	(Fu1	-1337.4)	D3	0.0	D4	0.2	D5	-0.4	D6	1.9
D1	7885795	D2	9553320	D3	8389066	D4	8485974	D5	8398942	D6	8468512	D7	-739.8	D2	-597.7	(Fu1	-1337.5)	D3	0.0	D4	0.2	D5	-0.4	D6	1.9
D1	7885758	D2	9553077	D3	8389056	D4	8485989	D5	8398934	D6	8468449	D7	-739.9	D2	-597.8	(Fu1	-1337.6)	D3	0.0	D4	0.2	D5	-0.4	D6	1.9
D1	7885828	D2	9552420	D3	8389016	D4	8485993	D5	8399058	D6	8468386	D7	-739.8	D2	-597.9	(Fu1	-1337.8)	D3	0.0	D4	0.2	D5	-0.4	D6	1.9
D1	7885711	D2	9552312	D3	8389074	D4	8485941	D5	8398899	D6	8468480	D7	-739.8	D2	-598.0	(Fu1	-1337.7)	D3	0.0	D4	0.2	D5	-0.4	D6	1.9
D1	7885787	D2	9552117	D3	8389042	D4	8485965	D5	8398952	D6	8468490	D7	-739.8	D2	-598.0	(Fu1	-1337.9)	D3	0.0	D4	0.2	D5	-0.4	D6	1.9
D1	7885750	D2	9551733	D3	8389054	D4	8485965	D5	8398960	D6	8468405	D7	-739.9	D2	-598.1	(Fu1	-1338.0)	D3	0.0	D4	0.2	D5	-0.4	D6	1.9
D1	7885688	D2	9551719	D3	8389041	D4	8486033	D5	8398875	D6	8468523	D7	-739.9	D2	-598.1	(Fu1	-1338.0)	D3	0.0	D4	0.2	D5	-0.4	D6	1.9
D1	7885746	D2	9551774	D3	8389044	D4	8485994	D5	8398850	D6	8468348	D7	-739.9	D2	-598.1	(Fu1	-1338.0)	D3	0.0	D4	0.2	D5	-0.4	D6	1.9
D1	7885699	D2	9551538	D3	8389039	D4	8485994	D5	8398850	D6	8468348	D7	-739.9	D2	-598.1	(Fu1	-1338.0)	D3	0.0	D4	0.2	D5	-0.4	D6	1.9
D1	7885803	D2	9551840	D3	8389064	D4	8486019	D5	8398812	D6	8468400	D7	-739.9	D2	-598.1	(Fu1	-1338.0)	D3	0.0	D4	0.2	D5	-0.4	D6	1.9
D1	7885681	D2	9551671	D3	8389052	D4	8485946	D5	8398753	D6	8468327	D7	-739.8	D2	-598.1	(Fu1	-1338.0)	D3	0.0	D4	0.2	D5	-0.4	D6	1.9
D1	7885790	D2	9551725	D3	8389046	D4	8485994	D5	8398891	D6	8468338	D7	-739.8	D2	-598.1	(Fu1	-1338.0)	D3	0.0	D4	0.2	D5	-0.4	D6	1.8
D1	7885746	D2	9551501	D3	8389037	D4	8485994	D5	8398827	D6	8468439	D7	-739.9	D2	-598.2	(Fu1	-1338.0)	D3	0.0	D4	0.2	D5	-0.4	D6	1.9
D1	7885772	D2	9551152	D3	8389034	D4	8485999	D5	8398889	D6	8468517	D7	-739.8	D2	-598.3	(Fu1	-1338.1)	D3	0.0	D4	0.2	D5	-0.4	D6	1.9
D1	7885715	D2	9551346	D3	8389046	D4	8486022	D5	8398803	D6	8468432	D7	-739.9	D2	-598.2	(Fu1	-1338.1)	D3	0.0	D4	0.2	D5	-0.4	D6	1.9
D1	7885789	D2	9551502	D3	8389034	D4	8486000	D5	8398748	D6	8468448	D7	-739.9	D2	-598.2	(Fu1	-1338.0)	D3	0.0	D4	0.2	D5	-0.4	D6	1.9
D1	7885705	D2	9551533	D3	8389060	D4	8485966	D5	8398808	D6	8468381	D7	-739.9	D2	-598.2	(Fu1	-1338.0)	D3	0.0	D4	0.2	D5	-0.4	D6	1.9
D1	7885772	D2	9551686	D3	8389056	D4	8486112	D5	8398698	D6	8468521	D7	-739.8	D2	-598.1	(Fu1	-1338.0)	D3	0.0	D4	0.3	D5	-0.5	D6	1.9
D1	7885671	D2	9551684	D3	8389040	D4	8486107	D5	8398756	D6	8468454	D7	-739.9	D2	-598.1	(Fu1	-1338.0)	D3	0.0	D4	0.3	D5	-0.5	D6	1.9
D1	7885619	D2	9551764	D3	8389048	D4	8486094	D5	8398888	D6	8468376	D7	-739.9	D2	-598.1	(Fu1	-1338.0)	D3	0.0	D4	0.3	D5	-0.4	D6	1.9

Obrázek 40 Zobrazení hodnot v programu Tera Term

10. Závěr

V této diplomové práci jsem se snažila navrhnout, vyrobit a otestovat funkci zařízení pro měření zatížení řididel silami v řízení letadla od pilota.

Pro měření zatížení kniplu ve směru podélném a příčném byl vyvinut systém se zapojením dvou zakoupených váhových senzorů. Jejich charakteristika se ukázala jako lineární, proto kalibrace nebyla složitá. Při následném ověření funkce systému se ukázalo, že přesnost měření senzoru R1 je s odchylkou přibližně 7 N a senzor R2 s odchylkou asi 6 N.

Při měření systému pro pedály se ukázalo, že v případě zapojení čtyř senzorů do jednoho plného můstku, je možné použít i desku ve tvaru chodidla. Při tomto zapojení bylo totiž během měření zjištěno, že nezáleží na tom, v jaké části je deska zatěžována. Na rozdíl od desky se zapojením senzorů do dvou půlmůstků, u které by musel pilot tlačit pouze do středu desky. V případě čtyř senzorů do jednoho plného můstku je přesnost měření systému s odchylkou 9 N. Pro systém se zapojením senzorů do dvou půlmůstků se přesnost měření nepodařilo zjistit. Systém totiž na konci zatěžování upadl a jeden z drátků se téměř ze senzoru vytrhl. Ověření funkce tak nemohlo proběhnout.

Systém je nyní ještě nutné odzkoušet na letadle. Navíc ať už pro měření zatížení ručního nebo nožního řízení, je nezbytné pro každý typ letadla vyrobit zvlášť vlastní objímku pro upevnění na knipl nebo pedály.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Předpis UL 2 - část I. (Požadavky letové způsobilosti SLZ. Ultralehké letouny řízené aerodynamicky)
- [2] Odporové tenzometry-princip, provedení, použití, historie. *Automatizace.hw.cz* [online]. [cit. 2021-7-28]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/foliove-odporove-tenzometry-princip-provedeni-pouziti-historie.html>
- [3] BARTUŠEK, Karel. *Měření v elektrotechnice*. 2., přeprac. a dopl. vyd. Brno: VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-4160-6.
- [4] Examples of Measurement with Strain Gages. [online]. [cit. 2021-7-28]. Dostupné z: http://www.kyowa-ei.co.jp/eng/support/technical/tecnical_info/strain_gages/gages.html
- [5] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN isbn80-01-02057-6.
- [6] BEJČEK, L., ČEJKA, M., REZ, J., GESCHEIDTOVÁ, E., STEINBAUER, M. *Měření v elektrotechnice*. Měření v elektrotechnice. Brno: VUT- FEKT, 2002.
- [7] DANK, M.: *Zkoušení letadel za letu*, Brno, 1962
- [8] MELOUN, M-MILITKÝ, J.: *Statistické zpracování experimentálních dat*, East Publishing, Praha, 1998
- [9] Strain gages. [online]. [cit. 2021-7-28]. Dostupné z: http://www.kyowa-ei.co.jp/eng/support/technical/tecnical_info/strain_gages/gages.html
- [10] KAPLAN, Tomáš, 2018. *Návrh a realizace měřící ústředny mechanických veličin*. Brno. Diplomová práce. VUT v Brně.
- [11] PTÁČEK, 2008. *Zařízení pro měření zatížení řididel silami od pilota*. Praha. Diplomová práce. ČVUT v Praze.
- [12] Dynamic 86. In: *Pilotní akademie* [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <http://www.pilotni-akademie.cz/pujcovna-ul-letadel/dynamic-86/>
- [13] Vážicí senzor. In: *Banggood* [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.banggood.com/cs/200KG-Weighing-Sensor-Electronic-Scale-Cantilever-Force-Sensor-Aluminium-Alloy-p-1283526.html>
- [14] Vážicí senzor 50kg. In: *Laskarduino* [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.laskarduino.cz/quang-ce-yzc-161-vazici-senzor-50kg/>

- [15] AD Převodník Modul 24-bit 2 kanály HX711. In: *Laskarduino* [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.laskarduino.cz/ad-prevodnik-modul-24-bit-2-kanaly-hx711/>
- [16] 50kg load cells with HX711. In: *Circuitjournal* [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://circuitjournal.com/50kg-load-cells-with-HX711>
- [17] Eevblog. *Electronics Community Forum* [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: <https://www.eevblog.com/forum/reviews/large-cheap-weight-digital-scale-options/25/>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Princip geometrické deformace vodiče [4]	13
Obrázek 2 Mechanické provedení tenzometrických snímačů: a) drátkový, b) fóliový, c) naprašovaný [6].....	15
Obrázek 3 Rozdělení fóliových tenzometrů pro různé druhy měření [2]	17
Obrázek 4 Měření axiální deformace [2].....	18
Obrázek 5 Měření ohybu na nosníku [2].....	19
Obrázek 6 Měření torzní deformace použitím dvou "dvojitých" křížových tenzometrů pootočených o 45° [2].....	19
Obrázek 7 Wheastoneův můstek [6].....	21
Obrázek 8 Možné konfigurace Wheastoneova můstku [10]	21
Obrázek 9 Cockpit letounu Dynamic 86 [12]	26
Obrázek 10 Návrh ručního systému vytvořený v programu Autodesk Inventor	27
Obrázek 11 Druhý návrh ručního systému vytvořený v programu Autodesk Inventor	28
Obrázek 12 Váhový senzor – elektronická váha [13]	28
Obrázek 13 Váhový tenzometrický senzor se zatížitelností do 50 kg [14]	29
Obrázek 14 Spodní část měřícího systému vytvořená v programu Autodesk Inventor	30
Obrázek 15 Horní část měřícího systému vytvořená v programu Autodesk Inventor	30
Obrázek 16 Systém s horní částí ve tvaru chodidla vytvořený v programu Autodesk Inventor.....	31
Obrázek 17 Díl tvaru T vytvořený v programu Autodesk Inventor	32
Obrázek 18 Díl tvaru L vytvořený v programu Autodesk Inventor	33
Obrázek 19 Modul HX711 [15]	33
Obrázek 20 NUCLEO-F446RE.....	34
Obrázek 21 Desky s připevněnými senzory	35
Obrázek 22 Zapojení senzorů jako dva půlmůstky	36
Obrázek 23 Připevnění senzorů při zapojení do plného můstku	37
Obrázek 24 Propojení senzorů při zapojení do plného můstku [17]	37
Obrázek 25 Ukázka zapojení senzorů na převodník HX711 [17]	38
Obrázek 26 Odporů váhových senzorů a jejich vývod na převodník HX711 [17]	39
Obrázek 27 Zapojení převodníků HX711 s procesorem.....	40
Obrázek 28 Zobrazení procesoru s vyznačenými zvolenými piny	41
Obrázek 29 Blokové schéma.....	42
Obrázek 30 Vývojový diagram.....	43
Obrázek 31 Detail zatížení senzorů při zatěžování 5 cm od okraje	44
Obrázek 32 Zatěžování měřícího systému	45
Obrázek 33 Průběh měření zatížení a odlehčení na D1	45
Obrázek 34 Průběh měření zatížení a odlehčení na D2.....	46
Obrázek 35 Zatěžování senzorů na okraji desky.....	47
Obrázek 36 Průběh měření zatížení a odlehčení na D4.....	48
Obrázek 37 Zatěžování senzoru R1	49

Obrázek 38 Průběh měření zatížení a odlehčení na D6.....	50
Obrázek 39 Průběh měření zatížení a odlehčení na D5.....	50
Obrázek 40 Zobrazení hodnot v programu Tera Term	54

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Mezní hodnoty sil od pilota	9
Tabulka 2 Provozní zatížení dle UL-2 a LTF-UL	10
Tabulka 3 Provozní zatížení dle CS-VLA a FAR-23	10
Tabulka 4 Změřený odpor	35
Tabulka 5 Propojení převodníků 1 až 6 s procesorem NUCLEO-32F446RE .	41
Tabulka 6 Měřené hodnoty sil na vstupech D1 a D2	51
Tabulka 7 Měřené hodnoty sil při zatěžování na vstupu D4	52
Tabulka 8 Měřené hodnoty na senzoru R1.....	52
Tabulka 9 Měřené hodnoty senzoru R2.....	53
Tabulka 10 Výsledky vlastního měření na vstupu D1 a D2	61
Tabulka 11 Výsledky vlastního měření na vstupu D4	62
Tabulka 12 Výsledky vlastního měření na vstupu D5 a D6	63

PŘÍLOHA 1

Tabulka 10 Výsledky vlastního měření na vstupu D1 a D2

	způsob zatěžování	středem		5 cm od okraje	
	síla [N]/vstup	D1	D2	D1	D2
měření při zatěžování	0	7840291,9	8980833,45	7981490,35	8987180,85
	100	7660650,05	8808773,8	8506397,9	8033832,4
	200	7431942,45	8594801,9	9021138,2	7104708
	300	7199788,05	8395800,95	9600665,1	6120955,95
	400	6970302,6	8190197,95	10446830,8	4847264,45
	500	6721626,6	8009575,6	11307605,95	3574690,5
	600	6489572,7	7797362,6	10505840,9	4766936,85
	700	6236344,2	7643768,7	9652982,15	6035391,15
	800	6021335,9	7403919	9031309,85	7074690,7
	900	5808275	7162856,5	8530325,8	8005014,5
	1000	5787860,5	7260217,25	7994594,2	8976925,1
měření při odlehčování	900	5900400,1	7404871,15		
	800	5893781,1	7580544,85		
	700	6040626	7778619,05		
	600	6399915,25	7908589,2		
	500	6613211,25	8107737,35		
	400	6821363,4	8338545		
	300	7724599,05	8530693,15		
	200	7873640,2	8686993,3		
	100	5900400,1	7404871,15		
	0	8137552,7	9014584,2		

Tabulka 11 Výsledky vlastního měření na vstupu D4

	způsob zatěžování	středem	přes hranu	těsně u okraje	těsně u okraje 2. str.	5 cm od okraje
	síla [N]/vstup	D4	D4	D4	D4	D4
měření při zatěžování	0	8476084	8456212,95	8451825,5	8479030,25	8470882,8
	100	8687471,2	8652097,9	8647918,45	8678752,9	8668913,1
	200	8895398	8850181	8850553,35	8886321,9	8866982,75
	300	9092395,22	9047628,95	9049445,8	9088598,05	9062816,9
	400	9283261,5	9238246,4	9254848,25	9288765,35	9261693,95
	500	9486419,95	9431144,1	9449512,05	9491573,4	9466685,1
	600	9703207,25	9631901,45	9647544,45	9693436,05	9655385,25
	700	9886609,5	9811066,45	9843114,15	9889012,2	9835365,3
	800	10109995,1	9999527	10042638,2	10097794,15	
	900	10309026	10236249,3	10253840,65	10295389,55	
	1000	10519837,1	10440745,7	10429195	10499559,45	
měření při odlehčování	900	10323898,1		10270351,75	10343840	
	800	10101269,8		10060241,35	10154325,7	
	700	9916008		9857672,7	9937013,3	
	600	9712317,3		9657818,55	9720656,6	
	500	9498067,25		9460943,4	9514587,4	
	400	9291129,65		9260821,05	9260267	
	300	9099072,2		9057145,85	9107049,1	
	200	8890228,95		8857563,5	8902204,1	
	100	8683124,3		8653907	8691924,3	
0	8476981,85		8454945,7	8485314,15		

Tabulka 12 Výsledky vlastního měření na vstupu D5 a D6

	způsob zatěžování	proti šipce	ve směru šipky	proti šipce	ve směru šipky
	síla [N]/vstup	D5	D5	D6	D6
měření při zatěžování	0	8389984	8401147,65	8460374,7	8481478,75
	100	8250817,58	8540453,45	8170550	8771289,75
	200	8112654,83	8679692,65	7880564,15	9061315,95
	300	7973632,7	8819085,95	7589661,15	9351316,85
	400	7831466,58	8958994,2	7292616,75	9644902,8
	500	7691626,28	9097890,8	6998343,25	9944883,3
	600	7548234,93	9241319,6	6707341,7	10239775,65
	700	7403402,13	9389403,95	6396185,5	10527097,05
	800	7267747,53	9541110,4	6113300,55	10808163,5
	900	7127181,73	9669536,9	5794184	11119490
	1000	6988793,33	9838337,55	5489320,2	11438968,7
měření při odlehčování	900	7132762,75	9669572,15	5775293,95	11115997,9
	800	7274795,08	9520362,45	6084130,95	10810290,7
	700	7412562,15	9377445,6	6408652,35	10518011,1
	600	7558730,58	9231369,7	6719073,95	10210684,45
	500	7694858,83	9096556,1	7012058,95	9929296,1
	400	7833616,1	8957485,3	7301887,4	9639984,75
	300	7973054,03	8818520,7	7591615,85	9350403,55
	200	8111081,48	8679339,7	7881350,1	9060412,05
	100	8258192,08	8540112,15	8171213,6	8770249
	0	8390421,93	8400840,65	8461011,6	8480573,5

PŘÍLOHA 2

Skript hx711.h

```
#ifndef HX711_H_
#define HX711_H_

#include "stm32f3xx_hal.h"
#include "main.h"

typedef struct _hx711
{
    GPIO_TypeDef* gpioSck;
    GPIO_TypeDef* gpioData;
    uint16_t pinSck;
    uint16_t pinData;
    int offset;
    int gain;
    // 1: channel A, gain factor 128
    // 2: channel B, gain factor 32
    // 3: channel A, gain factor 64
} HX711;

void HX711_Init(HX711 data);
HX711 HX711_Tare(HX711 data, uint8_t times);
int HX711_Value(HX711 data);
int HX711_AverageValue(HX711 data, uint8_t times);

#endif /* HX711_H_ */
```


Skript hx711.c

```
#include "hx711.h"

void HX711_Init(HX711 data)
{
    // GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure;
    // GPIO_InitStructure.Pin = data.pinSck;
    // GPIO_InitStructure.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
    // GPIO_InitStructure.Pull = GPIO_NOPULL;
    // GPIO_InitStructure.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
    // HAL_GPIO_Init(data.gpioSck, &GPIO_InitStructure);
    //
    // GPIO_InitStructure.Pin = data.pinData;
    // GPIO_InitStructure.Mode = GPIO_MODE_INPUT;
    // GPIO_InitStructure.Pull = GPIO_PULLUP;
    // GPIO_InitStructure.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
    // HAL_GPIO_Init(data.gpioData, &GPIO_InitStructure);

    HAL_GPIO_WritePin(data.gpioSck, data.pinSck, GPIO_PIN_SET);
    //HAL_GPIO_WritePin(GPIOA,GPIO_PIN_5, GPIO_PIN_SET);
    HAL_Delay(50);
    HAL_GPIO_WritePin(data.gpioData, data.pinSck, GPIO_PIN_RESET);
    //HAL_GPIO_WritePin(GPIOA,GPIO_PIN_5, GPIO_PIN_RESET);
}

int HX711_Average_Value(HX711 data, uint8_t times)
{
    int sum = 0;
    for (int i = 0; i < times; i++)
    {
        sum += HX711_Value(data);
    }

    return sum / times;
}

int HX711_Value(HX711 data)
{
    int buffer;
    buffer = 0;

    while (HAL_GPIO_ReadPin(data.gpioData, data.pinData)==1)
    ;

    for (uint8_t i = 0; i < 24; i++)
    {
        HAL_GPIO_WritePin(data.gpioSck, data.pinSck, GPIO_PIN_SET);
        //HAL_GPIO_WritePin(GPIOA,GPIO_PIN_5, GPIO_PIN_SET);

        buffer = buffer << 1 ;

        if (HAL_GPIO_ReadPin(data.gpioData, data.pinData))
        {
            buffer ++;
        }

        HAL_GPIO_WritePin(data.gpioSck, data.pinSck, GPIO_PIN_RESET);
        //HAL_GPIO_WritePin(GPIOA,GPIO_PIN_5, GPIO_PIN_RESET);
    }
}
```

```

    }

    for (int i = 0; i < data.gain; i++)
    {
        HAL_GPIO_WritePin(data.gpioSck, data.pinSck, GPIO_PIN_SET);
        //HAL_GPIO_WritePin(GPIOA,GPIO_PIN_5, GPIO_PIN_SET);
        HAL_GPIO_WritePin(data.gpioSck, data.pinSck, GPIO_PIN_RESET);
        //HAL_GPIO_WritePin(GPIOA,GPIO_PIN_5, GPIO_PIN_RESET);
    }

    buffer = buffer ^ 0x800000;

    return buffer;
}

HX711 HX711_Tare(HX711 data, uint8_t times)
{
    int sum = HX711_Average_Value(data, times);
    data.offset = sum;
    return data;
}

```

Hlavní skript

```
#include "main.h"
#include <stdbool.h>
#include <stdio.h>

#include "hx711.h"
#include "string.h"

#define cCAL_MAX_ITEMS 10
typedef struct tCalName
{

    long lArrMinWeight[cCAL_MAX_ITEMS];
    long lArrMaxWeight[cCAL_MAX_ITEMS];
    long lArrMinADC[cCAL_MAX_ITEMS];
    long lArrMaxADC[cCAL_MAX_ITEMS];

    int iActItems;

} tCal;

tCal glb_oSensorFootV1_D1__input1 = (tCal){
    .lArrMinWeight = { -1500/2, 0, 500/2},
    .lArrMaxWeight = { 0, 500/2, 1000/2 },
    .lArrMinADC = { 7840291, 6721626, 578760},
    .lArrMaxADC = { 11200000, 7840291, 6721626 },

    .iActItems = 3,
};

tCal glb_oSensorFootV1_D2__input2 = (tCal){
    .lArrMinWeight = { -1500/2, 0, 500/2 },
    .lArrMaxWeight = { 0, 500/2, 1000/2 },
    .lArrMinADC = { 8980833, 8009575, 7260217},
    .lArrMaxADC = { 11800000 ,8980833, 8009575 },

    .iActItems = 3,
};

tCal glb_oSensorFootV2__input4 = (tCal){
    .lArrMinWeight = { -1500, 0, 800 },
    .lArrMaxWeight = { 0, 800, 1500 },
    .lArrMinADC = { 5300000, 8485516, 10101269 },
    .lArrMaxADC = { 8485516, 10101269, 11650000 },

    .iActItems = 3,
};

tCal glb_oSensorR1__input6 = (tCal){
    .lArrMinWeight = { -1000, 0 },
    .lArrMaxWeight = { 0, 1000 },
    .lArrMinADC = { 5489320, 8462860 },
    .lArrMaxADC = { 8462860, 11438968 },

    .iActItems = 2,
};

tCal glb_oSensorR2__input5 = (tCal){
```

```

.lArrMinWeight = { -1000, 0 },
.lArrMaxWeight = { 0, 1000 },
.lArrMinADC = { 6988793, 8401148 },
.lArrMaxADC = { 8401148, 9838337 },

.iActItems = 2,
};

UART_HandleTypeDef huart2;

/* USER CODE BEGIN PV */
volatile int mer =0;
volatile int mer_2 =0;
volatile int mer_3 =0;
volatile int mer_4 =0;
volatile int mer_5 =0;
volatile int mer_6 =0;
volatile int merAtlag =0;
/* USER CODE END PV */

void SystemClock_Config(void);
static void MX_GPIO_Init(void);
static void MX_USART2_UART_Init(void);

int GetCalibData( int inADC, tCal * pCal, double *pWeight );

bool tempVar=true;
/**
 * @brief The application entry point.
 * @retval int
 */
int main(void)
{
    /* USER CODE BEGIN 1 */
    HX711 hx11;
    hx11.gpioSck = HS711SCK_GPIO_Port;
    hx11.gpioData = HX711OUTPUT_GPIO_Port;
    hx11.pinSck = HS711SCK_Pin;
    hx11.pinData = HX711OUTPUT_Pin;
    hx11.offset = 0;
    hx11.gain = 64;

    HX711 hx11_2;
    hx11_2.gpioSck = HS711SCK2_GPIO_Port;
    hx11_2.gpioData = HX711OUTPUT2_GPIO_Port;
    hx11_2.pinSck = HS711SCK2_Pin;
    hx11_2.pinData = HX711OUTPUT2_Pin;
    hx11_2.offset = 0;
    hx11_2.gain = 64;

    HX711 hx11_3;
    hx11_3.gpioSck = HS711SCK3_GPIO_Port;
    hx11_3.gpioData = HX711OUTPUT3_GPIO_Port;
    hx11_3.pinSck = HS711SCK3_Pin;
    hx11_3.pinData = HX711OUTPUT3_Pin;
    hx11_3.offset = 0;
    hx11_3.gain = 64;

    HX711 hx11_4;
    hx11_4.gpioSck = HS711SCK4_GPIO_Port;

```

```

hx11_4.gpioData = HX711OUTPUT4_GPIO_Port;
hx11_4.pinSck = HS711SCK4_Pin;
hx11_4.pinData = HX711OUTPUT4_Pin;
hx11_4.offset = 0;
hx11_4.gain = 64;

HX711 hx11_5;
hx11_5.gpioSck = HS711SCK5_GPIO_Port;
hx11_5.gpioData = HX711OUTPUT5_GPIO_Port;
hx11_5.pinSck = HS711SCK5_Pin;
hx11_5.pinData = HX711OUTPUT5_Pin;
hx11_5.offset = 0;
hx11_5.gain = 64;

HX711 hx11_6;
hx11_6.gpioSck = HS711SCK6_GPIO_Port;
hx11_6.gpioData = HX711OUTPUT6_GPIO_Port;
hx11_6.pinSck = HS711SCK6_Pin;
hx11_6.pinData = HX711OUTPUT6_Pin;
hx11_6.offset = 0;
hx11_6.gain = 64;

double arr_dWeight[6];
int iRetVal;
for( int iCnt = 0; iCnt < 6; iCnt++)
{
    arr_dWeight[iCnt] = 0;
}

HAL_Init();

/* USER CODE BEGIN Init */

/* USER CODE END Init */

/* Configure the system clock */
SystemClock_Config();

/* Initialize all configured peripherals */
MX_GPIO_Init();
MX_USART2_UART_Init();
/* USER CODE BEGIN 2 */
HX711_Init(hx11);
// HX711_Init(hx11_2);
// HX711_Init(hx11_3);
// HX711_Init(hx11_4);
// HX711_Init(hx11_5);
// HX711_Init(hx11_6);

char masage[2*255];
//uint8_t times = 4;
//merAtlag = HX711_AverageValue(hx11, times);
while (1)
{
    mer = HX711_Value(hx11); // MERI VSTUP adc1
    mer_2 = HX711_Value(hx11_2); // VSTUP adc2
    mer_3 = HX711_Value(hx11_3); // ..
    mer_4 = HX711_Value(hx11_4); // ..
    mer_5 = HX711_Value(hx11_5);
    mer_6 = HX711_Value(hx11_6);
}

```

```

        //mer = HX711_AverageValue(hx11, times);
        iRetVal = GetCalibData( mer, &glb_oSensorFootV1_D1__input1,
&arr_dWeight[1-1]);
/*
        HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t *)masage,
        sprintf(masage, "D1: Input %ld : RetVal %d, weight
%7.1f]\r\n",mer, iRetVal, dWeight ),1000);
*/

        iRetVal = GetCalibData( mer_2, &glb_oSensorFootV1_D2__input2,
&arr_dWeight[2-1]);
/*
        HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t *)masage,
        sprintf(masage, "D2: Input %ld : RetVal %d, weight
%7.1f]\r\n",mer_2, iRetVal, dWeight ),1000);

        iRetVal = GetCalibData( mer_4, &glb_oSensorFootV2__input4,
&arr_dWeight[4-1]);
/*
        HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t *)masage,
        sprintf(masage, "D4: Input %ld : RetVal %d, weight
%7.1f]\r\n",meres_4, iRetVal, dWeight ),1000);
*/
        iRetVal = GetCalibData( mer_5, &glb_oSensorR2__input5, &arr_dWeight[5-
1]);
        iRetVal = GetCalibData( mer_6, &glb_oSensorR1__input6, &arr_dWeight[6-
1]);

        HAL_Delay(500);
/*
        HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t *)masage,
        sprintf(masage, "D1 %d D2 %d D3 %d D4 %d D5 %d D6
%d\n\r", mer, mer_2, mer_3, mer_4, mer_5, mer_6),1000);
*/

        HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t *)masage,
        sprintf(masage, "D1 %d D2 %d D3 %d D4 %d D5 %d D6 %d - D1
%7.1f D2 %7.1f (Fv1 %7.1f) D3 %7.1f D4 %7.1f D5 %7.1f D6 %7.1f \r\n",
        mer, mer_2, mer_3, mer_4, mer_5, mer_6,
        arr_dWeight[1-1], arr_dWeight[2-1],
arr_dWeight[1-1]+arr_dWeight[2-1], arr_dWeight[3-1], arr_dWeight[4-1],
arr_dWeight[5-1], arr_dWeight[6-1]),
        1000);

        //HAL_UART_Transmit(&huart2, masage, sprintf(masage, "ahoj"),1000);
    }
}

int GetCalibData( int inADC, tCal * pCal, double *pWeight )
{
    int iCnt;

    *pWeight = -6543.21f;

    for( iCnt = 0; iCnt < pCal->iActItems; iCnt++ )
    {
        if( (inADC>pCal->lArrMinADC[iCnt])&&(inADC<=pCal-
>lArrMaxADC[iCnt]) )
        {

```

```

        double dDiv = (pCal->lArrMaxADC[iCnt]-pCal-
>lArrMinADC[iCnt]);
        if (dDiv==0) return 0;
        //printf( " dDiv %f \n", dDiv );
        double dTop = (pCal->lArrMaxWeight[iCnt]-pCal-
>lArrMinWeight[iCnt]);
        //printf( " dTop %f \n", dTop );

        double dA = dTop/dDiv;
        //printf( " dA %f \n", dA );
        double dB = pCal->lArrMinWeight[iCnt] - pCal-
>lArrMinADC[iCnt]*dA;
        //printf( " dB %f \n", dB );

        *pWeight = inADC*dA + dB;
        return 1;
    }
} // end for

return 0;
}

/**
 * @brief System Clock Configuration
 * @retval None
 */
void SystemClock_Config(void)
{
    RCC_OscInitTypeDef RCC_OscInitStruct = {0};
    RCC_ClkInitTypeDef RCC_ClkInitStruct = {0};

    /** Configure the main internal regulator output voltage
    */
    __HAL_RCC_PWR_CLK_ENABLE();
    __HAL_PWR_VOLTAGESCALING_CONFIG(PWR_REGULATOR_VOLTAGE_SCALE3);
    /** Initializes the RCC Oscillators according to the specified parameters
    * in the RCC_OscInitTypeDef structure.
    */
    RCC_OscInitStruct.OscillatorType = RCC_OSCILLATORTYPE_HSI;
    RCC_OscInitStruct.HSIState = RCC_HSI_ON;
    RCC_OscInitStruct.HSICalibrationValue = RCC_HSICALIBRATION_DEFAULT;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLState = RCC_PLL_ON;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLSource = RCC_PLLSOURCE_HSI;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLM = 16;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLN = 336;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLP = RCC_PLLP_DIV4;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLQ = 2;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLR = 2;
    if (HAL_RCC_OscConfig(&RCC_OscInitStruct) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }
    /** Initializes the CPU, AHB and APB buses clocks
    */
    RCC_ClkInitStruct.ClockType = RCC_CLOCKTYPE_HCLK|RCC_CLOCKTYPE_SYCLK
        |RCC_CLOCKTYPE_PCLK1|RCC_CLOCKTYPE_PCLK2;
    RCC_ClkInitStruct.SYCLKSource = RCC_SYCLKSOURCE_PLLCLK;
    RCC_ClkInitStruct.AHBCLKDivider = RCC_SYCLK_DIV1;
    RCC_ClkInitStruct.APB1CLKDivider = RCC_HCLK_DIV2;
    RCC_ClkInitStruct.APB2CLKDivider = RCC_HCLK_DIV1;

```

```

    if (HAL_RCC_ClockConfig(&RCC_ClkInitStruct, FLASH_LATENCY_2) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }
}

static void MX_USART2_UART_Init(void)
{
    huart2.Instance = USART2;
    huart2.Init.BaudRate = 115200;
    huart2.Init.WordLength = UART_WORDLENGTH_8B;
    huart2.Init.StopBits = UART_STOPBITS_1;
    huart2.Init.Parity = UART_PARITY_NONE;
    huart2.Init.Mode = UART_MODE_TX_RX;
    huart2.Init.HwFlowCtl = UART_HWCONTROL_NONE;
    huart2.Init.OverSampling = UART_OVERSAMPLING_16;
    if (HAL_UART_Init(&huart2) != HAL_OK)
    {
        Error_Handler();
    }
}

static void MX_GPIO_Init(void)
{
    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStruct = {0};

    /* GPIO Ports Clock Enable */
    __HAL_RCC_GPIOC_CLK_ENABLE();
    __HAL_RCC_GPIOH_CLK_ENABLE();
    __HAL_RCC_GPIOA_CLK_ENABLE();
    __HAL_RCC_GPIOB_CLK_ENABLE();

    /*Configure GPIO pin Output Level */
    // HAL_GPIO_WritePin(GPIOA,
    LD2_Pin|HX711OUTPUT6_Pin|HX711OUTPUT5_Pin|HX711OUTPUT4_Pin|HX711OUTPUT3_Pin|HX7
    11OUTPUT2_Pin|HX711OUTPUT_Pin, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOA, LD2_Pin, GPIO_PIN_RESET);

    /*Configure GPIO pin : B1_Pin */
    GPIO_InitStruct.Pin = B1_Pin;
    GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_IT_FALLING;
    GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
    HAL_GPIO_Init(B1_GPIO_Port, &GPIO_InitStruct);

    /*Configure GPIO pins : HX711OUTPUT5_Pin HX711OUTPUT3_Pin LD2_Pin
    HX711OUTPUT2_Pin
                                HX711OUTPUT_Pin HX711OUTPUT4_Pin HX711OUTPUT6_Pin */
    GPIO_InitStruct.Pin =
    LD2_Pin|HS711SCK_Pin|HS711SCK2_Pin|HS711SCK3_Pin|HS711SCK4_Pin|HS711SCK5_Pin|HS
    711SCK6_Pin;
    GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
    GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
    GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
    HAL_GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStruct);

    /*Configure GPIO pins : HS711SCK5_Pin HS711SCK3_Pin HS711SCK_Pin
    HS711SCK2_Pin
                                HS711SCK4_Pin HS711SCK6_Pin */

```



```

    //GPIO_InitStruct.Pin =
HX711OUTPUT6_Pin|HX711OUTPUT5_Pin|HX711OUTPUT4_Pin|HX711OUTPUT3_Pin|HX711OUTPUT
2_Pin|HX711OUTPUT_Pin;
    GPIO_InitStruct.Pin =
HX711OUTPUT5_Pin|HX711OUTPUT4_Pin|HX711OUTPUT3_Pin|HX711OUTPUT2_Pin|HX711OUTPUT
_Pin;
    GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_INPUT;
    GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
    HAL_GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStruct);

    GPIO_InitStruct.Pin = HX711OUTPUT6_Pin;
    GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_INPUT;
    GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
    HAL_GPIO_Init(GPIOC, &GPIO_InitStruct);
}

void Error_Handler(void)
{
    /* USER CODE BEGIN Error_Handler_Debug */
        /* User can add his own implementation to report the HAL error return
state */
        __disable_irq();
        while (1)
        {
        }
    /* USER CODE END Error_Handler_Debug */
}

#ifdef USE_FULL_ASSERT
/**
 * @brief Reports the name of the source file and the source line number
 * where the assert_param error has occurred.
 * @param file: pointer to the source file name
 * @param line: assert_param error line source number
 * @retval None
 */
void assert_failed(uint8_t *file, uint32_t line)
{
    /* USER CODE BEGIN 6 */
    /* User can add his own implementation to report the file name and line
number,
    tex: printf("Wrong parameters value: file %s on line %d\r\n", file, line)
 */
    /* USER CODE END 6 */
}
#endif /* USE_FULL_ASSERT */

```

Skript main.h

```
#ifndef __MAIN_H
#define __MAIN_H

#ifdef __cplusplus
extern "C" {
#endif

#include "stm32f4xx_hal.h"

void Error_Handler(void);

#define B1_Pin GPIO_PIN_13
#define B1_GPIO_Port GPIOC
#define HX711OUTPUT5_Pin GPIO_PIN_0
#define HX711OUTPUT5_GPIO_Port GPIOA
#define HS711SCK5_Pin GPIO_PIN_1
#define HS711SCK5_GPIO_Port GPIOA
#define USART_TX_Pin GPIO_PIN_2
#define USART_TX_GPIO_Port GPIOA
#define USART_RX_Pin GPIO_PIN_3
#define USART_RX_GPIO_Port GPIOA
#define HX711OUTPUT3_Pin GPIO_PIN_4
#define HX711OUTPUT3_GPIO_Port GPIOA
#define LD2_Pin GPIO_PIN_5
#define LD2_GPIO_Port GPIOA
#define HX711OUTPUT2_Pin GPIO_PIN_6
#define HX711OUTPUT2_GPIO_Port GPIOA
#define HS711SCK3_Pin GPIO_PIN_7
#define HS711SCK3_GPIO_Port GPIOA
#define HS711SCK_Pin GPIO_PIN_8
#define HS711SCK_GPIO_Port GPIOA
#define HX711OUTPUT_Pin GPIO_PIN_9
#define HX711OUTPUT_GPIO_Port GPIOA
#define HS711SCK2_Pin GPIO_PIN_10
#define HS711SCK2_GPIO_Port GPIOA
#define HX711OUTPUT4_Pin GPIO_PIN_11
#define HX711OUTPUT4_GPIO_Port GPIOA
#define HS711SCK4_Pin GPIO_PIN_12
#define HS711SCK4_GPIO_Port GPIOA
#define TMS_Pin GPIO_PIN_13
#define TMS_GPIO_Port GPIOA
#define HX711OUTPUT6_Pin GPIO_PIN_3
#define HX711OUTPUT6_GPIO_Port GPIOC

#define HS711SCK6_Pin GPIO_PIN_15
#define HS711SCK6_GPIO_Port GPIOA
#define SWO_Pin GPIO_PIN_3
#define SWO_GPIO_Port GPIOB

#ifdef __cplusplus
}
#endif
#endif
```