



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

POJEZDOVÉ A ZVEDACÍ ZAŘÍZENÍ

TRAVELLING AND LIFTING MECHANISM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TOMÁŠ HAVLAS

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ MALÁŠEK, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Tomáš Havlas

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Stavba strojů a zařízení (2302R016)**

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:

Pojezdové a zvedací zařízení

v anglickém jazyce:

Travelling and lifting mechanism

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhnout manipulační zařízení pro přemísťování vrtulníku BELL s ližinami mezi letištní plochou a hangárem.

Nosnost: 2000kg

Zvedací výška: 80mm

Ostatní podklady a parametry k zadání dle vedoucího diplomové práce.

Cíle bakalářské práce:

Provést přehled a zhodnocení výrobců podobných zařízení, provést rozbor možných mechanismů zařízení. Vybrat vhodný princip řešení, provést důležité pevnostní výpočty. Nakreslit sestavný výkres zařízení.

Seznam odborné literatury:

1. Gere J.M. and Timoshenko: Mechanics of materials. Chapman and Hall. Third SI Edition, 1989, ISBN 55-503-79.
2. Jančík, L.: *Části a mechanismy strojů*, ČVUT Praha, 2004
3. Klimeš, P.: *Části a mechanismy strojů I, II*, VUT Brno 2003
4. Janíček, P., Ondráček E., Vrbka J.: *Pružnost a pevnost*, VUT Brno, 1992
5. Gajdůšek, J., Škopán, M.: *Teorie dopravních a manipulačních zařízení*, skripta VUT Brno 1988

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jiří Malášek, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011. V Brně, dne 8.11.2010

L.S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.

Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.

Děkan fakulty

Bibliografická citace:

HAVLAS, T. *Pojzdové a zvedací zařízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 71 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Malášek, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce pana doc. Ing. Jiřího Maláška, Ph.D. a s použitím uvedené literatury.

V Brně dne 27. 5. 2011

Tomáš Havlas

Poděkování

V úvodu této práce bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce doc. Ing. Jiřímu Maláškovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné připomínky.

Chtěl bych též vyjádřit poděkování všem svým blízkým, kteří mi pomáhali a podporovali mě nejen při psaní práce, ale v průběhu celého studia.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá návrhem pojezdového a zvedacího zařízení. Na začátku práce jsou popsány různé typy manipulačních zařízení. Podrobněji se věnujeme přehledu těchto zařízení, zejména pak těm, která jsou v praxi dostupná. Hlavní část práce se zaměřuje na pevnostní výpočty a konstrukci navrženého manipulačního zařízení. Součástí práce je i postup výpočtů a sestavný výkres našeho návrhu.

Klíčová slova: zvedací zařízení, manipulační zařízení.

Abstract

The bachelor thesis deals with the design of travelling and lifting mechanism. At the beginning of the thesis various types of handling device are described. We attend to the summary of these mechanisms in full details, especially these ones which are the accessible in practice. Main part of the thesis is focused on strength calculations and construction of the designed handling device. The process of calculations and compiled plan of our design are included.

Key words: lifting mechanism, handling device.

Obsah

Úvod.....	10
1. Pozemní manipulace s vrtulníkem	11
2. Přehled manipulačních zařízení	13
2.1 Brackett	13
2.2 Chopper spotter	14
2.3 Helitowcart.....	15
2.4 Paravion Technology Inc.	16
2.5 Wackerbauer	17
2.6 Zhodnocení současných manipulačních zařízení	18
3. Mechanismy zdvihu	19
3.1 Mechanismus s jedním rámem.....	19
3.2 Mechanismus se dvěma rámy	19
3.2.1 Paralelogram	19
3.2.2 Nůžkový mechanismus	19
4. Typy vrtulníků.....	21
4.1 Bell 206	21
4.2 Bell 407	23
4.3 Bell 427	24
5. Určení hmotnosti a polohy těžiště vrtulníku	26
6. Zatížení příčných trubek podvozku.....	30
7. Konstrukční řešení	33
7.1 Rozbor zdvihacího mechanismu	34
8. Pevnostní výpočet	38
8.1 Horní rám	38
8.1.1 Zatížení horního rámu.....	38
8.1.2 Průběh napětí v horním rámu.....	43
8.1.3 Kontrola profilu horního rámu.....	44

8.2 Dolní rám	45
8.2.1 Zatížení dolního rámu	45
8.2.2 Průběh napětí v dolním rámu	51
8.2.3 Kontrola profilu dolního rámu	52
8.3 Čepy	53
8.3.1 Určení průměru čepu – bod C	53
8.4 Kontrola vahadla na vzpěr	56
Závěr	58
Seznam zdrojů.....	59
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	60
Seznam obrázků.....	64
Seznam tabulek	65
Seznam příloh	66

Úvod

Člověk odjakživa hledal, jak si ulehčit práci. Nejprve si vytvářel nástroje napomáhající jeho činnosti, později vymýšlel různé stroje, které by jeho práci buď úplně, nebo alespoň částečně nahradily. Ani s tímto ulehčením se však nespokojil, resp. dodnes hledá, jak si práci usnadnit. Současná technická praxe tak hledá nejen úplně nová zařízení, ale také se zaměřuje na vylepšení již stávajících technických vymožeností. A tak neustále hledáme co nejvyšší efektivitu práce s co nejmenší námahou, v poslední době i s co nejmenšími náklady, tedy s co nejméně pracovníky, za co nejméně finančních prostředků, také v co nejkratším čase. Nicméně očekáváme, že požadovaná činnost bude provedena s co nejvyšší kvalitou, příp. s co největší bezpečností práce.

Jednou z oblastí, kde člověk přirozeně hledá nejen ulehčení své práce, ale i její neustálé vylepšování je i manipulace s vrtulníky, které díky jejich hmotnosti jen těžko zvedneme, natož i někam přemístíme. V průběhu technického vývoje se objevily nejrůznější důmyslné nápady, jak si s touto manipulací poradit. V rámci naší bakalářské práce čtenáře seznámíme alespoň s některými z těchto zařízení. Především se však v naší práci zaměříme na vypracování návrhu manipulačního zařízení umožňujícího jak zvednutí, tak i transport vrtulníků tam, kde je třeba, tedy mezi hangárem a letištní plochou, odkud je schopen vrtulník již vzletnout, resp. přistát.

Než se do toho pustíme, nejprve bychom rádi čtenáře provedli strukturou naší práce. V úvodu práce čtenáře obecně seznámíme se základními možnostmi, jak s vrtulníkem manipulovat. Navážeme přehledem v praxi vyráběných a používaných manipulačních zařízení. Následně rozebereme různé způsoby samotného zdvihu. Abychom se mohli pustit do návrhu manipulačního zařízení, vybereme ty typy vrtulníku, které splňují zadanou hmotnost 2000 kg. Po té již můžeme stručně uvést způsoby zjištění hmotností těchto vrtulníků a jejich těžišť. Na základě takto zjištěných hodnot získáme představu o zatížení podvozku vrtulníku, tedy představu o tom, jak bude zatěžován horní rám námi navrhovaného manipulačního zařízení. Dále přistoupíme k výběru konkrétního konstrukčního řešení z možných variant řešení. Následně provedeme statický rozbor navrženého zařízení a zjištění reakce ve vazbách. Na závěr práce se budeme věnovat výpočtům profilů horního a spodního rámu, dále návrhem čepů a také kontrolou vahadel na vzpěr.

1. Pozemní manipulace s vrtulníkem

V této kapitole se podíváme na možné způsoby pozemní manipulace s vrtulníkem, který je opatřen ližinovým podvozkem. Dlouholetý výzkum a rozvoj vrtulníku totiž ukázal, že zvolit přistávací zařízení jako ližinové oproti klasickému kolovému podvozku je výhodnější jak z hlediska jeho jednoduché konstrukce, tak z hlediska problematiky přistání do neupraveného terénu (zvláště s velkým sklonem). Naopak nevýhodné jsou ližiny při pozemní manipulaci, protože manipulace s takovýmto typem podvozku je sama o sobě prakticky nemožná.

Dále je nutné říci, že kolový podvozek převážně najdeme na vrtulnicích středně těžké a těžké kategorie (kde by byla pozemní manipulace vzhledem k jejich hmotnosti s ližinami téměř nemožná). Ližinové přistávací zařízení zase naopak nejčastěji najdeme u vrtulníků lehké kategorie (případně i u vrtulníků středně těžké kategorie s předpokladem častého přistávání do terénu). Pozemní manipulace pak u těchto vrtulníků může být provedena pomocí

- a) manipulačních koleček,
- b) manipulačního zařízení, nebo
- c) manipulační přistávací a vzletové plošiny.

Volba způsobu pozemní manipulace s vrtulníkem je záležitostí provozovatele a vychází převážně z daného pozemního zázemí, účelu použití vrtulníku i provozně-ekonomických hledisek.



Obr. 1.1 Přistávací a vzletová plošina s vrtulníkem Bell 412 HP

Pro účely letecké záchranné služby je nejčastěji využívána přistávací a vzletová plošina, která je obecně nejrychlejší a nejjednodušší. Vyžaduje však dostatečné zázemí jak ve velikosti hangáru, tak i prostorem před hangárem, kde dochází ke vzletu a přiblížení vrtulníku.

Při využívání vrtulníku pouze pro soukromé účely nebo v obchodní dopravě je zase nejčastější způsob použití manipulačních zařízení. Zde nehraje velkou roli minimalizace času pro vytažení a připravení vrtulníku pro vzlet. Naopak výhodou manipulačního zařízení oproti přistávací plošině tady je možnost obsloužit více vrtulníků a možnost lepšího skládání strojů do hangáru.



Obr. 1.2 Manipulační kolečka na vrtulníku EC-120B

Posledním způsobem manipulace s vrtulníkem je využití manipulačních koleček, což spíše bývá nouzové nebo dočasné řešení. Jedná se o časově nejnáročnější způsob a obecně i nejnáročnější způsob z hlediska obslužnosti. Pouze u vrtulníků velmi lehké kategorie (R22, R44, S300) je to většinou jediný způsob manipulace za podmínky, že charakter manipulační plochy (sklon, povrch) umožňuje obsluhu jednou či dvěma osobami.

2. Přehled manipulačních zařízení

V následujícím textu stručně rozebereme nabídku manipulačních zařízení, kterou v současnosti nalezneme na trhu. Nevyjmenujeme zde všechny výrobce zabývající se touto technikou, ale spíše se zaměříme na nejběžnější typy těchto zařízení a na typizované způsoby manipulace. U všech výrobců jsou jednotlivá zařízení obecně odstupňovaná dle hmotnosti vrtulníku, nebo dle jeho rozměrů, také dle ceny, což bývá nejdůležitějším hlediskem výběru. Charakteristickým parametrem též je, zda je zařízení samohybné, nebo zda je k němu ještě nutno připojit další tažné zařízení.

2.1 Brackett

Firma Brackett se od roku 1968 zabývá výrobou zařízení a příslušenství pro letectví, zejména pak zařízeními pro manipulaci s vrtulníky a letadly po letištní ploše. V široké nabídce najdeme jak spoustu přídavných hydraulických nebo mechanických kol, tak i celé rámy s koly. Obecně firma Brackett nevyrobí přímo manipulační zařízení, ale pouze tažné tyče, nebo soustavu pomocných kol spojených do jednoduchého rámu. Velkou výhodou těchto jednoduchých rámu je relativně nízká cena. Nabízeny jsou typy HM-7M, HM-10M, HT-500, HT-88, HRT-100 a HRT-200. Zařízení je navrženo pro obsluhu i jednou osobou. Většinou jsou buď na přední, nebo zadní část ližin namontována kolečka. Po překlopení na tyto kolečka a zajištění je celý vrtulník pozadu tažen pomocným zařízením.



Obr. 2.1 Rám s koly od firmy Brackett [11]

2.2 Chopper spotter

Zařízení Chopper spotter je dodáváno ve třech základních typech:

- 1) Model E s nosností do 2075 kg,
- 2) Model MS s nosností do 4150 kg a
- 3) Model 4 s nosností do 5000 kg.

Jednotlivé typy se kromě nosnosti také odlišují základními rozměry, počty zdvihacích ramen, řešením otočného kola a vybavením. Zvedání je u všech typů zajištěno hydraulickým systémem. Elektrický pohon předního kola umožňuje pojezd až do rychlosti 1m/s. Napájení elektromotoru a hydrogenerátoru je z 24V baterií. Součástí všech typů je i elektronický brzdicí regulátor maximální rychlosti pojezdu. Konstrukce umožňuje pouze pohyb po zpevněném povrchu.

Model E a Model MS mají jedno zdvihací rameno, a tak musí být doplněny přídavnými koly, která jsou i říditelná. Model 4 je opatřen ještě dalším zvedacím ramenem, nepotřebuje tudíž přídavná kola. U všech typů je řízení pojezdu provedeno pomocí dálkového ovládání spojeného dlouhým kabelem k manipulačnímu zařízení. Přístup k vrtulníku je zezadu.



Obr. 2.2 Chopper Spotter Model 4 [12]

2.3 Helitowcart

Firma Helitowcart se jako jedna z mála zabývá i výrobou manipulačního zařízení pro lehké a středně těžké vrtulníky. Zařízení této firmy mají nosnost v rozmezí od 2500 do 8200 kg. Firma nabízí následující modely odstupňované dle hmotnosti:

- 1) **Model V201** do hmotnosti 2500 kg (pro vrtulníky R44, EC120, Bell 206B3, AS350, Enstroms, MD500),
- 2) **Model V404** do hmotnosti 4000 kg (pro vrtulníky EC130, EC135, EC145, AS355, BK 117, Bell 206L4, Bell 407),
- 3) **Model V500** do hmotnosti 7300 kg (pro vrtulníky Bell 427, Bell 429, Bell 412),
- 4) **Model V614** do hmotnosti 8200 kg.



Obr. 2.3 Helitowcart Model V201 a vrtulník MD-500 [13]

Všechna manipulační zařízení firmy Helitowcart jsou poháněna elektricky (12V autobateriemi) a díky úzkému rozvoru jsou vhodné i do náročných podmínek jako jsou např. nezpevněné plochy. V případě doplnění hnaných kol řetězy lze manipulační zařízení využít i na povrchu pokrytém ledem či sněhem. Zařízení má systém ochrany

proti překročení maximální dovolené rychlosti pojezdu, což je užitečné zejména při transportu ze svahu. Zvedání vrtulníku je provedeno jak elektricky, tak i ručním hydraulickým zvedákem (u typů pro lehčí vrtulníky). Firma Helitowcart používá konstrukci zvedání pomocí jednoho ramene (varianty AT45 a AT47) v přední části vrtulníku, v zadní části se umísťují přídatná kola. Manipulaci s vrtulníkem lze zvládnout i s jednou osobou. Kromě modelu V614, kde je ovládání zajištěno pomocí joysticku (na panelu spojeném s vozíkem dlouhým kabelem), jsou ostatní modely ovládány manuálně pomocí dlouhé řídicí tyče. Zajištění pod vrtulník je u všech typů stejné - je zepředu, pouze u modelu V614 není směr zajištění specifikován.

2.4 Paravion Technology Inc.

Firma Paravion Technology Inc. nabízí příslušenství a manipulační techniku k vrtulníkům již dvacet let. Nabízí čtyři základní modely Heliporters (HP110E, HP150, HP200, HP250) s drobnými modifikacemi (E, TP, G2, E-X, TP-X, G2-X), které jsou v rozsahu hmotnosti od 680 kg do 5400 kg. Obecně firma Paravion nabízí manipulační techniku pro širokou škálu vrtulníků. Základní modely Heliporters jsou vhodné pro vrtulníky:

- a) Bell 204, 206, 212, 222, 407, 412, 427, 430, 47, UH-1,
- b) Enstrom F-28, F-480,
- c) Eurocopter 350, 355, 120, 130, 135, 145, Bo-105, BK-117,
- d) MD Helicopter 369, 900,
- e) Robinson 22, 44,
- f) Schweizer 269,
- g) Augusta Koala.

Na přání zákazníka nabízí firma další dodatečnou modifikaci pro speciální technické vybavení. Kromě verze G2, pro kterou je nutno připojit specifické tažné zařízení, jsou všechna zařízení samohybná. Pohon je koncipován pomocí hydraulických pístů (pro zdvih) a hydromotorem (pro pohyb vpřed a vzad). Tlak v hydraulickém systému je vytvořen pomocí čerpadel poháněných elektromotorem (soustava 12 nebo 24 V).

Zařízení je určeno pro manipulaci na zpevněném povrchu. Maximální rychlost pojezdu je 1,1 m/s.



Obr. 2.4 Manipulační zařízení Helicopter firmy Paravion Technology

2.5 Wackerbauer

Firma Wackerbauer vyrábí jak manipulační zařízení, tak i pomocná manipulační kolečka, také vzletové a přistávací plošiny.

Firma Wackerbauer dodává dva typy manipulačních zařízení: pro nízký ližinový podvozek a pro vysoký ližinový podvozek. Manipulační zařízení jsou tvořena čtyřkolovým podvozkem s integrovanými prvky zvedacího zařízení. Opět se zde využívá zvedání dvou ramen zakončených speciálními úchyty pro ližiny. Pro zdvih, ovládání a pohon je využíván hydraulický systém poháněný hydrogenerátorem z baterie. Obsluha vozíku je zajištěna pomocí dálkového ovládání spojeného dlouhým kabelem k vozíku. Zajiždění manipulačního zařízení k vrtulníku je zezadu.



Obr. 2.5 Manipulační zařízení firmy Wackerbauer

2.6 Zhodnocení současných manipulačních zařízení

Stručně jsme nastínili v současnosti nabízené možnosti manipulace s vrtulníkem a typy manipulačních zařízení. Přístup jednotlivých firem je značně rozdílný, od toho se odvíjí různá konstrukční řešení jak způsobu zdvihu a pohybu vozíku, tak typů uchycení vrtulníku (nejčastější je uchycení vrtulníku za ližiny, avšak rozdílnými způsoby). Výhodou takové široké nabídky je pokrytí rozdílných požadavků ze stran provozovatelů a požadavků vyplývajících z rozmanitosti provozních ploch. Všeobecně však platí, že univerzální zařízení jak pro více typů vrtulníku, tak i pro rozdílné povrchy nemusí být nejideálnější volbou. Vhodnější je nabídka modifikací základních typů manipulačních zařízení podle požadavků provozovatele. Výběru manipulačního zařízení pro vrtulník by tedy měla předcházet podrobná studie charakteristik provozu vrtulníku i pozemního zázemí provozovatele.

3. Mechanismy zdvihu

Zdvih je možné řešit pomocí mechanismů s jedním rámem, nebo se dvěma rámy.

3.1 Mechanismus s jedním rámem

U konstrukce mechanismu s jedním rámem lze zdvih řešit buď zdviháním ramena, příp. více ramen, nebo změnou polohy pojezdových kol. U systému zdvihání ramen je rám vůči zdvihu nepohyblivý a zdvih je řešen pomocí dalšího mechanismu (např. nůžkového), který vysouvá, nebo otáčí ramenem či rameny. Co se týká zdvihu prostřednictvím změny polohy pojezdových kol, je rám naopak vůči zdvihu pohyblivý. Samotný zdvih je realizován pomocí pákového mechanismu, jenž podsouvá pojezdová kola pod rám. V obou případech dochází k uchopení vrtulníku za ližiny.

3.2 Mechanismus se dvěma rámy

3.2.1 Paralelogram

Už samotný název paralelogram poukazuje na to, že je tento mechanismus založen na principu rovnoběžnosti 2 rámu spojených 2 vahadly o stejné délce, a tvoří tak dohromady tvar rovnoběžníku. Spojení rámu a vahadel je zajištěno 4 klouby, jde tedy o zvláštní typ čtyřkloubového mechanismu. Podstata zdvihu spočívá v souhlasném natočení vahadel o stejný úhel a v posuvném kruhovém pohybu těhlice (horního rámu). Výška zdvihu se pak odvíjí od délky vahadel a úhlu jejich natočení.

Vzhledem k manipulačnímu zařízení spodní rám tvoří nosnou konstrukci pro technické vybavení jako např. hydrogenerátory, hydromotory, baterie atd. Na horním rámu najdeme systém úchytných sloužících k uchopení vrtulníku. Úchyty lze řešit různými způsoby např. nástavci se speciálně tvarovanými sedly pro uchopení vrtulníku za příčné trubky, nebo pomocí výsuvných ramen s kleštinami uchopující vrtulník za ližiny, případně kombinací obou těchto variant.

3.2.2 Nůžkový mechanismus

Jde o pákový mechanismus se dvěma pákami spojenými uprostřed jejich délky do tvaru písmene X. Páky jsou na jednom konci upevněny v rámu rotační vazbou a na druhém konci posuvnou vazbou, která je tvořena většinou kladičkou. Se změnou úhlu sevření obou pák dochází jednak ke zmenšení vzdálenosti mezi rotační vazbou jedné páky a posuvnou vazbou druhé páky, jednak k jejich napřímení do svislé polohy. Horní rám pak během zdvihu koná pouze posuvný pohyb ve svislém směru. Nedochází tak

k žádnému posunu ve vodorovném směru, což může být výhodné v omezeném prostoru. Naopak nevýhodou jsou velké počáteční síly působící na mechanismus v počátku zdvihu, kdy je úhel sevření obou pák velký (vzhledem k malé světlosti vrtulníků). Z konstrukčního hlediska by to vedlo k větší hmotnosti samotných nůžek.

4. Typy vrtulníků

Podle zadání bakalářské práce máme mj. řešit konstrukci manipulačního zařízení s nosností 2000 kg. Abychom se mohli pustit do konstrukce takového zařízení, je nutné zvážit, které konkrétní typy vrtulníků výrobce Bell Helicopter Textron splňují určenou hmotnost. U hodnoty hmotnosti je třeba nejdříve rozlišit maximální vzletovou hmotnost¹ a provozní hmotnost vrtulníku². Pro samotný transport vrtulníku je především třeba brát v potaz hodnotu provozní hmotnosti vrtulníku, a to z důvodu, že se vrtulník běžně v praxi přepravuje již v konfiguraci s vybavením pro daný úkol (např. pro leteckou záchrannou činnost) a s natankovaným palivem, aby byl připraven k okamžitému nástupu posádky a vzletu. Naopak maximální vzletovou hmotnost neuvažujeme proto, že to je provozní hmotnost navýšená o hmotnost posádky, cestujících, zavazadel, nákladu a příp. dotankovaného paliva. Hmotnost vrtulníku se takto navyšuje až po transportu vrtulníku námi uvažovaným manipulačním zařízením na letištní plochu. Na základě toho, je možné uvažovat od výrobce Bell Helicopter Textron následující typy vrtulníků: Bell 206, Bell 407 a Bell 427.

4.1 Bell 206

Jedná se o lehký vrtulník klasického uspořádání s dvoulistým nosným i vyrovnávacím rotorem. Konstrukce podvozku je ližinového typu. Od prvotní verze řady 206, kterým byl Bell 206A s jednou pohonnou jednotkou, prošel vrtulník během své výroby řadou změn, jež se týkaly především inovací pohonných jednotek (verze 206B) a prodloužení trupu (verze 206L), až k prodlouženému provedení se dvěma pohonnými jednotkami (verze 206LT). Verze Bell 206L4 společně s verzí Bell 206LT mají ze všech verzí z řady 206 nejvyšší maximální vzletovou hmotnost, jejíž hodnota činí 2018 kg [10]. Pro zadání naší práce to znamená, že tento typ vrtulníku nebudeme uvažovat při konstrukčním řešení manipulačního zařízení. To však neznamená, že navržené manipulační zařízení nebude možné k transportu tohoto typu vrtulníku použít.

¹ Maximální celková hmotnost vrtulníku při vzletu.

² Celková hmotnost vrtulníku připraveného k plnění daného úkolu.



Obr. 4.1 Bell 206L [14]



Obr. 4.2 Bell 206LT [10]

4.2 Bell 407

Tento typ vrtulníku koncepčně vychází z verze 206L3. Hlavní změnou je nová rotorová hlava se čtyřmi listy. Další změny oproti verzi 206L3 zahrnují zvětšení oken kabiny cestujících a rozšíření trupu, které vedlo ke zvětšení celkového vnitřního prostoru kabiny. Typ 407 také dostal novou výkonnější pohonnou jednotku a ta mu propůjčuje větší vzletovou hmotnost, zároveň větší výkony za teplejšího počasí a s vyšší nadmořskou výškou. Po těchto úpravách došlo k navýšení maximální vzletové hmotnosti na 2268 kg, což už je vyhovující hodnota pro naše zadání práce. Nicméně jsme již zmínili, že je vhodnější brát v potaz provozní hmotnost vrtulníku namísto maximální vzletové hmotnosti. Pokud tedy budeme uvažovat provozní hmotnost tohoto vrtulníku, ve většině případů nedosáhneme zadané hodnoty 2000 kg. Pro představu rozdíl 268 kg umožňuje vzít na palubu krom pilota (při obvykle počítané hmotnosti 80 kg) jen 2 cestující. Z praxe je taková rezerva hmotnosti nedostatečná. Proto tedy ani tento typ vrtulníku nebudeme zohledňovat při konstrukčním řešení zadaného manipulačního zařízení.



Obr. 4.3 Bell 407 [10]

4.3 Bell 427

Po typu 407 chtěla společnost Bell Helicopter Textron původně vyvinout dvoumotorovou verzi s označením 407T. Tento projekt však nebyl uskutečněn. Verze 407T totiž nenabízela dostatečný výkon užitečného zatížení, a proto začala společnost Bell vyvíjet nový typ vrtulníku. Výsledkem tohoto vývoje byl typ 427, který nahradil jednak verzi 206LT, jednak typ 407. Oproti typu 407 má typ 427 prodlouženou kabinu, výkonnější dvojici pohonných jednotek, nový reduktor a novou rotorovou hlavu, která nevyžaduje žádnou údržbu. Zmíněná vylepšení navyšují maximální vzletovou hmotnost tohoto typu až na 2880 kg. Když budeme opět zohledňovat hodnotu provozní hmotnosti (podrobněji se k ní ještě vrátíme v následující kapitole), typ 427 jen s nutným množstvím paliva a s potřebným vybavením již přesahuje zadanou hmotnost 2000 kg. Proto si tento typ vrtulníku vybíráme pro konstrukci manipulačního zařízení.



Obr. 4.4 Bell 427 [10]

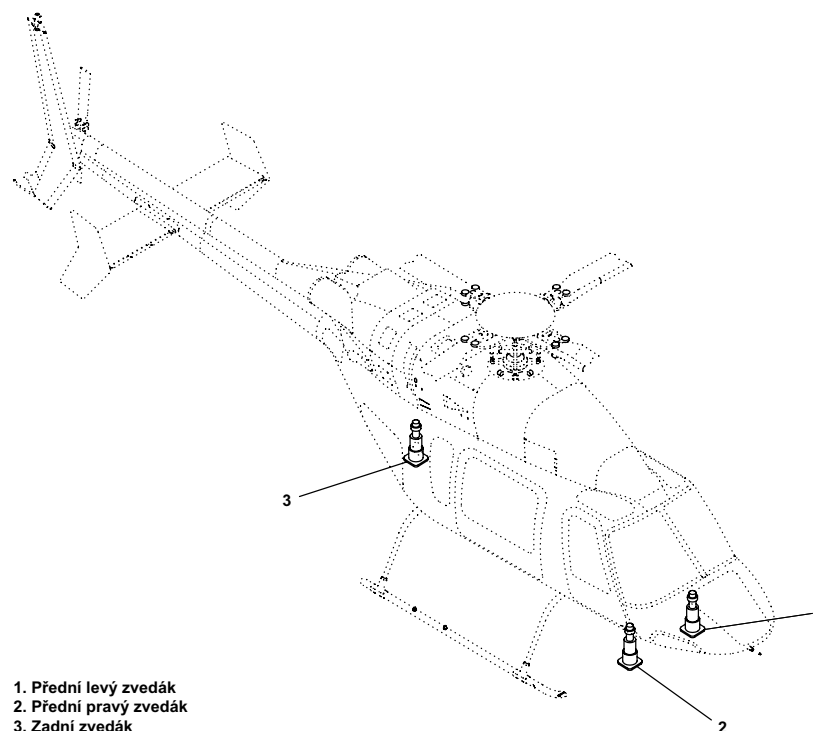
V následující tabulce uvádíme přehled jednotlivých hmotností u zmiňovaných typů a verzí vrtulníků Bell.

Tab. 4.1 Hmotnosti vrtulníků [10]

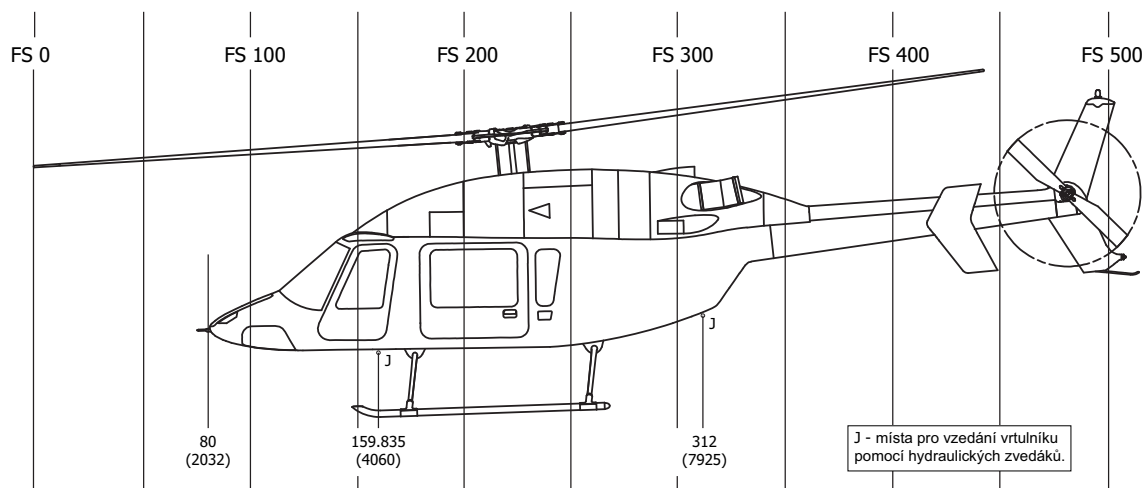
Typ	Verze	Hmotnost prázdného vrtulníku (kg)	Max. vzletová hmotnost vrtulníku (kg)
Bell 206	206B	660	1360
	206B3	737	1451
	206L	844	1814
	206L1	980	1882
	206L3	998	1882
	206L4	1031	2018
	206LT	1246	2018
Bell 407	407	1178	2268
Bell 427	427	1743	2880

5. Určení hmotnosti a polohy těžiště vrtulníku

Abychom se mohli pustit do konstrukčního návrhu manipulačního zařízení, nejdříve potřebujeme znát hmotnost prázdného vrtulníku, od které se odvíjí jeho provozní hmotnost. Hmotnost prázdného vrtulníku není standartní, závisí na vybavenosti vrtulníku dle požadavků zákazníka a dle činnosti, pro kterou bude vrtulník používán (např. VIP přeprava, policejní či záchranná činnost atd.). Proto je nutné vrtulník zvážit, a zjistit tak jeho prázdnou hmotnost, která by měla zahrnovat vrtulník jako celek, provozní kapaliny a nevyčerpatelné množství paliva. Samotné vážení se provádí pomocí zvednutí vrtulníku hydraulickými zvedáky opatřenými elektronickými váhami ve třech bodech (obr. 5.1), které jsou přesně dány technickou dokumentací o údržbě vrtulníku [6]. Výsledkem takového vážení je váhový protokol, kde jsou uvedeny přesné hodnoty hmotností na jednotlivých váhách a vzdálenosti zvedacích bodů vzhledem k referenční rovině (obr. 5.2). Z takto získaných hodnot je vypočítána celková hmotnost prázdného vrtulníku a poloha jeho těžiště. Tento váhový protokol je pak vložen do letové příručky vrtulníku [1]. Dále v textu budeme tento váhový protokol využívat ke zjištění provozní hmotnosti vrtulníku, na níž bude námi konstruované manipulační zařízení dimenzováno.



Obr. 5.1 Umístění hydraulických zvedáků při vážení dle [6]



Obr. 5.2 Referenční rovina FS 0 a vzdálenosti zvedacích bodů od roviny FS 0 dle [6]

Na základě získaných hodnot během právě popsaného vážení můžeme přistoupit k výpočtu polohy těžiště podle následujícího vztahu:

$$T = \frac{(m_{LP} \cdot r_P) + (m_{PP} \cdot r_P) + (m_{ZP} \cdot r_Z)}{\sum m}, \quad (4.1)$$

kde

T – vzdálenost ramena těžiště od referenční roviny FS 0 (in),

m_{LP} – hmotnost na levé přední podpoře (lb),

m_{PP} – hmotnost na pravé přední podpoře (lb),

m_{ZP} – hmotnost na zadní podpoře (lb),

r_P – rameno přední podpory od referenční roviny FS 0 (in),

r_Z – rameno zadní podpory od referenční roviny FS 0 (in),

$\sum m$ – celková hmotnost (lb) [6].

Vzhledem k tomu, že společnost Bell Helicopter Textron uvádí číselné údaje v imperiálních jednotkách a u nás pracujeme s jednotkami metrickými (SI soustava), uvádíme raději tabulku (tab. 5.1) s převody mezi těmito soustavami.

Tab. 5.1 Převodní vztahy [7, str. 1094]

Jednotka	Značka	lb	kg
libra	lb	1	0,4535
kilogram	kg	2,2051	1

Jednotka	Značka	in	mm
inch	in	1	25,4
milimetr	mm	0,0394	1

Nyní se již můžeme věnovat praktickému zjištění provozní hmotnosti vrtulníku, jejíž hodnota se odvíjí od hmotnosti prázdného vrtulníku. K ní připočteme hmotnost paliva potřebného k plnění daného úkolu, popř. se připočítává doplňková výbava. Konkrétně budeme vycházet z hodnot uvedených v letové příručce vrtulníku Bell 427 (registrační značky OK-AHE provozované firmou Alfa-Helicopter), a to z následujících váhových protokolů pro tyto konfigurace vybavení vrtulníku.

Varianta I (HEMS³) – bez paliva

Tab. 5.2 Váhový protokol – varianta I [1]

	Hmotnost (lb)	Rameno (in)	Moment (lb/in)
Varianta II	5345,0	227,277	1214796,960
- palivo (650 lb)	- 650	224,300	- 145795,000
Výsledná hmotnost a rameno	4695,0	227,689	1069001,960

Varianta II (HEMS) – 650 lb paliva

Tab. 5.3 Váhový protokol – varianta II [1]

Vážení	Hmotnost (lb)	Rameno (in)	Moment (lb/in)
Levá přední podpora	1489,0	159,835	237994,315
Pravá přední podpora	1487,0	159,835	237674,645
Zadní podpora	2369,0	312,000	739128,000
Výsledná hmotnost a rameno	5345,0	227,277	1214796,960

Varianta III (CV⁴) – bez paliva

Tab. 5.4 Váhový protokol – varianta III [1]

Vážení	Hmotnost (lb)	Rameno (in)	Moment (lb/in)
Levá přední podpora	1141,0	159,835	182371,735
Pravá přední podpora	1131,0	159,835	180773,385
Zadní podpora	1928,0	312,000	601536,000
Výsledná hmotnost a rameno	4200,0	229,686	964681,120

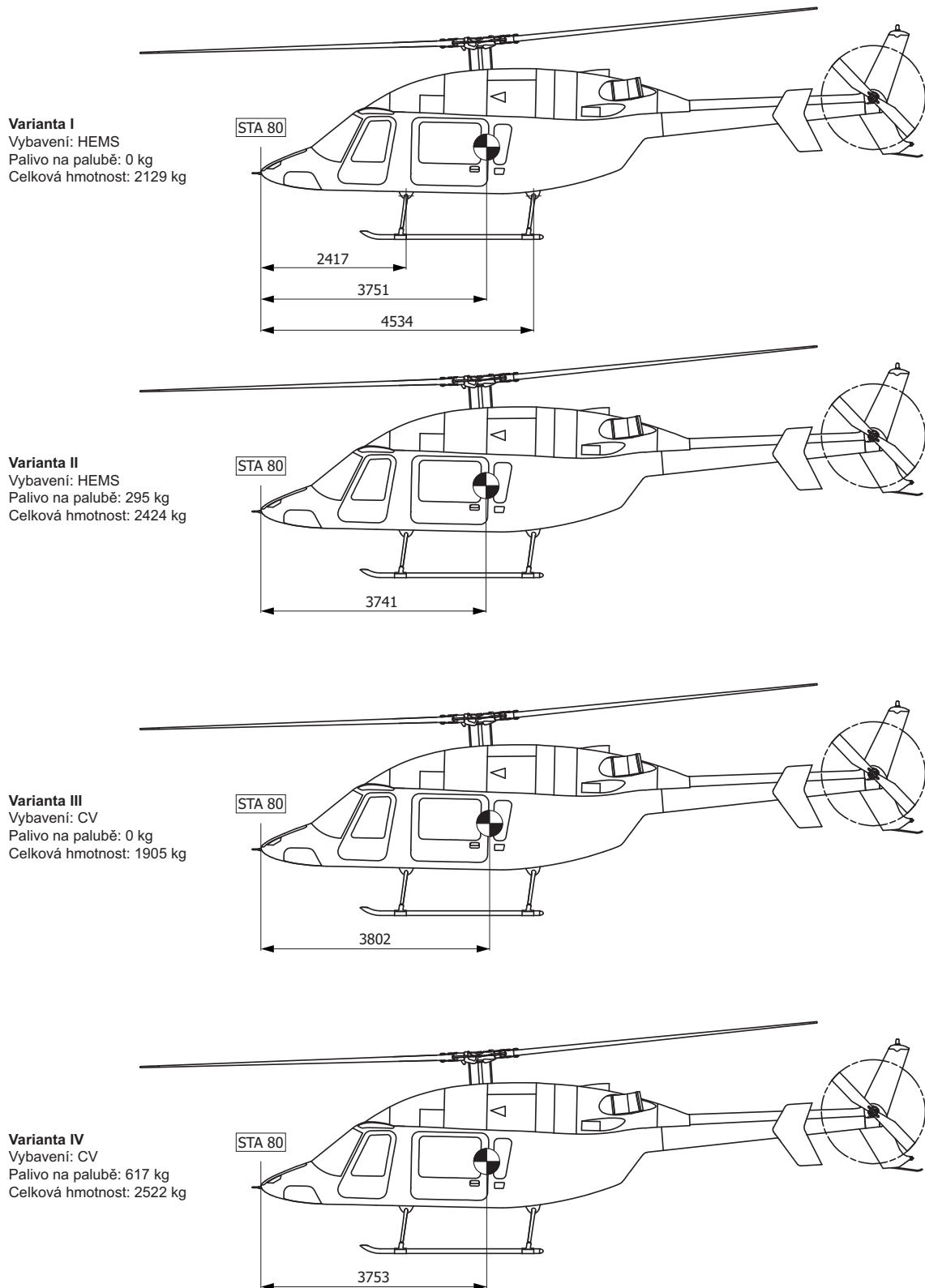
Varianta IV (CV) – 1360 lb paliva

Tab. 5.5 Váhový protokol – varianta IV [1]

	Hmotnost (lb)	Rameno (in)	Moment (lb/in)
Varianta III	4200,0	229,686	964681,120
+ palivo (1360 lb)	1360,0	221,800	301648,000
Výsledná hmotnost a rameno	5560,0	227,757	1266329,120

³ Helicopter Emergency Medical Service – vrtulník vybavený zástavbou pro leteckou záchrannou činnost.

⁴ Cestovní verze se sedadly pro 6 cestujících.

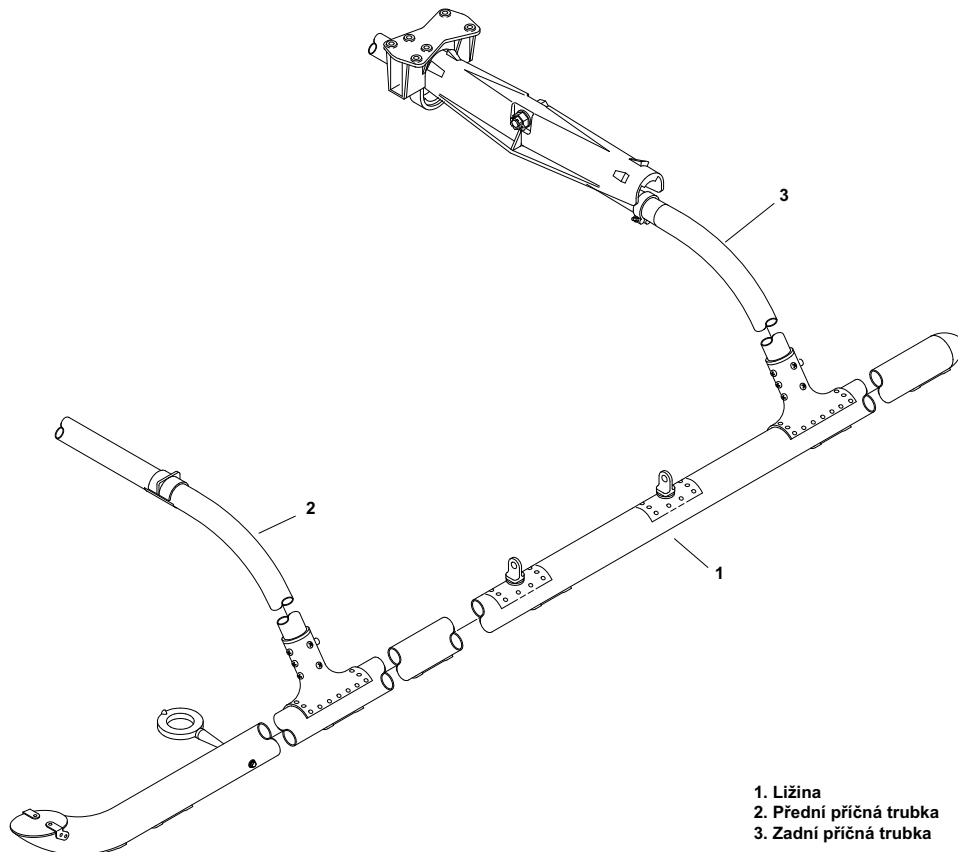


Obr. 5.3 Vzdálenost polohy těžiště od roviny STA 80 podle varianty I až IV

Uvedené kóty určují vzdálenost těžiště od referenční roviny označené STA 80 umístěné na přední vrtulníku. Z tabulek 5.2 až 5.5 jsme vzali hodnoty ramen (což jsou vzdálenosti těžiště vrtulníku od referenční roviny FS 0) a od těchto hodnot jsme odečetli 80 inchů, abychom získali vzdálenost těžiště od předě vrtulníku (od roviny STA 80). Hodnoty jsou již přepočteny do SI soustavy.

6. Zatížení příčných trubek podvozku

V předchozí kapitole jsme na základě váhových protokolů získali hmotnosti k jednotlivým variantám vybavení vrtulníku. Tyto hmotnosti nyní využijeme pro určení jejich rozložení na příčné trubky podvozku (obr. 6.1), což nás dále povede ke zjištění zatížení horního rámu námi konstruovaného manipulačního zařízení.

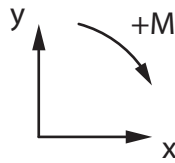


Obr. 6.1 Terminologie ližinového podvozku [upraveno 6]

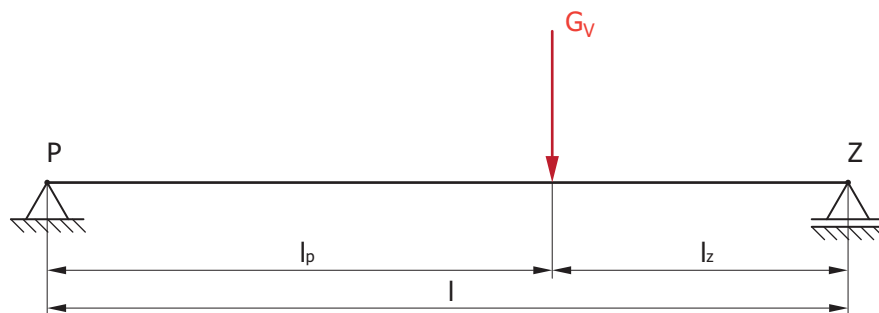
Ze znalostí o rozměrech podvozku (viz příloha výkres podvozku) získaných z technické dokumentace o údržbě vrtulníku [6] známe přesný rozměr rozteče příčných trubek. Lze tedy jednoduchým výpočtem ze známé hmotnosti vrtulníku a jeho polohy těžiště (vzhledem k podvozku) stanovit síly působící na příčné trubky.

Ještě než přejdeme k samotnému výpočtu, je třeba si zvolit souřadný systém.

Zvolený souřadný systém:

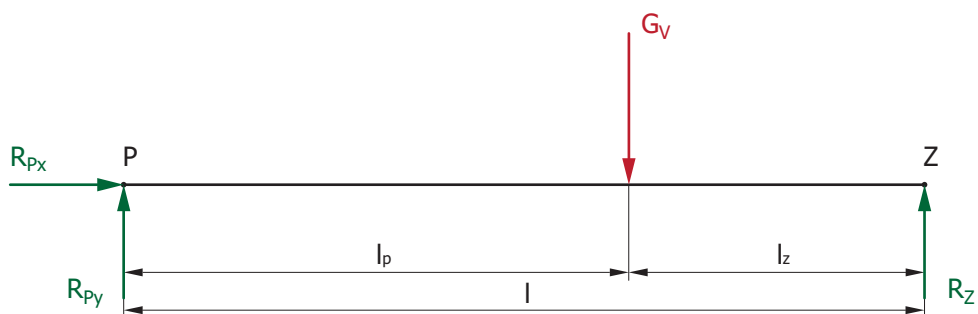


Obr. 6.2 Souřadný systém



Obr. 6.3 Schéma zatížení příčných trubek

Po úplném uvolnění dostaneme:



Obr. 6.4 Reakce příčných trubek

Pro statickou rovnováhu pak platí:

$$\sum F_x: R_{Px} = 0, \quad (6.1)$$

$$\sum F_y: R_{Py} + R_Z - G_V = 0, \quad (6.2)$$

$$\sum M_{z(P)}: G_V \cdot l_p - R_Z \cdot l = 0, \quad (6.3)$$

$$R_Z = \frac{G_V \cdot l_p}{l}, \quad (6.4)$$

$$R_{Py} = G_V - R_Z = G_V - \frac{G_V \cdot l_p}{l}. \quad (6.5)$$

Po dosazení do rovnic (6.4) a (6.5) pro variantu I dostaneme:

$$R_Z = \frac{21290 \cdot 1334}{2117} = 13415,62 \text{ N}, \quad (6.6)$$

$$R_{P_y} = 21290 - 13415,62 = 7874,38 \text{ N}. \quad (6.7)$$

Analogickým postupem pro zbývající varianty dostaneme (viz tab. 6.1).

Tab. 6.1 Výsledné reakce příčných trubek

Varianta	G_V (N)	l_P (mm)	l_Z (mm)	l (mm)	R_{P_x} (N)	R_{P_y} (N)	R_Z (N)
I	21290	1334	783	2117	0	7874,38	13415,62
II	24240	1324	793	2117	0	9079,98	15160,02
III	19050	1385	732	2117	0	6586,96	12463,04
IV	25220	1336	781	2117	0	9304,12	15915,88

kde

G_V – tíha vrtulníku pro jednotlivé varianty (N),

R_{P_x} – reakce od vnějšího silového působení v bodě P ve směru osy x (N),

R_{P_y} – reakce od vnějšího silového působení v bodě P ve směru osy y (N),

R_Z – reakce od vnějšího silového působení v bodě Z ve směru osy z (N),

l_P – vzdálenost těžiště vrtulníku od osy symetrie přední příčné trubky (mm),

l_Z – vzdálenost těžiště vrtulníku od osy symetrie zadní příčné trubky (mm),

l – rozteč os symetrií příčných trubek (mm).

Z tab. 6.1 je patrné, že největší zatížení příčných trubek bude při variantě IV. Proto pro pevnostní výpočty námi konstruovaného manipulačního zařízení budeme uvažovat právě tyto hodnoty.

Vzhledem k symetrii mechanismu zavedeme síly působící na horní rám v místě působiště od zatížení příčných trubek takto:

$$F_1 = \frac{R_{P_y}}{2} = \frac{9304,12}{2} = 4652,06 \text{ N}, \quad (6.8)$$

$$F_2 = \frac{R_Z}{2} = \frac{15915,88}{2} = 7957,94 \text{ N}, \quad (6.9)$$

kde

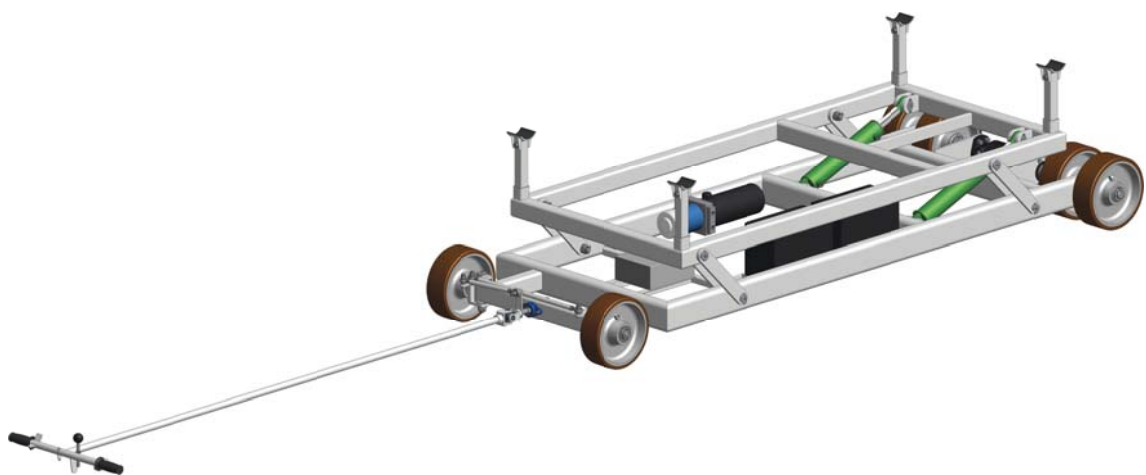
F_1 – síla působící na horní rám od zatížení přední příčnou trubkou (N),

F_2 – síla působící na horní rám od zatížení zadní příčnou trubkou (N).

7. Konstrukční řešení

Pro samotnou konstrukci manipulačního zařízení lze použít větší množství variant řešení. Ty se týkají způsobu zdvihu, řešení pojezdu a typu podvozku. Způsob zdvihu lze řešit hydraulicky, elektricky či mechanicky. Pojezd může být poháněný či nepoháněný. A typ podvozku může být tří, čtyř či více kolový. Dále konstrukční řešení manipulačního zařízení ovlivňuje konstrukce podvozku vrtulníku. Při podrobnějším zkoumání totiž zjistíme, že žádný podvozek vrtulníku nemá stejné rozměry, ať už to je rozchod ližin, průměr ližin, rozteč příčných trubek nebo světlá výška vrtulníku. Proto je návrh jednoduchého univerzálního manipulačního zařízení velmi komplikované.

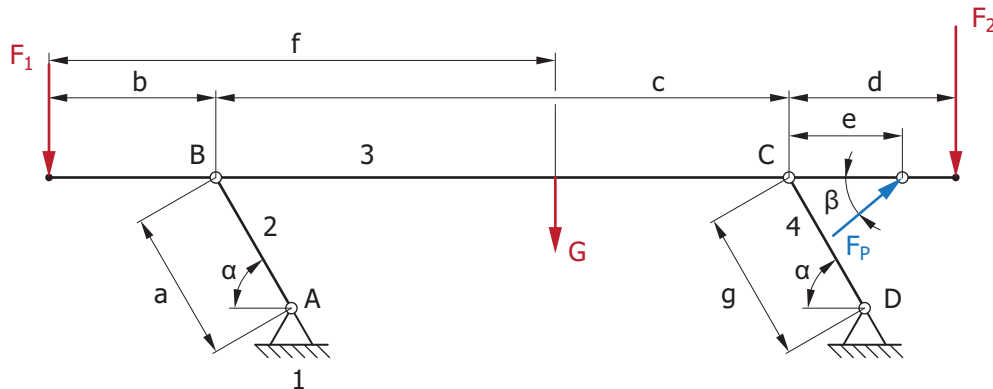
V úvahu tedy přicházejí různá konstrukční řešení založená na více možných mechanizmech zdvihu, z nichž jsme si pro účely naší práce vybrali mechanismus s dvojitým rámem (paralelogram). Jeho zdvih je realizován pomocí dvou přímočarých hydromotorů se zdvihem pístnic 300 milimetrů. Co se týká uchopení vrtulníku, zvolili jsme si uchopení za příčné trubky podvozku vrtulníku pomocí speciálně tvarovaných sedel, a to z důvodu větší rozměrové stálosti rozteče příčných trubek. Pro námi navrhované manipulační zařízení jsme dále zvolili podvozek čtyřkolového typu s pohonem zadních kol rotačními hydromotory.



Obr. 7.1 Zvolené konstrukční řešení

7.1 Rozbor zdvihacího mechanismu

Zdvihací mechanismus je tvořen dvojicí rámu spojených mezi sebou pomocí vahadel a tvoří tzv. paralelogram.



Obr. 7.2 Schéma zdvihacího mechanismu

Základní rozměry mechanismu

$a=320,5$ mm; $b=80$ mm; $c=1652,6$ mm; $d=384,5$ mm; $e=304,5$ mm; $f=1145$ mm;
 $g=320,5$ mm;

Silové působení na mechanismus

$F_1=4652,06$ N; $F_2=7957,94$ N; $G=650$ N (tíha horního rámu);

Klasifikace vazeb

A, B, C, D – rotační kinematická dvojice – $\xi = 2$,

kde

ξ – počet stupňů volnosti odebraných stykovou vazbou (-).

Určení pohyblivosti soustavy těles

$$i = (n - 1) \cdot i_v - \left(\sum \xi_i - \eta \right) = (4 - 1) \cdot 3 - (8 - 0) = 1, \quad (7.1)$$

kde

i – počet stupňů volnosti soustavy (-),

i_v – počet stupňů volnosti volného tělesa (-),

η – počet omezených deformačních parametrů (-),

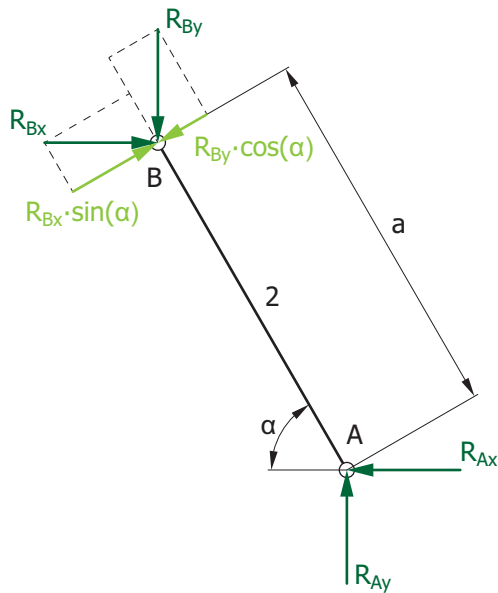
$\sum \xi_i$ – počet stupňů volnosti odebraných vazbami (-),

$(n - 1)$ – počet těles bez základního tělesa (-) [2, str. 132].

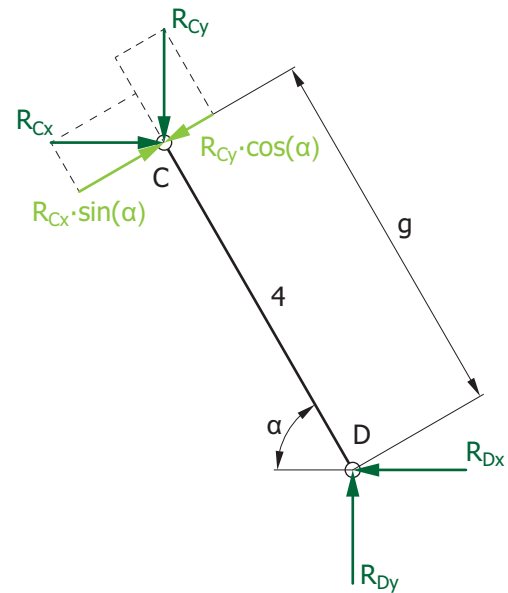
Soustava má jeden stupeň volnosti (viz rovnice 7.1) a díky síle F_p je ve statické rovnováze, a má tedy smysl pokračovat ve statickém řešení.

Uvolnění jednotlivých členů soustavy

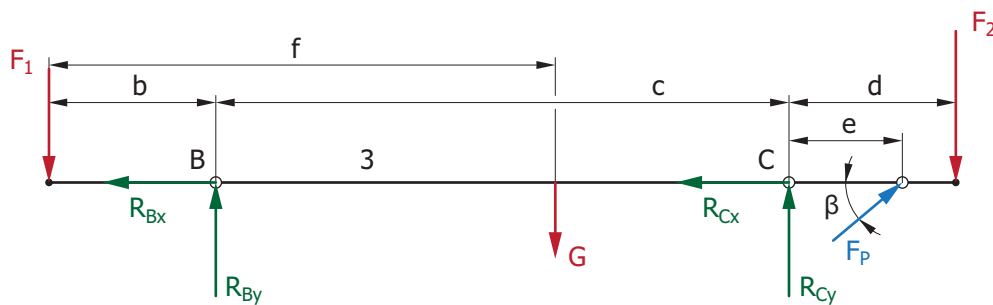
Členy uvolňujeme s respektováním principu akce a reakce.



Obr. 7.3 Člen 2



Obr. 7.4 Člen 4



Obr. 7.5 Člen 3

Sestavení podmínek statické rovnováhy

Člen 2

$$\sum F_x: -R_{Ax} + R_{Bx} = 0, \quad (7.2)$$

$$\sum F_y: R_{Ay} - R_{By} = 0, \quad (7.3)$$

$$\sum M_{z(A)}: R_{Bx} \cdot \sin(\alpha) \cdot a - R_{By} \cdot \cos(\alpha) \cdot a = 0. \quad (7.4)$$

Člen 3

$$\sum F_x: -R_{Bx} - R_{Cx} + F_P \cdot \cos(\beta) = 0, \quad (7.5)$$

$$\sum F_y: R_{By} + R_{Cy} + F_P \cdot \sin(\beta) - F_1 - F_2 - G = 0, \quad (7.6)$$

$$\sum M_{z(B)}: -R_{Cy} \cdot c - F_P \cdot \sin(\beta) \cdot (c + e) - F_1 \cdot b + F_2 \cdot (c + d) + G \cdot (f - b) = 0. \quad (7.7)$$

Člen 4

$$\sum F_x: R_{C_x} - R_{D_x} = 0, \quad (7.8)$$

$$\sum F_y: -R_{C_y} + R_{D_y} = 0, \quad (7.9)$$

$$\sum M_{z(D)}: R_{C_x} \cdot \sin(\alpha) \cdot g - R_{C_y} \cdot \cos(\alpha) \cdot g = 0. \quad (7.10)$$

Maticový zápis soustavy rovnic

$$A = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin(\alpha) \cdot a & -\cos(\alpha) \cdot a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & \cos(\beta) \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c & 0 & 0 & -\sin(\beta) \cdot (c + e) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sin(\alpha) \cdot g & -\cos(\alpha) \cdot g & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (7.11)$$

$$b = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ F_1 + F_2 + G \\ F_1 \cdot b - F_2 \cdot (c + d) - G \cdot (f - b) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad x = \begin{pmatrix} R_{A_x} \\ R_{A_y} \\ R_{B_x} \\ R_{B_y} \\ R_{C_x} \\ R_{C_y} \\ R_{D_x} \\ R_{D_y} \\ F_P \end{pmatrix} \quad (7.12), (7.13)$$

Zkoumané polohy mechanismu při zdvihu

V průběhu zdvihu mechanismu se síly působící ve vazbách mění v závislosti na hodnotě zdvihu. Pro náš výpočet nás zajímají polohy na počátku zdvihu a poloha při úplném vysunutí pístnice pracovního válce.

Tab. 7.1 Polohy mechanismu

Poloha	Zdvih mechanismu (mm)	Úhly mechanismu (°)		Vysunutí pístnice (mm)	Popis polohy
		α	β		
I	30	23,930	14,121	17,9	možný počátek prvního zdvihu
II	134,2	46,943	21,620	121,6	počátek zdvihu vrtulníku
III	215,2	79,554	22,751	300	maximální vysunutí pístnice

Po dosazení základních rozměrů mechanismu, silového působení na mechanismus a úhlů z poloh mechanismu do matic (7.11, 7.12, 7.13), pak získáme řešením maticové rovnice ve tvaru $A \cdot x = b$ hledané hodnoty reakcí ve vazbách (viz tab. 7.2).

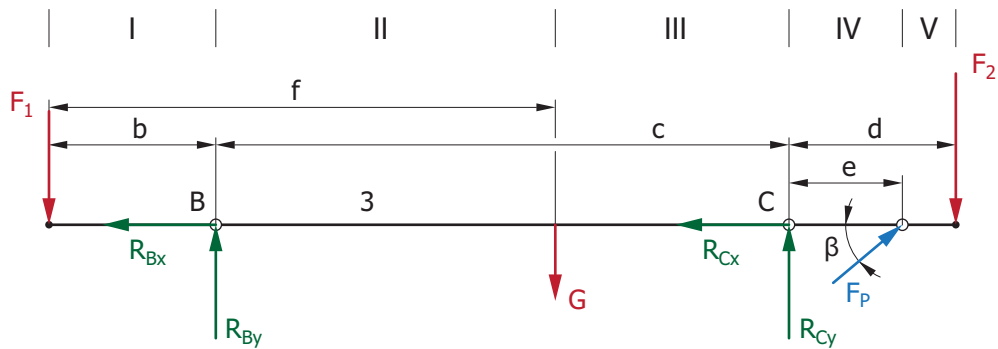
Tab. 7.2 Výsledné reakce ve vazbách

Reakce ve vazbách (N)	Polohy		
	I	II	III
R_{A_x}	9331,198	3660,103	632,794
R_{A_y}	4140,815	3917,114	3432,198
R_{B_x}	9331,198	3660,103	632,794
R_{B_y}	4140,815	3917,114	3432,198
R_{C_x}	9738,772	5381,577	1636,493
R_{C_y}	4321,681	5759,469	8876,147
R_{D_x}	9738,772	5381,577	1636,493
R_{D_y}	4321,681	5759,469	8876,147
F_P	19664,175	9725,887	2460,754

8. Pevnostní výpočet

8.1 Horní rám

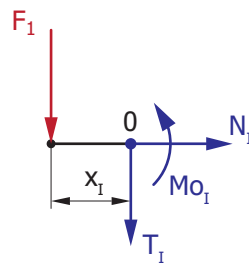
8.1.1 Zatížení horního rámu



Obr. 8.1 Zatížení horního rámu

Řez I:

$x_I \in (0; b)$,



Obr. 8.2 Řez I – poloha I

Pro $x_I = 0\text{mm}$,

$$N_I(0) = 0\text{N}, \quad (8.1)$$

$$T_I(0) = -F_1 = -4652,06\text{N}, \quad (8.2)$$

$$M_{O_I}(0) = -F_1 \cdot x_I = -4652,06 \cdot 0 = 0\text{Nmm}. \quad (8.3)$$

Pro $x_I = b = 80\text{mm}$,

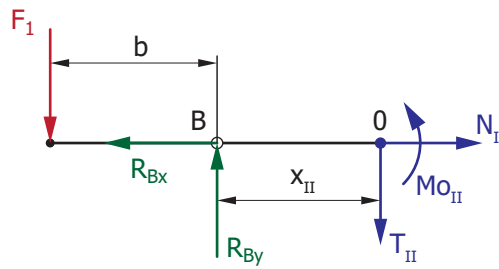
$$N_I(b) = 0\text{N}, \quad (8.4)$$

$$T_I(b) = -F_1 = -4652,06\text{N}, \quad (8.5)$$

$$M_{O_I}(b) = -F_1 \cdot x_I = -4652,06 \cdot 80 = -372164,8\text{Nmm}. \quad (8.6)$$

Řez II:

$$x_{II} \in (0; f - b),$$



Obr. 8.3 Řez II – poloha I

Pro $x_{II} = 0\text{mm}$,

$$N_{II}(0) = R_{B_x} = 9331,198\text{N}, \quad (8.7)$$

$$T_{II}(0) = R_{B_y} - F_1 = 4140,815 - 4652,06 = -511,245\text{N}, \quad (8.8)$$

$$\begin{aligned} Mo_{II}(0) &= R_{B_y} \cdot x_{II} - F_1 \cdot (b + x_{II}) = 4140,815 \cdot 0 - 4652,06 \cdot (80 + 0) = \\ &= -372164,8\text{Nmm}. \end{aligned} \quad (8.9)$$

Pro $x_{II} = (f - b) = 1145 - 80 = 1065\text{mm}$,

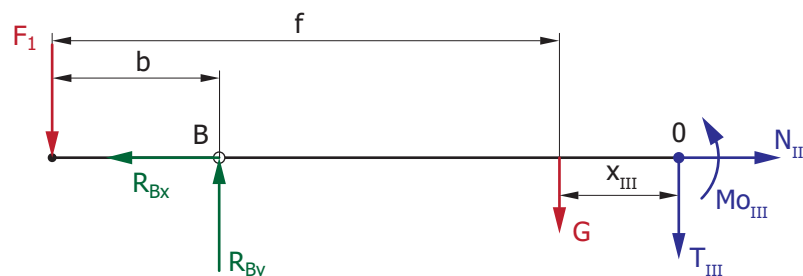
$$N_{II}(f - b) = R_{B_x} = 9331,198\text{N}, \quad (8.10)$$

$$T_{II}(f - b) = R_{B_y} - F_1 = 4140,815 - 4652,06 = -511,245\text{N}, \quad (8.11)$$

$$\begin{aligned} Mo_{II}(f - b) &= R_{B_y} \cdot x_{II} - F_1 \cdot (b + x_{II}) = \\ &= 4140,815 \cdot 1065 - 4652,06 \cdot (80 + 1065) = \\ &= -916640,725\text{Nmm}. \end{aligned} \quad (8.12)$$

Řez III:

$$x_{III} \in (0; b + c - f),$$



Obr. 8.4 Řez III – poloha I

Pro $x_{III} = 0\text{mm}$,

$$N_{III}(0) = R_{B_x} = 9331,198\text{N}, \quad (8.13)$$

$$T_{III}(0) = R_{By} - F_1 - G = 4140,815 - 4652,06 - 650 = -1161,245N, \quad (8.14)$$

$$\begin{aligned} Mo_{III}(0) &= R_{By} \cdot (f - b + x_{III}) - F_1 \cdot (f + x_{III}) - G \cdot x_{III} = \\ &= 4140,815 \cdot (1145 - 80 + 0) - 4652,06 \cdot (1145 + 0) - 650 \cdot 0 = \\ &= -916640,725Nmm. \end{aligned} \quad (8.15)$$

$$\text{Pro } x_{III} = (b + c - f) = 80 + 1652,59 - 1145 = 587,59mm,$$

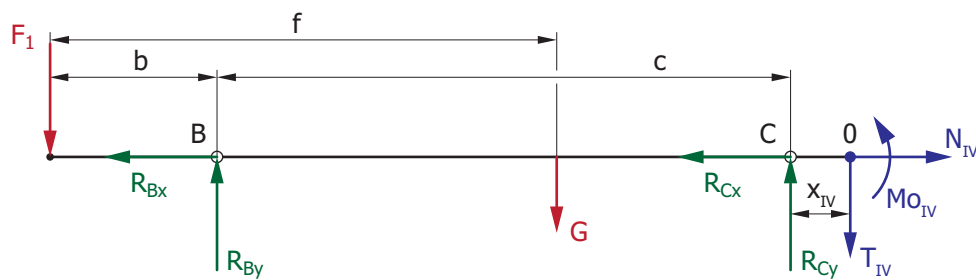
$$N_{III}(b + c - f) = R_{Bx} = 9331,198N, \quad (8.16)$$

$$T_{III}(b + c - f) = R_{By} - F_1 - G = 4140,815 - 4652,06 - 650 = -1161,245N, \quad (8.17)$$

$$\begin{aligned} Mo_{III}(b + c - f) &= R_{By} \cdot (f - b + x_{III}) - F_1 \cdot (f + x_{III}) - G \cdot x_{III} = \\ &= 4140,815 \cdot (1145 - 80 + 587,59) - 4652,06 \cdot \\ &\quad \cdot (1145 + 587,59) - 650 \cdot 587,59 = -1598976,675Nmm. \end{aligned} \quad (8.18)$$

Řez IV:

$$x_{IV} \in (0; e),$$



Obr. 8.5 Řez IV – poloha I

$$\text{Pro } x_{IV} = 0mm,$$

$$N_{IV}(0) = R_{Bx} + R_{Cx} = 9331,198 + 9738,772 = 19069,97N, \quad (8.19)$$

$$\begin{aligned} T_{IV}(0) &= R_{By} + R_{Cy} - F_1 - G = 4140,815 + 4321,681 - 4652,06 - 650 = \\ &= 3160,436N, \end{aligned} \quad (8.20)$$

$$\begin{aligned} Mo_{IV}(0) &= R_{By} \cdot (c + x_{IV}) + R_{Cy} \cdot x_{IV} - F_1 \cdot (b + c + x_{IV}) - G \cdot (b + c - f + x_{IV}) \\ &= 4140,815 \cdot (1652,59 + 0) + 4321,681 \cdot 0 - 4652,06 \cdot \\ &\quad \cdot (80 + 1652,59 + 0) - 650 \cdot (80 + 1652,59 - 1145 + 0) = \\ &= -1598976,675Nmm. \end{aligned} \quad (8.21)$$

$$\text{Pro } x_{IV} = e = 304,5mm,$$

$$N_{IV}(e) = R_{Bx} + R_{Cx} = 9331,198 + 9738,772 = 19069,97N, \quad (8.22)$$

$$T_{IV}(e) = R_{By} + R_{Cy} - F_1 - G = 4140,815 + 4321,681 - 4652,06 - 650 = \quad (8.23)$$

$$= 3160,436N,$$

$$Mo_{IV}(e) = R_{By} \cdot (c + x_{IV}) + R_{Cy} \cdot x_{IV} - F_1 \cdot (b + c + x_{IV}) - G \cdot (b + c - f + x_{IV}) \quad (8.24)$$

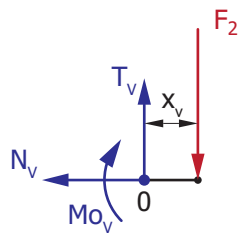
$$= 4140,815 \cdot (1652,59 + 304,5) + 4321,681 \cdot 304,5 - 4652,06 \cdot$$

$$\cdot (80 + 1652,59 + 304,5) - 650 \cdot (80 + 1652,59 - 1145 + 304,5) =$$

$$= -636623,913Nmm.$$

Řez V:

$$x_V \in (0; d - e),$$



Obr. 8.6 Řez V – poloha I

Pro $x_V = 0mm$,

$$N_V(0) = 0N, \quad (8.25)$$

$$T_V(0) = F_2 = 7957,94N, \quad (8.26)$$

$$Mo_V(0) = -F_2 \cdot x_V = -7957,94 \cdot 0 = 0Nmm. \quad (8.27)$$

Pro $x_V = (d - e) = (384,5 - 304,5) = 80mm$,

$$N_V(0) = 0N, \quad (8.28)$$

$$T_V(0) = F_2 = 7957,94N, \quad (8.29)$$

$$Mo_V(0) = -F_2 \cdot x_V = -7957,94 \cdot 80 = -636635,2Nmm. \quad (8.30)$$

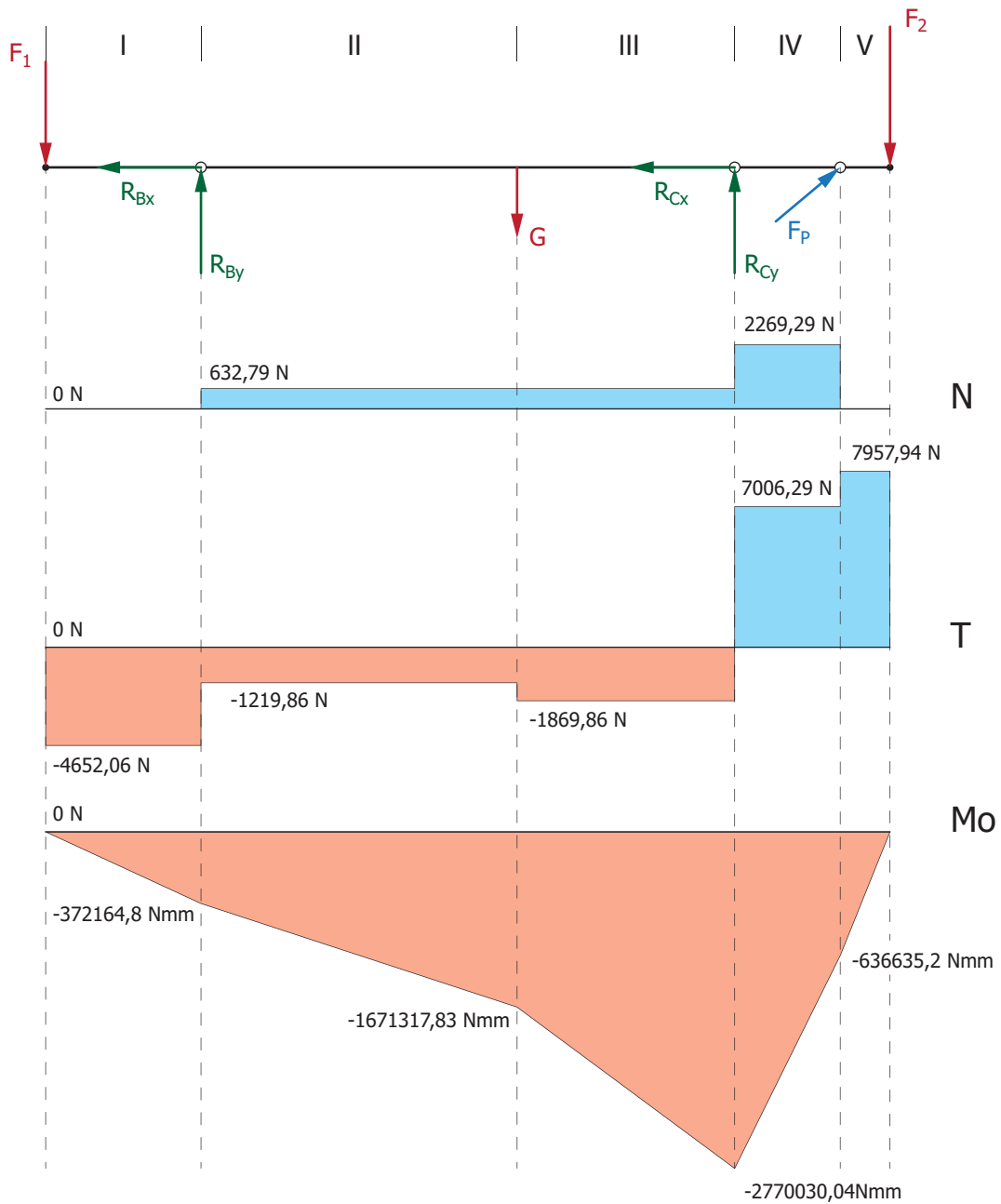
Analogickým postupem získáme hodnoty i pro ostatní polohy (tab. 8.1).

Tab. 8.1 Zatížení horního rámu

	x_i	Poloha		
		I	II	III
$N_I(N)$	(0)	0,000	0,000	0,000
	(b)	0,000	0,000	0,000
$N_{II}(N)$	(0)	9331,198	3660,103	632,794
	(f-b)	9331,198	3660,103	632,794
$N_{III}(N)$	(0)	9331,198	3660,103	632,794
	(b+c-f)	9331,198	3660,103	632,794
$N_{IV}(N)$	(0)	19069,970	9041,680	2269,287
	(e)	19069,970	9041,680	2269,287
$N_V(N)$	(0)	0,000	0,000	0,000
	(d-e)	0,000	0,000	0,000
$T_I(N)$	(0)	-4652,06	-4652,06	-4652,06
	(b)	-4652,06	-4652,06	-4652,06
$T_{II}(N)$	(0)	-511,245	-734,946	-1219,862
	(f-b)	-511,245	-734,946	-1219,862
$T_{III}(N)$	(0)	-1161,245	-1384,946	-1869,862
	(b+c-f)	-1161,245	-1384,946	-1869,862
$T_{IV}(N)$	(0)	3160,436	4374,523	7006,285
	(e)	3160,436	4374,523	7006,285
$T_V(N)$	(0)	7957,940	7957,940	7957,940
	(d-e)	7957,940	7957,940	7957,940
$Mo_I(Nmm)$	(0)	0,000	0,000	0,000
	(b)	-372164,800	-372164,800	-372164,800
$Mo_{II}(Nmm)$	(0)	-372164,800	-372164,800	-372164,800
	(f-b)	-916640,725	-1154882,290	-1671317,830
$Mo_{III}(Nmm)$	(0)	-916640,725	-1154882,290	-1671317,830
	(b+c-f)	-1598976,674	-1968662,710	-2770030,042
$Mo_{IV}(Nmm)$	(0)	-1598976,674	-1968662,710	-2770030,042
	(e)	-636635,200	-636635,200	-636635,200
$Mo_V(Nmm)$	(d-e)	-636635,200	-636635,200	-636635,200
	(0)	0,000	0,000	0,000

8.1.2 Průběh napětí v horním rámu

Z výsledků je zřejmé, že horní rám bude nejvíce namáhaný v poloze III (viz tab. 8.1).



Obr. 8.7 Nejvyšší zatížení horního rámu – poloha III

8.1.3 Kontrola profilu horního rámu

Pro horní rám jsem zvolil obdélníkový profil TR OBD 80x60x6 – 2177 – ČSN 42 5720.00 – 11523 [5, str. 302].

Ohybový moment

$$\sigma_{OH} = \frac{|M_{OIII}|}{W_{OH}} = \frac{2770030,042}{29062,227} = 95,314 \text{MPa}, \quad (8.31)$$

kde

σ_{OH} – ohybové napětí horního rámu (MPa),

M_{OIII} – ohybový moment horního rámu v řezu III – poloha III (Nmm),

W_{OH} – průřezový modul v ohybu obdélníkového profilu 80x60x6 k ose y (mm^3).

Napětí v tahu

$$\sigma_{tH} = \frac{N_{IV}}{S_H} = \frac{2269,287}{1443,292} = 1,572 \text{MPa}, \quad (8.32)$$

kde

σ_{tH} – napětí v tahu horního profilu (MPa),

N_{IV} – normálová složka v řezu IV – poloha III (N),

S_H – plocha průřezu obdélníkového profilu 80x60x6 (mm^2).

Kombinované namáhání

$$\sigma_{HR} = \sigma_{OIII} + \sigma_{tH} = 95,314 + 1,572 = 96,886 \text{MPa}, \quad (8.33)$$

$$\sigma_{Dt} = \frac{\sigma_{Kt}}{k_k} = \frac{333}{3} = 111 \text{MPa}, \quad (8.34)$$

$$\sigma_{HR} \leq \sigma_{Dt}, \quad (8.35)$$

$111 \leq 96,886$ – profil vyhovuje.

kde

σ_{HR} – kombinované napětí horního rámu dle [4, str. 270] (MPa),

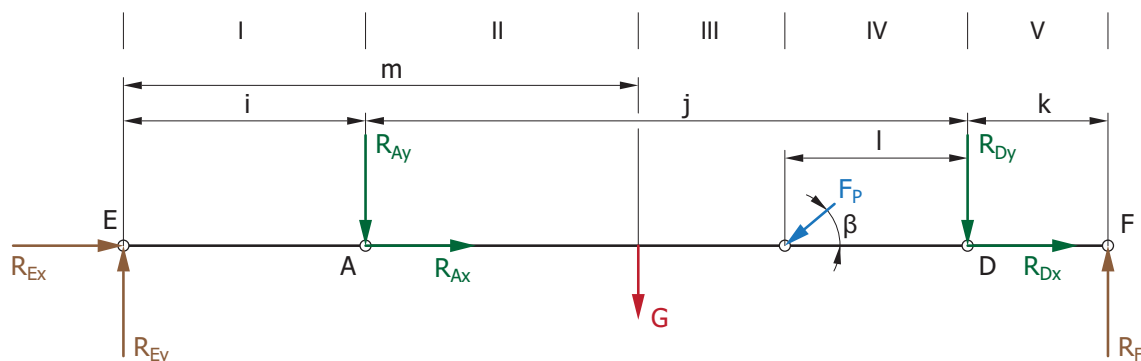
σ_{Dt} – dovolené napětí v tahu (MPa),

σ_{Kt} – mez kluzu materiálu 11 523 (MPa) [5, str. 234],

k_k – zvolená bezpečnost (-).

8.2 Dolní rám

8.2.1 Zatížení dolního rámu



Obr. 8.8 Zatížení dolního rámu

Základní rozměry spodního rámu

$i=664,5$ mm; $j=1652,59$ mm; $k=360$ mm; $l=505,198$ mm; $m=1395$ mm; $G=1500$ N (tíha dolního rámu včetně všeho vybavení).

Určení reakcí R_{E_x} , R_{E_y} a R_F

Pro pevnostní výpočet dolního rámu je třeba ještě určit hodnoty reakcí R_{E_x} , R_{E_y} a R_F .

Ze statické rovnováhy

$$\sum F_x: R_{E_x} + R_{A_x} - F_P \cdot \cos\beta + R_{D_x} = 0, \quad (8.36)$$

$$\sum F_y: R_{E_y} - R_{A_y} - G - F_P \cdot \sin\beta - R_{D_y} + R_F = 0, \quad (8.37)$$

$$\sum M_{z(E)}: R_{A_y} \cdot i + G \cdot m + F_P \cdot (i + j - l) + R_{D_y} \cdot (i + j) - R_F \cdot (i + j + k) = 0. \quad (8.38)$$

$$R_{E_x} = F_P \cdot \cos\beta - R_{A_x} - R_{D_x}, \quad (8.39)$$

$$R_{E_y} = R_{A_y} + G + F_P \cdot \sin\beta + R_{D_y} - R_F, \quad (8.40)$$

$$R_F = \frac{R_{A_y} \cdot i + G \cdot m + F_P \cdot \sin\beta \cdot (i + j - l) + R_{D_y} \cdot (i + j)}{(i + j + k)}. \quad (8.41)$$

Pro polohu I po dosazení do rovnic 8.39, 8.40 a 8.41 pak je:

$$R_{E_x} = 19664,175 \cdot \cos 14,121 - 9331,198 - 9738,772 = 0 \text{ N}, \quad (8.42)$$

$$R_F = \frac{4140,815 \cdot 664,5 + 1500 \cdot 1395 + 19664,175 \cdot \sin 14,121 \cdot (664,5 + 1652,59 + 360)}{(664,5 + 1652,59 + 360)} \quad (8.43)$$

$$\begin{aligned} & \cdot (664,5 + 1652,59 - 505,198) + 4321,681 \cdot (664,5 + 1652,59) \\ & = 8796,98N, \\ R_{E_y} & = 4140,815 + 1500 + 19664,175 \cdot \sin 14,121 + 4321,681 - 8796,98 = \quad (8.44) \\ & = 5962,994N \end{aligned}$$

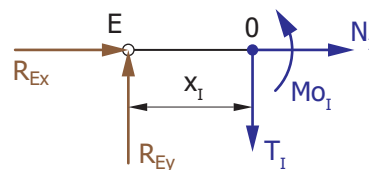
Stejným postupem určíme i hodnoty reakcí pro polohu II a polohu III (tab. 8.2).

Tab. 8.2 Výsledné reakce na kola

Reakce (N)	Polohy		
	I	II	III
R_{E_x}	0,000	0,000	0,000
R_{E_y}	5962,994	5595,822	4799,806
R_F	8796,980	9164,255	9960,179

Řez I:

$$x_I \in (0; i),$$



Obr. 8.9 Řez I – poloha I

Pro $x_I = 0mm$,

$$N_I(0) = 0N, \quad (8.45)$$

$$T_I(0) = R_{E_y} = 5962,994N, \quad (8.46)$$

$$M_{O_I}(0) = R_{E_y} \cdot x_I = 5962,994 \cdot 0 = 0Nmm. \quad (8.47)$$

Pro $x_I = i = 664,5mm$,

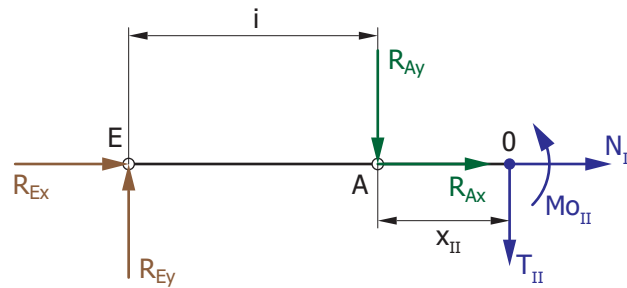
$$N_I(i) = 0N, \quad (8.48)$$

$$T_I(i) = R_{E_y} = 5962,994N, \quad (8.49)$$

$$M_{O_I}(i) = R_{E_y} \cdot x_I = 5962,994 \cdot 664,5 = 3962409,513Nmm. \quad (8.50)$$

Řez II:

$$x_{II} \in (0; m - i),$$



Obr. 8.10 Řez II – poloha I

Pro $x_{II} = 0mm$,

$$N_{II}(0) = -R_{Ax} = -9331,198N, \quad (8.51)$$

$$T_{II}(0) = R_{Ey} - R_{Ay} = 5962,994 - 4140,815 = 1822,179N, \quad (8.52)$$

$$\begin{aligned} Mo_{II}(0) &= R_{Ey} \cdot (i + x_{II}) - R_{Ay} \cdot x_{II} = 5962,994 \cdot (664,5 + 0) - 4140,815 \cdot 0 = \\ &= 3962409,513Nmm. \end{aligned} \quad (8.53)$$

Pro $x_{II} = (m - i) = (1395 - 664,5) = 730,5mm$,

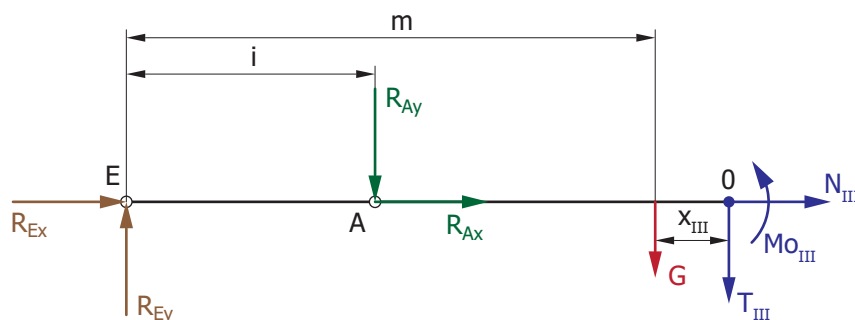
$$N_{II}(m - i) = -R_{Ax} = -9331,198N, \quad (8.54)$$

$$T_{II}(m - i) = R_{Ey} - R_{Ay} = 5962,994 - 4140,815 = 1822,179N, \quad (8.55)$$

$$\begin{aligned} Mo_{II}(m - i) &= R_{Ey} \cdot (i + x_{II}) - R_{Ay} \cdot x_{II} = 5962,994 \cdot (664,5 + 730,5) - \\ &- 4140,815 \cdot 730,50 = 5293511,272Nmm. \end{aligned} \quad (8.56)$$

Řez III:

$$x_{III} \in (0; i + j - l - m),$$



Obr. 8.11 Řez III – poloha I

Pro $x_{III} = 0mm$,

$$N_{III}(0) = -R_{Ax} = -9331,198N, \quad (8.57)$$

$$T_{III}(0) = R_{E_y} - R_{A_y} - G = 5962,994 - 4140,815 - 1500 = 322,179N, \quad (8.58)$$

$$\begin{aligned} Mo_{III}(0) &= R_{E_y} \cdot (m + x_{III}) - R_{A_y} \cdot (m - i + x_{III}) - G \cdot x_{III} = \\ &= 5962,994 \cdot (1395 + 0) - 4140,815 \cdot (1395 - 664,5 + 0) - 1500 \cdot 0 = \\ &= 5293511,272Nmm. \end{aligned} \quad (8.59)$$

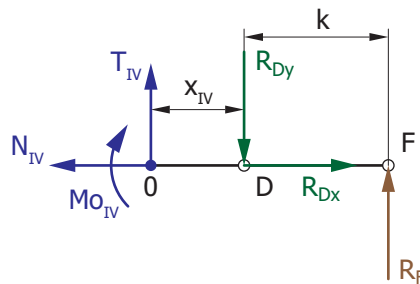
$$\begin{aligned} \text{Pro } x_{III} &= (i + j - l - m) = (664,5 + 1652,59 - 505,198 - 1395) = 416,892mm, \\ N_{III}(i + j - l - m) &= -R_{A_x} = -9331,198N, \end{aligned} \quad (8.60)$$

$$T_{III}(i + j - l - m) = R_{E_y} - R_{A_y} - G = 5962,994 - 4140,815 - 1500 = 322,179N, \quad (8.61)$$

$$\begin{aligned} Mo_{III}(i + j - l - m) &= R_{E_y} \cdot (m + x_{III}) - R_{A_y} \cdot (m - i + x_{III}) - G \cdot x_{III} = \\ &= 5962,994 \cdot (1395 + 416,892) - 4140,815 \cdot (1395 - 664,5 + 416,892) \\ &\quad - 1500 \cdot 416,892 = 5427825,128Nmm. \end{aligned} \quad (8.62)$$

Řez IV:

$$x_{IV} \in (0; l),$$



Obr. 8.12 Řez IV – poloha I

Pro $x_{IV} = 0mm$,

$$N_{IV}(0) = R_{D_x} = 9738,772N, \quad (8.63)$$

$$T_{IV}(0) = R_{D_y} - R_F = 4321,681 - 8796,98 = -4475,299N, \quad (8.64)$$

$$\begin{aligned} Mo_{IV}(0) &= R_F \cdot (k + x_{IV}) - R_{D_y} \cdot x_{IV} = 8796,98 \cdot (360 + 0) - 4321,681 \cdot 0 = \\ &= 3166912,8Nmm. \end{aligned} \quad (8.65)$$

Pro $x_{IV} = l = 505,198mm$,

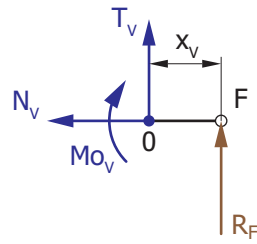
$$N_{IV}(l) = R_{D_x} = 9738,772N, \quad (8.66)$$

$$T_{IV}(l) = R_{D_y} - R_F = 4321,681 - 8796,98 = -4475,299N, \quad (8.67)$$

$$\begin{aligned} Mo_{IV}(l) &= R_F \cdot (k + x_{IV}) - R_{D_y} \cdot x_{IV} = 8796,98 \cdot (360 + 505,198) - 4321,681 \cdot \\ &\quad \cdot 505,198 = 5427824,904Nmm. \end{aligned} \quad (8.68)$$

Řez V:

$$x_V \in (0; k),$$



Obr. 8.13 Řez V – poloha I

Pro $x_V = 0\text{mm}$,

$$N_V(0) = 0\text{N}, \quad (8.69)$$

$$T_V(0) = -R_F = -8796,98\text{N}, \quad (8.70)$$

$$M_{O_V}(0) = R_F \cdot x_V = 8796,98 \cdot 0 = 0\text{Nmm}. \quad (8.71)$$

Pro $x_V = k = 360\text{mm}$,

$$N_V(k) = 0\text{N}, \quad (8.72)$$

$$T_V(k) = -R_F = -8796,98\text{N}, \quad (8.73)$$

$$M_{O_V}(k) = R_F \cdot x_V = 8796,98 \cdot 360 = 3166912,8\text{Nmm}. \quad (8.74)$$

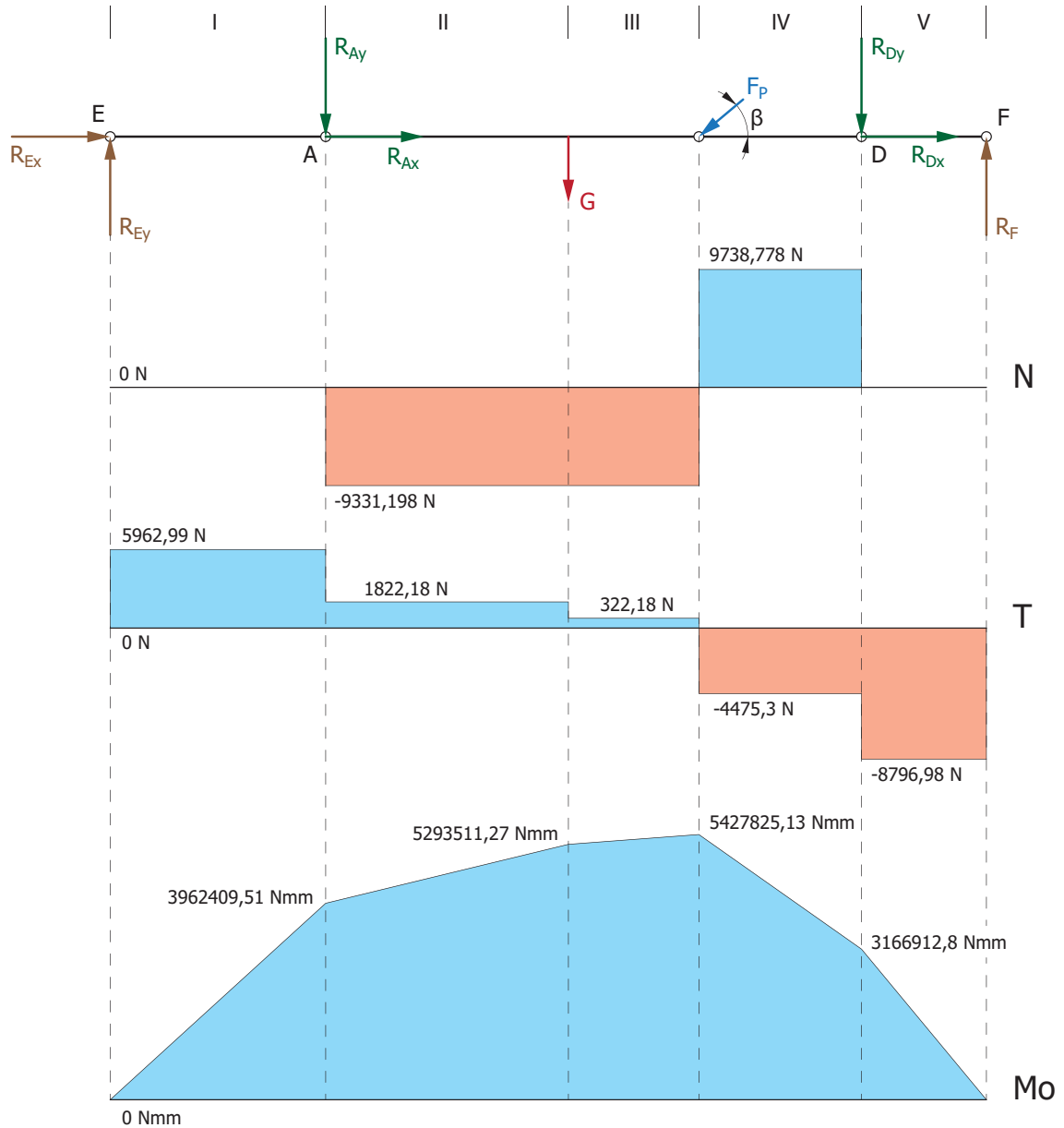
Analogicky pro ostatní polohy pak (tab. 8.3).

Tab. 8.3 Zatížení dolního rámu

	x_i	Poloha		
		I	II	III
$N_I(N)$	(0)	0,000	0,000	0,000
	(i)	0,000	0,000	0,000
$N_{II}(N)$	(0)	-9331,198	-3660,103	-632,794
	(m-i)	-9331,198	-3660,103	-632,794
$N_{III}(N)$	(0)	-9331,198	-3660,103	-632,794
	(i+j-l-m)	-9331,198	-3660,103	-632,794
$N_{IV}(N)$	(0)	9738,778	5381,548	1636,499
	(l)	9738,778	5381,548	1636,499
$N_V(N)$	(0)	0,000	0,000	0,000
	(k)	0,000	0,000	0,000
$T_I(N)$	(0)	5962,994	5595,822	4799,806
	(i)	5962,994	5595,822	4799,806
$T_{II}(N)$	(0)	1822,179	1678,708	1367,608
	(m-i)	1822,179	1678,708	1367,608
$T_{III}(N)$	(0)	322,179	178,708	-132,392
	(i+j-l-m)	322,179	178,708	-132,392
$T_{IV}(N)$	(0)	-4475,299	-3404,786	-1084,032
	(l)	-4475,299	-3404,786	-1084,032
$T_V(N)$	(0)	-8796,980	-9164,255	-9960,179
	(k)	-8796,980	-9164,255	-9960,179
$Mo_I(Nmm)$	(0)	0,000	0,000	0,000
	(i)	3962409,513	3718423,719	3189471,087
$Mo_{II}(Nmm)$	(0)	3962409,513	3718423,719	3189471,087
	(m-i)	5293511,272	4944719,913	4188508,731
$Mo_{III}(Nmm)$	(0)	5293511,272	4944719,913	4188508,731
	(i+j-l-m)	5427825,128	5019221,850	4133315,562
$Mo_{IV}(Nmm)$	(l)	5427825,128	5019221,850	4133315,562
	(0)	3166912,800	3299131,800	3585664,440
$Mo_V(Nmm)$	(k)	3166912,800	3299131,800	3585664,440
	(0)	0,000	0,000	0,000

8.2.2 Průběh napětí v dolním rámu

Z výsledků je zřejmé, že dolní rám bude nejvíce namáhaný v poloze I (viz tab. 8.3).



Obr. 8.14 Nejvyšší zatížení dolního rámu – poloha I

8.2.3 Kontrola profilu dolního rámu

Pro dolní rám jsem zvolil obdélníkový profil 120x60x8 dle ČSN EN 10219-2 – 11523.

Ohybový moment

$$\sigma_{oD} = \frac{|M_{oIII}|}{W_{oD}} = \frac{5427825,128}{62551,345} = 86,774 \text{MPa}, \quad (8.75)$$

kde

σ_{oD} – ohybové napětí dolního rámu (MPa),

M_{oIII} – ohybový moment dolního rámu v řezu III – poloha I (Nmm),

W_{oD} – průřezový modul v ohybu obdélníkového profilu 120x60x8 k ose y (mm^3).

Napětí v tahu

$$\sigma_{tD} = \frac{N_{IV}}{S_D} = \frac{9738,778}{2404,248} = 4,051 \text{MPa}, \quad (8.76)$$

kde

σ_{tD} – napětí v tahu dolního profilu (MPa),

N_{IV} – normálová složka v řezu IV – poloha I (N),

S_D – plocha průřezu obdélníkového profilu 120x60x8 (mm^2).

Kombinované namáhání

$$\sigma_{DR} = \sigma_{oIII} + \sigma_{tD} = 86,774 + 4,051 = 90,825 \text{MPa}, \quad (8.77)$$

$$\sigma_{Dt} = \frac{\sigma_{Kt}}{k_k} = \frac{333}{3} = 111 \text{MPa}, \quad (8.78)$$

$$\sigma_{HR} \leq \sigma_{Dt}, \quad (8.79)$$

$111 \leq 90,825$ – profil vyhovuje.

kde

σ_{DR} – kombinované napětí dolního rámu dle [4, str. 270] (MPa),

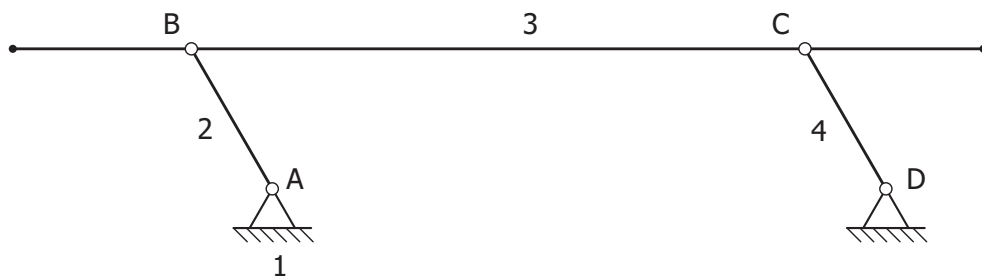
σ_{Dt} – dovolené napětí v tahu (MPa),

σ_{Kt} – mez kluzu materiálu 11 523 (MPa) [5, str. 234],

k_k – zvolená bezpečnost (-).

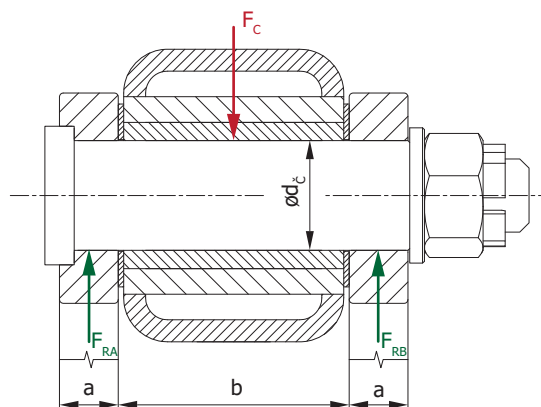
8.3 Čepy

Z tab. 7.2 je patrné největší zatížení čepů v bodech C a D v poloze I. Vzhledem ke konstrukci manipulačního zařízení je pro všechny body volen jeden průměr čepu.



Obr. 8.15 Rozmístění čepů

8.3.1 Určení průměru čepu – bod C



Obr. 8.16 Zatížení čepu v bodě C – poloha I

Základní rozměry

$a=16 \text{ mm}$; $b=63 \text{ mm}$;

Síla působící na čepový spoj

$$F_C = \sqrt{R_{Cx}^2 + R_{Cy}^2} = \sqrt{9738,772^2 + 4321,681^2} = 10654,604 \text{ N}, \quad (8.80)$$

kde

F_C – zatížení čepového spoje v bodě C (N),

R_{C_x} – x-ová složka reakce ve vazbě v bodě C – poloha I (N),

R_{C_y} – y-nová složka reakce ve vazbě v bodě C – poloha I (N).

Napětí v ohybu

$$\sigma_{D_{t\check{c}}} = \frac{\sigma_{K_{t\check{c}}}}{k_k} \cdot c_{II\check{c}} = \frac{345}{3} \cdot 0,75 = 86,25 \text{MPa}. \quad (8.81)$$

kde

$\sigma_{D_{t\check{c}}}$ – dovolené napětí v tahu čepu (MPa) [9, str. 2],

$\sigma_{K_{t\check{c}}}$ – mez kluzu pro materiál čepu – 11 700 (MPa) [5, str. 234],

k_k – zvolený součinitel bezpečnosti (-),

$c_{II\check{c}}$ – součinitel snížení napětí pro mýjivé zatížení dle materiálu čepu (-) [5, str. 38].

Pro výpočet čepu na ohyb se bere čep jako nosník na dvou podporách, zatížený spojitým břemenem s délkou rovnající se šířce b (obr. 8.16) [9, str. 32].

Pak:

$$F_{RA} = \frac{F_C}{2} = \frac{10654,604}{2} = 5327,302 \text{N}, \quad (8.82)$$

$$c = \frac{a}{2} + \frac{b}{4} = \frac{16}{2} + \frac{63}{4} = 23,75 \text{mm}, \quad (8.83)$$

$$M_{O_{max}} = F_{RA} \cdot c = 5327,302 \cdot 23,75 = 126523,423 \text{Nmm}, \quad (8.84)$$

$$\sigma_{D_o} = (1 \div 1,1) \cdot \sigma_{D_t}, \quad (8.85)$$

$$\sigma_{D_o} = \frac{M_{O_{max}}}{W_o} = \frac{M_{O_{max}}}{\frac{\pi \cdot d_{\check{c}}^3}{32}}, \quad (8.86)$$

Po úpravě rovnice 8.86 dostaneme:

$$d_{\check{c}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_{O_{max}}}{\pi \cdot \sigma_{D_o}}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 126523,423}{\pi \cdot 86,25}} = 24,63 \text{mm}, \quad (8.87)$$

kde

F_{RA} – reakce v čepovém spoji (N),

a – šířka vahadla (mm),

b – šířka pouzdra (mm),

c – rameno momentu (mm),

$M_{O_{max}}$ – maximální ohybový moment (Nmm),

σ_{D_o} – dovolené napětí v ohybu (MPa) [9, str. 2],

W_O – průřezový modul v ohybu (mm^3),

$d_{\check{c}}$ – průměr čepu (mm).

Napětí ve smyku

$$\tau_{D_S} = 0,6 \cdot \sigma_{D_t} = 0,6 \cdot 86,25 = 51,75 \text{MPa}, \quad (8.88)$$

$$\tau_{D_S} = \frac{F_C}{2 \cdot S_{\check{c}}} = \frac{F_C}{2 \cdot \frac{\pi d_{\check{c}}^2}{4}}, \quad (8.89)$$

Po úpravě rovnice 8.89 dostaneme:

$$d_{\check{c}} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_C}{2 \cdot \pi \cdot \tau_{D_S}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 10654,604}{2 \cdot \pi \cdot 51,75}} = 11,449 \text{mm}, \quad (8.90)$$

kde

τ_{D_S} – dovolené napětí ve smyku (MPa) [9, str. 2],

$S_{\check{c}}$ – plocha průřezu čepu (mm^2).

Otlačení v neotočné části

$$\sigma_{D_{tV}} = \frac{\sigma_{K_{tV}}}{k_k} \cdot c_{IIV} = \frac{333}{3} \cdot 0,85 = 94,35 \text{MPa}, \quad (8.91)$$

$$p_{D_n} = \sigma_{D_{tV}}, \quad (8.92)$$

$$p_{D_n} = \frac{F_C}{S_n} = \frac{F_C}{2 \cdot a \cdot d_{\check{c}}}, \quad (8.93)$$

Úpravou rovnice 8.93 pak dostaneme:

$$d_{\check{c}} = \frac{F_C}{2 \cdot a \cdot p_{D_n}} = \frac{10654,604}{2 \cdot 16 \cdot 94,35} = 3,529 \text{mm}, \quad (8.94)$$

kde

$\sigma_{D_{tV}}$ – dovolené napětí v tahu vahadla (MPa) [9, str. 2],

c_{IIV} – součinitel snížení napětí pro míjivé zatížení dle materiálu vahadla (-) [5, str. 38],

S_n – otlačovaná plocha ve vahadle (mm^2),

p_{D_n} – dovolený tlak v neotočné části (MPa) [9, str. 33].

Otlačení v otočné části

Výrobce kluzného pouzdra z masivního bronzu (SKF PBM 304060 M1G1) uvádí statickou únosnost 45 N/mm^2 (45 MPa) [16].

$$p_{D_o} = \frac{F_C}{S_o} = \frac{F_C}{b \cdot d_{\check{c}}}, \quad (8.95)$$

$$d_{\check{c}} = \frac{F_C}{b \cdot p_{D_o}} = \frac{10654,604}{63 \cdot 45} = 3,758 \text{ mm}, \quad (8.91)$$

kde

p_{D_o} – dovolený tlak v otočné části (MPa),

S_o – otlačovaná plocha kluzného pouzdra (mm^2).

Na základě výsledků výpočtu zohledňujeme průměr čepu dle hodnoty pro namáhání ohybem na nejbližší vyšší rozměr podle ČSN EN 22341, což je na průměr 30mm [5, str. 449].

8.4 Kontrola vahadla na vzpěr

Štíhlost prutu

$$J_{min} = \frac{a^3 \cdot h}{12} = \frac{16^3 \cdot 56}{12} = 19114,667 \text{ mm}^4, \quad (8.92)$$

kde

J_{min} – kvadratický moment průřezu (mm^4),

a – šířka vahadla (mm),

h – výška vahadla (mm).

Vzhledem k uložení vahadla, kdy jsou oba jeho konce kloubově uloženy, je redukovaná délka rovna délce vahadla. Pak:

$$l_0 = l = 320,5 \text{ mm}, \quad (8.93)$$

$$\lambda = \frac{l_0}{i} = \frac{l_0}{\sqrt{\frac{J_{min}}{S}}} = \frac{l_0}{\sqrt{\frac{J_{min}}{a \cdot h}}} = \frac{320,5}{\sqrt{\frac{19114,667}{16 \cdot 56}}} = 69,39, \quad (8.94)$$

kde

l_0 – redukovaná délka prutu (mm),

l – skutečná délka prutu (mm),

i – poloměr kvadratického momentu (-),

S – plocha průřezu vahadla (mm^2),

λ – štíhlost prutu dle [4, str. 226] (-).

Mezní štíhlost

$$\lambda_m = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_{Kt}}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^5}{333}} = 78,893, \quad (8.95)$$

kde

E – modul pružnosti v tahu (MPa),

σ_{Kt} – mez kluzu v tahu pro materiál 11 523 dle [5, str. 234] (MPa),

λ_m – mezní štíhlost dle [4, str. 231] (-).

Podmínka:

$\lambda < \lambda_m \rightarrow$ výpočet podle Tetmajera.

Bezpečnost

$$\sigma_{kr} = 335 - 0,62 \cdot \lambda = 335 - 0,62 \cdot 69,39 = 291,98 \text{MPa}, \quad (8.96)$$

$$F_{kr} = \sigma_{kr} \cdot S = 291,98 \cdot 16 \cdot 56 = 261614,08 \text{N}, \quad (8.97)$$

$$F = \frac{F_{kr}}{k} \rightarrow k = \frac{F_{kr}}{F} = \frac{F_{kr}}{\frac{F_C}{2}} = \frac{261614,08}{\frac{10654,604}{2}} = 49,108 > k_k = 3 \rightarrow \text{vyhovuje} \quad (8.98)$$

kde

σ_{kr} – napětí na mezi vzpěrné pevnosti pro materiál 11 500 dle [5, str. 37] (MPa),

F_{kr} – kritická síla dle [5, str. 37] (N),

F – dovolená zatěžující síla dle [5, str. 37] (N),

F_C – zatěžující síla (N),

k – součinitel bezpečnosti (-),

k_k – zvolený součinitel bezpečnosti (-).

Závěr

Výsledkem předložené práce je návrh manipulačního zařízení, které je schopno zvednout a transportovat vrtulník mezi hangárem a zpevněnými letištními plochami. Navržené zařízení je založeno na konstrukci s dvojitým rámem (paralelogramem), kde zdvih je řešen hydraulickými přímočarými motory. Podvozek je čtyřkolového typu, přičemž zadní kola jsou sestavena dvojmontáží a jsou poháněna rotačním hydromotorem. Způsob uchycení vrtulníku jsme zvolili v podobě nástavců se speciálně tvarovanými sedly.

Pro samotné vypracování návrhu bylo zapotřebí vybrat typ vrtulníku odpovídající kritériím zadání (hmotnost vrtulníku 2000 kg). K tomu jsme potřebovali hmotnostní údaje (maximální vzletové hmotnosti) vrtulníků nabízených společnostmi Bell Helicopter Textron. V úvahu přicházely tři typy, ze kterých jsme po rozboru jejich hmotností vybrali typ 427. Na základě výběru odpovídajícího vrtulníku, resp. jeho technické dokumentace byly zjištěny rozměry jeho podvozku podstatné k určení rozměrů námi konstruovaného manipulačního zařízení. Vznikl tak i výkres podvozku. Dále bylo nutné zvažovat, jaká v praxi bude jeho provozní hmotnost dle varianty jeho vybavení. Pro návrh konstrukčního řešení jsme pak brali v potaz variantu s nejvyšší hmotností, kterou jsme získali přičtením paliva k prázdné hmotnosti vyčtené z váhových protokolů. Následně jsme určili, jak bude zatěžován horní rám, a pustili se do pevnostního výpočtu. V praxi se obecné rámy řeší metodou konečných prvků (MKP). Tato metoda je však nad rámec bakalářské práce, proto jsme pro základní určení profilů rámu přistoupili k řešení pomocí prosté metody. Dále jsme se zaměřili na výpočty průměru čepů a vahadel mechanismu. Bylo možné se věnovat i dalším pevnostním výpočtům, ale vzhledem k rozsahu práce jsme vybrali jen jejich stěžejní část. Také bychom se mohli zabývat návrhem hydraulického okruhu, což už by také bylo nad rámec bakalářské práce.

Na základě uvedených výpočtů tedy bylo zkonstruováno manipulační zařízení a vytvořen jeho sestavný výkres. V příloze uvádíme jak tento výkres, tak i výkres podvozku vytvořený na základě technické dokumentace vrtulníku.

Seznam zdrojů

- [1] *Flight Manual (BHT-427-FM-2)*. Fort Worth: Bell Helicopter a Textron Company, 2007, 8th revision.
- [2] FLORIAN, Z., ONDRÁČEK, E., PŘIKRYL, K. *Mechanika těles – statika*. Brno: CERM, 2003, 1. vydání.
- [3] HOSNEDL, S., KRÁTKÝ, J. *Příručka strojního inženýra (Obecné strojní části I)*. Brno: Computer Press, 1999, 1. vydání.
- [4] JANÍČEK, P., et al. *Mechanika těles (Pružnost a pevnost I)*. Brno, CERM, 2004, 1. vydání.
- [5] LEINVEBER, J., VÁVRA, P. *Strojnické tabulky*. Úvaly: Albra, 2008, 4. doplněné vydání.
- [6] *Maintenance Manual (BHT-427-MM)*. Fort Worth: Bell Helicopter a Textron Company, 2009, 11th revision.
- [7] SHIGLEY, J. E., MISCHKE, C. R., BUDYNAS, R. G. *Konstruování strojních součástí*. Brno: VUTIUM, 2010, 1. vydání.
- [8] SVOBODA, P., BRANDEJS, J., PROKEŠ, F. *Výběry z norem pro konstrukční cvičení*. Brno: CERM, 2006, 1. vydání.
- [9] ZELENÝ, J. *Stavba strojů – strojní součásti*. Brno, Computer Press, 2007, dotisk 2. vydání.
- [10] *Airliners.net* [online]. Dostupné z WWW: <<http://www.airliners.net/aircraft-data/>>.
- [11] *Brackett Aircraft Company* [online]. Dostupné z WWW: <<http://www.brackettaircraft.com/>>.
- [12] *Choppet Spotter* [online]. Dostupné z WWW: <<http://www.chopperspotter.com/>>.
- [13] *Helitowcart.com* [online]. Dostupné z WWW: <<http://www.helitowcart.com/default.htm>>.
- [14] *Flugzeuginfo.net* [online]. Dostupné z WWW: < <http://www.flugzeuginfo.net/>>.
- [15] *Paravion Technology* [online]. Dostupné z WWW: <<http://www.paravion.com/products/helicopter/helicopter.htm>>.
- [16] *SKF* [online]. Dostupné z WWW: <http://www.skf.com/files/264280.pdf>.
- [17] *Wackerbauer* [online]. Dostupné z WWW: <<http://www.helilifter.de/helilifter.helilifter-hubschrauber.0.html>>.

Seznam použitých zkratek a symbolů

a	délka vahadla (str. 34)	(mm)
a	šířka vahadla (str. 54)	(mm)
b	šířka pouzdra	(mm)
c	rozteč čepů horního rámu (str. 34)	(mm)
c	rameno momentu (str. 54)	(mm)
$c_{II\check{c}}$	součinitel snížení napětí pro míjivé zatížení dle materiálu čepu	-
c_{IIV}	součinitel snížení napětí pro míjivé zatížení dle materiálu vahadla	-
$d_{\check{c}}$	průměr čepu	(mm)
E	modul pružnosti v tahu	(MPa)
F	dovolená zatěžující síla	(N)
F_1	síla působící na horní rám od zatížení přední příčnou trubkou	(N)
F_2	síla působící na horní rám od zatížení zadní příčnou trubkou	(N)
F_c	zatížení čepového spoje v bodě C	(N)
F_{kr}	kritická síla	(N)
F_p	síla působící na píst	(N)
F_{RA}	reakce v čepovém spoji	(N)
G	tíha rámu	(N)
G_V	tíha vrtulníku pro jednotlivé varianty	(N)
g	délka vahadla	(mm)
h	výška vahadla	(mm)
i	počet stupňů volnosti soustavy (str. 34)	-
i	poloměr kvadratického momentu (str. 56)	-
i_v	počet stupňů volnosti volného tělesa	-
j	rozteč čepů dolního rámu	(mm)
J_{min}	kvadratický moment průřezu	(mm ⁴)
k	součinitel bezpečnosti	-
k_k	zvolený součinitel bezpečnosti	-
l_0	redukovaná délka prutu	(mm)
l	rozteč os symetrií příčných trubek (str. 32)	(mm)
l	skutečná délka prutu (str. 56)	(mm)

l_P	vzdálenost těžiště vrtulníku od osy symetrie přední příčné trubky	(mm)
l_Z	vzdálenost těžiště vrtulníku od osy symetrie zadní příčné trubky	(mm)
Mo_I	ohybový moment působící v řezu I	(Nmm)
Mo_{II}	ohybový moment působící v řezu II	(Nmm)
Mo_{III}	ohybový moment působící v řezu III	(Nmm)
Mo_{IV}	ohybový moment působící v řezu IV	(Nmm)
Mo_V	ohybový moment působící v řezu V	(Nmm)
Mo_{max}	maximální ohybový moment	(Nmm)
m	celková hmotnost	(lb)
m_{LP}	hmotnost na levé přední podpoře	(lb)
m_{PP}	hmotnost na pravé přední podpoře	(lb)
m_{ZP}	hmotnost na zadní podpoře	(lb)
N_I	normálová složka v řezu I	(N)
N_{II}	normálová složka v řezu II	(N)
N_{III}	normálová složka v řezu III	(N)
N_{IV}	normálová složka v řezu IV	(N)
N_V	normálová složka v řezu V	(N)
p_{D_n}	dovolený tlak v neotočné části	(MPa)
p_{D_o}	dovolený tlak v otočné části	(MPa)
R_{Ax}	reakce na vnější zatížení	(N)
R_{Ay}	reakce na vnější zatížení	(N)
R_{B_x}	reakce na vnější zatížení	(N)
R_{B_y}	reakce na vnější zatížení	(N)
R_{C_x}	reakce na vnější zatížení	(N)
R_{C_y}	reakce na vnější zatížení	(N)
R_{D_x}	reakce na vnější zatížení	(N)
R_{D_y}	reakce na vnější zatížení	(N)
R_{E_x}	reakce působící na přední kolo ve směru osy x	(N)
R_{E_y}	reakce působící na přední kolo ve směru osy y	(N)
R_F	reakce působící na zadní kolo	(N)
R_{P_x}	reakce od vnějšího silového působení v bodě P ve směru osy	(N)

R_{Py}	reakce od vnějšího silového působení v bodě P ve směru osy y	(N)
R_Z	reakce od vnějšího silového působení v bodě Z ve směru osy y	(N)
r_P	rameno přední podpory od referenční roviny FS 0	(in)
r_Z	rameno zadní podpory od referenční roviny FS 0	(in)
S	plocha průřezu vahadla	(mm ²)
S_{ζ}	plocha průřezu čepu	(mm ²)
S_D	plocha průřezu obdélníkového profilu dolního rámu	(mm ²)
S_H	plocha průřezu obdélníkového profilu horního rámu	(mm ²)
S_n	otlačovaná plocha ve vahadle	(mm ²)
S_o	otlačovaná plocha kluzného pouzdra	(mm ²)
T	vzdálenost ramena těžiště od referenční roviny FS 0	(in)
T_I	tečná složka v řezu I	(N)
T_{II}	tečná složka v řezu II	(N)
T_{III}	tečná složka v řezu III	(N)
T_{IV}	tečná složka v řezu IV	(N)
T_V	tečná složka v řezu V	(N)
W_O	průřezový modul v ohybu	(mm ³)
W_{OD}	průřezový modul v ohybu obdélníkového profilu dolního rámu	(mm ³)
W_{OH}	průřezový modul v ohybu obdélníkového profilu horního rámu	(mm ³)
x_I	vzdálenost zkoumané oblasti řezu I	(mm)
x_{II}	vzdálenost zkoumané oblasti řezu II	(mm)
x_{III}	vzdálenost zkoumané oblasti řezu III	(mm)
x_{IV}	vzdálenost zkoumané oblasti řezu IV	(mm)
x_V	vzdálenost zkoumané oblasti řezu V	(mm)
α	úhel natočení vahadla	°
β	úhel síly působící na píst	°
η	počet omezených deformačních parametrů	-
λ	štíhlost prutu	-
λ_m	mezní štíhlost	-
ξ	počet stupňů volnosti odebraných stykovou vazbou	-
σ_{Dt}	dovolené napětí v tahu	(MPa)
$\sigma_{Dt\zeta}$	dovolené napětí v tahu čepu	(MPa)

σ_{DtV}	dovolené napětí v tahu vahadla	(MPa)
σ_{DR}	kombinované napětí dolního rámu	(MPa)
σ_{HR}	kombinované napětí horního rámu	(MPa)
σ_{Kt}	mez kluzu materiálu	(MPa)
$\sigma_{Kt\check{c}}$	mez kluzu pro materiál čepu	(MPa)
σ_{kr}	napětí na mezi vzpěrné pevnosti	(MPa)
σ_{OD}	ohybové napětí dolního rámu	(MPa)
σ_{OH}	ohybové napětí horního rámu	(MPa)
σ_{tD}	napětí v tahu dolního profilu	(MPa)
σ_{tH}	napětí v tahu horního profilu	(MPa)
τ_{DS}	dovolené napětí ve smyku	(MPa)

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Přistávací a vzletová plošina s vrtulníkem Bell 412 HP	11
Obr. 1.2 Manipulační kolečka na vrtulníku EC 120-B	12
Obr. 2.1 Rám s koly od firmy Brackett [11]	13
Obr. 2.2 Chopper Spotter Model 4 [12]	14
Obr. 2.3 Helitowcart Model V201 a vrtulník MD-500 [13]	15
Obr. 2.4 Manipulační zařízení Heliporter firmy Paravion Technology	17
Obr. 2.5 Manipulační zařízení firmy Wackerbauer	17
Obr. 4.1 Bell 206L [14]	22
Obr. 4.2 Bell 206LT [10]	22
Obr. 4.3 Bell 407 [10]	23
Obr. 4.4 Bell 427 [10]	24
Obr. 5.1 Umístění hydraulických zvedáků při vážení [6]	26
Obr. 5.2 Referenční rovina FS 0 a vzdálenosti zvedacích bodů od roviny FS 0 [6]	27
Obr. 5.3 Vzdálenost polohy těžiště od roviny STA 80 podle varianty I až IV	29
Obr. 6.1 Terminologie ližinového podvozku [6]	30
Obr. 6.2 Souřadný systém	31
Obr. 6.3 Schéma zatížení příčných trubek	31
Obr. 6.4 Reakce příčných trubek	31
Obr. 7.1 Zvolené konstrukční řešení	33
Obr. 7.2 Schéma zdvihacího mechanismu	34
Obr. 7.3 Člen 2	35
Obr. 7.4 Člen 4	35
Obr. 7.5 Člen 3	35
Obr. 8.1 Zatížení horního rámu	38
Obr. 8.2 Řez I – poloha I	38
Obr. 8.3 Řez II – poloha I	39
Obr. 8.4 Řez III – poloha I	39
Obr. 8.5 Řez IV – poloha I	40
Obr. 8.6 Řez V – poloha I	41
Obr. 8.7 Nejvyšší zatížení horního rámu – poloha III	43
Obr. 8.8 Zatížení dolního rámu	45
Obr. 8.9 Řez I – poloha I	46
Obr. 8.10 Řez II – poloha I	47
Obr. 8.11 Řez III – poloha I	47
Obr. 8.12 Řez IV – poloha I	48
Obr. 8.13 Řez V – poloha I	49
Obr. 8.14 Nejvyšší zatížení dolního rámu – poloha I	51
Obr. 8.15 Rozmístění čepů	53
Obr. 8.16 Zatížení čepu v bodě C – poloha I	53

Seznam tabulek

Tab. 4.1 Hmotnosti vrtulníků [10]	25
Tab. 5.1 Převodní vztahy [7]	27
Tab. 5.2 Váhový protokol – varianta I [1]	28
Tab. 5.3 Váhový protokol – varianta II [1]	28
Tab. 5.4 Váhový protokol – varianta III [1]	28
Tab. 5.5 Váhový protokol – varianta IV [1]	28
Tab. 6.1 Výsledné reakce příčných trubek	32
Tab. 7.1 Polohy mechanismů	36
Tab. 7.2 Výsledné reakce ve vazbách	37
Tab. 8.1 Zatížení horního rámu	42
Tab. 8.2 Výsledné reakce na kola	46
Tab. 8.3 Zatížení dolního rámu	50

Seznam příloh

Příloha P1 - Příklad dosazení matice

Příloha P2 - Manipulační zařízení

Název výkresu	Číslo výkresu
POJÍZDNÉ A ZVEDACÍ ZAŘÍZENÍ	PZZ-0-S0
KUSOVNÍK	PZZ-K-4/S0
PODVOZEK BELL 427	BHT-0-427

Příloha P1

Příklad dosazení matice

Parametry (Poloha I)

$a=320,5$ mm; $b=80$ mm; $c=1652,59$ mm; $d=384,5$ mm; $e=304,5$ mm; $f=1145$ mm;
 $g= 320,5$ mm; $F_1=4652,06$ N; $F_2=7957,94$ N; $G=650$ N; $\alpha=23,93^\circ$; $\beta=14,12^\circ$.

$$A = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin(23,93) \cdot 320,5 & -\cos(23,93) \cdot 320,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & \cos(14,12) \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & \sin(14,12) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1652,59 & 0 & 0 & -\sin(14,12) \cdot (1652,59 + 304,5) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sin(23,93) \cdot 320,5 & -\cos(23,93) \cdot 320,5 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$b = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 4652,06 + 7957,94 + 650 \\ 4652,06 \cdot 80 - 7957,94 \cdot (1652,59 + 384,5) - 650 \cdot (1145 - 80) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad x = \begin{pmatrix} 9331,198 \\ 4140,815 \\ 9331,198 \\ 4140,815 \\ 9738,772 \\ 4321,681 \\ 9738,772 \\ 4321,681 \\ 19664,175 \end{pmatrix}$$

Příloha P2

Manipulační zařízení



