



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

NÁVRH MOBILNÍHO STOJANU PRO ZAVĚŠENÍ ELEKTRODYNAMICKÉHO BUDIČE PRO ZKOUŠKY AEROELASTICKÝCH JEVŮ V LETECTVÍ

DESIGN OF MOBILE STAND FOR SUSPENDING OF ELECTRODYNAMIC EXCITER FOR AEROELASTIC
PHENOMENA TESTING IN AVIATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Vojáček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Navrátil, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Jan Vojáček**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenství
Vedoucí práce: **Ing. Jan Navrátil, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh mobilního stojanu pro zavěšení elektrodynamického budiče pro zkoušky aeroelastických jevů v letectví

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pozemní rezonanční zkoušky jsou nedílnou součástí certifikačního procesu letounu. Výsledky této zkoušky slouží jako podklady pro analýzu odolnosti proti nebezpečnému aeroelastickému jevu – flutteru. Během rezonanční zkoušky je do konstrukce zaváděn pomocí elektrodynamických budičů silový impuls o dané frekvenci a amplitudě a je sledována odezva konstrukce na buzení. Práce je zaměřena na návrh stojanu pro zavěšení budiče během pozemní rezonanční zkoušky malých sportovních letounů. Stojan má umožňovat snadnou manipulaci a přivedení buzení v požadovaném směru v daném bodě na konstrukci letounu.

Cíle bakalářské práce:

- Stanovení konstrukčních požadavků na stojan.
- Rešerše možností návrhu.
- Návrh stojanu a výpočet jeho dynamických vlastností.

Seznam doporučené literatury:

NEWLAND, D. E. Mechanical Vibration Analysis and Computation. Dover Publications, 2013. ISBN 0486445178.

GÉRADIN, M., RIXEN, D. Mechanical vibrations: theory and application to structural dynamics. 2nd ed. Chichester: Wiley, 1997, XVIII, 425 s. : ill. ISBN 0-471-97524-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem mobilního stojanu pro provádění rezonančních zkoušek v letectví potřebných pro zhodnocení odolnosti letounů proti flutteru. Začátek práce pojednává o teoretických základech aeroelasticity společně s historickými událostmi, které vedly k počátkům zkoumání těchto jevů. Druhá část práce objasňuje motivaci pro konstrukci zadaného stojanu skrze rešerši stojanů dostupných na trhu a skrze uvedení prostředků, které má v současné době k dispozici zkušebna Leteckého Ústavu. Třetí část práce poté uvádí možné koncepční návrhy stojanu a následně přechází do kapitoly pojednávající o konečných vybraných řešeních vycházejících z těchto koncepčních návrhů. Na konec práce jsou uvedeny výsledky modální analýzy, jejíž výsledky udávají vlastní frekvence v pásmu frekvencí vyskytujících se při měření.

ABSTRACT

This Bachelor thesis deals with the design of mobile stand for carrying out ground vibration tests in aviation applications. These tests mainly judge the tolerance of aircraft against flutter. The start of the thesis deals with the theoretical background of aeroelasticity together with the historical events that led to the origins of research of such phenomenons. The second part of the thesis clarifies the motivation for designing the stand through overview of similar equipment available on the market and through introducing the equipment used at the aircraft testing laboratory at the Institute of Aerospace Engineering. Third part of the thesis states possible approaches to the overall design of the stand and then crosses over to the chapter that discusses the chosen solution of the design. At the end there are introduced the results of modal analysis. These results state the natural frequencies occurring in the range of frequencies that normally occur while testing.

KLÍČOVÁ SLOVA

Aeroelasticita, budící frekvence, vlastní frekvence, flutter, pozemní rezonanční zkouška, svařovaná konstrukce

KEYWORDS

Aeroelasticity, excitation frequency, natural frequency, flutter, ground vibration test, welded structure

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VOJÁČEK, Jan. *Návrh mobilního stojanu pro zavěšení elektrodynamického budiče pro zkoušky aeroelastických jevů v letectví*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140169>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Jan Navrátil.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému vedoucímu Ing. Janu Navrátilovi, Ph.D. za cenné rady, odborné vedení a všeobecnou ochotu projevenou během vypracovávání této bakalářské práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, vypracoval jsem ji samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona c. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků.

V Brně dne 20. 5. 2022

.....

Jan Vojáček

OBSAH

1	ÚVOD.....	15
2	AEROELASTICITA	17
2.1	Flutter.....	18
2.1.1	Matematický model flutteru a jeho řešení	19
2.2	Pozemní rezonanční zkouška.....	21
2.2.1	Elektrodynamický budič.....	22
3	PŘEHLED STOJANŮ PRO BUDIČE	23
3.1	Jednoduché podstavce	23
3.2	Stojany	23
3.2.1	Stojan The modal shop 2050A	24
3.2.2	Stojan Brüel&Kjaer UA1608	25
3.3	Prostředky užívané na LÚ	26
4	URČENÍ POŽADAVKŮ NA KONSTRUOVANÝ STOJAN.....	26
4.1	Směry buzení	26
4.2	Základní rozměry stojanu	26
4.3	Zlepšení ergonomie práce.....	27
4.4	Určení dynamických vlastností	27
5	KONCEPČNÍ NÁVRHY	28
5.1	Koncepční návrhy základny	28
5.2	Koncepční návrhy sloupu	29
5.3	Možnosti připojení vertikálního sloupu k základně	30
5.4	Možnosti návrhu zdvihacího mechanismu	31
6	KONEČNÝ NÁVRH	33
6.1	Základna	33
6.1.1	Manipulační kola	34
6.1.2	Stavitelné nohy	35
6.1.3	Možnost spojení kol s nohami	35
6.2	Sloup.....	36
6.3	Rameno	37
6.3.1	Saně budiče.....	38
6.4	Zdvihací mechanismus	39
6.4.1	Naviják.....	40
6.4.2	Kladky a jejich uložení	40
6.5	Konečná podoba návrhu	42
6.6	Materiály, polotovary a spojovací materiál	43
6.6.1	Materiály.....	43
6.6.2	Polotovary.....	43
6.6.3	Spojovací materiál	44
6.7	Modální analýza	45
6.7.1	Příprava geometrie.....	45
6.7.2	Síť a okrajové podmínky	46
6.7.3	Výsledné vlastní frekvence a jejich vlastní tvary	47
7	ZÁVĚR	49
8	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	51

9	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	52
9.1	Obrázky	52
9.2	Tabulky	52
10	SEZNAM PŘÍLOH	53

1 ÚVOD

Jedním z hlavních požadavků na konstrukce letounů je jejich nízká hmotnost, jelikož dovoluje dosahovat vysokých letových výkonů a dalších parametrů jako je například dolet a celková ekonomičnost provozu. Toto je zejména v moderní komerční letecké dopravě při neustále se zvyšujících cenách paliva a neustále vyšších nárocích na ekologičnost a udržitelnost jedna z nejdůležitějších metrik, které se promítají do výběru nových typů do flotily jednotlivých aerolinií. Neméně důležitá je nízká hmotnost i v oblasti sportovního letectví.

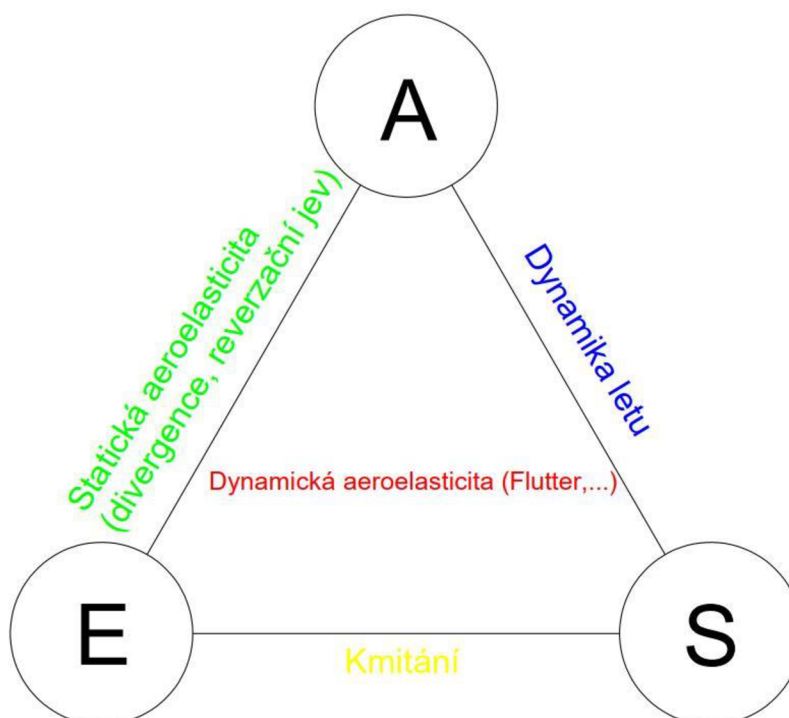
Při odlehčování konstrukce však dochází ke snižování její pevnosti, což také zapříčiňuje snižování konstrukčních součinitelů bezpečnosti. V rámci letu je jakákoliv porucha týkající se soustavy zajišťující let potenciálně fatální, což znamená, že na trhu dostupné typy letounů musejí projít náročným procesem certifikace, který zajistí bezproblémový provoz při předepsané údržbě.

Certifikace v sobě zahrnuje množství zkoušek, za zmínku v tomto případě stojí zejména pozemní rezonanční zkouška, kdy je do určitého bodu konstrukce přiváděn silový impuls o dané frekvenci a amplitudě a sleduje se odezva celého draku na buzení. Výsledky této zkoušky slouží k pozorování odolnosti konstrukce proti aeroelastickému jevu, který se nazývá flutter. Vzhledem k nutnosti budít silový impuls ve více bodech konstrukce, je žádoucí, aby změna bodu buzení byla pro měřícího pracovníka co možná nejsnadnější.

Od této skutečnosti se odvíjí hlavní cíl práce, což je návrh takového stojanu, který umožní zmiňovanou snadnou změnu místa, kterým jsou do konstrukce kmity přiváděny, zároveň by měl stojan umožňovat i změnu směru buzení. Vzhledem k určitému rozsahu frekvencí, ve kterých se zkouška provádí, je také třeba v něm znát dynamické vlastnosti navržené konstrukce. Dále by práce měla položit teoretické základy v rámci aeroelasticity a také by měla porovnat prostředky podobné navržené konstrukci, které jsou dostupné na trhu.

2 AEROELASTICITA

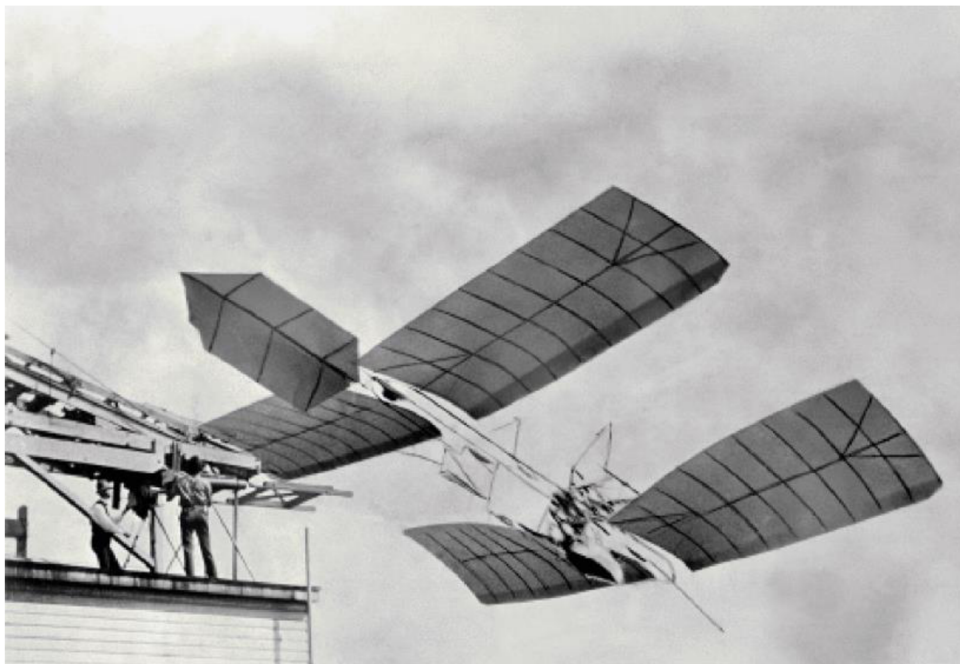
Aeroelasticita je vědní disciplína zkoumající interakce aerodynamických, elastických a setrvačných sil a jejich působení na plochy zkoumaných těles. Nejčastěji se jedná o tělesa v oblasti leteckého průmyslu, ale výzkum aeroelasticity můžeme potkat i v rámci stavebnictví a dalších oborů. Hlavní dělení rozděluje aeroelasticitu na dvě hlavní podskupiny, a to na aeroelasticitu statickou a dynamickou. Statická aeroelasticita je ovlivněna hlavně interakcí sil aerodynamických a elastických, zatímco dynamická je ovlivňována všemi třemi typy pozorovaných sil, řadíme do ní také jev zvaný flutter, pro jehož zkoumání má tato práce za úkol zkonstruovat stojan. Pro lepší vizualizaci oblastí aeroelasticity se používá trojúhelník aeroelastických interakcí. [1] [2] [3]



Obr. 2.1–Trojúhelník aeroelastických interakcí [1]

První problémy s aeroelastickými jevy mohou být s dnešním poznáním sledovány už u prvopočátků pokusů o řízený let, a to konkrétně u letounu Aerodrome Samuela Langleyho (obr. 2.2), jehož jednoplošnicková konstrukce trpěla na torzní divergenci křídla. Hlavní problémy této konstrukce byly později vyřešeny a Aerodrome byl úspěšně otestován. Rozšířenější problémy se objevily s širším nasazením letadel v 1. světové válce. Fokker D–8, jeden z prvních nasazených jednoplošníků, měl například problémy při prudkých klesáních, kdy kvůli flutteru přestávala fungovat křídélka a letadlo se tak stalo z velké části neřiditelným, toto bylo způsobeno primárně nedostatečnou torzní tuhostí jednoplošnickové konstrukce, která ale letadlu dodávala výkony v mnohém převyšující konstrukce dwojplušnickové.

Zvýšením zmiňované torzní tuhosti a zlepšením vyvážení byly tyto problémy eliminovány. Dalším letadlem vykazujícím problémy s aeroelastickými jevy byl i bombardér Hadley Page 0/400, u kterého se objevovaly torzní kmity v rámci zadní části trupu, které kmitaly společně s ocasními plochami. [1]



Obr. 2.2–Langleyho aerodrome [1]

2.1 Flutter

Flutter je nejnebezpečnějším aeroelastickým jevem, který se z hlediska konstrukce letadla a návrhu jeho letové obálky musí brát v potaz. Volně ho lze definovat jako dynamickou nestabilitu elastického tělesa v proudu vzduchu.

K základní představě tohoto jevu může sloužit jednoduché křídlo vetknuté z jedné strany ve větrném tunelu a natočené proti obtékajícímu proudu o malý úhel náběhu. Pokud vyvedeme toto křídlo z klidu v čase, kdy tunel není v provozu, vzniklé kmity se postupně disturbance utlumí a křídlo se znovu vrátí do klidu. Při postupném zvyšování rychlosti proudění v tunelu se tlumení křídla nejprve zvedá, ale s dalším zvyšováním se dostaneme do chvíle, kdy se tlumení začne značně snižovat. Při dosažení rychlosti, kterou nazýváme kritická rychlost flutteru, jsou kmity křídla ustáleny s konstantní amplitudou, avšak při dalším zvýšení rychlosti proudění je křídlo náchylné ke zvýšení kmitání s amplitudami mnohem vyššími, v tomto případě se na křídle vyskytuje nestabilní kmitání, což je popisovaný jev zvaný flutter.

2.1.1 Matematický model flutteru a jeho řešení

K matematickému popisu je nutno využít modelu, který je schopen vyjadřovat chování letadla, zejména jeho vlastních frekvencí a vlastních tvarů, v požadovaných rozsazích frekvencí, které jsou podle využití a výkonů určitých letadel rozdílné. Model je realizován pomocí metody konečných prvků. Základem tohoto modelu jsou pohybové rovnice ve tvaru:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K} = 0 \quad (1)$$

Kde \mathbf{M} je maticí hmotnosti, \mathbf{K} je maticí tuhosti, obě velikosti $N \times N$, a x je vektor výchylky velikosti $N \times 1$. Pomocí metody vlastních čísel je pak vypočteno prvních n vlastních frekvencí a vlastních tvarů konstrukce. Mezi typické vlastní tvary se řadí ohýbání a kroucení křídla a trupu. Pro snížení počtu rovnic při určování aerodynamických sil a pro získání výsledků flutteru transformujeme rovnice do modálního prostoru pomocí transformace:

$$\vec{x} = \mathbf{\Phi}\vec{q} \quad (2)$$

Kde $\mathbf{\Phi}$ je modální matice a q je vektor obecných souřadnic o velikosti $n \times 1$. Po dosazení rovnice (2) do rovnice (1) a vynásobení rovnice transponovanou maticí $\mathbf{\Phi}^T$ dostaneme:

$$\mathbf{A}\ddot{\vec{q}} + \mathbf{E}\dot{\vec{q}} = 0 \quad (3)$$

Zde $\mathbf{A} = \mathbf{\Phi}^T\mathbf{M}\mathbf{\Phi}$ a $\mathbf{E} = \mathbf{\Phi}^T\mathbf{K}\mathbf{\Phi}$ jsou zobecněné matice hmotnosti a tuhosti o velikosti $n \times n$. Touto úpravou byl tedy snížen počet rovnic z N na menší počet n . Dalším krokem v odhadu flutterového chování letounu je zavedení aerodynamických sil, které vyvstávají z obecného pohybu kmitajícího letounu. Nejprve je zavedena redukovaná frekvence, jež popisuje neklidnost proudění a je definována jako:

$$k = \frac{c\omega}{v} \quad (4)$$

Kde ω je úhlová frekvence [rad/s], v je pravá vzdušná rychlost [m/s] a c je délka tělivity profilu [m]. Aerodynamické síly jsou následně zavedeny do pohybové rovnice (3). Dostáváme tedy rovnici flutteru v obecných souřadnicích ve tvaru:

$$\mathbf{A}\ddot{\vec{q}} + (\rho V\mathbf{B} + \mathbf{D})\dot{\vec{q}} + (\rho V^2\mathbf{C} + \mathbf{E})\vec{q} = 0 \quad (5)$$

Zde ρ je pravá hustota vzduchu, V je pravá vzdušná rychlost, \mathbf{B} a \mathbf{C} jsou aerodynamické matice tlumení a tuhosti respektive. Obě tyto matice jsou funkcí redukované frekvence k . \mathbf{D} je maticí tlumení konstrukce a je odhadnuta pomocí výsledků pozemní rezonanční zkoušky.

Řešení rovnice (5) je realizováno pomocí odhadu výsledku pro nebuzený pohyb ve tvaru:

$$q(t) = q_0 * e^{\lambda t} \quad (6)$$

Kde q_0 je amplituda a λ je exponent indikující stabilitu. Dosazením do rovnice (5) a úpravou dostáváme rovnici ve tvaru:

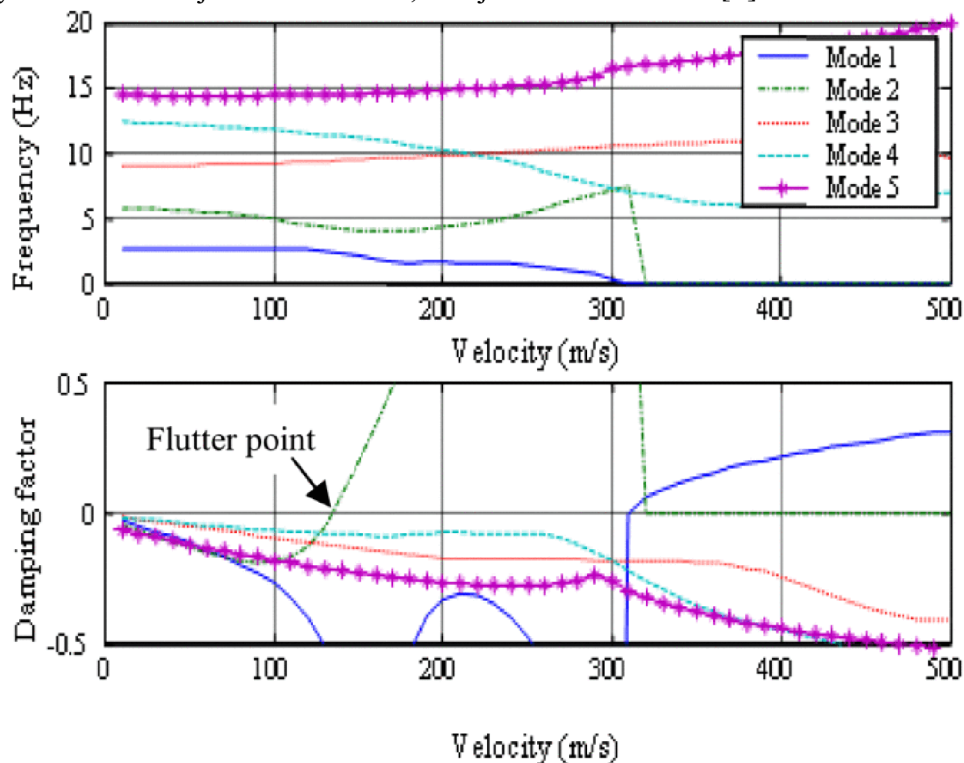
$$[\lambda^2 \mathbf{A} + \lambda(\rho V \mathbf{B} + \mathbf{D}) + (\rho V^2 \mathbf{C} + \mathbf{E})] q_0 = 0 \quad (7)$$

Tímto vznikne úloha vlastních čísel n -tého řádu, jejímž vyřešením dostaneme výsledky ve tvaru $\sigma_j + i\delta_j$ ($j = 1, 2, \dots, n$). Imaginární části δ_j jsou frekvence, při kterých je možný nebuzený pohyb a reálné části σ_j jsou korespondující procentuální kritické tlumení. [1]

Tedy:

- $\sigma_j < 0$ (pro všechna j), letoun je stabilní
- $\sigma_j = 0$ (pro všechna j), vytrvalý pohyb je možný a lze pozorovat flutter
- $\sigma_j > 0$ (pro všechna j), pohyb je nestabilní a jeho amplituda bude růst bez teoretického limitu [1]

Výsledky výpočtů jsou běžně vynášeny jako závislost frekvence a tlumení na rychlosti. Kritická rychlost flutteru je určena v bodě, kde je tlumení nulové. [1]



Graf 2.1–výsledky výpočtu flutteru s vyznačeným bodem flutteru [1]

2.2 Pozemní rezonanční zkouška

Je prováděna na prototypu daného letounu pro získání odhadů dat jako vlastní frekvence, vlastní tvary, tlumící poměry a modální hmotnosti. Tato data jsou dále užívána pro verifikaci a případnou úpravu výpočtů flutteru. Letoun je upevněn tak, aby co možná nejvíce odpovídal volnému chování při letu, většinou jsou užívány elastická lana, vzduchem či jiným médiem napuštěné vaky nebo vypuštěné pneumatiky. Způsob upevnění prototypu může být zohledněn i v dalších výpočtech pro zvýšení jejich přesnosti. Samotná zkouška spočívá v osazení letounu velkým počtem akcelerometrů a následným buzením kmitů zpravidla elektrodynamickými budiči. Je pravděpodobné, že za dobu zkoušky se musí místa, kde jsou kmity buzeny, několikrát změnit, je tedy žádoucí, aby změna těchto míst byla co nejrychlejší a nejjednodušší. Průběh buzení má obvykle tvar sinusoidy, případně může být buzení nahodilé. Pomocí výsledků z této zkoušky je verifikován matematický model flutterového chování letounu.[2]



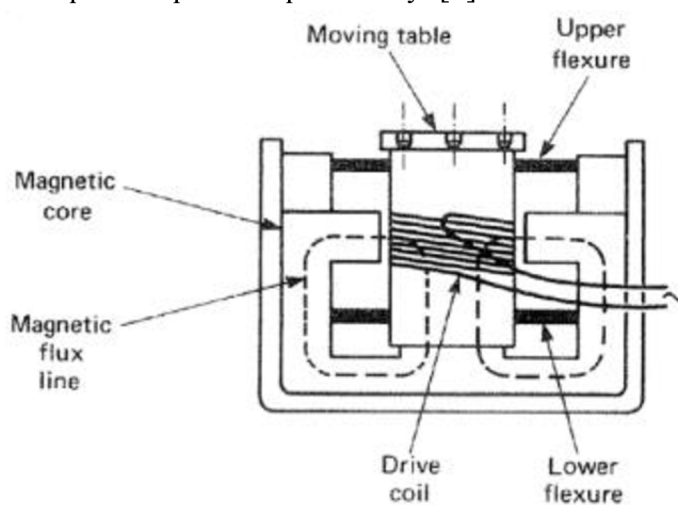
Obr. 2.3–křídlo letadla přichystané k rezonanční zkoušce [4]

2.2.1 Elektrodynamický budič

Jedná se o zařízení sestávající se obvykle z pohyblivé části opatřené cívkou, do které je přiváděn proud a statických magnetů, které bývají u většiny menších budičů (budící síly do ~500 N) permanentní. Může být viděn na obr. 2.3, kde je připraven k buzení kmitů. Přivedením střídavého proudu do cívky se pohyblivá část působením magnetického pole pohybuje kmitavým pohybem odpovídajícím frekvenci přiváděného proudu. Budič tedy pracuje na základě vztahu pro elektromagnetickou sílu ve tvaru:

$$\vec{F} = L \cdot \vec{I} \times \vec{B} \quad (8)$$

Kde L je délka vodiče, \vec{I} je vektoru proudu a \vec{B} je vektor magnetické indukce. Směr síly může být poté určen pomocí pravidla pravé ruky. [5]



Obr. 2.4—schématický řez budičem [5]

3 PŘEHLED STOJANŮ PRO BUDIČE

Z provedeného průzkumu lze v praxi sledovat užívání dvou hlavních typů prostředků pro umístění budiče na požadované místo. Tyto typy se liší svojí komplexností a možnostmi všestranného použití a budou podrobněji popsány v následujících podkapitolách.

3.1 Jednoduché podstavce

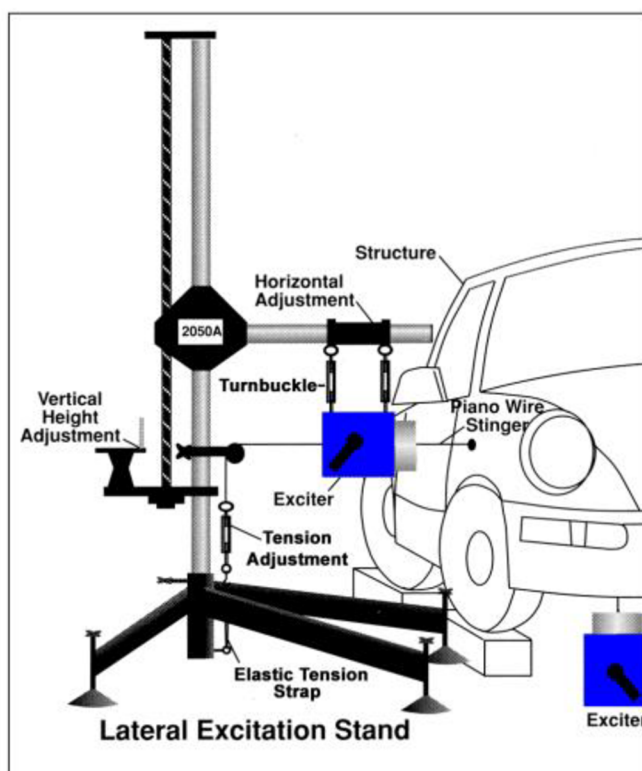
Pro pracoviště provádějící měření, které nevyžadují velkou variabilitu v měřicí výšce a celkové poloze budiče vůči měřenému letadlu, jsou ideální a také velice rozšířené jednoduché ocelové podstavce, které fungují pouze k přizvednutí budiče do výšky blíže místu, kterým budou buzeny kmity. Jedná se převážně o konstrukce svařené z ocelových profilů bez jakýchkoliv dalších prvků pro zjednodušení práce při přípravě měření. Tento typ podstavce tedy neumožňuje jednoduché přesouvání mezi buzenými místy a lze s nimi budit jen ve velmi omezeném rozsahu výšek. Příklad tohoto typu podstavce může být viděn na obr. 2.3.

3.2 Stojany

Jsou svojí konstrukcí uzpůsobeny pro ulehčení práce při časté změně míst buzení a pro maximální ulehčení práce měřícího pracovníka, který nemusí na rozdíl od podstavců celý budič zvedat jen svojí silou. Pohyb ve vertikálním směru bývá realizován pomocí pohybového mechanismu, posouvání v horizontálním směru je umožněno ručním posuvem „saní“ budiče po rameni stojanu. Vzhledem k tomu, že komerční produkty tohoto typu jsou primárně určeny pro automobilový průmysl k buzení z boku a budič je na nich volně zavěšen, bývají také opatřeny napínacím mechanismem, který vymezení další nekontrolovaný pohyb v horizontální rovině. V případě vyšší hmotnosti jsou také opatřeny koly pro jednodušší změnu polohy celého stojanu.

3.2.1 Stojan The modal shop 2050A

Jedná se o stojan koncepce popsané v kapitole 3.2, pro pohyb ve vertikálním směru je užíván pohybový šroub, který hýbe celým ramenem společně s budičem po svislé tyči kruhového průřezu. Celý stojan je navržen pro užití v kombinaci s lehčími typy budičů, díky čemuž nedosahuje vysoké hmotnosti a není tak opatřen manipulačními koly. Čistě ocelová konstrukce je z velké části rozebíratelná díky kombinaci svarových a šroubových spojů. Celkové rozměry jsou výška 191 cm, šířka 99 cm a délka 126 cm. Rozměry rozsahů možnosti měření nejsou uvedeny, ale lze předpokládat maximální výšku cca 170 cm a vyložení budiče od svislé osy cca 80–100 cm. [6]



Obr. 3.1–schéma užívání stojanu 2050A [6]

3.2.2 Stojan Brüel&Kjaer UA1608

Celková filozofie konstrukce je podobná předchozímu stojanu s rozdílem toho, že tento typ je určen pro těžší budiče. Maximální povolená zavěšená hmotnost je výrobcem uvedena na 60 kg. Z toho plyne, že konstrukce je celkově masivnější, čemuž odpovídá i celková hmotnost 140 kg, pro jednoduchou manipulaci je tedy stojan opatřen manipulačními koly. Pro pevné ustavení na místě měření je navíc opatřen i pogumovanými nožičkami. Dalším rozdílem oproti předchozímu typu je užití profilů vyrobených z hliníkové slitiny pro svislé a horizontální rameno. Rozměry tohoto typu jsou srovnatelné s předchozím typem. Tento typ také umožňuje připevnění na horní plochu horizontálního ramena, díky čemuž lze budit zespodu. [7]



Obr. 3.2–stojan UA 1608 [7]

3.3 Prostředky užívané na LÚ

V současnosti se pro rezonanční zkoušky na zkušebně Leteckého ústavu užívají dílenský jeřáb a vysokozdvížený paletový vozík. Dílenský jeřáb je užíván pro buzení kmitů shora křídla, budič je v tomto případě na jeřábu zavěšen na ocelových lankách. Vysokozdvížený vozík lze užívat jak pro buzení shora, tak i zdola. Buzení zdola je při zkouškách preferováno, takže je vozík využívanějším prostředkem pro polohování budiče. K vozíku je budič připevněn buď svorkami nebo jej lze pouze položit na zvedací vidlici.

Oba tyto prostředky mají své problémy, zejména z důvodu, že pro tuto práci nebyly přímo navrhovány, takže je sice užívat lze, ale není to ideální. Hlavním problémem jeřábu je absence možnosti buzení zespoda, dalším problémem je potom dostupnost přes rošt zkušebny Leteckého ústavu, kdy kola jeřábu nemají dostatečnou tloušťku, tudíž zapadají do otvorů roštu a práce na celé zkoušce se stává obtížnější a zdlouhavější.

4 URČENÍ POŽADAVKŮ NA KONSTRUOVANÝ STOJAN

4.1 Směry buzení

Pro rozdílné typy směru měření se dosud muselo využívat kombinace prostředků uvedených v kap. 3.3, kdy pro buzení shora byl využíván převážně dílenský jeřáb a pro buzení zespoda vysokozdvížený vozík. S dostupnými prostředky bylo problematické budit z boku svislé ocasní plochy. Stojan zkonstruovaný v této práci si dává za cíl umožnit všechny uvedené typy směrů buzení, kdy změna jednoho směru na jiný bude realizována pouze skrze lehkou modifikaci jednotlivých prvků stojanu.

4.2 Základní rozměry stojanu

Tyto rozměry musí pojmut rozsahy měření na běžných typech letadel vyskytujících se na zkušebně LÚ, tyto typy zahrnují bezmotorové kluzáky a menší sportovní letadla s koncepcí horní i dolnoplošníků. Po provedení průzkumu zejména tuzemského trhu s kluzáky a malými motorovými letadly společně s diskusí s vedoucím práce byly určeny rozsahy měření na výšku 0,5–2 m a vyložení budiče od svislého sloupu stojanu 1 m. Tyto rozměry by měly umožnit všechny typy měření uvedené v kap. 4.1.

4.3 Zlepšení ergonomie práce

Vzhledem k poměrně vysoké hmotnosti budiče, která byla zvážena na 23 kg, by měl stojan minimalizovat potřebu zdvihání celého budiče zejména do vysokých výšek. Toho by mělo být docíleno pomocí mechanismu, který zdvihá celé rameno stojanu i s připevněným budičem, tudíž jediné případy s nutností zdvihnutí budiče je jeho připojení k saním a změna konfigurace stojanu například z buzení shora na buzení zdola. Dále je třeba zajistit lehkou manipulaci se stojanem po zkušebně, pro což budou zvolena kola, která by měla minimalizovat problémy s překonáváním drážek roštu na zkušebně LÚ. Pro zlepšení stability a zbavení se nežádoucích účinků od valení kol při zkoušení bude stojan opatřen stavitelnými nožičkami.

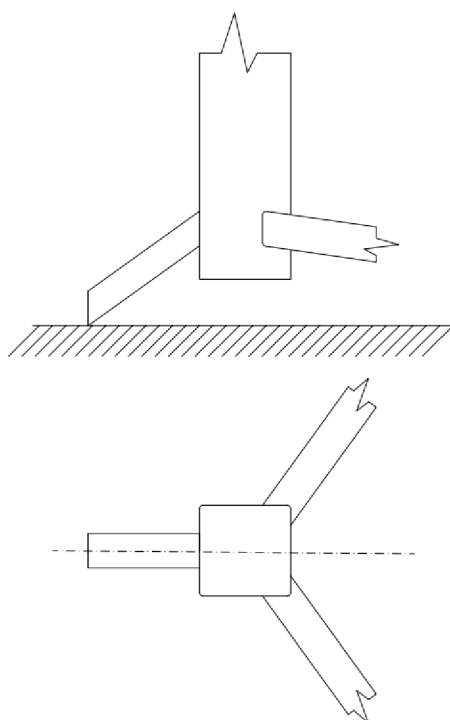
4.4 Určení dynamických vlastností

Vzhledem ke kmitavé povaze zatěžování při zkoušce je třeba určit pro navržený stojan zejména vlastní frekvence pro účel identifikace nepřesností ve výsledcích zkoušky a pro případné úplné vyřazení těchto nepřesností, vzniklé vlivem vlastní frekvence konstrukce, z výsledků. Jelikož rozsah práce zahrnuje pouze teoretickou konstrukci bez výroby prototypu, budou tyto frekvence určeny pomocí modální analýzy, která bude provedena softwarem pro řešení úlohy metodou končených prvků ANSYS Workbench.

5 KONCEPČNÍ NÁVRHY

5.1 Koncepční návrhy základny

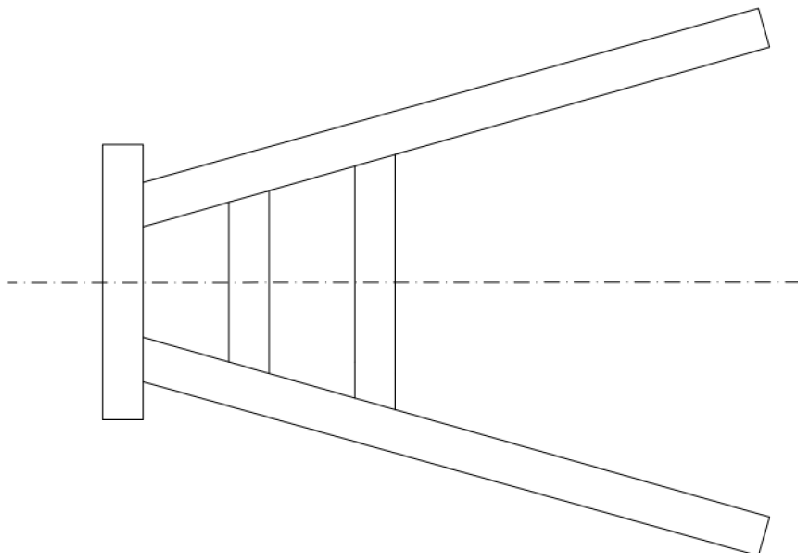
První zamýšlenou možností byla konstrukce jednoduché trojnožky, do jejíhož středu by byl připevněn svislý sloup stojanu pro polohování ramena. Tato možnost měla výhodu lepšího rozložení napětí nohách trojnožky, ale zároveň měla nevýhodu v obtížnosti připojení kol ve spojení se stavitelnými nohami a ve složité geometrii řezu profilem pro přivaření ke sloupu. Další nevýhoda by také byla složitá konstrukce pro připojení zamýšleného zdvihacího mechanismu.



Obr. 5.1–schéma základny typu trojnožka

Další zamýšlenou variantou byla konstrukce podobného charakteru jako u stojanu firmy Brüel&Kjaer [7], která má uspořádání třícípé hvězdy a oproti trojnožce je uspořádaná v jedné rovině, na spodní ploše základny tedy vznikají plochy příhodně orientované pro připojení kol a stavitelných noh. Konstrukce základny stojanu Brüel&Kjaer [7] je dle dostupných fotografií pravděpodobně svařená z jednotlivých kusů plechu do jednoho nosníku obdélníkového průřezu. Tato skutečnost je vnímána jako poměrně velká nevýhoda z důvodu složitosti výroby.

Poslední navrženou možností byla modifikace základny dílenského jeřábu pro připojení svislého ramena a stavitelných nohou. Tato možnost spojovala dobré možnosti pro připojení dalších komponent s jednoduchostí výroby, která skýtá pouze užití některé z technologií spojování normalizovaných ocelových profilů.



Obr. 5.2–schéma modifikované základny jeřábu při pohledu shora

5.2 Koncepční návrhy sloupu

Možnosti realizace sloupu se značně neodlišují od stojanů uvedených v kapitole 3.2, mezi možnostmi tedy byly duté profily kruhového či jiného průřezu nebo extrudované hliníkové profily. Kruhový průřez nebyl, vzhledem k požadavkům na buzení i z jiných směrů než z boku, shledán ideálním z důvodu následné nutnosti vymezení otáčení ramena okolo svislé osy sloupu. Vzhledem k této skutečnosti byly za vhodnější považovány sloupy čtvercového průřezu. Sloupu bylo zároveň určeno za úkol podílet se i na fixaci výškového nastavení ramena, což lze řešit pomocí třecího spoje, ale vzhledem k větším rozměrům a hmotnosti ramena společně s budičem bylo jako potenciálně lepší řešení navrženo fixování pomocí čepu procházejícího skrze díru v rameni i sloupu. V rámci hliníkových profilů by tento způsob fixace prakticky nešel vytvořit z důvodu nemožnosti tyto profily navrtat z boku, čímž se řešení sloupu pomocí extrudovaného hliníkového profilu stalo prakticky nemožné.

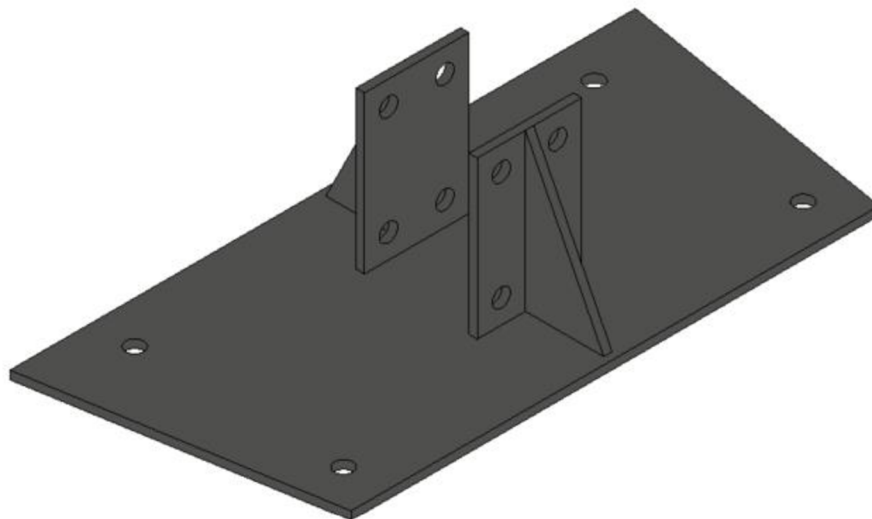
5.3 Možnosti připojení vertikálního sloupu k základně

V případě zvolení základny typu trojnožka by toto připojení bylo realizováno buď vložením do protikusu v základně a následným smontováním nebo by se základna se sloupem spojila do jednoho celku, kdy by jednotlivé nohy trojnožky byly pevně spojeny přímo se sloupem. Z tohoto by však vyvstával problém poměrně omezené rozebíratelnosti celého stojanu například z důvodu převozu či uskladnění. Realizace připojení k druhé variantě základny by vypadala velice podobně jako v případě stojanu typu trojnožky.

Při užití posledního zamýšleného stojanu by bylo příhodné využít 2 vzpěry spojující rozevírající se profily tvořící nohy. V tomto případě by na tyto vzpěry byla připevněna deska, na kterou by byl následně navařen prostředek pro připojení sloupu.

Samotné připojení sloupu lze řešit pomocí vložení do většího profilu přivařeného na desku a smontováním, tímto ale vzniknou značné tolerance z důvodu běžných tolerancí tloušťek dodávaných normalizovaných profilů, kdy z tohoto důvodu musí být zvolen profil pro protikus, který má tenkou stěnu, čímž vznikne zmiňovaná tolerance. Toto lze řešit distančními vložkami nebo případně zvolením připojovacího profilu s tlustší stěnou a následným obrobením na potřebnou tloušťku, což by ale bylo zbytečně nákladné.

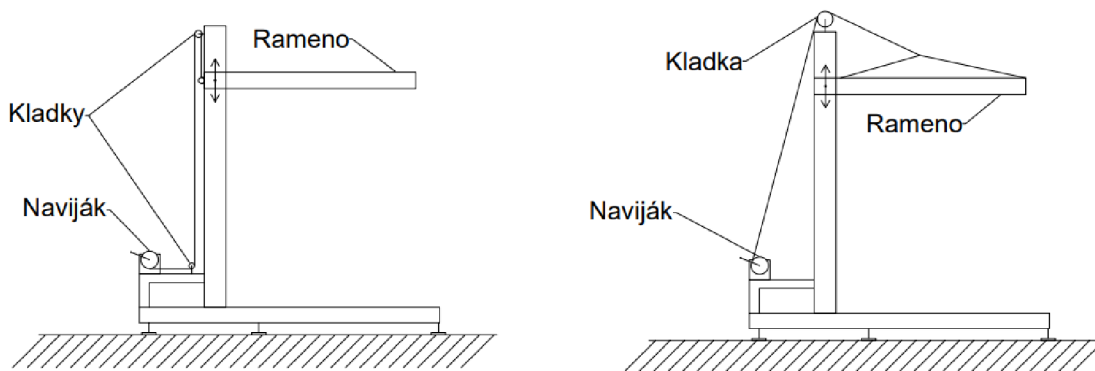
Druhou možností připojení sloupu je vytvoření konzol, mezi které by se sloup vložil a následně spojil pomocí šroubového spoje. Tyto konzoly by byly pouze jednotlivé kusy naděleného plechu přivařené k základní desce a vyztužené žebry. Z hlediska složitosti výroby a ceny je tedy tato možnost přívětivější než možnost předešlá, zároveň i nechává prostor pro řešení nepřesnosti rozměru profilu dodaného pro výrobu sloupu.



Obr. 5.3–konzolový způsob připojení

5.4 Možnosti návrhu zdvihacího mechanismu

Jak bylo zmíněno v kapitole 4.3, jedním z hlavních požadavků na stojan je zjednodušení práce během jeho užívání při měření také díky mechanismu, který bude zajišťuje pohyb ramena s připevněným budičem po sloupu stojanu. Zde byly brány v potaz 2 hlavní možnosti realizace. První z nich bylo užití pohybového šroubu tak jako na stojanech uvedených v kapitole 3.2, druhou potom využití jednoduchého kladkového mechanismu v kombinaci s navijákem, zde byly dále zvažovány 2 způsoby propojení lana k rameni stojanu.



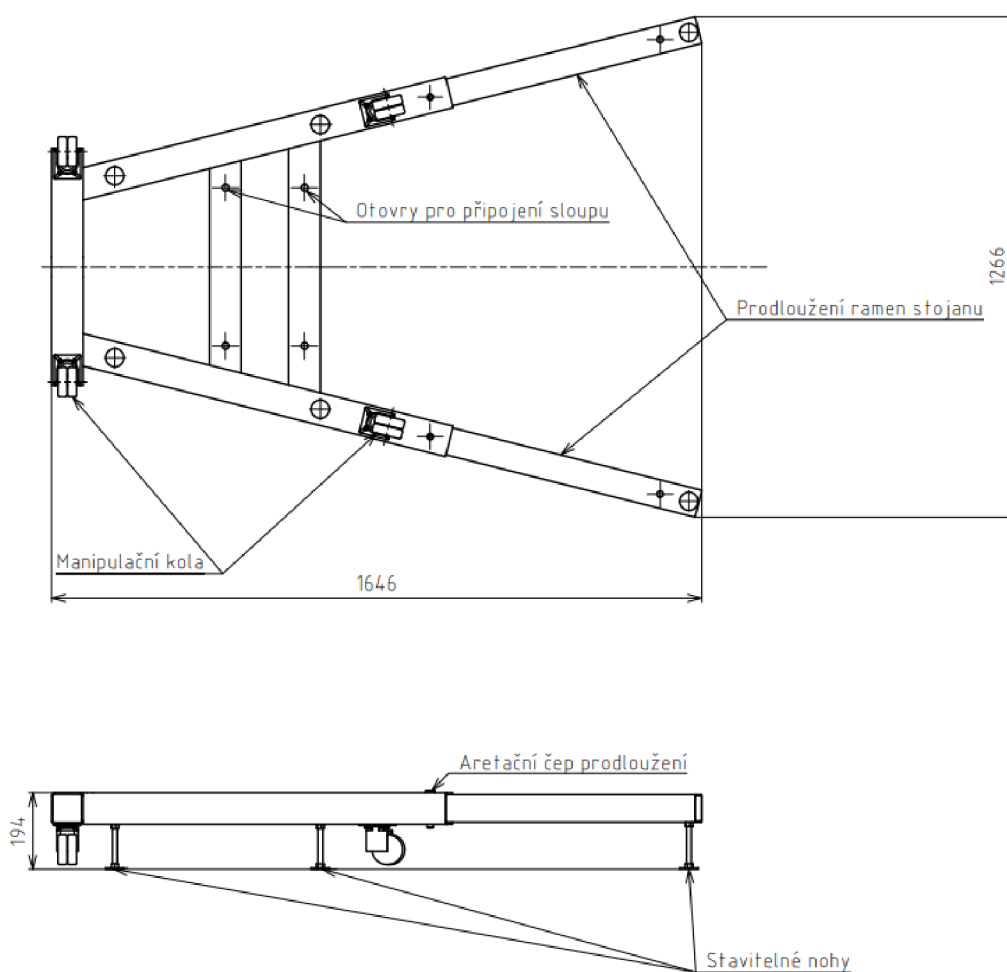
Obr. 5.4–možnosti propojení kladkového mechanismu s ramenem

V případě verze vpravo by vznikl problém při buzení zespoda, kdy by bylo problematické vyhnout se lanům při propojování budiče s letadlem, a proto se jako lepší volba jeví verze na obrázku vlevo, kdy je lano připevněno k ramenu zezadu. Šroubový mechanismus byl zavrhnut z důvodu vysoké pravděpodobnosti potřeby výroby obráběných součástí, což by navyšovalo cenu a potřeby vybavení pro konečnou výrobu stojanu. Zatímco kladkový mechanismus lze složit ze součástí volně dostupných ke koupi.

6 KONEČNÝ NÁVRH

6.1 Základna

Zvoleným typem se stala základna vycházející z konstrukce základny dílenských jeřábů. Jak je uvedeno v kap. 5.1, tento typ základny spojuje ideální možnosti pro připojení ostatních prvků stojanu s jednoduchostí výroby. Jedná se o jednotlivé duté profily čtvercového průřezu spojené svařováním, čehož se dosahuje co možná nejvyšší tuhosti a pevnosti základu celé konstrukce. Do rozevřajících se ramen základny jsou vsunuty profily menšího rozměru pro prodloužení podpěrné délky, jinak by hrozilo při vysokých vyloženích budiče převrnutí stojanu. Toto řešení je zvoleno z důvodu toho, aby se prodloužení ramen dalo při uskladnění stojanu zasunout do hlavního celku základny a celé zařízení tak zabíralo co možná nejméně místa. Aretace prodloužení ramen při vysunutí je zařízena pomocí čepu, který je vložen do předvrtaných děr jak v profilu základny, tak v profilu prodloužení. Na spodní ploše je základna opatřena manipulačními koly a stavitelnými nohami pro usazení v místě měření.



Obr. 6.1—schéma konečné podoby základny

6.1.1 Manipulační kola

Na kola byl kladen požadavek vysokého dovoleného zatížení ve spojení s co možná nejmenším rozměrem, zároveň je žádoucí, aby byla vybrána varianta kola s brzdou pro zabrzdění zejména na místě uskladnění, aby nebylo nutno stojan stavět pokaždé na nohy. Ideálním průnikem těchto požadavků společně s požadavkem co možná nejnižší ceny bylo shledáno přístrojové pojezdové kolečko B120.A80.075. Dovolené zatížení tohoto kola je 80 kg, což by mělo v případě užití čtyřech kol zajišťovat, při hmotnosti stojanu cca 140 kg, součinitel bezpečnosti větší než dva. Zároveň má kolo stavební výšku 102 mm, což tedy splňuje požadavek na co možná nejmenší rozměry.[8]

V kap. 4.3 byl také uveden požadavek pro řešení problému se zapadáním kol do roštu na zkušebně LÚ, šířka drážek v roštu byla změřena na cca 40 mm, zatímco zvolené kolo má dvojitý běhoun každý o šířce 24 mm, což by společně s mezerou mezi běhouny mělo zajistit celkovou šířku přes 50 mm, což řeší uvedený problém.

Kola zobrazena ve výkresech a schématech jsou pouze schématická, ale pro jejich tvorbu byly použity reálné rozměry zvoleného typu. Připevnění kol je zajištěno pomocí přivařovacích šroubů, toto řešení zvyšuje komplexnost výroby, ale je nutno použít z důvodu zasouvání prodloužení ramen do profilů základny, takže při použití šroubu, který by zasahoval do tohoto profilu by nešlo prodlužovací profily zasunout.



Obr. 6.2–přístrojové pojezdové kolečko–B120.A80.075 [8]

6.1.2 Stavitelné nohy

Nohy musí zajistit dostatečné vyzvednutí stojanu pro odlepení kol od země. Jejich propojení se stojanem je realizováno pomocí přivařených matic na spodní ploše profilů základny. Zvoleny byly celokovové nohy s průměrem základny 46 mm a závitem M12 s délkou 120 mm.[9] Tento závit by bylo nutné při konečné montáži zkrátit tak, aby šly prodloužení ramen základny zasunout a při tom nenarážely do noh zasahujících dovnitř profilu základny. Zvolené celokovové nohy by bylo možné vyměnit za nohy s patkou vyrobenou z polymeru, avšak montáž a užití by bylo identické s prvotně zvolenými nohami.



Obr. 6.3–stavitelná celokovová otočná noha [9]

6.1.3 Možnost spojení kol s nohami

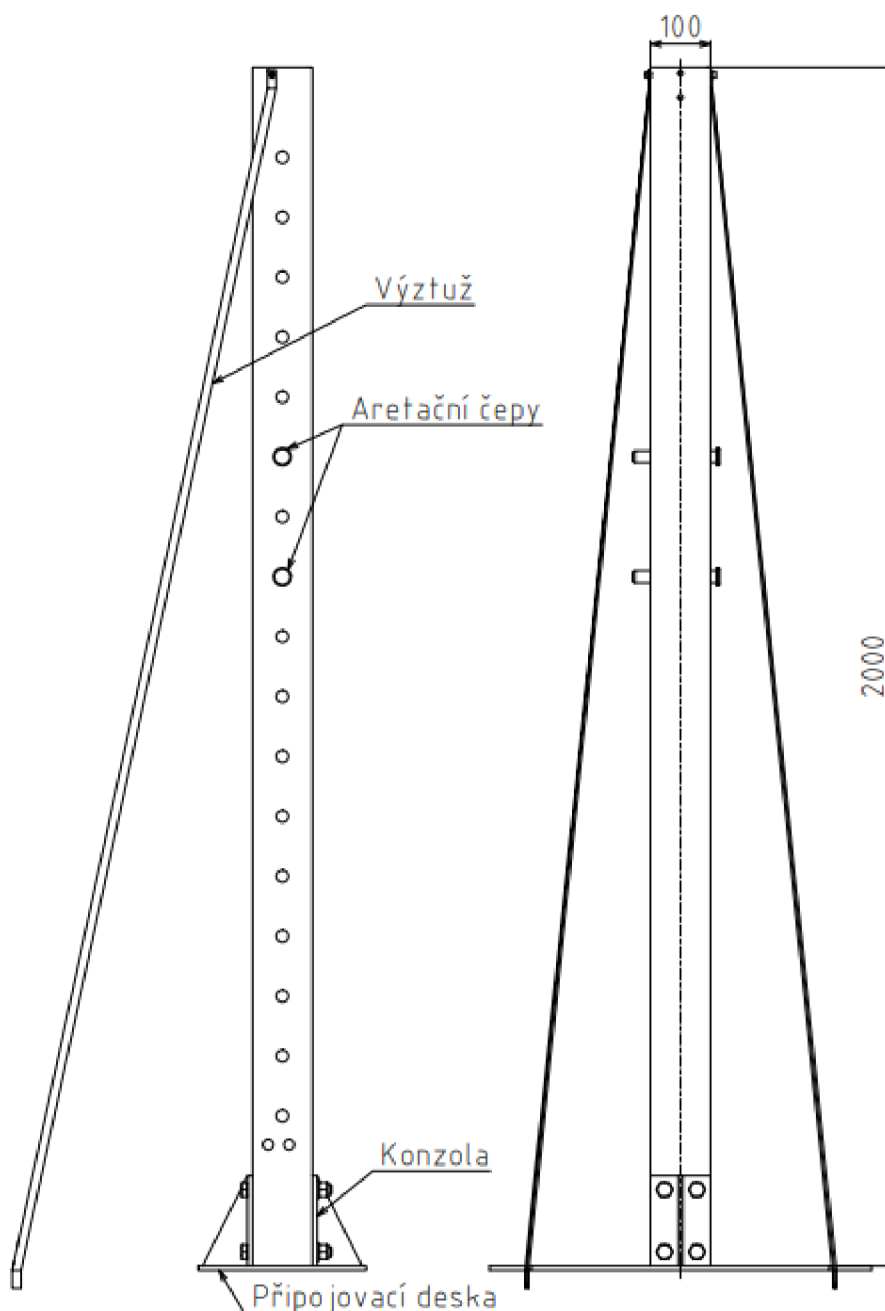
Během výběru noh a kol byla nalezena i alternativa, která by tyto 2 prvky spojovala dohromady, což by značně snížilo množství výrobních úkonů, jelikož by se kola připojovaly společně s nohami.[10] Cena tohoto řešení se ale pohybuje řádově až v tisících korun za kus, což bylo vzhledem k určitému důrazu na přijatelnou cenu celého stojanu hlavním důvodem pro nezvolení tohoto řešení.



Obr. 6.4–rozebíratelná kolečka se stavitelnou nožkou [10]

6.2 Sloup

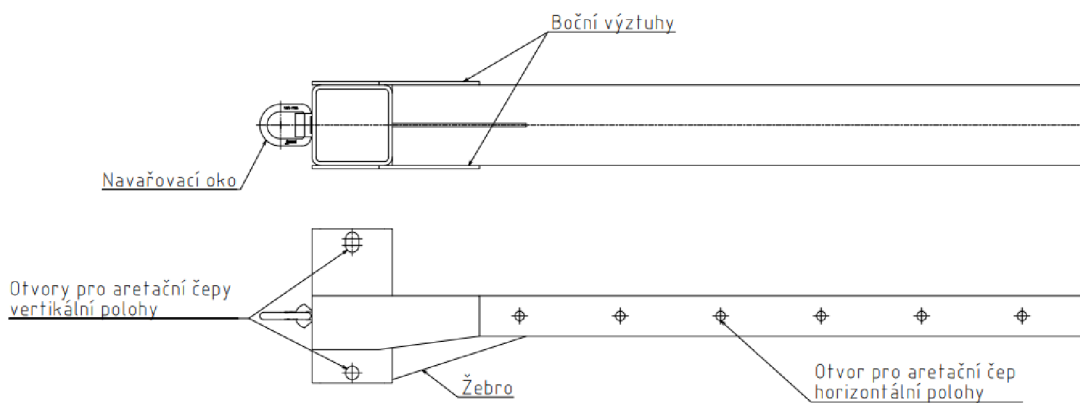
Sloup je tvořen dutým čtvercovým profilem s délkou hrany 100 mm, tloušťkou stěny 4 mm a celkovou délkou 2 m. K základně je připojen pomocí konzol přivařených na připojovací desce, jak je popsáno v kap. 5.3. Jak připojovací deska k základně, tak sloup ke konzolám je připojen šroubovými spoji. Zároveň je dále vyztužen pásovinou, která spojuje horní hranu sloupu a boční stranu ramen základny. Pro vertikální aretaci ramena stojanu jsou do boční plochy navrtány otvory rozmístěné po 10 cm od sebe pro vložení aretačních čepů.



Obr. 6.5–schéma sloupu a jeho připojení k základně

6.3 Rameno

Jedná se o svařenec, který je tvořen dvěma hlavními částmi, a to čtvercovým profilem, který se nasune na sloup stojanu a zajišťuje posun ve vertikálním směru a samotným ramenem, které je tvořeno obdélníkovým profilem po němž budou posouvány saně s budičem v horizontálním směru a bude tak nastavováno vyložení budiče od sloupu. Spoj těchto dvou profilů je vyztužen zespoda pomocí žebra a dále i z boku pomocí navařených plechů. Kombinace těchto prvků by měla zaručit co nejvyšší možnou tuhost tohoto spoje. Na profilu, jež je nasunut na sloup stojanu jsou otvory pro zasunutí dvou čepů pro aretaci vertikální polohy a také pro vymezení vůle mezi ramenem a sloupem, která by zapříčiňovala naklopení vyložené části ramene spolu s budičem směrem dolů, což není žádoucí. Pro aretaci saní v horizontální poloze je použit, obdobně jako u aretace vertikální polohy, čep, který proniká jak saněmi budiče, tak profilem ramene. Na zadní straně celého ramene je navařeno vázací oko, na které bude připojeno lano zdvihacího mechanismu.

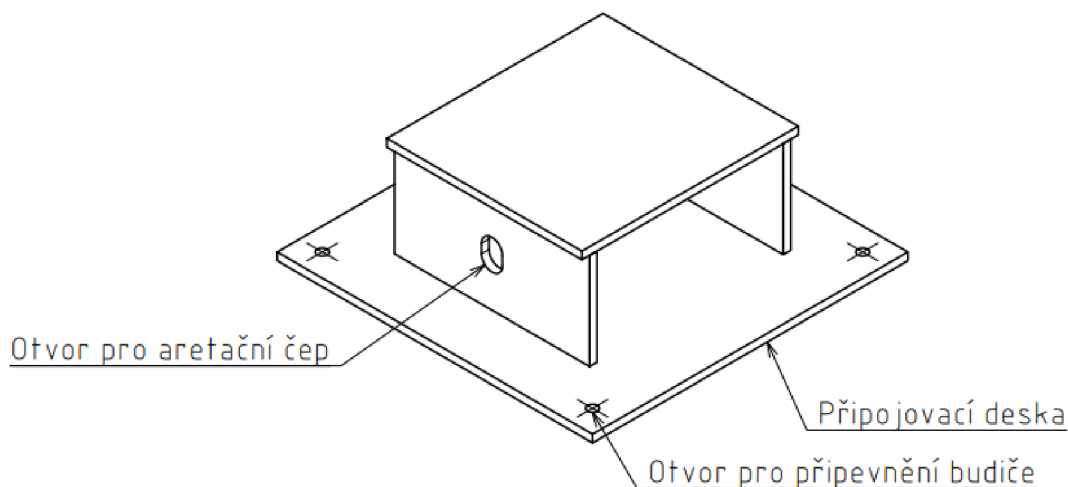


Obr. 6.6–schéma ramena

6.3.1 Saně budiče

Slouží pro propojení budiče se stojanem a pro jeho pohyb v horizontálním směru po ramenu. Jedná se o svařenec složený z plechů, který má připojovací desku pro budič. Připojení je zamýšleno realizovat dvěma možnostmi. První možností je tuhé připevnění pomocí šroubových spojů, kdy se těleso budiče přímo připojí skrze připojovací díry v něm k desce saní. Tato metoda připojení je dle konverzace s vedoucím práce v poslední době preferována. Druhou možností je zavěšení budiče pomocí ocelových lanek. V tomto případě by se otvory v připojovací desce lanka protáhla a přivázala se, nebo lze také použít oka s závitem, který by šla do jednotlivých otvorů připevnit pomocí matice z druhé strany desky. Jak již bylo zmíněno, připevnění lanky je využíváno v minoritě případů, je tedy možno ho využít, ale nebude v rámci schéma ani výkresové dokumentace vyobrazeno.

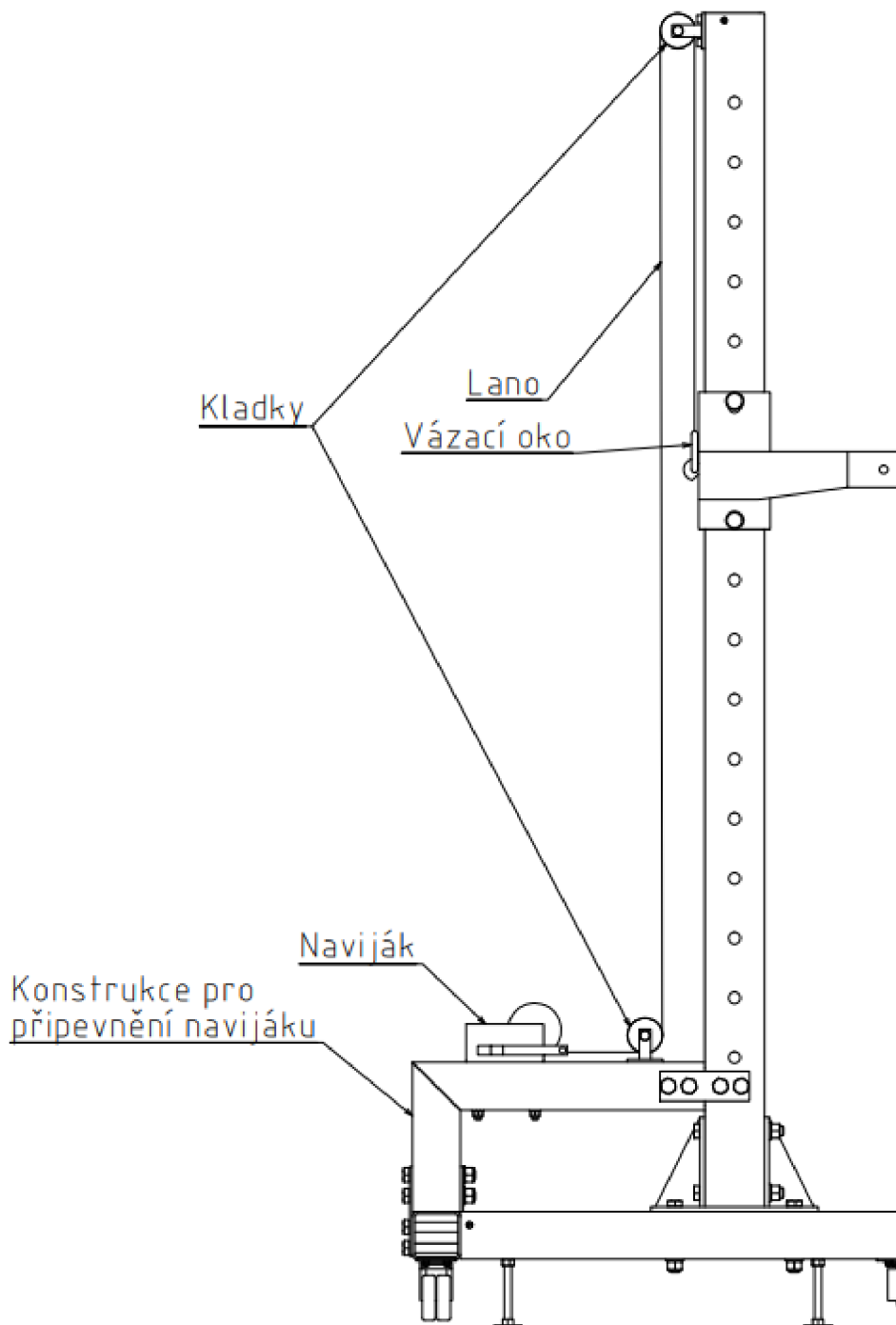
Saně jsou zkonstruovány tak, aby šly užit při buzení ze všech požadovaných směrů. Na schématech a výkresech je vyobrazena konfigurace při buzení shora, avšak při změně konfigurace pro buzení zdola stačí saně i s budičem vyjmout z ramena, následně je otočit o 180° tak, aby je šlo nasunout zpět s tím rozdílem, že budič je usazen na horní straně ramena. V případě požadavku na buzení z boku lze využít obě zmiňované konfigurace, kdy bude budič pouze natočen o 90° ve svém držáku, obdobně lze budít prakticky z jakéhokoliv úhlu, kdy bude natočení pouze nastaveno o příslušný úhel.



Obr. 6.7–schéma saní

6.4 Zdvihací mechanismus

Byla zvolena cesta kladkového mechanismu v kombinaci s ručním navijákem. Toto řešení spojuje relativně jednoduchou celkovou konstrukci mechanismu s nízkou cenou celého řešení. Pro připevnění navijáku byla do konstrukce přidána část skládající se ze dvou profilů svařených do L, která spojuje základnu se sloupem. Připevnění samotné je realizováno dle pokynů výrobce pomocí šroubů M10.



Obr. 6.8–schéma zdvihacího mechanismu

6.4.1 Naviják

Pro mechanismus byl zvolen ruční naviják od firmy PROTECO s udávanou nosností 450 kg. Dohromady s ním je dodáváno také ocelové lano s průměrem 5 mm a délkou 7,3 m. Tyto parametry dělají uvedený typ přijatelným pro zamýšlené užití, zároveň se jedná o jeden z nejlevnějších typů. Je také opatřen převodem pro další ulehčení práce s převodovým poměrem 4,1:1.[11] Od výrobce byly vyžádány připojovací rozměry, které nebyly uvedeny v technických specifikacích na e-shopu. Tyto rozměry byly následně užity pro návrh připojovacích rozměrů v rámci sestavy stojanu. Naviják vyobrazen na schématech a výkresech je pouze ilustrativní, avšak jak bylo zmíněno, připojovací rozměry jsou shodné s reálným zařízením.



Obr. 6.9–zvolený naviják s nosností 450 kg [11]

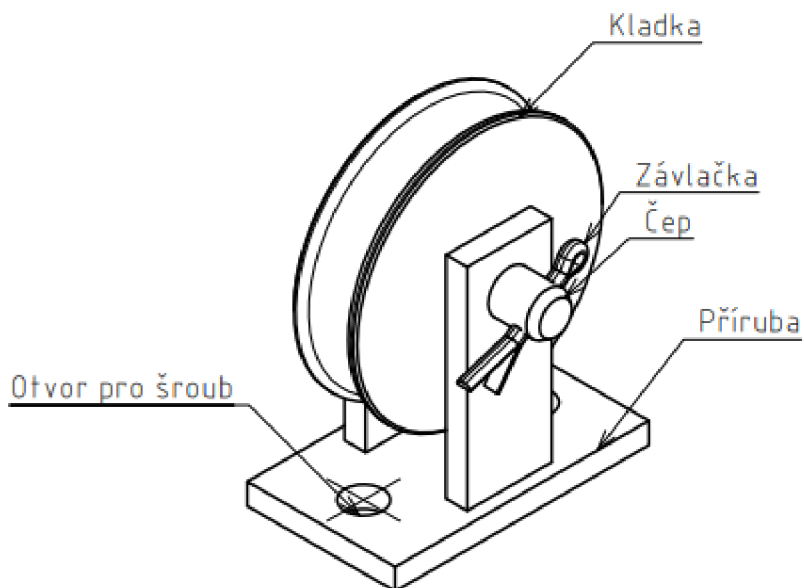
6.4.2 Kladky a jejich uložení

Použité kladky mají velký průměr 59 mm, tloušťku 15 mm, poloměr drážky 3 mm a dovolené zatížení 150 kg.[12] Tento rozměr byl zvolen zejména s ohledem na průměr lana, které je dodáváno s navijákem, maximální dovolené zatížení je zároveň více než dostačující.



Obr. 6.10–kladka s nalisovaným ložiskem [12]

Jako hřídel pro kladku je použit čep, který je následně axiálně zajištěn závlačkou. Čep i s kladkou je uložen v navržené přírubě, což je svařenec plechů s otvory pro přišroubování ke sloupu stojanu. V mechanismu jsou užity tyto celky dva, aby se lano vedlo takovou cestou, kde nebude překážet při práci a nebude tvořit nebezpečí pro potenciální úraz.



Obr. 6.11–schéma uložení kladky

6.5 Konečná podoba návrhu



Obr. 6.12–render konečného návrhu stojanu

6.6 Materiály, polotovary a spojovací materiál

6.6.1 Materiály

Byly voleny hlavně na základě požadavku svařitelnosti, jelikož společně se spoji šroubovými zaujímají spoje svarové většinu spojů na stojanu.

Profily jsou vyráběny z oceli S235JRH(1.0093), pro niž ekvivalentní označení dle ČSN je ocel 11 375. Číslo S ve značce značí, že se jedná o konstrukční ocel, číslo značí minimální mez kluzu, tedy 235 Mpa, přídavné symboly JR značí nárazovou práci 27J při teplotě + 20 °C a písmeno H značí, že se jedná o materiál pro duté profily. Tento materiál zároveň splňuje požadavek na svařitelnost.

Plechý válcované za tepla jsou vyráběny z materiálu obdobných vlastností S235JRC+N(1.0122), rozdílem jsou tu pouze poslední dva dodatkové symboly, kde C značí zvláštní tvářitelnost (je vhodný pro ohýbání, ohraňování, obrubování, ...) za studena a +N značí, že je materiál normalizovaně žhán či normalizovaně válcován.

6.6.2 Polotovary

Celá konstrukce stojanu je složena z dvou hlavních typů polotovarů, a to z dutých profilů čtvercového nebo obdélníkového průřezu, norma EN 10219, a z plechu válcovaného za tepla, norma EN 10051. Oba typy polotovarů jsou v konstrukci užity ve více rozměrech. Následující tabulky zahrnují potřebné profily a plechy pro výrobu konstrukce.

Tab. 1–profily dle EN 10219

Průřez	Rozměr [mm]	Délka [mm]
Čtverec	70x3	1500
	80x4	3750
	100x4	2000
	120x6	230
Obdélník	100x80x4	740
	120x60x4	1040

Tab. 2–plechy dle EN 10051

Tloušťka [mm]	Rozměr tabule [mm]
5	620x320
8	820x320

6.6.3 Spojovací materiál

Zahrnuje šrouby, matice, podložky, čepy a závlačky. Na tuzemském trhu se spojovací materiál běžně prodává v kombinaci norem ISO a DIN, tyto normy jsou většinou ekvivalentní a je tedy prakticky bez rozdílu, který kus je zakoupen. Neobvyklými typy spojovacího materiálu, které bylo nutno užít, jsou navařovací šrouby a nýtovací matice.

Tab. 3–spojovací materiál

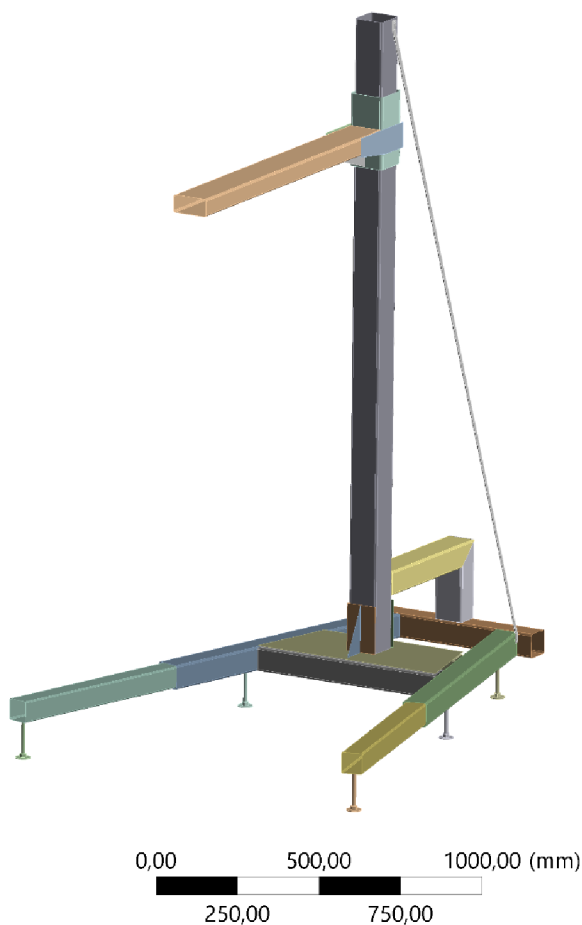
Typ dílu	Norma	Rozměr	Počet ks
Šroub s šestihrannou hlavou	DIN 931	M16x110	8
		M16x140	8
		M10x100	3
Šroub s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem	DIN 912	M8x25	2
		M6x20	8
Šroub přivařovací	ISO 13918	M6x10	16
Matice	DIN 934	M16	16
		M12	6
		M10	3
		M8	2
		M6	22
Nýtovací matice	–	M6	2
Podložka	DIN125A	16	16
		10	3
		8	2
		6	22
Čep	ISO 2341 B	D20x140	2
		D14x140	1
		D10x40	2
	EN 22341	D16x90	2
Závlačka	DIN 94	D3,2x22	2

6.7 Modální analýza

Jak bylo zmíněno v kap. 4.4, pro navrženou konstrukci je nutno určit vlastní frekvence z důvodu validace výsledků měření a případnému vyřazení výsledků ovlivněných těmito frekvencemi. Pásmo budících frekvencí se pohybuje od 10 do 100 Hz, toto tedy zároveň určuje rozsah, ve kterých je cíl určit výskyt vlastních frekvencí. Vzhledem k tomu, že tato práce má za cíl vytvořit pouze návrh konstrukce zadaného stojanu, nevzniká možnost provést modální analýzu experimentálně na vyrobené konstrukci, bylo tedy nutné využít pro ni software ANSYS Workbench, který pro řešení užívá metodu konečných prvků.

6.7.1 Příprava geometrie

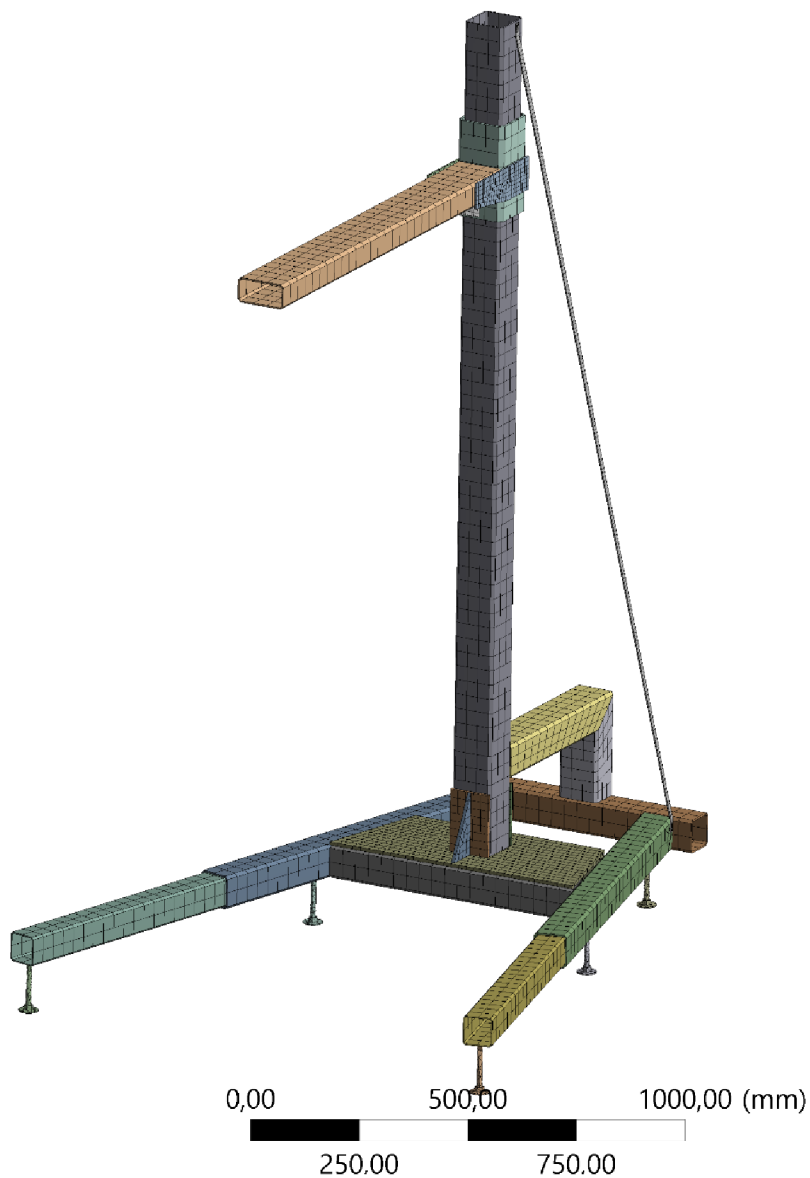
Model sestavy byl zjednodušen a zbaven všech šroubových spojů, jelikož jejich modelování je složité a pro účely této analýzy nepotřebné. Následně byly profily a plechové součásti nahrazeny jejich střednicovými plochami pomocí funkce midsurface v softwaru DesignModeler, který je implementován přímo v programu Workbench. Spojení jednotlivých komponent bylo následně vytvořeno pomocí bonded kontaktů přímo v řešícím prostředí Ansys Mechanical.



Obr. 6.13–zjednodušená geometrie stojanu

6.7.2 Sít' a okrajové podmínky

Pro řešení metodou konečných prvků je třeba celou geometrii pokrýt sítí, která komponenty rozdělí na jednotlivé konečné prvky. V rámci řešení modální analýzy se důraz klade na spíše rovnoměrnou sít' než na její jemnost.



Obr. 6.14 – geometrie pokrytá sítí

Před řešením je třeba definovat i okrajové podmínky úlohy. V rámci této úlohy se jednalo o podepření celé konstrukce na spodních plochách jednotlivých noh. Laicky řečeno lze tedy říct, že pod konstrukcí byla definována podlaha, na které celá konstrukce stojí.

6.7.3 Výsledné vlastní frekvence a jejich vlastní tvary

V rozsahu budících frekvencí bylo nalezeno celkem 5 vlastních frekvencí a k nim patřících vlastních tvarů, jejichž snímky jsou uvedeny v příloze 1.

Tab. 4–vlastní frekvence a popis vlastních tvarů

Číslo	Frekvence [Hz]	Popis vlastního tvaru
1	29	výkyv sloupu do stran
2	34	ohýbání sloupu v ose souměrnosti celého stojanu
3	38	výkyv základny
4	57	ohýbání ramene
5	82	kroucení sloupu a ramene

Obecně lze říct, že tyto frekvence lze posunout do nižších hodnot pomocí zatížení konstrukce stojanu, toto by ale ztížilo celkovou manipulaci se stojanem. V návrhu to tedy není zakomponováno a bylo by to řešeno pomocí jednotlivých závaží přidaných až na místě měření. Zároveň by se výsledky této analýzy v případě výroby stojanu validovaly pomocí experimentu na konkrétním výrobku

7 ZÁVĚR

Hlavním cílem práce bylo navrhnout stojan pro připevnění budiče kmitů, který se používá při pozemních rezonančních zkouškách. Dílčími cíli bylo vytvořit přehled stojanů dostupných na trhu a výpočet dynamických vlastností navrženého stojanu.

V rešeršní části práce byly položeny teoretické základy o aeroelasticitě a byl vytvořen přehled prostředků užívaných v praxi či dostupných na trhu. Následně byly uvedeny možné koncepční návrhy a poté se přešlo ke konečnému návrhu zadaného stojanu.

Celková koncepce stojanu byla zvolena jako konstrukce tvořena primárně ocelovými profily spojenými kombinací svarových a šroubových spojů. Do konstrukce byl zakomponován zdvihací mechanismus, který má za cíl dále zjednodušit práci při zkouškách, dále byl stojan opatřen koly pro jednodušší manipulaci a nohami pro ustavení na místě. Celý návrh se snažil co nejvíce zjednodušit celou práci při vykonávání zkoušky a zároveň bylo pohlíženo i na ceny jednotlivých komponent a polotovarů. Nakonec byla provedena modální analýza pomocí metody konečných prvků, jejíž výsledky odhalily vlastní frekvence v pásmu budících frekvencí.

Další možnosti rozvoje práce jsou vnímány především skrze výrobu navrženého stojanu, ověření přesnosti a správnosti výsledků provedené modální analýzy a celková optimalizace vyrobeného exempláře.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CHINMAYA, Panda a S. R. P. VENKATASUBRAMANI, 2009. *Aeroelasticity - In General and Flutter Phenomenon*. In: . IEEE, 2009, s. 81-85. ISBN 978-1-4244-5250-7. Dostupné z: doi:10.1109/ICETET.2009.23
- [2] WRIGHT, Jan R a Jonathan E COOPER, 2007. *Introduction to aircraft aeroelasticity and loads*. Reston: Chichester: American Institute of Aeronautics and Astronautics ; Wiley, xxiv, 499 s. : il. ISBN 978-1-56347-935-9.
- [3] BISPILINGHOFF, Raymond L., Holt ASHLEY a Rober L. HALFMAN, 1996. *Aeroelasticity*. Mineola: Dover Publications. ISBN 978-0-486-69189-3.
- [4] *Ground Vibration Test – GVT* [online]. Cyberpark Ankara TURKEY [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <https://www.dynalabs.com.tr/ground-vibration-test-gvt/>
- [5] PERES, Marco A., Richard W. BONO a David L. BROWN. PRACTICAL ASPECTS OF SHAKER MEASUREMENTS FOR MODAL TESTING. In: *The Modal Shop, Inc* [online]. Cincinnati OH: The Modal Shop [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: [https://www.modalshop.com/filelibrary/Practical-Aspects-of-Shaker_Measurements-for-Modal-Testing-Paper-\(MD-0268\).pdf](https://www.modalshop.com/filelibrary/Practical-Aspects-of-Shaker_Measurements-for-Modal-Testing-Paper-(MD-0268).pdf)
- [6] 2050A Datasheet. In: *The Modal Shop, Inc*. [online]. Cincinnati OH: The Modal Shop [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: [https://www.modalshop.com/filelibrary/Modal-Shaker-Lateral-Excitation-Stand-Datasheet-\(DS-0013\).pdf](https://www.modalshop.com/filelibrary/Modal-Shaker-Lateral-Excitation-Stand-Datasheet-(DS-0013).pdf)
- [7] Product data: Lateral Modal Exciter Stands - UA 1607, UA 1608. In: *Brüel&Kjaer* [online]. 2005 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp1973.ashx>
- [8] PŘÍSTROJOVÉ POJEZDOVÉ KOLEČKO - B120.A80.075. *KOLA PIRKL* [online]. [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.kolapirkl.cz/pristrojove-pojezdove-kolecko-b120-a80-075>
- [9] Stavitelná noha celokovová otočná M12x120mm, patka D=46mm, ocel ZN. *A components* [online]. [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://eshop.acomponents.cz/cz/stavitelna-noha-celokovova-otocna-m12x120mm-patka-d%3D46mm-ocel-zn>
- [10] ROZEBÍRATELNÁ KOLEČKA SE STAVITELNOU NOŽKOU. *MAREK Industrial a.s.* [online]. [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.marek.eu/sugatsune/kolecka-a-stavec-i-nozky/kombinace-pojezdovych-kol-a-stavecich-noh/32904/rozebiratelna-kolecka-se-stavitelnou-nozkou.html>
- [11] NAVIJÁK RUČNÍ 450KG. *PROTECO* [online]. [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: https://www.proteco-naradi.cz/auto-moto_c340741230428161/navijak-rucni-450kg_p39638
- [12] Kladka CM59/6L. *Navrátil s.r.o.* [online]. [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: https://www.navratilsro.cz/kladka-cm59-6l_i5711

9 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

9.1 Obrázky

Obr. 2.1–Trojúhelník aeroelastických interakcí [1]	17
Obr. 2.2–Langleyho aerodrome [1]	18
Obr. 2.3–křídlo letadla přichystané k rezonanční zkoušce [4]	21
Obr. 2.4–schématický řez budičem [5].....	22
Obr. 3.1–schéma užívání stojanu 2050A [6]	24
Obr. 3.2–stojan UA 1608 [7].....	25
Obr. 5.1–schéma základny typu trojnožka	28
Obr. 5.2–schéma modifikované základny jeřábu při pohledu shora	29
Obr. 5.3–konzolový způsob připojení	30
Obr. 5.4–možnosti propojení kladkového mechanismu s ramenem.....	31
Obr. 6.1–schéma konečné podoby základny	33
Obr. 6.2–přístrojové pojezdové kolečko–B120.A80.075 [8]	34
Obr. 6.3–stavitelná celokovová otočná noha [9]	35
Obr. 6.4–rozebíratelná kolečka se stavitelnou nožkou [10]	35
Obr. 6.5–schéma sloupu a jeho připojení k základně.....	36
Obr. 6.6–schéma ramena	37
Obr. 6.7–schéma saní	38
Obr. 6.8–schéma zdvihacího mechanismu	39
Obr. 6.9–zvolený naviják s nosností 450 kg [11].....	40
Obr. 6.10–kladka s nalisovaným ložiskem [12]	40
Obr. 6.11–schéma uložení kladky	41
Obr. 6.12–render konečného návrhu stojanu.....	42
Obr. 6.13–zjednodušená geometrie stojanu.....	45
Obr. 6.14–geometrie pokrytá sítí	46

9.2 Tabulky

Tab. 1–profily dle EN 10219	43
Tab. 2–plechy dle EN 10051	43
Tab. 3–spojovací materiál	44
Tab. 4–vlastní frekvence a popis vlastních tvarů	47

10 SEZNAM PŘÍLOH

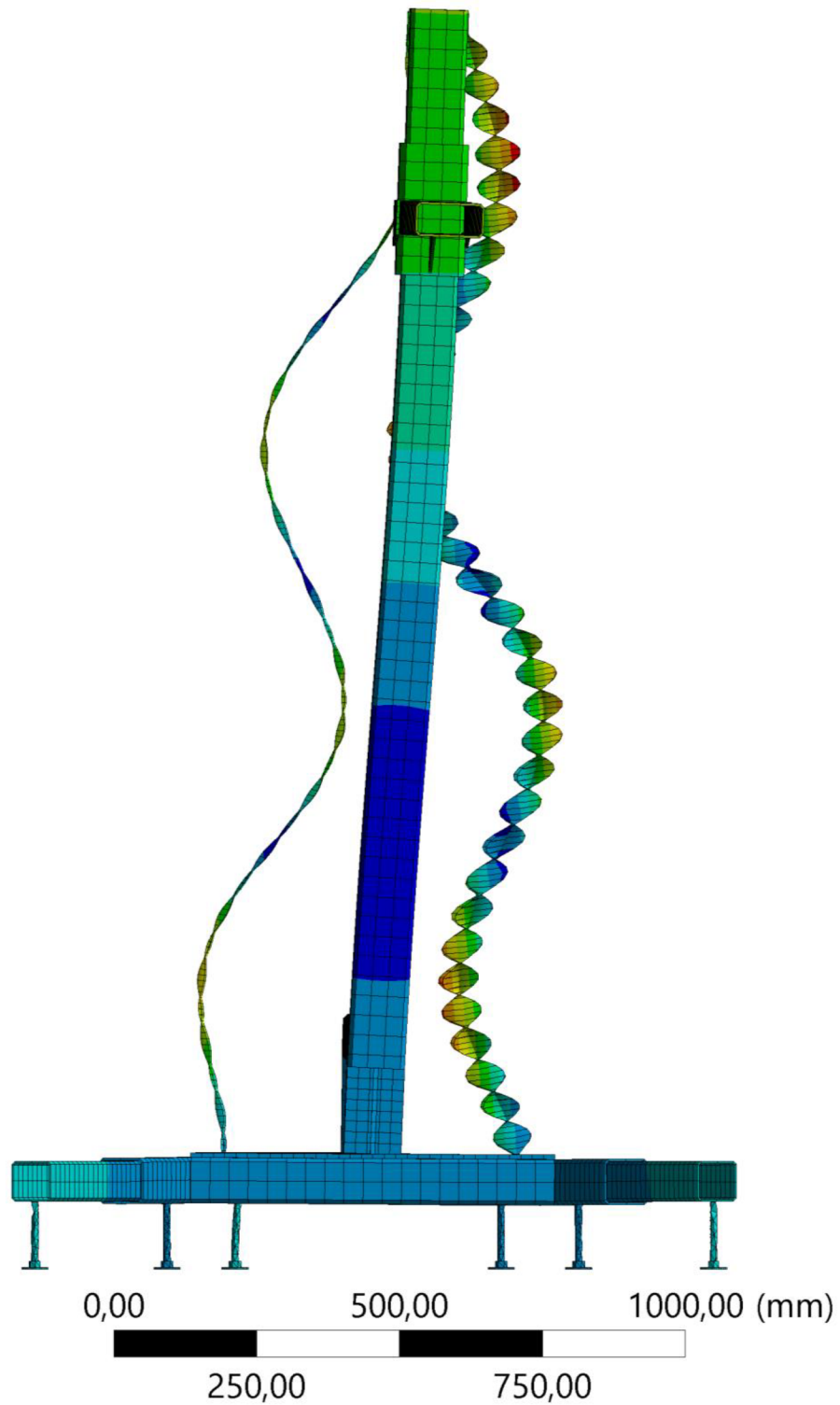
Příloha 1–snímky s orientačním vzhledem vlastních tvarů

Příloha 2–externí soubor s výkresovou dokumentací

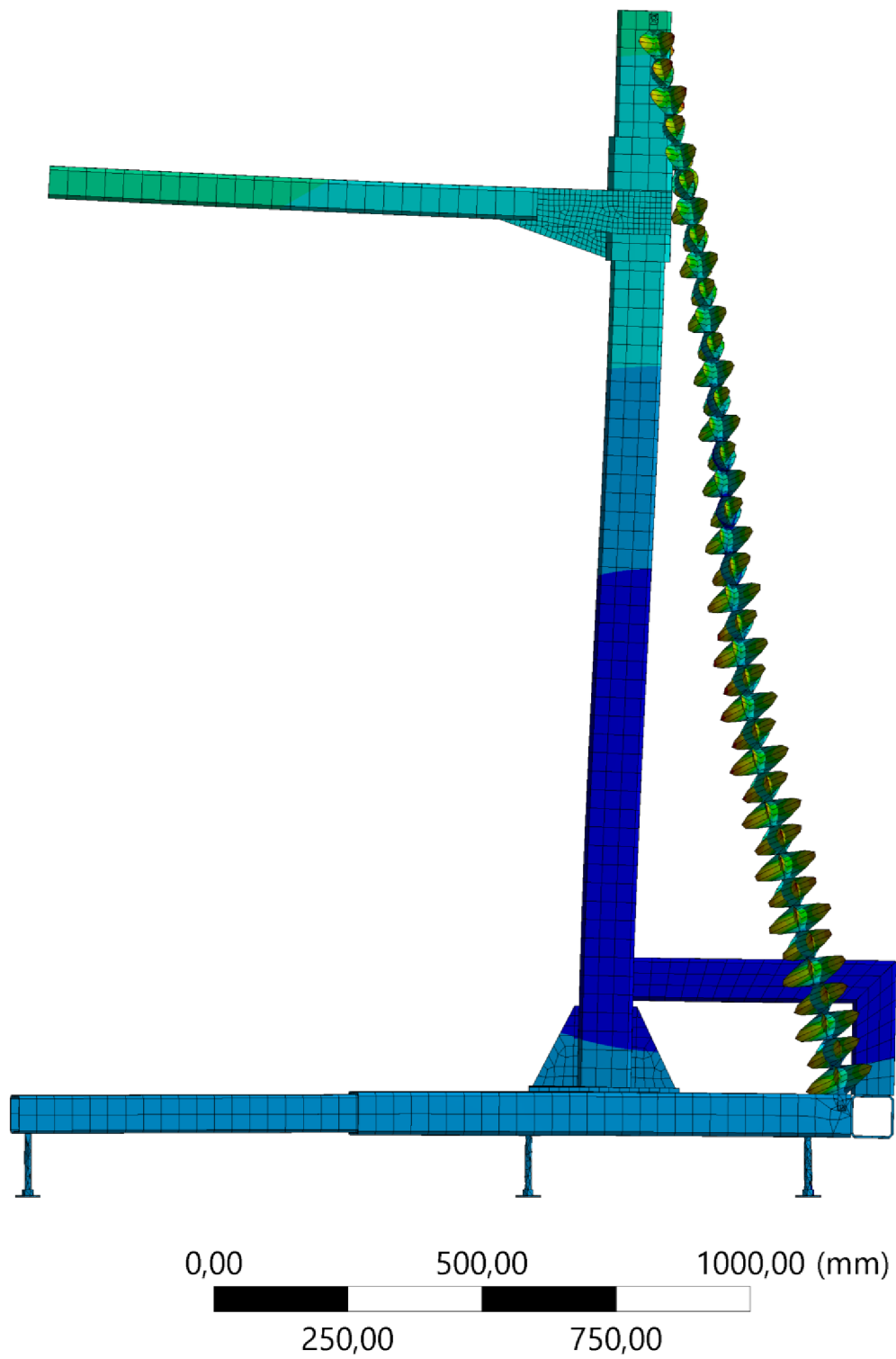
PŘÍLOHY

Příloha 1–snímky s orientačním vzhledem vlastních tvarů

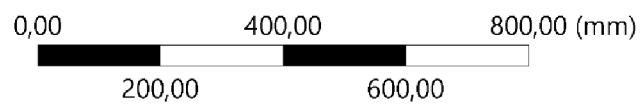
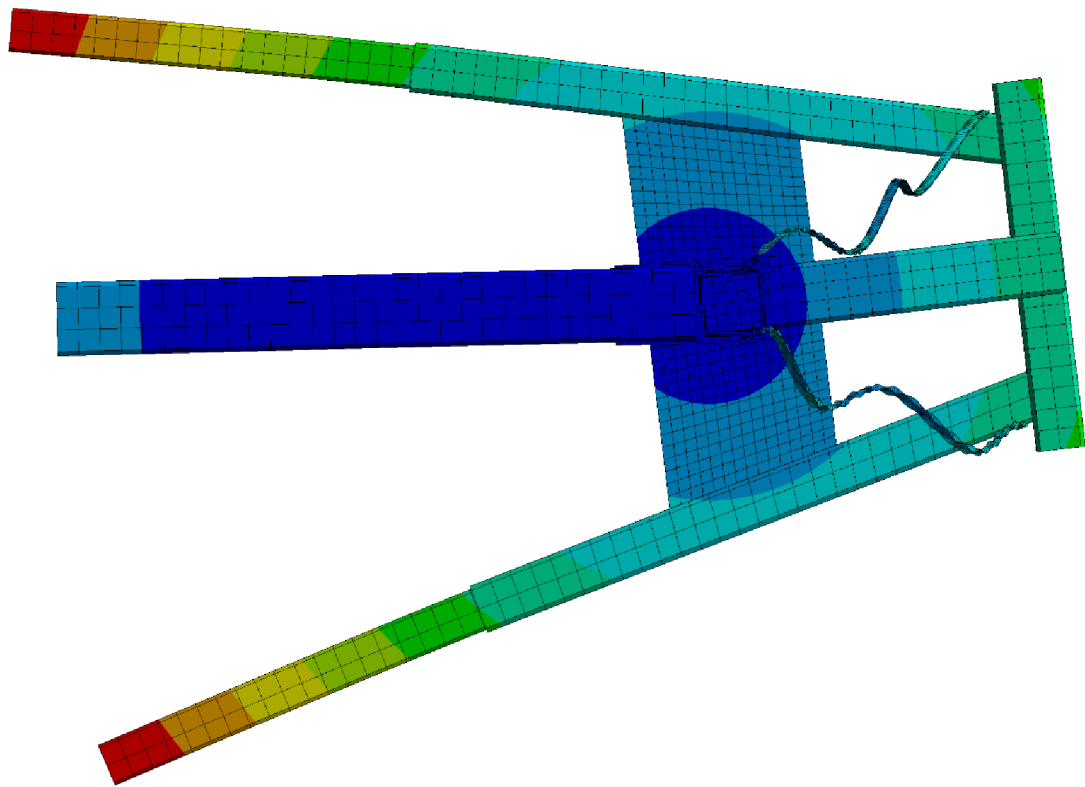
První vlastní tvar



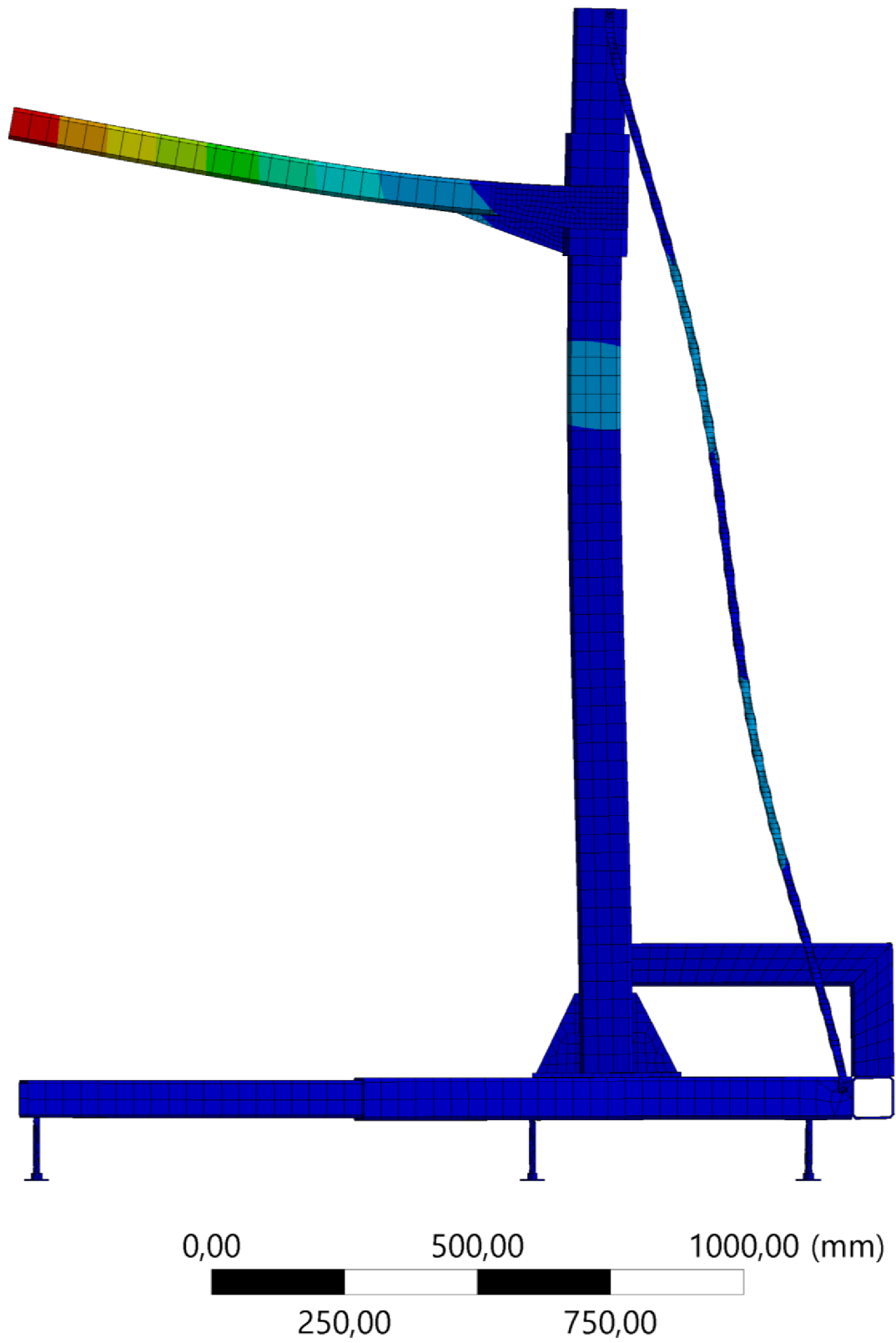
Druhý vlastní tvar



Třetí vlastní tvar



Čtvrtý vlastní tvar



Pátý vlastní tvar

