



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

## NÁVRH SOUSTAVY ŘÍZENÍ MODERNÍHO KLUZÁKU

FLIGHT CONTROL SYSTEM DESIGN FOR MODERN SAILPLANE

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Kocour

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Dubnický

BRNO 2024

## Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav  
Student: **Petr Kocour**  
Studijní program: Základy strojního inženýrství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Lukáš Dubnický**  
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### Návrh soustavy řízení moderního kluzáku

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Konstrukce sportovních kluzáků klade velké nároky na provedení soustavy řízení. Je to především v důsledku sdružení funkcí vztlakových klapek a balančních křidélek, spojování dílů křídla a s tím souvisejícím propojením mechanismů řídicí soustavy, ale také v důsledku omezeného vnitřního prostoru křídla a jeho velké štíhlosti. Práce má proto poskytovat rešerši technických řešení, jejich zhodnocení a následnou aplikaci na křídlo zadaných parametrů.

#### Cíle bakalářské práce:

Zpracovat rešerši technických řešení mechanických soustav řízení kluzáků obsahující popisy: konstrukce, kinematiky a přenosu závěsového momentu.

Zhodnotit používaná konstrukční řešení.

Zpracovat počáteční návrh soustavy příčného řízení a vztlakové mechanizace v křídle zadaných parametrů.

#### Seznam doporučené literatury:

Thomas, F. and Milgram, J. (1999) Fundamentals of Sailplane Design. 3, ilustrované vydání. College Park Press, ISBN 0966955307.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty



## ABSTRAKT

Práce je zaměřená na soustavy řízení používané především v kluzácích nebo případně v ultralehkých letadlech. Provedená rešerše ukazuje základní požadavky kladené na soustavy řízení a různá konstrukční řešení, která zajišťují splnění těchto požadavků. Shrnutí rešerše poté porovnává možné varianty. Následuje kapitola, ve které se nachází seznámení se zadaným křídlem obsahující jeho základní parametry. Dále jsou popsány mechanismy a řešení použité v návrhu soustavy příčného řízení a vztlakové mechanizace včetně podrobnějšího odůvodnění jejich volby. Výsledkem návrhu je soustava řízení vykazující požadované vlastnosti, kterými jsou například automatické propojení jednotlivých soustav, diferenciací výchylky křídélkovacího pohybu, rozdíl poměru křídélkovací a klapkovací výchylky na vnějším a vnitřním segmentu flaperonu nebo umístění mixážního mechanismu do prostoru křídla. Pro předběžnou kontrolu realizovatelnosti byl proveden pevnostní výpočet na části, která byla odhadnuta jako nejnámáhanější. Výsledkem MKP výpočtu bylo redukované napětí podle Von-Mises rovné 61 MPa, které se nachází hluboko pod mezí kluzu běžných hliníkových slitin.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Mechanismus řízení, flaperon, křídlo, kluzák, sumační mechanismus

## ABSTRACT

The thesis focuses on flight control mechanisms used in sailplanes or alternatively ultralight airplanes. The research done shows basic demands put on the flight control mechanisms and the different solutions that can be used to fulfill these demands. The research summary then compares the alternative solutions to each other. In the following chapter, the wing in subject is introduced, including its main parameters. Following is a description of the chosen variants for the flight control mechanism initial design, with explanations of why those variants were chosen. The result is a flight control mechanism initial design, which incorporates the selected properties, including for example automatic connection of separate mechanisms, differentiation of aileron deflection, different ratios of aileron to flap deflection for the inner and outer flaperon segments or placement of the summary mechanism into the wing itself. To check the suitability of the initial design, a stress calculation was carried out on what was approximated to be the part of the mechanism subjected to the most stress. The results of the FEM calculation suggested eligibility of the mechanism, showing the Von-Mises stress of 61 MPa, well below the yield strength of common aluminum alloys.

## KEYWORDS

Flight control mechanism, flaperon, wing, sailplane, summary mechanism



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KOCOUR, Petr. Návrh soustavy řízení moderního kluzáku. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157510>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Lukáš Dubnický.



**LETECKÝ ÚSTAV**

Institute of Aerospace  
Engineering

---

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Lukáše Dubnického a s použitím uvedených informačních zdrojů.

V Brně, dne 24. 5. 2024

---

Petr Kocour



## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu své bakalářské práce Ing. Lukáši Dubnickému za vedení a pomoc při vypracování mé práce, za jeho ochotu, trpělivost a připomínky. Dále bych rád poděkoval své rodině a přítelkyni za dlouhodobou podporu během studia.



## OBSAH

Úvod .....	10
1 Soustavy řízení.....	11
1.1 Závěsový moment .....	11
1.2 Orgány řízení.....	11
1.2.1 Křidélka .....	11
1.2.2 Klapky .....	12
1.2.3 Flaperony.....	12
1.2.4 Spoilery.....	12
2 Mechanické soustavy řízení kluzáků.....	13
2.1 Požadavky na soustavy řízení .....	13
2.2 Přenos závěsového momentu .....	13
2.3 Metody automatického propojení .....	15
2.4 Mechanické řešení diferenciací výchylky .....	17
2.5 Mixážní mechanismus .....	18
3 Shrnutí rešerše .....	19
4 Popis problému .....	20
4.1 Geometrie zadaného křídla .....	20
4.2 Specifické technické požadavky.....	21
4.3 Další zadané parametry.....	21
5 Návrh konstrukce.....	22
5.1 Poloha a typ automatického propojení.....	22
5.2 Realizace mixážního mechanismu.....	23
5.2.1 Přívod křídélkovacího (nesymetrického) pohybu na mixážní páku .....	23
5.2.2 Přívod klapkovacího (symetrického) pohybu na mixážní páku.....	24
5.3 Realizace rozdílných poměrů křídélkovacích a klapkovacích výchylek vnitřního a vnějšího flaperonu.....	25
5.4 Maximální výchylky mixážního mechanismu .....	26
5.5 Realizace přídatného diferenčního mechanismu křídélkovacího pohybu vnějšího flaperonu .....	28
5.6 Náhon vnitřního flaperonu.....	29
5.7 Náhon vnějšího flaperonu.....	31





---

6	Pevnostní kontrola vybraných částí návrhu soustavy řízení .....	32
6.1	Přibližné určení závěsových momentů flaperonů .....	32
6.2	Přenos sil soustavou řízení .....	34
6.2.1	Přenos sil z vnitřního flaperonu.....	35
6.2.2	Přenos sil z vnějšího flaperonu.....	37
6.3	Kontrola mixážní páky pomocí MKP.....	39
7	Další vývoj.....	41
	Závěr .....	42
	Seznam použitých zdrojů.....	43
	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	44
	Seznam obrázků .....	45



## ÚVOD

Pro bezpečný a nenáročný provoz letadel je nutné zajistit především stabilitu a ovladatelnost stroje. Stabilita běžně vychází z vhodného tvaru a polohy křídel a ocasních ploch. Ovladatelnosti lze dosáhnout více způsoby, mezi ty méně časté se řadí např. řízení polohy těžiště, které u moderních letadel spolupracuje s vertikálním stabilizátorem a výškovkou pro řízení klopení. Pro příčné řízení u letadel se téměř bezvýhradně využívá změny rozložení vztlaku na křídlech dosažená vychýlením orgánů řízení na odtokové hraně křídla. Výsledkem této změny je vznik žádaného klonivého momentu, který může pilot regulovat řídicí pákou. Doprovázejícím jevem je však i vznik parazitního zatačecího momentu, jenž se projevuje zhoršením letových vlastností. Dalším negativním projevem je zvýšení odporu křídla.

K dosažení pohybu orgánů řízení a k přenosu vznikajících aerodynamických sil slouží soustava řízení. Soustavy řízení podléhají mnoha požadavkům. Síly z orgánů řízení musí na ovládací prvky přenášet přesně v celém rozsahu řízení, musí splňovat přísné váhové požadavky a samozřejmě také musí vyhovovat pevnostně. U křídel se složitější soustavou orgánů řízení musí výchylky jednotlivých ploch splňovat parametry, které minimalizují nepříznivé účinky při klonění. Podle použitého principu přenosu síly se soustavy dají rozdělit na více kategorií, např. na hydraulické nebo elektrické. U malých letadel se pro jejich jednoduchost, nízkou hmotnost a nenáročnou údržbu používají soustavy čistě mechanické, kde pro přenos sil slouží táhla, tyče, páky, kladky nebo lana.

Prvotním cílem práce je provést rešerši současných řešení jednotlivých částí mechanických soustav řízení kluzáků, porovnat jednotlivé varianty a určit jejich výhody a nevýhody. Provedená rešerše má za cíl umožnit vhodnou volbu jednotlivých konstrukčních metod a částí potřebnou pro řešení dalších částí této závěrečné práce.

Dále je cílem zpracovat počáteční návrh soustavy příčného řízení a vztlakové mechanizace. Důvodem zaměření části bakalářské práce na toto téma jsou unikátní vlastnosti křídla zadaného pro vypracování, ve kterém by konvenční řešení nebylo možné z různých důvodů použít. Jednou z těchto vlastností, jak bude popsáno v samostatné kapitole, je počet a rozmístění stojin nosníků. Z tohoto důvodu bude nutné brát v potaz velmi omezený prostor v křídle. Dalšími požadavky hrajícími roli při návrhu jsou především minimalizace hmotnosti a aerodynamické vlastnosti, které určují žádané výchylky jednotlivých orgánů řízení.

Posledním cílem je počáteční ověření realizovatelnosti navržené soustavy. Pro malý prostor v křídle bude s velkou pravděpodobností nutné při dimenzování pák a táhel volit malé rozměry jednotlivých částí. Z těchto důvodů je cílem provést zjednodušený výpočet sil řízení. Následující pevnostní kontrola vytipované součásti pomocí metody konečných prvků (MKP) má pak stanovit, zda je zatížení této součásti v únosných mezích.



# 1 SOUSTAVY ŘÍZENÍ

Soustavy řízení umožňují kontrolovaný let díky zajištění stability a ovladatelnosti [1]. Nejčastěji toho dosahují řízením směru a velikosti aerodynamických sil. Pro dosažení těchto změn se používají orgány řízení, základním požadavkem na soustavy řízení je tedy zajištění pohybu orgánů řízení do potřebných výchylek a přenos sil, které tím vznikají. Soustavy řízení existují v různých provedeních, například hydraulické, pneumatické, elektrické, mechanické nebo různě kombinované [2]. Práce se dále zaměřuje na soustavu čistě mechanickou, protože je pro kluzáky stále nejnepříjemnější a žádoucí pro její spolehlivost a jednoduchost [3].

## 1.1 Závěsový moment

Nejběžnější pohyb orgánů řízení je rotace kolem osy, čímž se orgán řízení natáčí do proudu vzduchu v požadovaném směru. Vznikající aerodynamické síly vyvolávají závěsový moment k ose rotace dané ovládací plochy, který je nutné přenášet soustavou řízení k řídicím plochám.

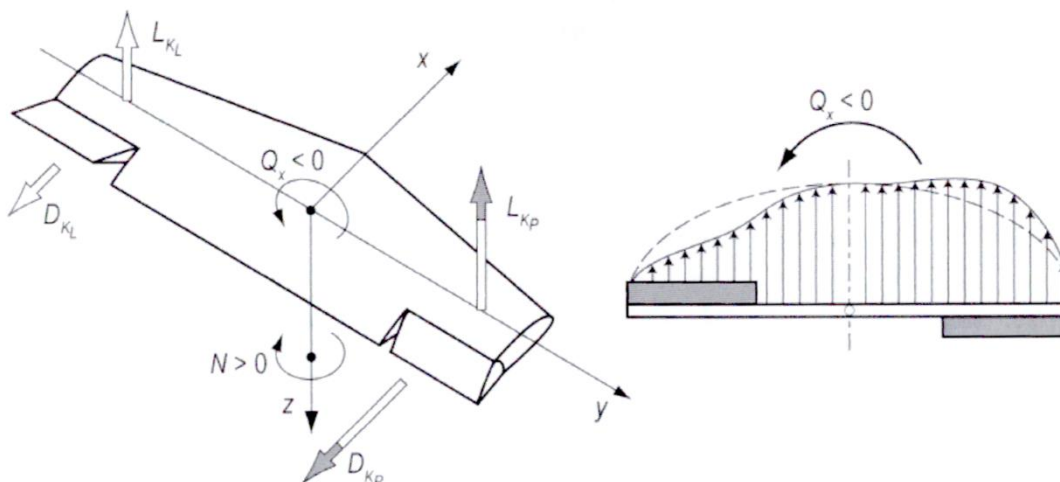
## 1.2 Orgány řízení

Stabilita a ovládání letu je běžně dosažena použitím různých řídicích ploch, mezi které se řadí výškové a směrové kormidlo, horizontální a vertikální stabilizátory, klapky, křídélka a spoilery [1]. Díky těmto plochám je možné řídit natočení okolo všech tří os. Jelikož se tato práce zabývá systémem řízení v křídle, budeme se zabývat pouze řídicími plochami, které se zde nachází neboli klapkami, křídélky a spoilery.

### 1.2.1 Křídélka

Křídélka jsou primárním orgánem řízení sloužící k ovládnutí klonění vyvozením žádaného klonivého momentu. Při pokynu pilota se na jednom křídle křídélko vychýlí dolů, čímž se vztlak zvýší, na druhém křídle se vychýlí nahoru, čímž se vztlak sníží. Tato asymetrie vztlaku (obr. 1 vpravo) vyvolá požadovaný klonivý moment. Na křídle s výchylkou křídélka dolů dochází k většímu přírůstku odporu než na křídle s výchylkou křídélka nahoru (obr. 1 vlevo). Důsledkem toho vzniká při klonění nežádoucí parazitní zatáčivý moment. Nejčastějším způsobem eliminace tohoto problému je diferenciace výchylek křídélka, kdy je výchylka křídélka nahoru větší než výchylka křídélka dolů [1]. Technické řešení diferenciace pohybu bude rozvedeno v dalších kapitolách.

## SOUSTAVY ŘÍZENÍ



Obr. 1 Rozložení vzlaku (vpravo) a silové a momentové účinky křídélek (vlevo) [1]

### 1.2.2 Klapky

Klapky jsou jedním z prvků vzlakové mechanizace křídel. Jejich účelem je zvýšení vzlaku umožňující let v nižších rychlostech. Používají se primárně při vzletu a přistání. U kluzáků se využívá i malá výchylka klapek směrem nahoru ve vysokých rychlostech, což snížením klopivého momentu a zlepšením aerodynamických vlastností snižuje potřebu klopení a vznikající odpor [4].

### 1.2.3 Flaperony

Flaperony jsou ovládací plochy kombinující funkci klapek a křídélek. Při letu bez klapek fungují stejně jako křídélka. Při požadavku na výchylku klapek se flaperony vysunují také, avšak často na menší úhel. Tato výchylka se stává neutrální pozicí křídélkovacího pohybu. [1] Výhodou tohoto řešení je rozšíření funkce ovládací plochy, která by jinak byla využita jen na klapkovací nebo jen na křídélkovací pohyb. Nevýhodou se stává snížení efektivity křídélkovacího pohybu při požadavku na vysunutí klapek.

### 1.2.4 Spoilery

Spoilery slouží ke snížení vzlaku a zvýšení odporu křídla. Používají se při potřebě snížení rychlosti letu nebo zvýšení rychlosti klesání [4]. Jejich funkce spočívá v rušení vzlaku křídla a zvýšení čelního odporu. U některých letadel jsou spoilery používány i pro účely klonění, kdy pomáhají křídélkům vyvolat dostatečný klonivý moment a zároveň pomáhají eliminovat parazitní zatáčecí moment. [1] U kluzáků se toto řešení pro minimalizaci celkového odporu nepoužívá.



## 2 MECHANICKÉ SOUSTAVY ŘÍZENÍ KLUZÁKŮ

Pro přenos řídicích sil od řídicích k ovládacím plochám lze využít několik různých řešení, mezi které se řadí například hydraulické nebo plně elektronické systémy (tzv. fly-by-wire, FBW). U lehkých letadel a kluzáků se pro jednoduchost, spolehlivost a úsporu hmotnosti užívají mechanické soustavy řízení složené z táhel, pák, tyčí, kladek a lan [2].

### 2.1 Požadavky na soustavy řízení

Základním požadavkem na soustavu řízení je schopnost spolehlivě přenášet síly řízení. Pohyby řídicích pák musí být na ovládací plochy přenášeny plynule, s minimálními odpory a vůlemi a s dostatečnou tuhostí. Speciálními požadavky jsou diferenciace výchylek křidélek a mixáž klapovacího a křidélkovacího pohybu pro flaperony. Soustava řízení zároveň musí odpovídat rozměrovým a geometrickým omezením vnitřních prostor.

### 2.2 Přenos závěsového momentu

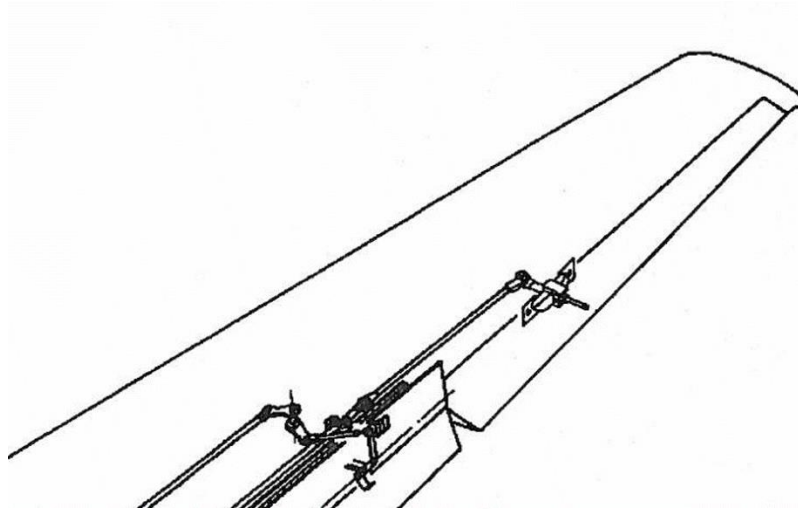
Závěsový moment lze do soustavy řízení přenášet více způsoby. Jedním z nich je využití pákového mechanismu, který kroutivý moment z ovládací plochy převádí na sílu působící na rameni. Je zřejmé, že snižování délky tohoto ramena ústí v nutnost zvětšování síly pro vyvození stejného točivého momentu. Vzhledem k nízké výšce křídel kluzáků proto páka náhonu ovládací plochy zpravidla vystupuje mimo profil křídla a je opatřena aerodynamickým krytem, jak je vidět na obr. 2



Obr. 2 Mechanismus náhonu flaperonu opatřený aerodynamickým krytem kluzáku AS33 Es [9]

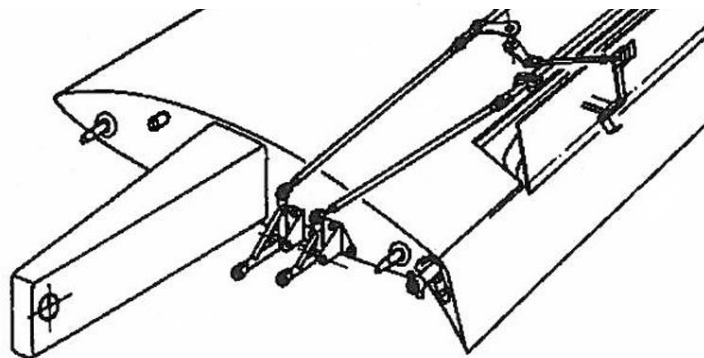
## MECHANICKÉ SOUSTAVY ŘÍZENÍ KLUZÁKŮ

Existují i další možnosti přenosu závěsového momentu, které nevystupují mimo profil křídla. Jedna z těchto možností, využívající úhlovou páku a táhlo, je zobrazena na obr. 3.



Obr. 3 Náhon vnějšího křídélka nevstupující mimo profil křídla kluzáku Grob G103 Twin Astir [10]

Další možností náhonu je použití torzní tyče, jejíž náhon je realizován v trupu. Ukázka tohoto řešení je na obr. 4.



Obr. 4 Náhon klapky pomocí torzní tyče kluzáku Grob G103 Twin Astir [10]

Zlepšení aerodynamických vlastností je vyvážené většími silami nutnými pro dosažení požadovaného momentu. Tyto síly se navíc přenášejí i do závěsů řídicích ploch. Výsledkem je nejen navýšení hmotnosti mechanismu samotného náhonu, ale i výztuh křídla, na které se přenáší síly ze závěsů řídicích ploch.

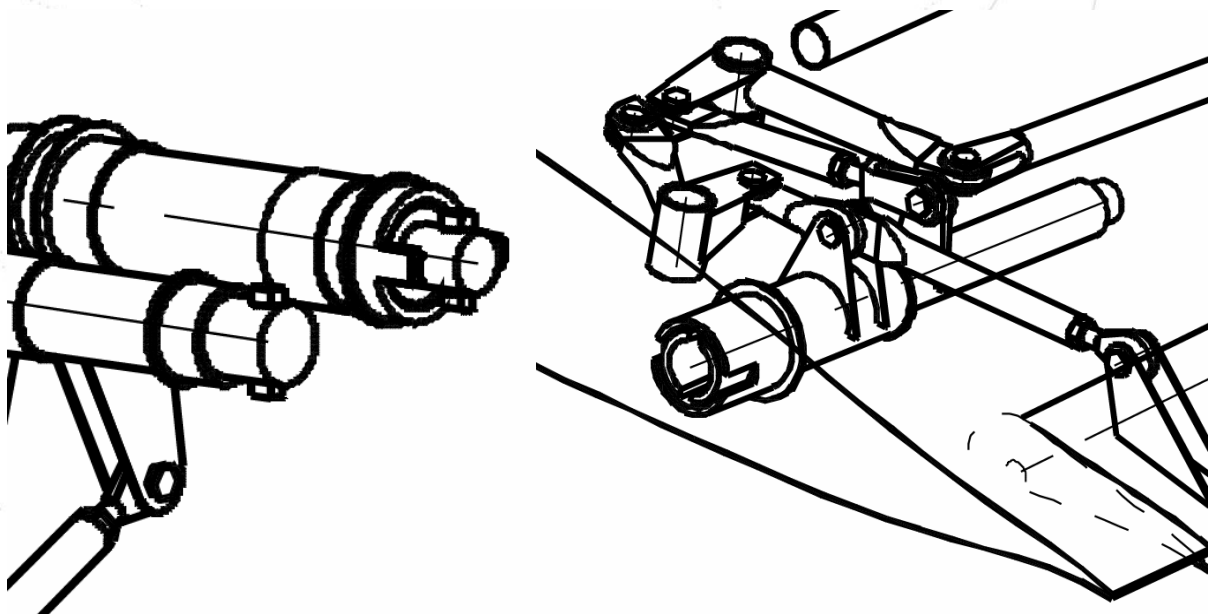
Jednotlivé řídicí plochy kluzáků mají zpravidla jeden náhon. Toto řešení zlepšuje aerodynamické vlastnosti, protože minimalizuje nerovnosti na křídle. Dále výrazně ulehčuje výpočet zatížení, protože se jedná o staticky určitou úlohu. Vzhledem k malé hloubce řídicích ploch je jeden náhon běžně dostatečný [4].



## 2.3 Metody automatického propojení

Kluzáky jsou běžně konstruovány tak, aby bylo možné je snadno rozebrat na menší celky za účelem transportu. Běžně se oddělují křídla a vodorovné ocasní plochy od trupu. Křídla pak mohou být rozložena na pravou a levou polovinu a u kluzáků větších rozpětí je možné oddělit i nástavce křídel, čímž se dále zmenší délka transportovaných částí. S dělením křídla souvisí i potřeba rozdělení soustav řízení. U starších kluzáků bylo nutné při každém sestavování propojit soustavy řízení např. vsazením čepů do některých spojů. To zvětšovalo prostor pro lidskou chybu. Z důvodu bezpečnosti a usnadnění montáže se dnes používají prvky umožňující automatické propojení soustav řízení. Tyto prvky jsou zkonstruovány tak, aby pohybem při nasazování křídla došlo k samovolnému spojení soustav řízení. Pokud by k úspěšnému propojení nedošlo, nesmí jít křídlo namontovat. Pro tyto účely lze opět využít více mechanismů. Mezi základní varianty se řadí propojení krutové a kyvné.

Krutové spojení využívá hřídele s vhodně tvarovanými konci, které jsou umístěny tak, aby se do sebe při instalaci křídla zasunuly a tím i propojily. Obě hřídele jsou při letu namáhány krutem, proto je potřeba vhodně vyřešit jejich náhon, kde je třeba brát v úvahu prostorové omezení zejména v křídle. Nevýhodou také je, že montáž křídla musí probíhat prostým posuvem, jelikož krutový mechanismus umožňuje pouze minimální úhlové vychýlení. Při užití tvarování konců hřídelů s kolmými výřezy jako na obr. 5 je také pro montáž nutné ručně natočit ovládací plochy do takové polohy, do které by je vedla pozice řídicí tak, aby do sebe tyto výřezy mohly zapadnout.



Obr. 5 Zakončení krutových tyčí automatického propojení v trupu (vlevo) a v křídle (vpravo) kluzáku LAK-17B [11]

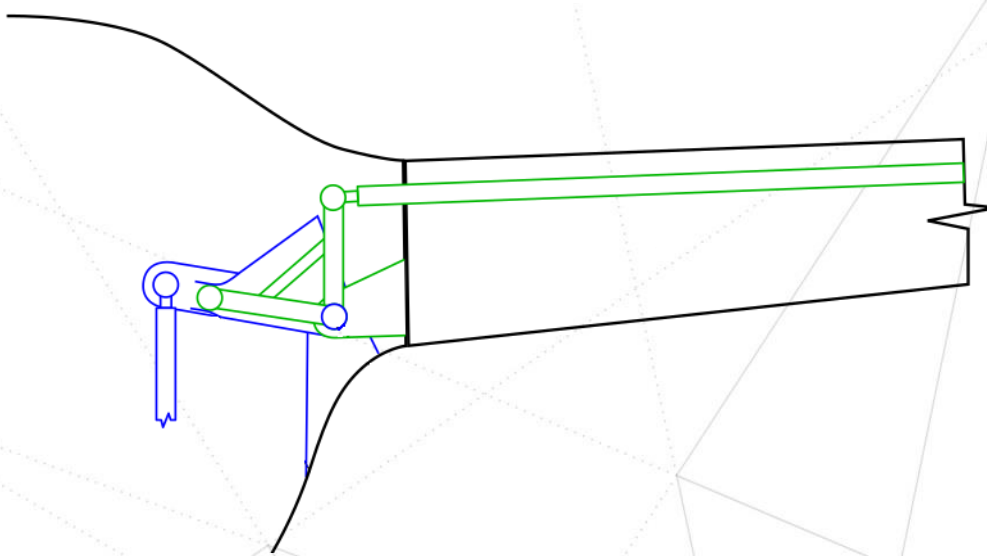


## MECHANICKÉ SOUSTAVY ŘÍZENÍ KLUZÁKŮ

Dalším řešením je spojení kyvné, které se podobně jako spojení krutové skládá ze dvou vhodně tvarovaných součástí se společnou osou rotace, nejde však o hřídele, ale o páku a tzv. zvonek, jak lze vidět na obr. 6 a obr. 7.



Obr. 6 Kyvný mechanismus automatického spojení řízení mezi trupem a křídlem kluzáku ASK 21 v rozpojeném stavu [13]



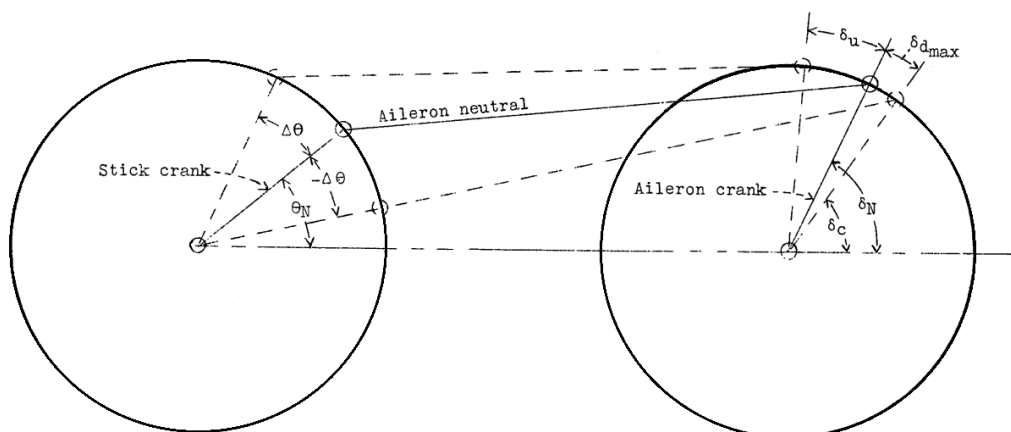
Obr. 7 Schéma spojeného kyvného mechanismu – pohled zředu [12]

Velkou výhodou tohoto provedení je, že pohyb vcházející do soustavy v křídle má již vhodný směr ve vhodné rovině a není ho proto třeba různými pákami měnit. Pro uživatele je také výhodný fakt, že díky širokému otevření zvonku není pro montáž křídla nutné ručně nastavovat pozici řídicích ploch. Zvonek lze navrhnout i tak, aby umožňoval větší úhlové natočení, díky čemuž lze přistoupit i k montáži, která nezahrnuje pouze prostý posuv.



## 2.4 Mechanické řešení diferenciací výchylky

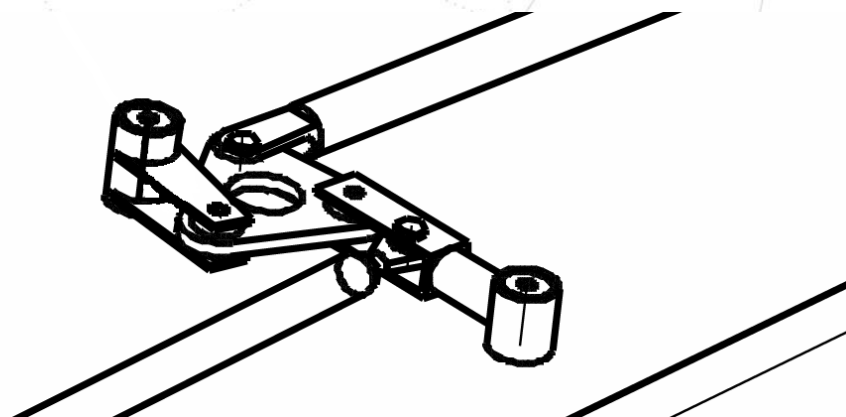
Pro diferenciací výchylky křidélek se často využívají mechanismy založené na principech trigonometrie. Jak lze vidět na obr. 8, záměrnou volbou geometrie lze jednoduše dosáhnout mechanické diferenciací výchylky křidélek [5].



Obr. 8 Mechanické řešení diferenciací křidélek [5]

Pokud není podstatný celkový pohyb konce páky, ale pouze pohyb v určitém směru, je možné podobného efektu dosáhnout i použitím pouze jedné páky, která vyvolá úhlové natočení neutrální pozice vůči středu otáčení. Tohoto principu bude využito pro dosažení dostatečného poměru horní a dolní výchylky křídlovacího pohybu vnějších flaperonů.

Nevýhodou tohoto řešení je jeho nelineární projev. Částečné kompenzace tohoto problému lze dosáhnout využitím vhodně tvarovaného paralelogramu, který nelinearitu projevu při velkých výchylkách diferencčního mechanismu vyrovná. Ukázkou tohoto řešení je použití paralelogramu v křídle kluzáku LAK 17B, které je zobrazeno na obr. 9. Použitím paralelogramů lze mechanicky měnit průběh reakce výchylek na pokyny z řídicího, čehož lze využít pro ladění letových charakteristik.



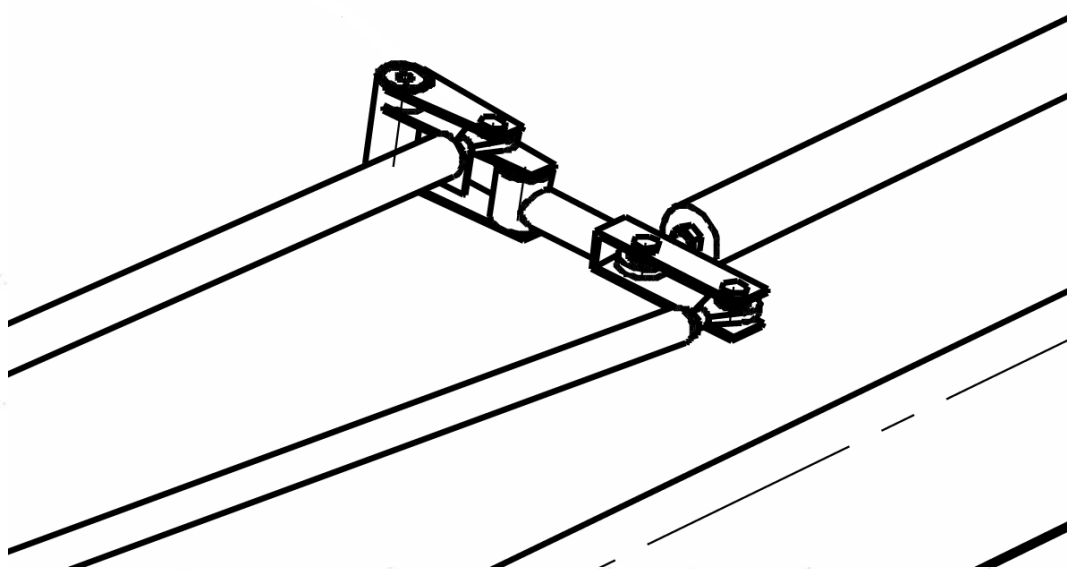
Obr. 9 Paralelogram v křídle kluzáku LAK 17B [11]



## 2.5 Mixážní mechanismus

Mixážní mechanismus slouží k mechanické kombinaci klapkovacího a křídélkovacího pohybu přiváděných z řídicích. Výstupní pohyb je poté táhly převáděn na náhon flaperonů. Podmínkou tohoto mechanismu je, že musí mít právě 2 stupně volnosti.

Častým způsobem řešení je použití páky, na jejíž konce jsou přivedeny vstupy z ovládacích prvků klapky a křídélka. V dalších kapitolách je tato páka označována pojmem mixážní páka. Jeden z těchto konců musí být zároveň napojen na páku, která zajistí pohyblivé propojení s trupem a která zároveň přenáší veškeré vertikální síly. Body ležící na mixážní páce mezi vstupy se pak řídí jak klapkovacím, tak i křídélkovacím pohybem. Na obr. 10 je ukázáno toto řešení v křídle kluzáku LAK 17B, kde se tento mechanismus nachází v křídle.



Obr. 10 Mixážní mechanismus v křídle kluzáku LAK 17B [11]

Změnou pozice výstupního bodu na mixážní páce lze velmi snadno měnit poměr klapkovacích a křídélkovacích výchylek flaperonu, a to např. u kluzáků, jenž mají vnitřní a vnější flaperon, které se mají chovat různě. Čím blíže se pozice výstupního bodu přibližuje k některému vstupu, tím větší význam má tento vstup v pohybu výstupního bodu.



### 3 SHRNU TÍ REŠERŠE

Soustavy řízení používané v kluzácích jsou specifické v mnoha ohledech. Obecně se využívá přenos sil táhly namáhanými tahem nebo tlakem. Toto řešení se vyznačuje vyšší tuhostí v porovnání s tyčemi namáhanými krutem [2]. Pro zajištění nízké hmotnosti jsou prvky řízení běžně vyrobeny z hliníkových slitin a táhla jsou duté konstrukce, která zajišťuje vysokou vzpěrnou stabilitu při zachování nízké hmotnosti.

Jednotlivé řídicí plochy mají zpravidla jeden náhon, což výrazně ulehčuje výpočet zatížení a zlepšuje aerodynamické vlastnosti. Závěsový moment se nejčastěji přenáší pomocí páky a táhla, které zpravidla vystupují mimo profil křídla (mimo jiné i pro jednoduchost údržby). Existují varianty, které profil křídla neopouští, jejich nevýhodou je ale výrazné zvýšení sil. Tyto síly namáhají nejenom samotný mechanismus náhonu, ale také závěsy řídicí plochy. Nárůst hmotnosti těchto prvků pak zneguje aerodynamické výhody, jež toto řešení přináší.

Charakteristickým prvkem kluzáků je požadavek na uživatelsky jednoduchou montáž a demontáž různých součástí. Pro zamezení lidského omylu při propojování soustav řízení se používají metody automatického spojení. Mechanismů sloužících tomuto účelu existuje více, nejběžněji se používá kyvný a krutový. Výhody kyvného mechanismu jsou především snadnost montáže, protože není nutné manuálně nastavovat výchylku řídicích ploch do pozice vhodné pro spojení. Dále umožňuje více volnosti při vzájemném pohybu při montáži, čehož lze využít u křidel, které mají více bodů závěsu.

Diferenciace výchylky křidélek (případně křídélkovacího pohybu flaperonů) výrazně ovlivňuje letové charakteristiky. Nejvýznamnější úlohou tohoto řešení je minimalizace nežádoucího zatáčivého momentu vznikajícího rozdílem odporů křidel při klonění [1]. Změnami v průbězích výchylek lze optimalizovat také celkový indukovaný odpor při klonění, což má velký vliv obzvláště u kluzáků, které se nepřímým letem pohybují častěji než motorová letadla [6]. Další faktor ovlivnitelný diferenciací křidélek je síla, kterou musí pro klonění pilot vyvinout na řídidla. Lze ukázat, že vhodně zkonstruovanou soustavou řízení s diferenciací křidélek lze tuto sílu výrazně snížit [5]. Přídavnými mechanismy, např. paralelogramy, lze měnit průběh výchylky řídicích ploch a tím i letové vlastnosti kluzáku.

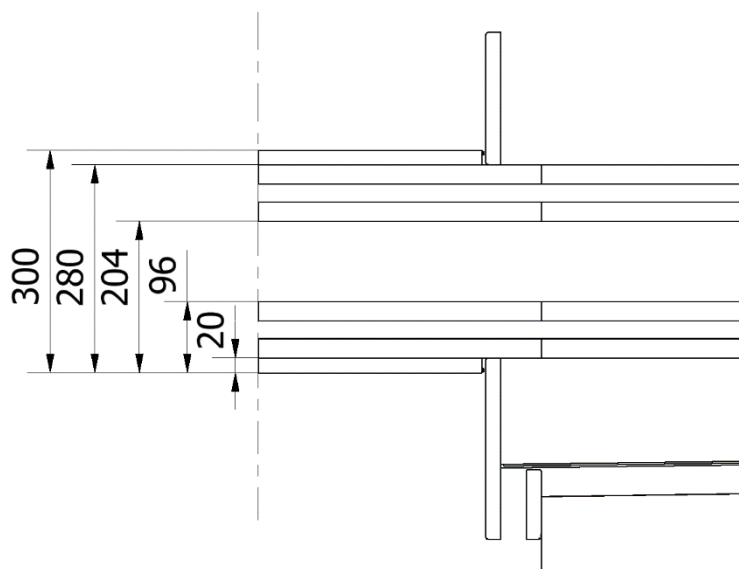
Flaperony jsou řídicí plochy, které kombinují funkce klapky a křidélek tak, že aktuální výchylka klapkovacího pohybu se stává neutrální pozicí pro křídélkovací [1]. Pro kombinaci těchto pohybů je nutné použití mixážního mechanismu, často realizovaného mixážní pákou. Vlivem tenkosti profilu je v křídle omezený prostor, což vybízí k umístění mixážního mechanismu do prostoru trupu. Toto řešení snižuje využitelný prostor v kabině. Umístění mechanismu mimo prostor generující vztlak navíc zvyšuje ohybové zatížení křidel. Klapkovací pohyb je pro levé a pravé křídlo symetrický, křídélkovací je nesymetrický, pro levé a pravé křídlo je tedy nutné mít vlastní mixážní páky.

## 4 POPIS PROBLÉMU

Cílem této práce je mimo jiné navrhnout mechanickou soustavu řízení do křídla moderního kluzáku. Specifiky tohoto křídla jsou jeho neobvyklá vnitřní stavba a způsob uchycení do trupu.

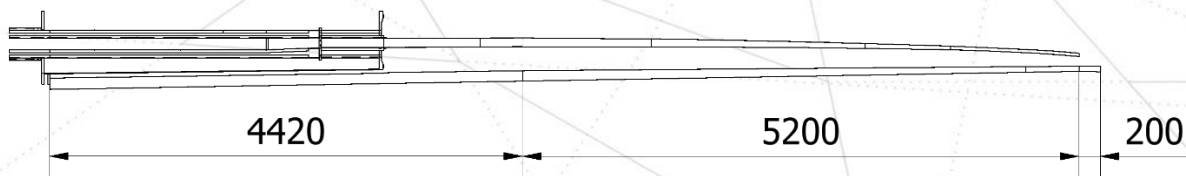
### 4.1 Geometrie zadaného křídla

Zadané křídlo je oproti běžným řešením křídel kluzáků specifické ve více ohledech. Je rozděleno na třetiny, kde každý segment má rozpětí 7 m pro celkové rozpětí kluzáku 21 m. Ve střední části se nachází dva páry nosníků, což výrazně omezuje vnitřní prostor, viz obr. 11.



Obr. 11 Rozvržení nosníků centrálního segmentu křídla

Vnější segmenty křídla jsou běžné konstrukce s jedním nosníkem. Po většině délky odtokové hrany křídla jsou umístěny flaperony rozdělené do dvou částí, viz obr. 12. Vnitřní flaperon má délku 4420 mm (3120 mm v centrálním segmentu křídla a 1300 mm ve vnějším segmentu křídla) a jeho primární pohyb má být klapkový. Vnější flaperon má délku 5200 mm a jeho primární pohyb má být křídélkový. Na vnějším konci odtokové hrany křídla se nachází spoiler o délce 200 mm sledující pouze zápornou výchylku vnějšího flaperonu (nahoru).



Obr. 12 Rozvržení flaperonů na zadaném křídle



---

**POPIS PROBLÉMU**

## 4.2 Specifické technické požadavky

Křídla běžných kluzáků jsou rozdělená na levé a pravé a montují se do trupu nasunutím zboku. Zadané křídlo je rozdělené na třetiny, to znamená, že prostřední segment se musí montovat shora současným posunem a náklonem o cca 15°. Tomu musí být uzpůsobeny především zadní závěsy a mechanismy automatického propojení řízení, které musí umožňovat dostatečnou volnost pro náklon. Vnější segmenty křídel se do centrální části montují zboku posunem, pro propojení soustav řízení centrálního a vnějších segmentů lze proto použít konvenční mechanismy.

Dalším ze specifických požadavků je umístění mixážního mechanismu do prostoru křídla, díky čemuž lze ušetřit místo v trupu a využít jinak neobsazený prostor v křídle. Soustava řízení dále musí vyvozovat diferenční výchylku křídélkovacího pohybu. Zároveň má umožňovat rozdílné poměry klapkovacího a křídélkovacího pohybu na vnitřním a vnějším flaperonu. Propojení řízení mezi trupem a křídlem a mezi centrálním a vnějšími segmenty křídla mají být automatická. Do křídla vstupují 3 pohyby řízení, a to z ovládání klapek, křídélek a spoilerů.

Poměr maximální křídélkovací výchylky flaperonu nahoru ku maximální křídélkovací výchylce flaperonu dolů, v této práci dále označován jako poměr diference, je hodnota, která významně ovlivňuje letové vlastnosti kluzáku. Po dohodě s vedoucím práce byla zvolena cílová hodnota poměru diference pro vnější flaperon rovna 2. V kapitole zabývající se řešením mechanismů diference jsou popsány možnosti úpravy této hodnoty pro potřeby optimalizace návrhu.

Vzhledem k požadavkům na soustavu řízení je nutné na několika místech přerušit stojiny nosníků, pásnice však narušené být nesmí. Průchody přes stojiny nosníků způsobí oslabení konstrukce, které bude napraveno vyztužením stojin v místech průchodů. Vyztužení stojin není předmětem této práce.

## 4.3 Další zadané parametry

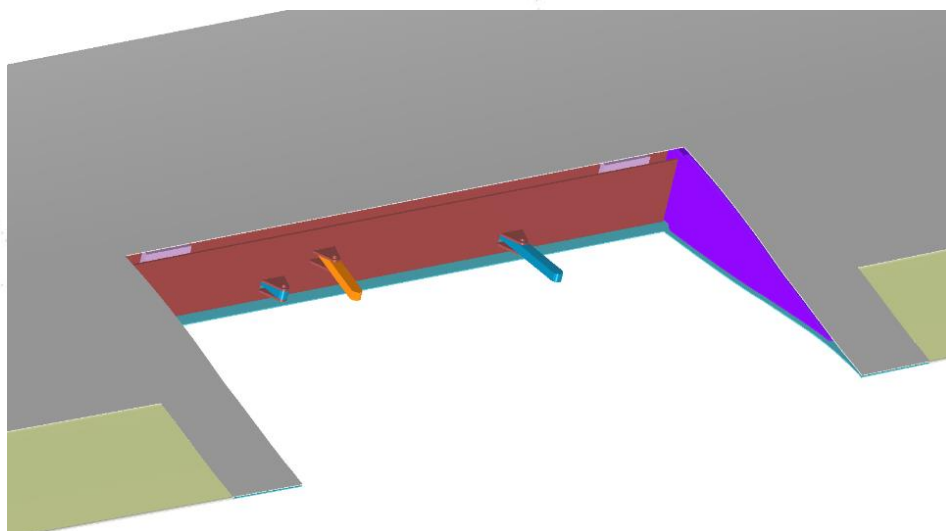
parametr	označení	jednotka	hodnota
hmotnost kluzáku	$m$	[kg]	650
plocha křídla	$S$	[m <sup>2</sup> ]	12,19
provozní letový násobek zatížení	$n_1$	[-]	7
součinitel početního zatížení	$k$	[-]	1,5

## 5 NÁVRH KONSTRUKCE

Návrh soustavy řízení byl zpracován v programu Autodesk Inventor Professional 2024. Modely táhel a pák zobrazené v této práci slouží pouze pro účely přehlednosti, zobrazení navrhovaných tras a kinematický výpočet. Snahou bylo, aby především táhla alespoň přibližně vzhledem a velikostí odpovídala skutečným součástem, jejich modely se však nezakládají na pevnostních výpočtech. Podobně i napojení pák na stojiny nosníků byla modelována tak, aby byl zřejmý jejich účel.

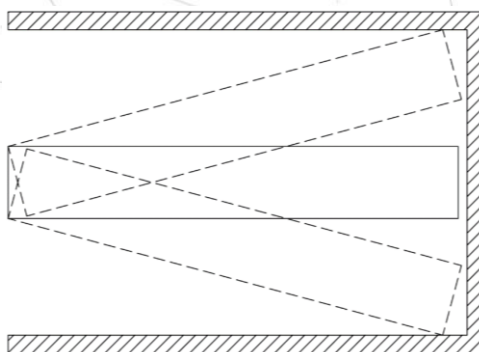
### 5.1 Poloha a typ automatického propojení

Jak lze vidět na obr. 13, umístění automatického propojení soustav řízení v trupu a v křídle bylo zvoleno kyvné na stojině nejzadnějšího nosníku v centrálním segmentu křídla. Toto řešení nezasahuje do pásnic, čímž splňuje požadavky, a jeho výstupní pohyb leží ve vodorovné rovině, která je pro další mechanismy výhodná.



Obr. 13 Realizace automatického propojení soustav řízení v trupu a v křídle

Vzhledem k nutnosti natočení křídla při montáži je nutné použít kyvný typ propojení s rozšířenými zvonky, které toto natočení umožní, viz obr. 14.



Obr. 14 Výškové rozšíření zvonku pro umožnění naklopení křídla při montáži (pohled z boku)



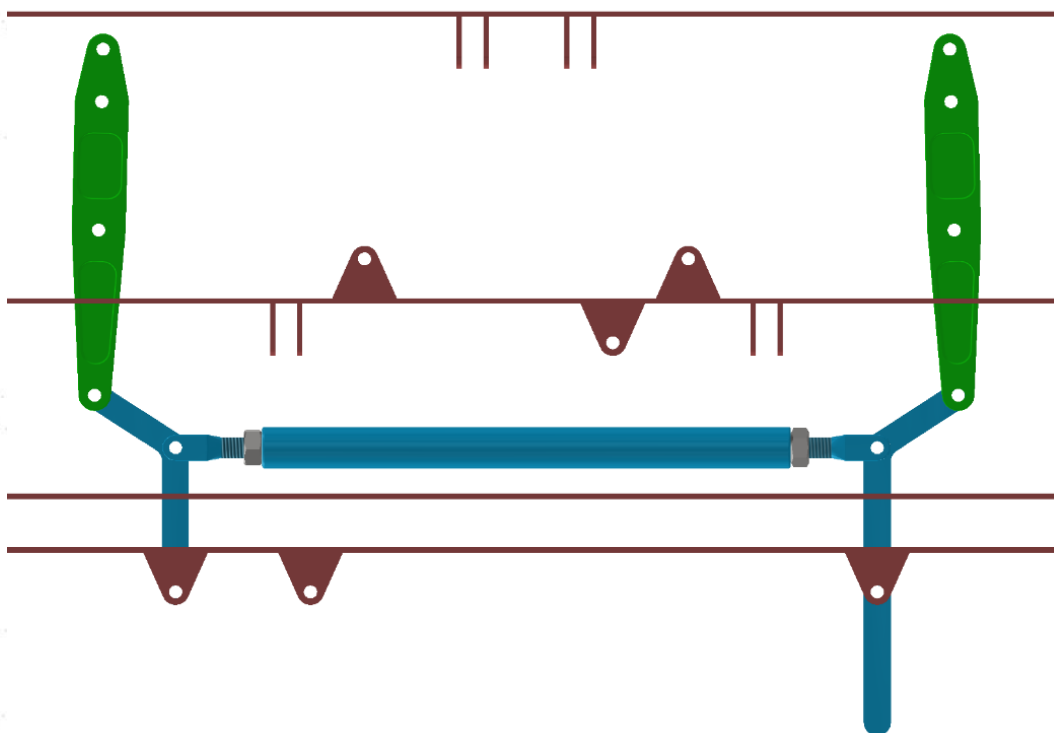
## NÁVRH KONSTRUKCE

### 5.2 Realizace mixážního mechanismu

Pro realizaci mixážního mechanismu bylo použito řešení s pákou popsané v kapitole 2.5. Flaperony se na levém i pravém křídle vlivem klapkovacího pohybu vychylují stejným směrem, vlivem křídélkovacího pohybu se vychylují v opačných směrech. Z tohoto důvodu je nutné použít pro každou polovinu křídla vlastní mixážní páku, na které bude jeden přiváděný pohyb symetrický (klapkovací) a druhý opačný (křídélkovací).

#### 5.2.1 Přívod křídélkovacího (nesymetrického) pohybu na mixážní páku

Na obr. 15 je ukázáno přivedení nesymetrického pohybu k mixážní páce. Zalomení pák slouží k diferenciaci výchylky, kde pohyb směrem ke středu odpovídá výchylce ovládacích ploch nahoru. Je vidět, že při stejných natočeních vstupní páky (ze zvonku automatického propojení) bude horizontální složka pohybu konců pák větší při natočení směrem ke středu, což způsobí žádanou diferenciaci. Výhodou tohoto řešení je, že ovlivňuje pouze křídélkovací složku výchylky, poměr diferenciaci ale bohužel nedosahuje požadovaných hodnot, je tedy nutné použít další prvky nacházející se za mixážním mechanismem.

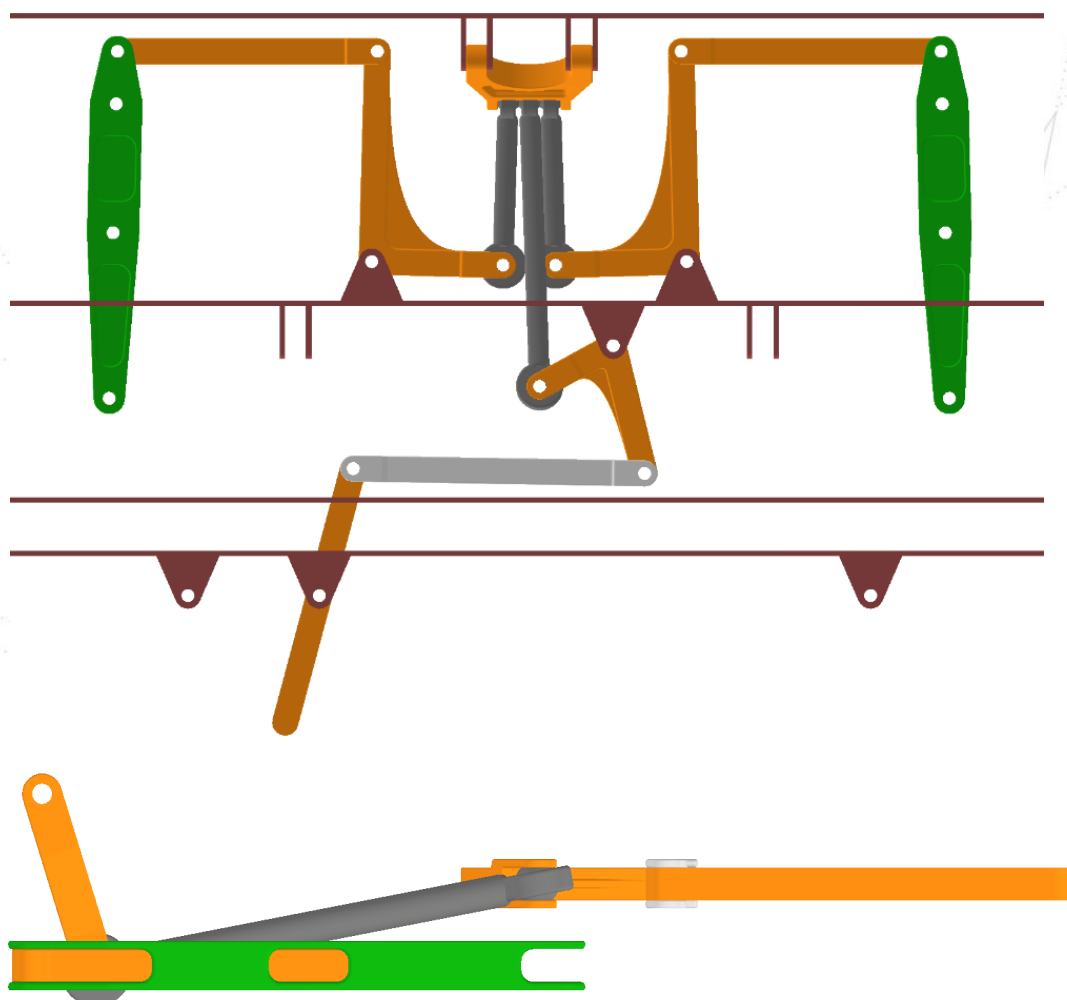


Obr. 15 Přivedení nesymetrického pohybu k mixážní páce

---

**NÁVRH KONSTRUKCE****5.2.2 Přívod klapkovacího (symetrického) pohybu na mixážní páku**

Na obr. 16 nahoře je zobrazeno zvolené řešení pro zrcadlení klapkovacího pohybu a jeho přívod na mixážní páku. Pro přesné zrcadlení pohybu je nutné využít pohyb ve vertikální rovině. Tento pohyb zajišťuje páka uložená na dvou závěsech naháněná z mechanismu automatického propojení ovládání klapky. Vzhledem ke složitému vzájemnému pohybu je nutné použít kulové klouby. Z vertikální páky je pak pohyb symetricky přenášěn přes páky ve tvaru písmene L na mixážní páky. Z obrázku je také patrné, že nulová výchylka flaperonů neodpovídá nulovému natočení páky automatického propojení, protože klapkovací výchylka směrem dolů je výrazně větší než nahoru, tomu odpovídá i rozsah pohybu ovládací páky ke krajním polohám. Páky, které se mívají s mechanismem křídélkovacího pohybu, jsou výškově posunuté, jak je vidět na obr. 16 dole. Rozšířené horní uchycení vertikální páky slouží k zachycení nežádoucích krouživých momentů při nesouměrném zatížení ovládacích ploch na levém a pravém křídle.

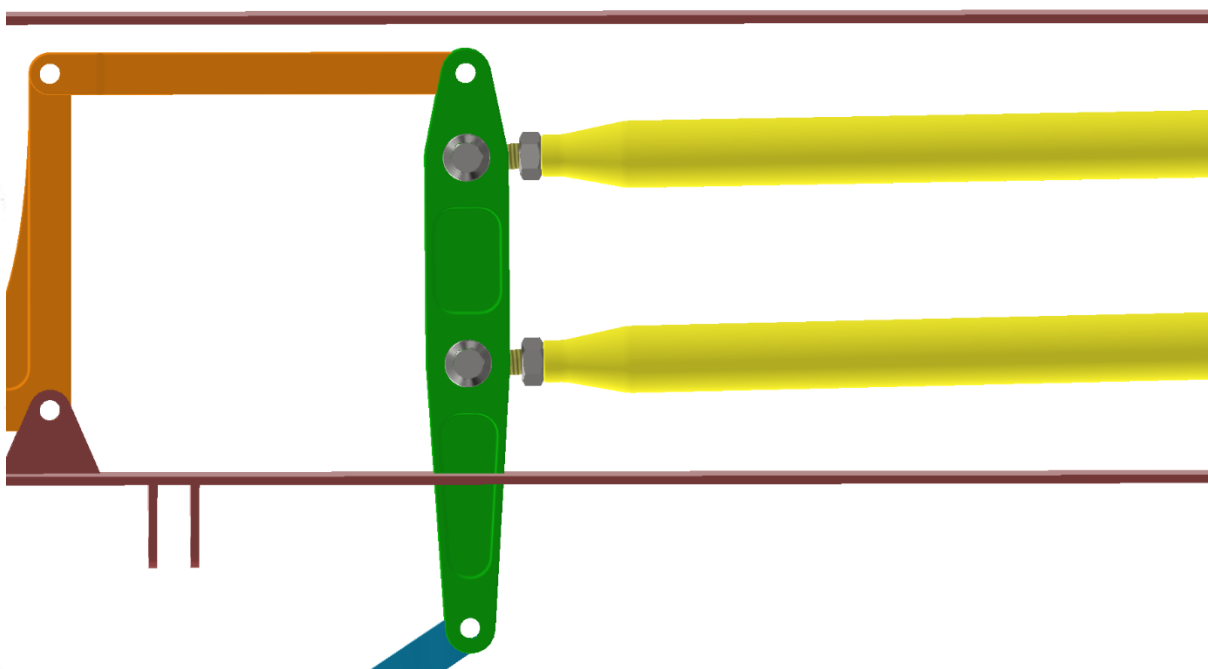


*Obr. 16 Přivedení symetrického pohybu k mixážní páce + vertikální separace*



### 5.3 Realizace rozdílných poměrů křídélkovacích a klapkovacích vychylek vnitřního a vnějšího flaperonu

Požadavek na rozdílné poměry křídélkovacích a klapkovacích vychylek vnitřního a vnějšího flaperonu je řešen pomocí napojení jejich táhel na mixážní páku v různých pozicích. Platí, že čím blíže se napojení nachází ke vstupu klapkovacího pohybu, tím větší bude poměr klapkovacího pohybu ku křídélkovacímu a naopak. Náhon vnitřního flaperonu, který má mít hlavní vychylku klapkovací, se proto na mixážní páku napojuje výše než náhon vnějšího flaperonu, který má mít hlavní vychylku křídélkovací, viz obr. 17.

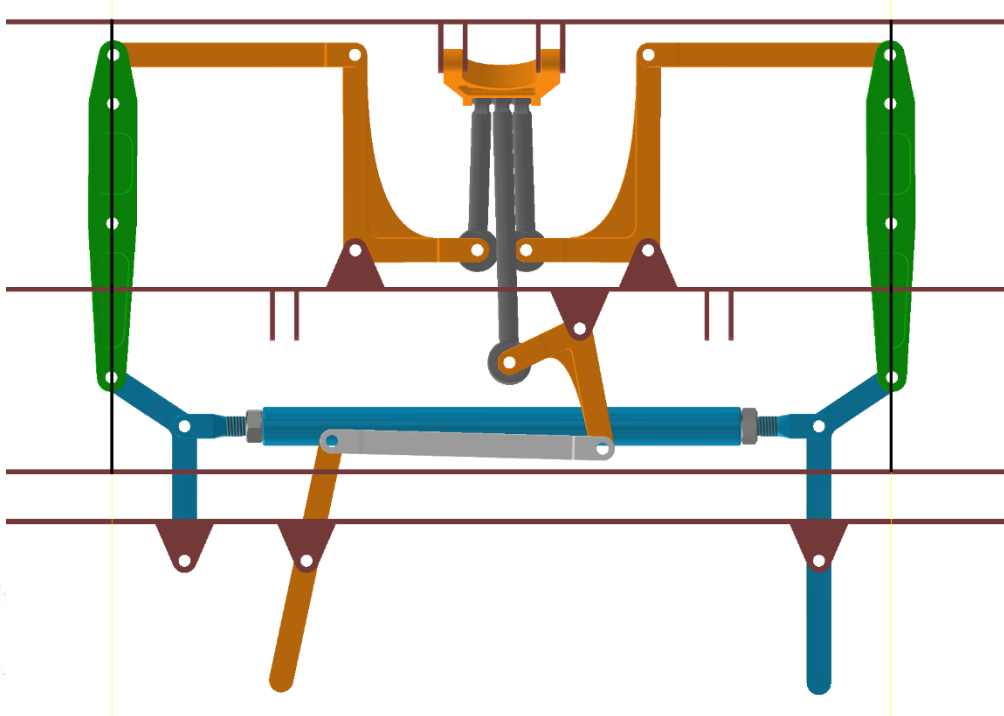


Obr. 17 Napojení náhonu vnitřního flaperonu (nahore) a vnějšího flaperonu (dole)

Změnou pozice připojení náhonů na mixážní páce se dá velmi snadno optimalizovat poměr křídélkovacích a klapkovacích vychylek na vnějším a vnitřním flaperonu – čím blíže je náhon k jedné straně, tím větší význam má vychylka odpovídající této straně.

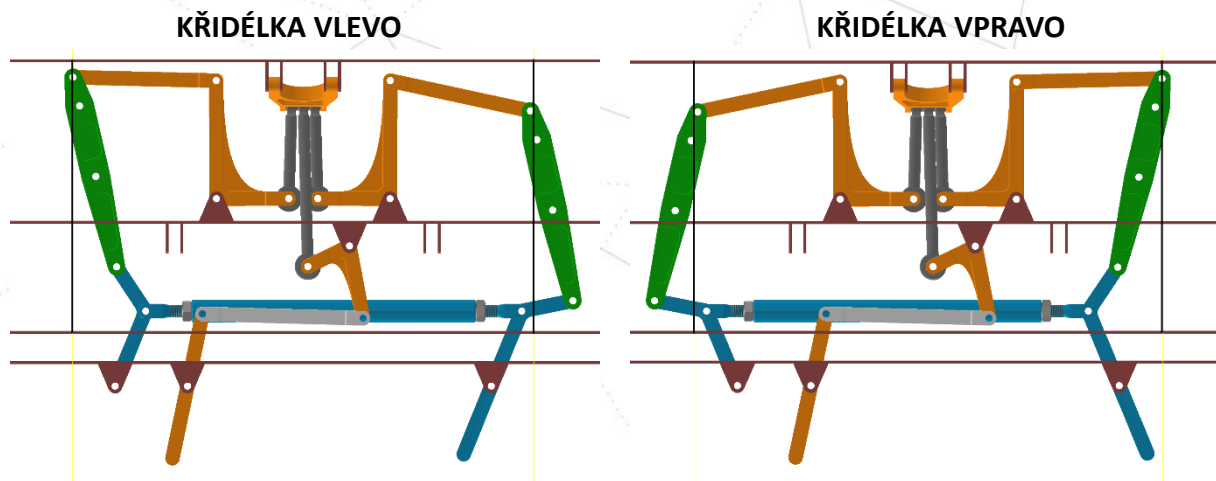
**NÁVRH KONSTRUKCE****5.4 Maximální výchylky mixážního mechanismu**

Na následujících obrázcích (obr. 19) jsou znázorněny maximální výchylky sumačního mechanismu pro jednotlivé kombinace křídélkovacích a klapkovacích řídicích pokynů. Na obr. 18 je zobrazena neutrální poloha mechanismu.



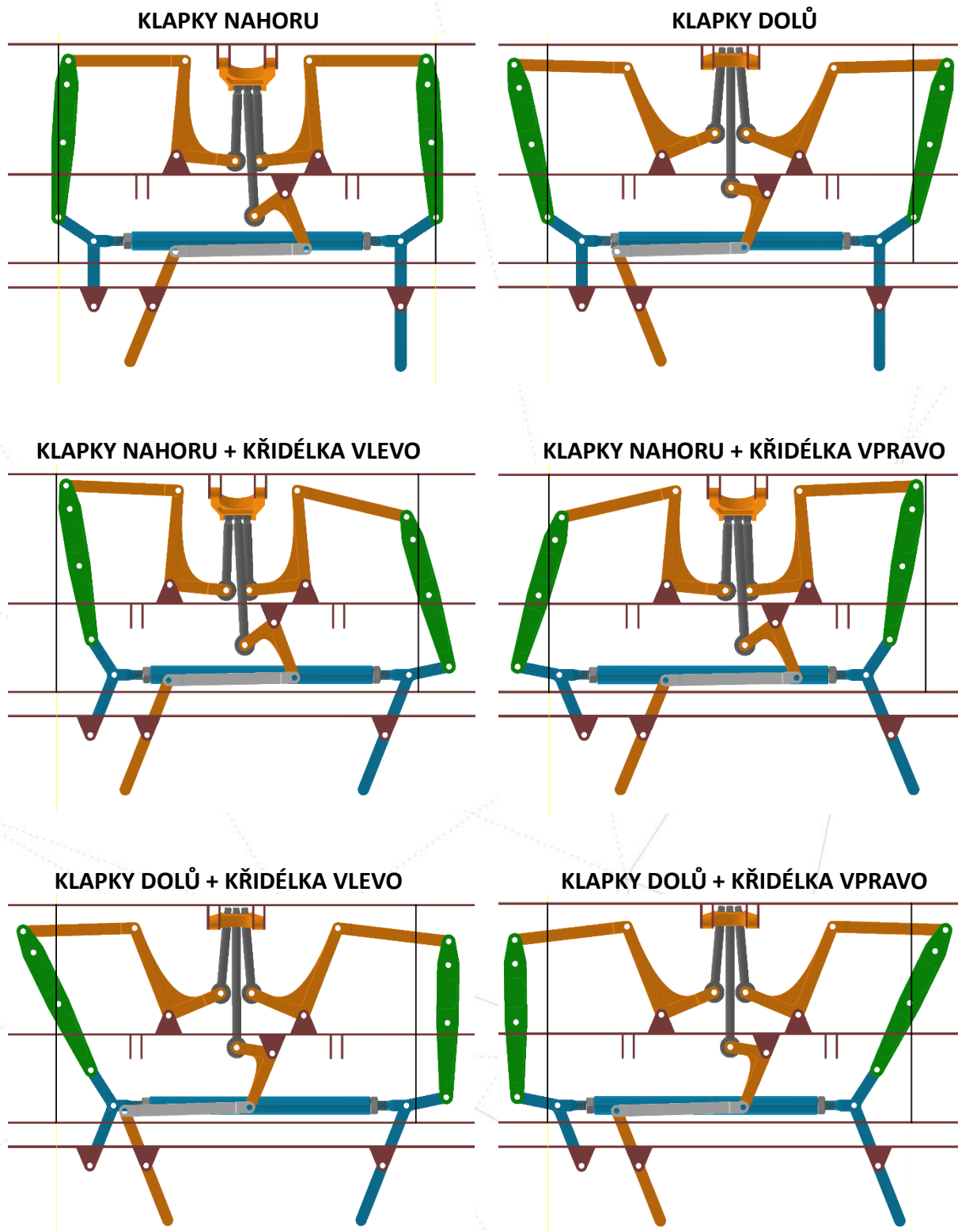
Obr. 18 Neutrální poloha mixážního mechanismu

Do obrázku byly dokresleny dvě černé vertikální úsečky. Na těchto úsečkách leží neutrální polohy míst náhonů jednotlivých flaperonů. Slouží pro lepší vizualizaci polohy náhonů při kombinacích různých klapkovacích a křídélkovacích výchylek. Horní místa náhonu odpovídají vnitřním flaperonům, směr pohybu ke středu odpovídá výchylce flaperonů nahoru.





**NÁVRH KONSTRUKCE**



*Obr. 19 Schémata pro kombinace maximálních výchylek*



## NÁVRH KONSTRUKCE

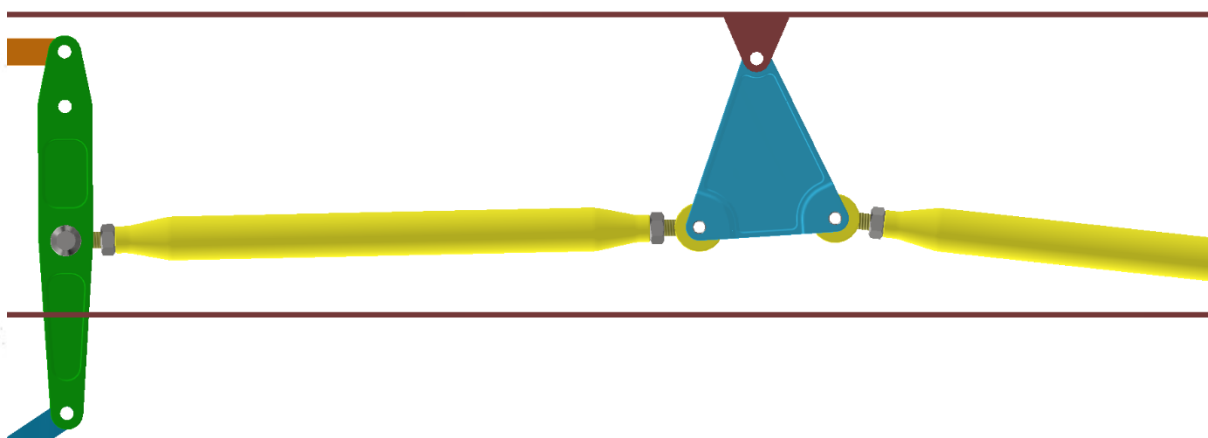
Za povšimnutí stojí schéma zobrazující maximální výchylku klapek dolů a maximální výchylku křidélek na libovolnou stranu. Je vidět, že výsledná výchylka vnějšího flaperonu, který koná křídélkovací pohyb nahoru, bude celkově nahoru. Toto bylo zvoleno po dohodě s vedoucím práce jako jedno z kritérií, kterých mělo být dosaženo.

Dalším zjevným faktorem je šířka průchodu v třetím nosníku potřebná pro pohyb mixážní páky. Tento problém není předmětem této práce, ale s jistotou vyžaduje další zkoumání.

### 5.5 Realizace přídavného diferenčního mechanismu křídélkovacího pohybu vnějšího flaperonu

Mechanismus pro diferenciaci popsán v kapitole 5.2.1 poskytuje pouze omezenou diferenciaci pohybu. Poměr výchylky nahoru k výchylce dolů při použití pouze tohoto mechanismu je přibližně 1,2. Tato diferenciaci je dostatečná pro vnitřní flaperon, u kterého převládá klapkový pohyb, pro vnější flaperon je však potřeba poměr diferenciaci zvýšit použitím dalších mechanismů.

Prvním použitým mechanismem je přepákování náhonu vnějšího flaperonu za mixážní pákou zobrazené na obr. 20.

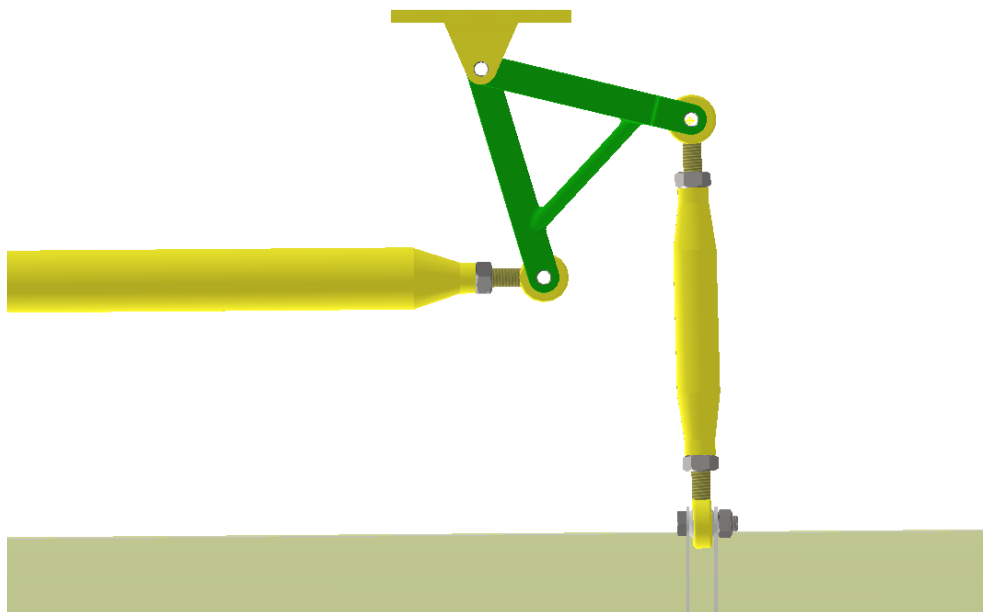


Obr. 20 Mechanismus pro diferenciaci výchylky vnějšího flaperonu v neutrální poloze

Principem funkce tohoto přepákování je různé úhlové natočení vstupního a výstupního bodu k ose rotace, což způsobí stejný efekt, jaký je popsán v kapitole 2.4 a zobrazen na obr. 5. Nevýhodou tohoto řešení je, že k diferenciaci dochází nejen pro křídélkovací pohyb, ale i pro klapkový. Tento problém však není významný, protože vnější flaperon má klapkový pohyb menší než křídélkovací. Poměr diferenciaci vycházející z prvních dvou mechanismů je přibližně 1,7.

K poslednímu zvýšení diferenciaci dochází na páce náhonu samotného flaperonu. Na obr. 21 je k povšimnutí opět úhlové natočení mezi vstupním a výstupním bodem, tentokrát se však jedná o odchýlení od úhlu 90°, protože tato páka zároveň otáčí hlavní směr pohybu o 90°. Celkový poměr diferenciaci vnějšího flaperonu je roven přibližně 1,9.

## NÁVRH KONSTRUKCE

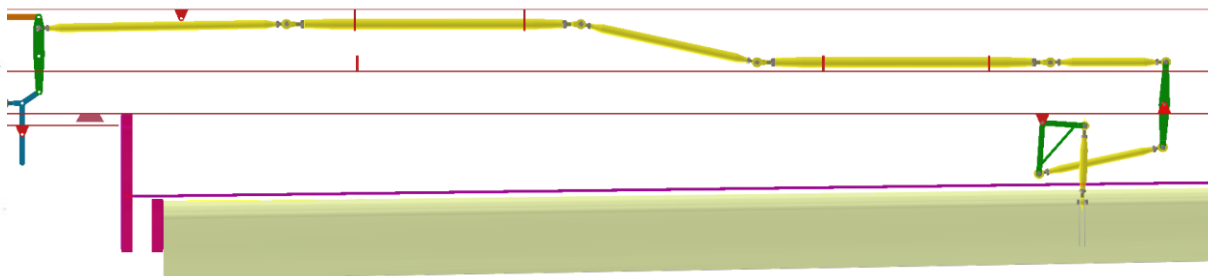


Obr. 21 Páka náhonu vnějšího flaperonu sloužící k finální diferenciaci výchylky v základní poloze

Pro změnu poměru diferenciaci lze snadno použít změnu úhlového natočení na jednotlivých pákách. Zvýšení úhlového natočení zvýší úroveň diferenciaci. Mechanismy diferenciaci nacházející se za mixážní pákou ovlivňují také klapkový pohyb, proto na nich změna úhlového natočení způsobí i změnu výchylky klapkovacího pohybu na vnějším flaperonu. Korekcí této změny je přizpůsobení místa náhonu na mixážní páce, kterým lze opět dosáhnout požadovaného poměru křídélkovacích a klapkovacích výchylek.

## 5.6 Náhon vnitřního flaperonu

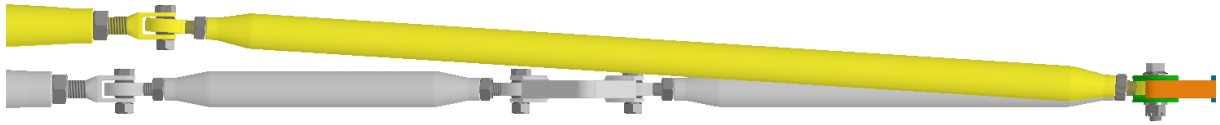
Návrh náhonu vnitřního flaperonu je zobrazen na obr. 22. Skládá se z 5 táhel, které přenáší pohyb na páku prostupu stojinami nosníků. První táhlo zároveň slouží k vertikální separaci od náhonu vnějšího flaperonu, viz obr. 23. Z páky prostupu stojinami je pak pohyb přenášen táhlem na páku náhonu flaperonu, odkud je posledním táhlem naháněn samotný flaperon, detail je zobrazen na obr. 24.



Obr. 22 Celkové schéma náhonu vnitřního flaperonu

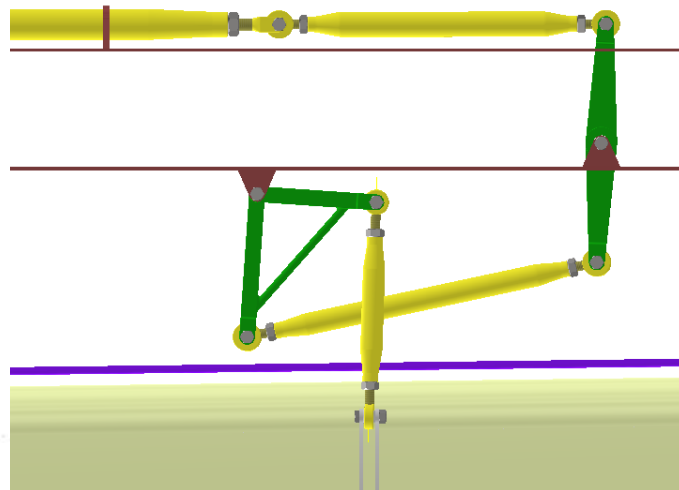


## NÁVRH KONSTRUKCE



Obr. 23 Vertikální separace náhonu vnitřního (žlutá) a vnějšího (šedivá) flaperonu

Vertikální vychýlení prvního táhla náhonu vyvolá vznik malých vertikálních sil působících na mixážní páku. S těmito silami se bude muset počítat při návrhu uložení pák spojujících mixážní páku s nosníky křídla.



Obr. 24 Detail páky náhonu vnitřního flaperonu

Náhon části vnitřního flaperonu nacházející se ve vnějším segmentu křídla bude realizován pomocí krutového spojení s vnitřním flaperonem v centrálním segmentu křídla. Toto propojení umožní zachování jediné páky přenášející závěsový moment pro celý vnitřní flaperon.

## NÁVRH KONSTRUKCE

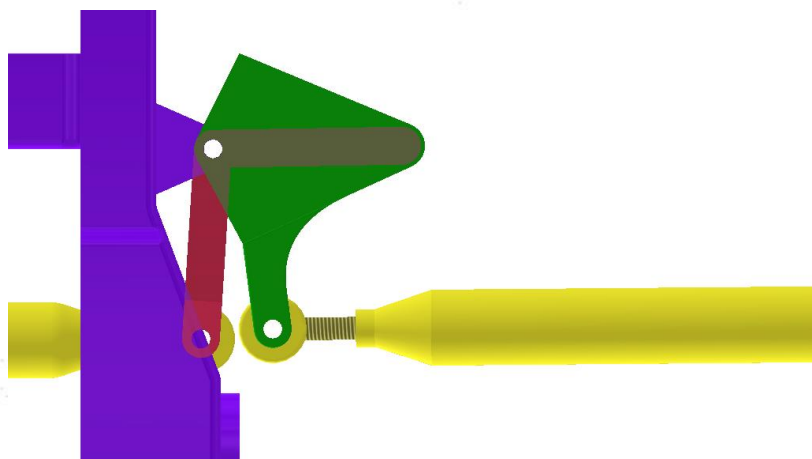
### 5.7 Náhon vnějšího flaperonu

Návrh náhonu vnějšího flaperonu v centrálním segmentu křídla je zobrazen na obr. 25. Skládá se z diferenciačního mechanismu popsaného v kapitole 5.5, ze kterého 3 táhla převádí pohyb na páku přechodu skrz stojiny nosníků. Tato páka má stejnou osu rotace jako páka v kapitole 5.6 a nachází se pod ní.



Obr. 25 Schéma náhonu vnějšího flaperonu – část v centrálním segmentu křídla

Pohyb je dále převeden na mechanismus propojení centrálního a vnějšího segmentu křídla, který je realizovaný konvenčně za použití páky a zvonku, viz obr 26.



Obr. 26 Schéma propojení řízení v centrálním a vnějším segmentu křídla

Návrh náhonu vnějšího flaperonu ve vnějším segmentu křídla je zobrazen na obr. 27. Pohyb ze zvonku automatického propojení je pomocí 3 táhel přenášen na páku náhonu vnějšího flaperonu, které se blíže věnuje kapitola 5.5.



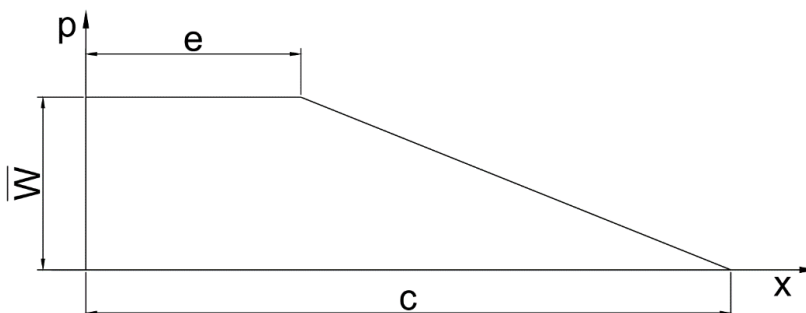
Obr. 27 Schéma náhonu vnějšího flaperonu – část ve vnějším segmentu křídla

## 6 PEVNOSTNÍ KONTROLA VYBRANÝCH ČÁSTÍ NÁVRHU SOUSTAVY ŘÍZENÍ

Pro počáteční ověření proveditelnosti soustavy řízení byla provedena přibližná pevnostní kontrola mixážní páky, která byla pro kontrolu zvolena, protože se jedná o jednu z nejvíce namáhaných částí. Zatížení je uvažováno jako statické o velikosti dosažené při maximální výchylce. Vztlková síla vyvolaná rozdílem tlaků na horní a dolní ploše křídla působí na řídicí plochy silou působící nahoru. Výsledkem je, že při výchylce dolů působí na soustavu řízení větší síly než při výchylce nahoru. Z tohoto důvodu bude pro kontrolu a výpočet použita pozice mechanismu s maximální výchylkou flaperonů dolů.

### 6.1 Přibližné určení závěsových momentů flaperonů

Pro přibližné určení závěsových momentů jednotlivých flaperonů bylo využito modelové tlakové rozdělení po délce tělivity řídicí plochy podle předpisu CS-23 Amdt. 3 [7]. Předpis určuje různá rozdělení pro křídélka a klapky. Po dohodě s vedoucím práce bylo rozhodnuto, že vzhledem ke konstrukčnímu řešení flaperonů zadaného křídla bude pro výpočet využito modelové tlakové rozdělení pro křídélka zobrazené na obr. 28.



Obr. 28 Modelové tlakové rozložení pro křídélka

kde:

- $c$  ...hloubka řídicí plochy v daném řezu [m]
- $e$  ...vzdálenost osy rotace od náběžné hrany řídicí plochy [m]
- $\bar{W}$  ...průměrné tlakové zatížení řídicí plochy [Pa]

Zadané křídlo má závěs flaperonů na samotné náběžné hraně, vzdálenost  $e$  je proto rovna nule a modelové tlakové rozdělení má trojúhelníkový tvar s funkčním předpisem:

$$p = \bar{W} - \frac{\bar{W}}{c} \cdot x \quad (1)$$

kde:

- $p$  ...hodnota tlaku [Pa]
- $c$  ...hloubka řídicí plochy v daném řezu [m]
- $\bar{W}$  ...průměrné tlakové zatížení řídicí plochy [Pa]



**PEVNOSTNÍ KONTROLA VYBRANÝCH ČÁSTÍ**

Hodnota  $\bar{W}$  je určena dle předpisu následujícím vztahem:

$$\bar{W} = 0,466 \cdot n_1 \cdot \frac{m \cdot g}{S} \quad (2)$$

kde:

- $n_1$  ...provozní letový násobek zatížení [-]
- $m$  ...hmotnost kluzáku [kg]
- $g$  ...gravitační zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ]
- $S$  ...plocha křídla [ $\text{m}^2$ ]

Plocha modelového tlakového rozložení pak odpovídá liniové síle působící na řídicí plochu a vzdálenost těžiště této plochy od osy závěsu odpovídá ramenu. Liniový moment působící na daný řez řídicí plochy je pak popsán rovnicemi:

$$F_l = \frac{1}{2} \cdot \bar{W} \cdot c \quad (3)$$

kde:

- $F_l$  ...liniová zatěžující síla řídicí plochy [N/m]
- $\bar{W}$  ...průměrné tlakové zatížení řídicí plochy [Pa]
- $c$  ...hloubka řídicí plochy v daném řezu [m]

$$r = \frac{1}{3} \cdot c \quad (4)$$

kde:

- $r$  ...rameno liniové zatěžující síly [m]
- $c$  ...hloubka řídicí plochy v daném řezu [m]

$$M_l = F_l \cdot r = \frac{1}{6} \cdot \bar{W} \cdot c^2 \quad (5)$$

kde:

- $M_l$  ...liniový závěsový moment řídicí plochy [Nm/m]
- $F_l$  ...liniová zatěžující síla řídicí plochy [N/m]
- $r$  ...rameno liniové zatěžující síly [m]

Pro základní řídicí plochu lichoběžníkového tvaru platí, že hloubka řídicí plocha v daném řezu lze určit pomocí vztahu:

$$c = c_1 - \frac{c_1 - c_2}{l} \cdot y \quad (6)$$

kde:

- $c$  ...hloubka řídicí plochy v daném řezu [m]
- $c_1$  ...počáteční hloubka řídicí plochy [m]
- $c_2$  ...koncová hloubka řídicí plochy [m]
- $l$  ...délka řídicí plochy [m]



---

**PEVNOSTNÍ KONTROLA VYBRANÝCH ČÁSTÍ**

Celkový závěsový moment prosté lichoběžníkové řídicí plochy pak lze psát vztahem:

$$M = \int_0^l \frac{1}{6} \cdot \bar{W} \cdot \left( c_1 - \frac{c_1 - c_2}{l} \cdot y \right)^2 dy = \frac{1}{18} \cdot \bar{W} \cdot l \cdot (c_1^2 + c_1 \cdot c_2 + c_2^2) \quad (7)$$

kde:

$M$	...závěsový moment [Nm]
$\bar{W}$	...průměrné tlakové zatížení řídicí plochy [Pa]
$l$	...délka řídicí plochy [m]
$c_1$	...počáteční hloubka řídicí plochy [m]
$c_2$	...koncová hloubka řídicí plochy [m]

Ze zadaných hodnot a hodnot určených z CAD modelu pak lze určit závěsové momenty jednotlivých flaperonů:

flaperon	šířka $l$ [mm]	počáteční hloubka $c_1$ [mm]	koncová hloubka $c_2$ [mm]	závěsový moment $M$ [Nm]
vnitřní v centrálním segmentu	3120	111	111	10,93
vnitřní ve vnějším segmentu	1300	111	97	4,00
vnější	5200	97	48	8,43

## 6.2 Přenos sil soustavou řízení

Závěsový moment je přenášen pomocí pák a táhel na mixážní páku. U kluzáků je běžné, že každá řídicí plocha má právě jeden náhon, což zlepšuje aerodynamické vlastnosti křídla a zjednodušuje výpočet sil v soustavě řízení, protože řídicí plocha s více náhony se stává staticky neurčitou, kde rozložení sil v jednotlivých náhonech závisí nejen na tuhosti soustavy řízení, ale i na tuhosti samotné řídicí plochy.

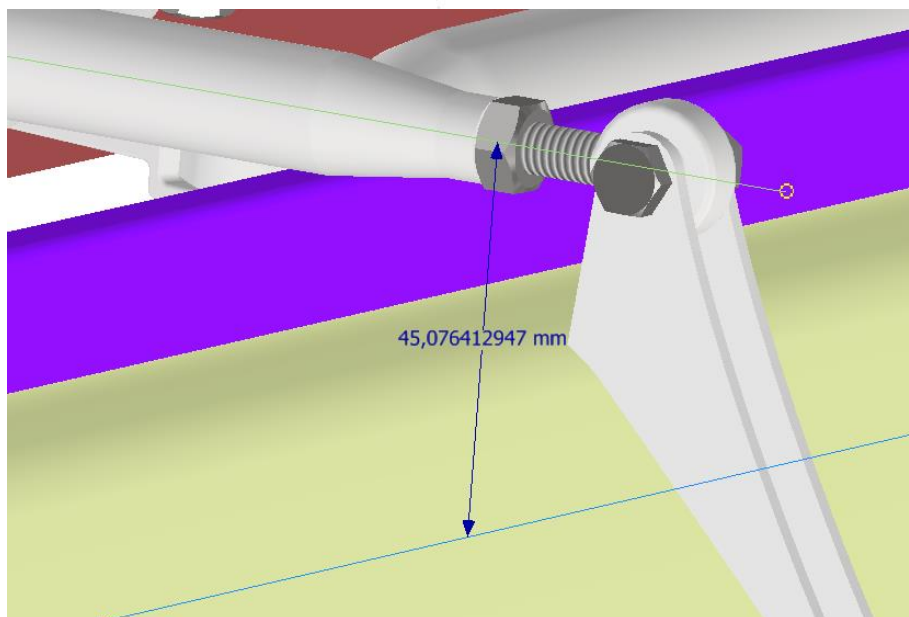
Úhlová natočení menší než  $5^\circ$  budou v následujících částech zanedbána, protože jejich vliv je pouze velmi malý, a protože již samotné určení závěsových momentů pomocí modelového tlakového rozložení je pouze přibližné. Tyto nejistoty je nutné zohlednit při finálním posuzování závěrů pevnostní kontroly.

Finální výpočet síly působící na mixážní páku bude doplněn o součinitel početního zatížení. Díky tomu bude zatížení přepočteno z hodnot provozních na hodnoty početní, které jsou pro pevnostní kontrolu potřebné. Součinitel početního zatížení a provozní letový násobek zatížení byly zadány podle předpisu CS-22 Amdt. 3 [8].

## PEVNOSTNÍ KONTROLA VYBRANÝCH ČÁSTÍ

### 6.2.1 Přenos sil z vnitřního flaperonu

Síla v táhlu náhonu vnitřního flaperonu byla určena na základě závěsového momentu a ramena síly, kterou tato páka vyvozuje. Velikost ramena byla určena z CAD modelu jako přibližně 45 mm, viz obr 29. Délka tohoto ramena byla v modelu zvolena pro dosažení předběžně vyžadovaných výchylek.



Obr. 29 Rameno síly táhla náhonu vnitřního flaperonu určené z CAD modelu

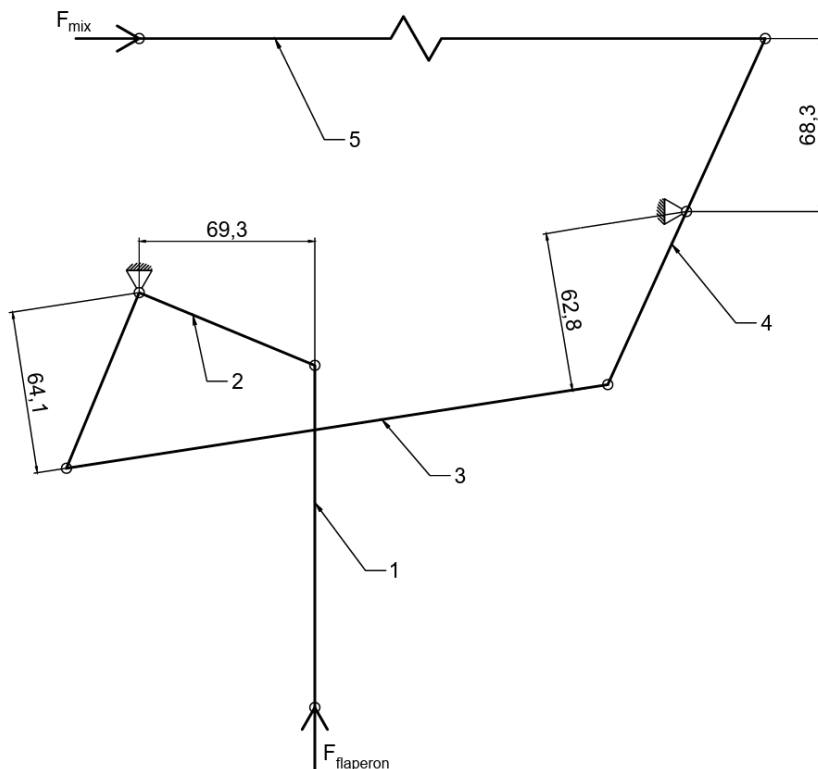
Síla v táhlu náhonu je pak:

$$F_{flaperon1} = \frac{M}{r} = \frac{14,93}{0,045} \cong 332 \text{ N} \quad (8)$$

kde:

$F_{flaperon1}$	...síla táhla náhonu vnitřního flaperonu [N]
$M$	...závěsový moment vnitřního flaperonu [Nm]
$r$	...rameno síly [m]

Na obr. 30 je zobrazeno kinematické schéma mechanismu náhonu vnitřního flaperonu. Táhla zakreslená s lomenou čarou uprostřed nejsou na schématu kreslena v plné délce. Táhlo 1 přenáší sílu  $F_{flaperon}$  z flaperonu do páky 2, ze které se poté síla přenáší táhlem 3 na páku 4 a odtud táhlem 5 na mixážní páku, na kterou působí síla  $F_{mix}$ . V schématu jsou zakresleny všechny rozměry získané z CAD modelu potřebné pro přepočítání známé síly  $F_{flaperon}$  na sílu  $F_{mix}$ . Pro lepší představu lze schéma porovnat s obr. 22 v kapitole 5.6. Přechod mezi přední a zadní stěnou dutiny není v kinematickém schématu naznačen, protože sílu působící na mixážní páku neovlivní.

**PEVNOSTNÍ KONTROLA VYBRANÝCH ČÁSTÍ**


Obr. 30 Kinematické schéma náhonu vnitřního flaperonu.

Sílu v táhlu 3 lze vypočítat díky momentové rovnováze páky 2 počítané k ose rotace pomocí snadno odvozeného vztahu:

$$F_3 = F_{flaperon1} \cdot \frac{69,3}{64,1} \quad (9)$$

kde:

$F_3$  ...síla v táhlu 3 [N]  
 $F_{flaperon1}$  ...síla v táhlu 1 [N]

Dále lze za pomoci momentové rovnováhy páky 4 a s přepočtem na početní zatížení určit  $F_{mix1}$ :

$$F_{mix1} = F_3 \cdot \frac{62,8}{68,3} \cdot k = F_{flaperon1} \cdot \frac{69,3 \cdot 62,8}{64,1 \cdot 68,3} \cdot 1,5 \cong 495 \text{ N} \quad (10)$$

kde:

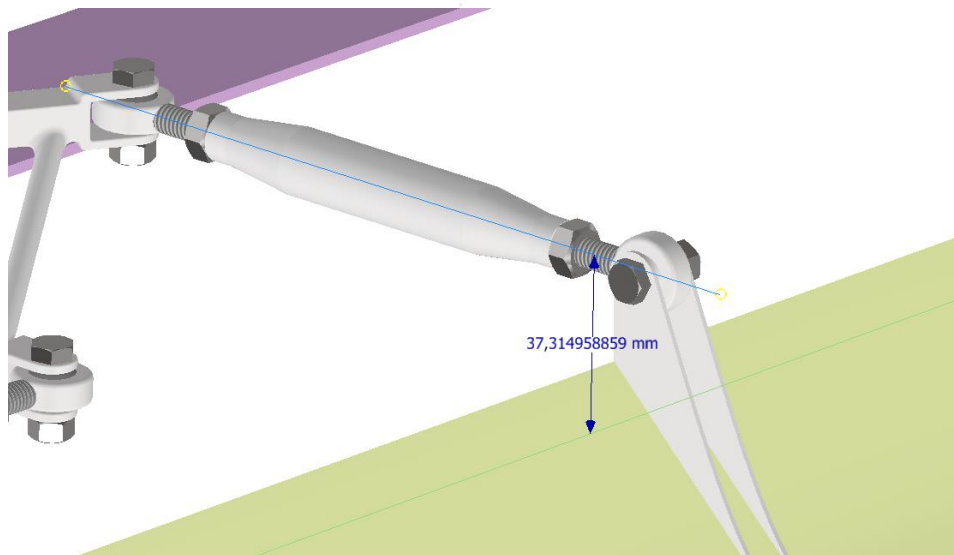
$F_{mix1}$  ...síla působící na mixážní mechanismus [N]  
 $F_3$  ...síla v táhlu 3 [N]  
 $F_{flaperon1}$  ...síla v táhlu 1 [N]  
 $k$  ...součinitel početního zatížení [-]

Mixážní páka je v místě náhonu vnitřního flaperonu při maximální výchylce dolů namáhána početní silou přibližně 495 N. Částečně zde bude namáhána i vertikální silou, jak bylo popsáno v kapitole 5.6, toto namáhání má na pevnostní kontrolu zanedbatelný vliv.

---

**PEVNOSTNÍ KONTROLA VYBRANÝCH ČÁSTÍ****6.2.2 Přenos sil z vnějšího flaperonu**

Pomocí závěsového momentu a ramena byla obdobně jako v kapitole 6.2.1 určena síla působící v táhle, které tvoří náhon vnějšího flaperonu. Rameno síly bylo určeno jako přibližně 37,3 mm z CAD modelu, jak je vidět na obr. 31. Délka tohoto ramena byla v modelu zvolena pro dosažení předběžně vyžadovaných vychylek.



Obr. 31 Rameno síly táhla náhonu vnějšího flaperonu určené z CAD modelu

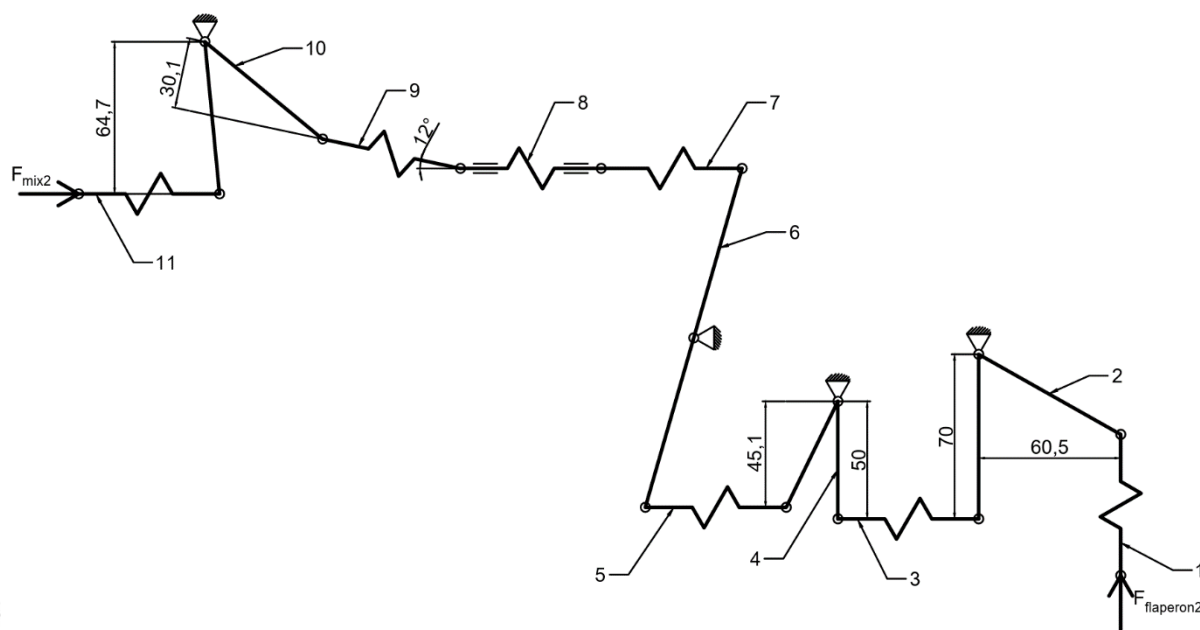
Síla v táhlu náhonu je pak:

$$F_{flaperon2} = \frac{M}{r} = \frac{8,43}{0,0373} \cong 226 \text{ N} \quad (11)$$

kde:

$F_{flaperon2}$	...síla táhla náhonu vnějšího flaperonu [N]
$M$	...závěsový moment vnitřního flaperonu [Nm]
$r$	...rameno síly [m]

Na obr. 32 je zobrazeno kinematické schéma mechanismu náhonu vnějšího flaperonu. Táhla zakreslená s lomenou čarou uprostřed nejsou na schématu kreslena v plné délce. Táhlo 1 je připojené přímo k páce flaperonu a přenáší z ní sílu  $F_{flaperon2}$  na páku 2, ze které pak tuto sílu přenáší skupina táhel 3 do mechanismu automatického propojení 4. Odtud již v centrálním segmentu křídla pokračuje táhlo 5 na páku 6 (ekvivalentní páce 4 v kapitole 6.2.1), na kterou se táhlem 7 napojuje posuvně uložené táhlo 8. Na mechanismus diferenciací 10 sílu přivádí táhlo 9. Posledním členem je táhlo 11 napojené na mixážní páku, na kterou působí silou  $F_{mix2}$ . Pro lepší představu lze schéma porovnat s obr. 25, obr. 26 a obr. 27 v kapitole 5.7.

**PEVNOSTNÍ KONTROLA VYBRANÝCH ČÁSTÍ**


Obr. 32 Kinematické schéma náhonu vnějšího flaperonu

Díky momentové rovnováze na páce 2 lze ze síly  $F_{flaperon2}$  získat sílu  $F_3$ :

$$F_3 = F_{flaperon2} \cdot \frac{60,5}{70} \quad (12)$$

kde:

$F_3$  ...síla ve skupině táhel 3 [N]  
 $F_{flaperon2}$  ...síla v táhlu 1 [N]

Dále lze použitím stejného principu na mechanismu automatického propojení 4 zjistit sílu  $F_5$ :

$$F_5 = F_3 \cdot \frac{50}{45,1} = F_{flaperon2} \cdot \frac{60,5 \cdot 50}{70 \cdot 45,1} \quad (13)$$

kde:

$F_5$  ...síla v táhlu 5 [N]  
 $F_3$  ...síla ve skupině táhel 3 [N]  
 $F_{flaperon2}$  ...síla v táhlu 1 [N]



## PEVNOSTNÍ KONTROLA VYBRANÝCH ČÁSTÍ

Páka 6 je symetrická a táhla 7 a 5 jsou rovnoběžná, síla v nich proto bude stejná,  $F_7 = F_5$ . Táhlo 8, uložené posuvně, je vůči táhlu 7 přibližně rovnoběžné, lze tedy psát  $F_8 = F_7$ . Táhlo 9 je vzhledem k táhlu 8 natočené o  $12^\circ$ , sílu v něm lze proto určit vztahem:

$$F_9 = \frac{F_8}{\cos(12^\circ)} = F_{flaperon2} \cdot \frac{60,5 \cdot 50}{70 \cdot 45,1 \cdot \cos(12^\circ)} \quad (14)$$

kde:

$F_8$	...síla v táhlu 8 [N]
$F_7$	...síla v táhlu 7 [N]
$F_{flaperon2}$	...síla v táhlu 1 [N]

Nakonec podle rovnováhy na páce 10 a s přepočtem na početní zatížení určíme sílu v táhlu 11 působící na mixážní páku  $F_{mix2}$ :

$$F_{mix2} = F_9 \cdot \frac{30,1}{64,7} \cdot k = F_{flaperon2} \cdot \frac{60,5 \cdot 50 \cdot 30,1}{70 \cdot 45,1 \cdot 64,7 \cdot \cos(12^\circ)} \cdot 1,5 \cong 180 \text{ N} \quad (15)$$

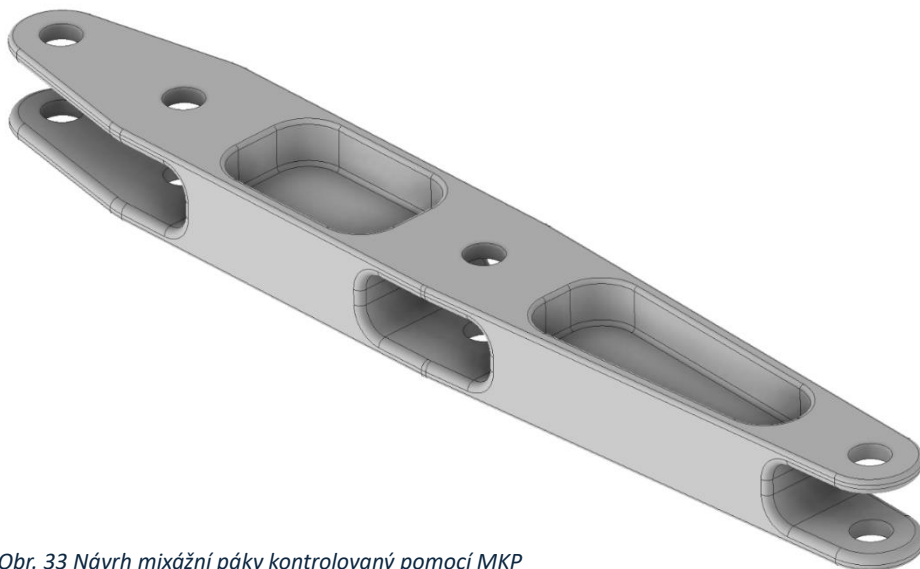
kde:

$F_{mix2}$	...síla působící na mixážní mechanismus [N]
$F_9$	...síla v táhlu 9 [N]
$F_{flaperon2}$	...síla v táhlu 1 [N]
$k$	...součinitel početního zatížení [-]

Mixážní páka je v místě náhonu vnějšího flaperonu při maximální výchylce dolů namáhána početní silou přibližně 180 N.

### 6.3 Kontrola mixážní páky pomocí MKP

Se znalostí výsledných sil působících na mixážní páku byl proveden návrh mixážní páky (obr. 33) a následná kontrola mezního stavu pružnosti pomocí MKP výpočtu v programu Ansys 2023 R2.



Obr. 33 Návrh mixážní páky kontrolovaný pomocí MKP



## PEVNOSTNÍ KONTROLA VYBRANÝCH ČÁSTÍ

Na válcových plochách v místech napojení na navazující mixážní mechanismus byla zvolena okrajová podmínka frictionless, na válcových plochách v místech napojení náhonů flaperonů byly zvoleny okrajové podmínky force velikostí odpovídající silám zjištěným v kapitolách 6.2.1 a 6.2.2. Pro řešení bylo nutné omezit pohyb páky ve vertikálním směru. Toho bylo dosaženo pomocí okrajové podmínky displacement zvolené pro jednu hranu válcového napojení na mixážní mechanismus. Tato okrajová podmínka nehraje v řešení žádnou roli, slouží pouze pro zabránění pohybu.

Na obr. 34 jsou zobrazeny výsledky statické strukturní analýzy mixážní páky. Je vidět, že maximum redukovaného napětí podle podmínky Von-Mises dosahuje hodnoty přibližně 61 MPa, což je hluboce pod mezí pevnosti i mezí kluzu běžných hliníkových slitin.

### A: Static Structural

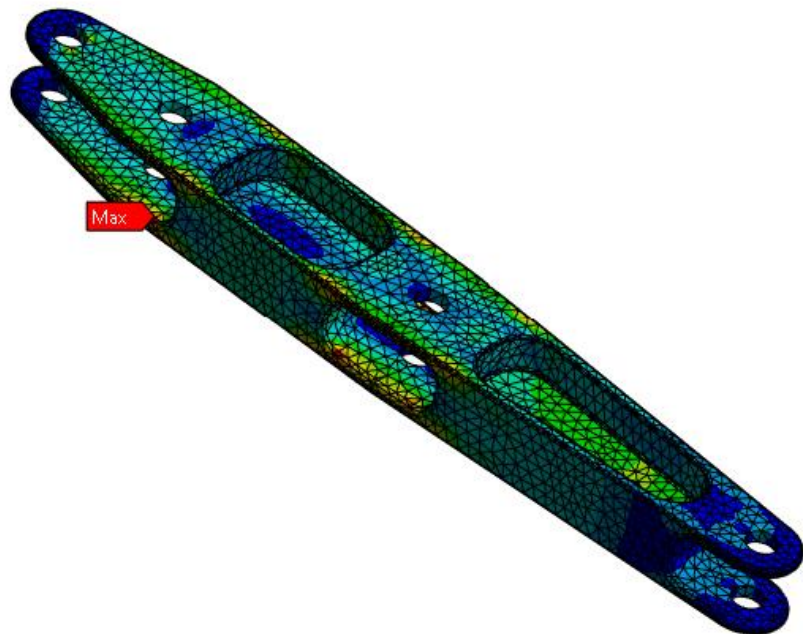
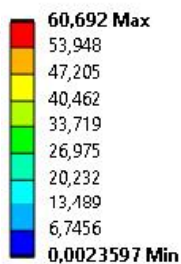
Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 1 s

17.05.2024 17:18



Obr. 34 Výsledky redukovaného napětí zjištěné pomocí MKP

Váha navržené páky je 28 g a tloušťka nejtenčí stěny je 0,5 mm. Další úběr materiálu je možný, ale vede k úspoře hmotnosti pouze v jednotkách gramů, což je vzhledem k ostatním částem zanedbatelné.





## 7 DALŠÍ VÝVOJ

Prezentovaný počáteční návrh soustavy řízení se zaměřuje především na rozměrové limitace zadaného křídla, je proto důležité popsat postup, který by v návrhovém procesu následoval.

Vzhledem ke složitosti především mixážního mechanismu bylo nutné zařadit do řešení několik prostupů stojinami nosníků. Tyto prostupy způsobují snížení tuhosti a koncentrace napětí a je proto nutné provést jejich pevnostní kontrolu s případným přidáním vyztužujících prvků. Podobnou kontrolou musí projít i všechny závěsy pák na nosnících.

V textu práce se nachází několik poznámek o možných změnách v soustavě, kterými lze dosáhnout změn různých vlastností, je tedy vhodné těmito způsoby soustavu řízení kinematicky naladit na specifické aerodynamické a silové požadavky tohoto specifického kluzáku.

Výpočet závěsových momentů byl proveden podle modelového zatížení dle předpisu CS-23 [7], které je však zjednodušeno zanedbáním mnoha parametrů, např. úhlem výchytky nebo tvarem řídicí plochy. Pro přesnou kontrolu celé soustavy řízení je zapotřebí přesně určit závěsové momenty pro různé polohy orgánů řízení, např. za použití počítačových simulací. Tyto momenty je pak nutné pro všechny odpovídající polohy mechanismu přepočítat na síly v táhlech a pákách, podobně jako bylo provedeno v této práci pro maximální výchytku dolů. Každou část mechanismu je nutné pevnostně zkontrolovat za použití provozního a početního napětí zvýšených o koeficienty bezpečnosti v místech spojů a dle metody výroby, uvedené v předpisu CS-22 [8].

Pro kompletaci soustavy řízení v křídle je nutné vypracovat mechanismus ovládání spoilerů. Při vypracování počátečního návrhu byl pro automatické propojení tohoto ovládání ponechán prostor na horní části zadního nosníku. Také lze uvažovat o pohybu spoilerů metodou FBW, který by nevyžadoval návrh dalších mechanických prvků řízení, ale zároveň by přinášel jiné problémy k řešení, např. dosažení požadované spolehlivosti nebo bezpečné automatické propojení vodičů.

Dále musí být obdobně zpracován návrh soustavy řízení v trupu kluzáku. Je nutné brát v potaz specifické požadavky předpisu CS-22 [8], např. na odolnost vůči síle vyvinuté pilotem na řídicí. Mechanismy automatického propojení musí odpovídat těm použitých v křídle, a to jak pozicí, tak i rozsahem pohybu.



## ZÁVĚR

Jedním z hlavních cílů této bakalářské práce bylo zpracovat počáteční návrh soustavy příčného řízení a vztlakové mechanizace do křídla zadaných parametrů. Aby bylo možné tento návrh sestavit, bylo nutné provést rešerši zaměřenou především na mechanické soustavy řízení používané v kluzácích, zhodnotit různá řešení jednotlivých konstrukčních uzlů, porovnat jejich výhody a nevýhody a sestavit z nich kombinaci vhodnou pro použití v zadaném křídle.

Provedená rešerše obsahuje obecné poznatky o metodách a vlastnostech aerodynamického řízení letadel. Dále se zaměřuje již podrobněji na specifika mechanických soustav řízení kluzáků. Jedním z užitečných zdrojů informací se staly manuály pro údržbu mnoha typů kluzáků, které umožnily vyzorovat často používaná řešení jednotlivých prvků, např. krutové a kyvné automatické propojení soustav řízení v trupu a v křídle nebo metody náhonů jednotlivých řídicích ploch. Na závěr rešerše následovalo shrnutí důležitých poznatků a porovnání výhod a nevýhod prezentovaných prvků.

Zadané křídlo má více specifických vlastností, které byly představeny před samotným řešením návrhu soustavy řízení. Jedná se především o počet a umístění stojin nosníků, které výrazně limitují vnitřní prostor v křídle. Řídicí orgány po celé šířce odtokové hrany kombinují křídélkovací a klapkovací pohyb, což vede v potřebu mechanické mixáže těchto pohybů.

Výsledkem práce je počáteční návrh s podrobnými popisy jeho částí obsahující odůvodnění jejich volby. Speciální pozornost byla věnována samotnému mixážnímu mechanismu, který se nachází v prostoru křídla a který se skládá z mnoha částí. Kinematika mixážního mechanismu jako celku je zobrazena pomocí zobrazení jeho pozic v kombinacích maximálních vychylek. Součástí návrhu jsou i trasy řízení a mechanismy automatického propojení soustav. Finální částí návrhu jsou poznámky o možných parametrech, které lze měnit pro dosažení jiných vlastností soustavy řízení, např. jiný poměr diferenciací křidélek.

Navržená soustava splňuje požadavky vyplývající ze zadání. Křídélkovací pohyb podléhá dostatečné diferenciaci, vnitřní a vnější flaperony mají různé poměry klapkovacích a křídélkovacích vychylek, ke spojení soustav řízení dojde automaticky při montáži segmentů křídla, samotný mixážní mechanismus se nachází v křídle a splňuje rozměrová omezení.

Pro malé rozměry částí mixážního mechanismu nebylo jisté, zda budou pevnostně vyhovovat. Z tohoto důvodu bylo provedeno přibližné určení závěsového momentu flaperonů, jenž byl dále pomocí kinematických schémat přepočítán na síly působící na mixážní páku, která byla odhadnuta jako nejnamáhanější část mixážního mechanismu. Pro tuto páku byl proto navržen podrobnější CAD model, který sloužil pro výpočet metodou konečných prvků. Výsledkem kontroly je maximální redukované napětí dle podmínky Von-Mises o velikosti 61 MPa, což je hluboko pod mezí kluzu běžných hliníkových slitin, návrh mixážní páky proto předběžně vyhovuje. Váha páky při použití hliníkové slitiny je 28 g, její další odlehčování má již zanedbatelný účinek.

Práci završuje kapitola zaměřená na budoucí vývoj, ve které jsou zmíněny návrhy na další činnost potřebnou pro rozvoj vypracovaného počátečního návrhu do podoby vhodné pro uplatnění v reálném kluzáku.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] DANĚK, Vladimír. *Mechanika letu. II, Letové vlastnosti*. Druhé vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2021. ISBN 978-80-7623-059-0.
- [2] TEICHMANN, Frederick K. 1905. *Airplane design manual*. New York (State): Pitman, 1958.
- [3] MULYANTO, T. a ZULKARNAIN, M. F. Study of sailplane control mechanism configuration and layout for Indonesian sailplane design. Online. In: *AIP conference proceedings*. 2020. ISSN 0094-243X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/5.0002635>. [cit. 2024-05-22].
- [4] THOMAS, Fred. *Fundamentals of Sailplane Design*. Maryland: College Park Press, 1979. ISBN 0-9669553-0-7.
- [5] JONES, Robert T. a NERKEN, Albert I. *The reduction of aileron operating force by differential linkage: Technical note no. 586, National Advisory Committee for Aeronautics*. Langley Memorial Aeronautical Laboratory, 1936.
- [6] FEIFEL, Winfried M. Combination of Aileron and Flap Deflection for Minimum Induced Drag Roll Control. 1978, s. 6.
- [7] *Certification Specifications for Normal, Utility, Aerobatic, and Commuter Category Aeroplanes CS-23*. Amdt. 3. 2012.
- [8] *Certification Specifications, Acceptable Means of Compliance and Guidance Material for Sailplanes and Powered Sailplanes (CS-22)*. Amdt. 3. 2021.
- [9] LANGER, Stefan. *FLIGHT TEST AS33 Es – LATEST 18m GLIDER*. Online. In: . 2022. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=xKNlBSAOkHE>. [cit. 2024-05-05].
- [10] *Grob-Flugzeugbau 1980 Maintenance Handbook Grob G 103 Twin II*. 1980.
- [11] *Maintenance Manual for the Sportine Aviacija LAK-17B sailplane with Front Electric Sustainer system*. 2014.
- [12] *What is automatic control connections and how does it work?* Online. Dostupné z: <https://aviation.stackexchange.com/questions/17124/what-is-automatic-control-connections-and-how-does-it-work>. [cit. 2024-05-05].
- [13] *ASK 21 B | ASegelflug*. Online. Dostupné z: <https://www.alexander-schleicher.de/en/flugzeuge/ask-21-b/>. [cit. 2024-05-05].



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

CAD	computer assisted design
FBW	fly-by-wire
MKP	metoda konečných prvků
$c$	hloubka řídicí plochy v daném řezu [m]
$c_1$	počáteční hloubka řídicí plochy [m]
$c_2$	koncová hloubka řídicí plochy [m]
$e$	vzdálenost osy rotace od náběžné hrany řídicí plochy [m]
$F_3$	síla v táhlu 3 [N]
$F_5$	síla v táhlu 5 [N]
$F_7$	síla v táhlu 7 [N]
$F_8$	síla v táhlu 8 [N]
$F_9$	síla v táhlu 9 [N]
$F_{11}$	síla v táhlu 11 [N]
$F_{flaperon1}$	síla táhla náhonu vnitřního flaperonu [N]
$F_{flaperon2}$	síla táhla náhonu vnějšího flaperonu [N]
$F_l$	liniová zatěžující síla řídicí plochy [N/m]
$F_{mix1}$	síla působící na mixážní mechanismus od vnitřního flaperonu [N]
$F_{mix2}$	síla působící na mixážní mechanismus od vnějšího flaperonu [N]
$g$	gravitační zrychlení [ $m/s^2$ ]
$k$	součinitel početního zatížení [-]
$l$	délka řídicí plochy [m]
$m$	hmotnost kluzáku [kg]
$M$	závěsový moment [Nm]
$M_l$	liniový závěsový moment řídicí plochy [Nm/m]
$n_1$	provozní letový násobek zatížení [-]
$p$	tlak [Pa]
$r$	rameno síly [m]
$S$	plocha křídla [ $m^2$ ]
$\bar{W}$	průměrné tlakové zatížení řídicí plochy [Pa]



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Rozložení vztlaku (vpravo) a silové a momentové účinky křidélek (vlevo) [1].....	12
Obr. 2 Mechanismus náhonu flaperonu opatřený aerodynamickým krytem kluzáku AS33 Es [9] .....	13
Obr. 3 Náhon vnějšího křídélka nevstupující mimo profil křídla kluzáku Grob G103 Twin Astir [10] .....	14
Obr. 4 Náhon klapky pomocí torzní tyče kluzáku Grob G103 Twin Astir [10] .....	14
Obr. 5 Zakončení krutových tyčí automatického propojení v trupu (vlevo) a v křídle (vpravo) kluzáku LAK-17B [11] .....	15
Obr. 6 Kyvný mechanismus automatického spojení řízení mezi trupem a křídlem kluzáku ASK 21 v rozpojeném stavu [13] .....	16
Obr. 7 Schéma spojeného kyvného mechanismu – pohled zředu [12].....	16
Obr. 8 Mechanické řešení diferenciací křidélek [5] .....	17
Obr. 9 Paralelogram v křídle kluzáku LAK 17B [11].....	17
Obr. 10 Mixážní mechanismus v křídle kluzáku LAK 17B [11] .....	18
Obr. 11 Rozvržení nosníků centrálního segmentu křídla .....	20
Obr. 12 Rozvržení flaperonů na zadaném křídle.....	20
Obr. 13 Realizace automatického propojení soustav řízení v trupu a v křídle .....	22
Obr. 14 Výškové rozšíření zvonku pro umožnění naklopení křídla při montáži (pohled z boku) .....	22
Obr. 15 Přivedení nesymetrického pohybu k mixážní páce.....	23
Obr. 16 Přivedení symetrického pohybu k mixážní páce + vertikální separace.....	24
Obr. 17 Napojení náhonu vnitřního flaperonu (nahore) a vnějšího flaperonu (dole).....	25
Obr. 18 Neutrální poloha mixážního mechanismu .....	26
Obr. 19 Schémata pro kombinace maximálních výchylek .....	27
Obr. 20 Mechanismus pro diferenciaci výchylky vnějšího flaperonu v neutrální poloze .....	28
Obr. 21 Páka náhonu vnějšího flaperonu sloužící k finální diferenciaci výchylky v základní poloze .....	29
Obr. 22 Celkové schéma náhonu vnitřního flaperonu.....	29
Obr. 23 Vertikální separace náhonu vnitřního (žlutá) a vnějšího (šedivá) flaperonu .....	30
Obr. 24 Detail páky náhonu vnitřního flaperonu.....	30
Obr. 25 Schéma náhonu vnějšího flaperonu – část v centrálním segmentu křídla.....	31
Obr. 26 Schéma propojení řízení v centrálním a vnějším segmentu křídla .....	31
Obr. 27 Schéma náhonu vnějšího flaperonu – část ve vnějším segmentu křídla.....	31
Obr. 28 Modelové tlakové rozložení pro křídélka .....	32
Obr. 29 Rameno síly táhla náhonu vnitřního flaperonu určené z CAD modelu .....	35
Obr. 30 Kinematické schéma náhonu vnitřního flaperonu. ....	36
Obr. 31 Rameno síly táhla náhonu vnějšího flaperonu určené z CAD modelu .....	37
Obr. 32 Kinematické schéma náhonu vnějšího flaperonu.....	38
Obr. 33 Návrh mixážní páky kontrolovaný pomocí MKP .....	39
Obr. 34 Výsledky redukovaného napětí zjištěné pomocí MKP .....	40