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

NŮŽKOVÝ MECHANISMUS ZDVIHACÍ PLOŠINY

SCISSOR LIFT TABLE MECHANISM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — VÁCLAV GRYGAŘÍK

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. JAROSLAV KAŠPÁREK, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Václav Grygařík

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

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

Nůžkový mechanismus zdvihací plošiny

v anglickém jazyce:

Scissor Lift Table Mechanism

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh a pevnostní kontrola nůžkového mechanismu zdvihací plošiny. Základní technické parametry:
- výška zdvihu 6 m,
- nosnost 250 kg,
- rozměry pracovního koše 750 x 1600 mm.

Cíle bakalářské práce:

Technická zpráva obsahující:
- koncepce navrženého řešení,
- funkční a pevnostní výpočet nůžkového mechanismu
- další výpočty dle vedoucího BP

Výkresová dokumentace obsahující:
- celková sestava zařízení
- podsestavy a výrobní výkresy dle pokynů vedoucího BP

Seznam odborné literatury:

1. SHIGLEY, J.E. - MISCHKE, Ch.R. - BUDYNAS R.G.: Konstruování strojních součástí, Vydalo VUT v Brně, nakladatelství VUTIUM 2010, ISBN 978-80-214-2629-0
2. ŠKOPÁN, M.: Hydraulické pohony strojů, elektronická skripta VUT v Brně 2009
3. Firemní literatura

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jaroslav Kašpárek, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 16.10.2011

L.S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc. Ředitel ústavu	prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc. Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce je zaměřena na funkční a pevnostní výpočet nůžkového mechanismu zdvihací plošiny s rozměry pracovního koše 1 600 x 750 mm, nosností 250 kg a s požadovanou výškou zdvihu 6 m. Cílem práce je vypracování výkresu sestavy celkového zařízení, výkresů podsestav a vypracování výrobních výkresů jednotlivých součástí.

KLÍČOVÁ SLOVA

nůžkový mechanismus, zdvihací plošina, pracovní koš, hydraulická pohonná jednotka, mechanická pohonná jednotka

ABSTRACT

This thesis is focused on functional and strength calculation of the scissor mechanism of lift table with dimensions of working cage 1 600 x 750 mm, capacity 250 kg and with required lift height 6 m. The aim of this work is development of drawings of the overall assembly, drawings of the subassemblies and development of the manufacturing drawings.

KEYWORDS

scissor mechanism, lifting platform, working cage, hydraulic power unit, mechanical power unit

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

GRYGAŘÍK, V. *Nůžkový mechanismus zdvihací plošiny.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 73 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaroslav Kašpárek, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jaroslava Kašpárka, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 21. května 2012 ……..……..……..

Václav Grygařík

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Jaroslavu Kašpárkovi, Ph.D. za odborné vedení práce a poskytnutí podkladů k technickým údajům týkajících se problematiky nůžkových mechanismů.

OBSAH

Úvod **15**

1 Koncepce navrženého řešení **16**

1.1 Hlavní části nůžkového mechanismu 16
1.1.1 Základní rám 16
1.1.2 Nůžkový mechanismus 17
1.1.3 Pracovní koš zdvihací plošiny 18
1.1.4 Pohonná jednotka 18
1.2 Zvolené konstrukční řešení 19

2 Funkční a pevnostní výpočet nůžkového mechanismu **21**

2.1 Způsoby zatížení mechanismu 21
2.1.1 I. Způsob zatížení 22
2.1.2 II. Způsob zatížení 23
2.1.3 III. způsob zatížení 24
2.2 Uvolnění nosníků nůžkového mechanismu 25
2.2.1 Tělesa I a II 25
2.2.2 Tělesa III a IV 28
2.2.3 Tělesa V a VI 32
2.2.4 Tělesa VII, VIII, IX, X a XI 36
2.3 Výsledné vnitřní účinky 45
2.3.1 Výsledné vnitřní účinky VII. tělesa 45
2.3.2 Výsledné vnitřní účinky VIII. tělesa 48
2.3.3 Výsledné vnitřní účinky IX. tělesa 50
2.3.4 Výsledné vnitřní účinky X. tělesa 53
2.4 Výpočet průměrů čepů 56
2.4.1 Výpočet smykových sil 56
2.4.2 Výpočet průměru čepu v místě N 57
2.4.3 Výpočet průměru čepu v místě O 57
2.4.4 Výpočet průměru čepu v místě V 58
2.5 Návrh profilu nosníku 58
2.6 Pevnostní kontrola čepů 60
2.6.1 Kontrola čepů na otlačení 60

2.7 Kontrola nosníků vůči ztrátě vzpěrné stability 61
2.7.1 Kontrola VII. nosníku 61
2.7.2 Kontrola IX. nosníku 62
2.8 Volba hydraulického válce 63

Závěr 65

Použité informační zdroje 66

Seznam použitých zkratek a symbolů 68

Seznam příloh 73

ÚVOD

Stroj je technický systém, který člověk sestrojil za využití přírodních zákonů, pro ulehčení své tělesné nebo duševní práce a k zvýšení produktivity práce.

Od dob průmyslové revoluce byl obrovský zájem o stroje všeho druhu. S rozvojem průmyslu a strojírenství začala být lidská práce nahrazována výkonem strojů. Lidé tak mohli namáhavou práci přenechat technickým zařízením, které požadované úkony zvládaly rychleji, přesněji a efektivněji.

Jednou skupinou strojů jsou ty, které pomáhají lidem vyzdvihovat břemena nebo umožňují práci ve výškách. Tato skupina technických zařízení se nazývá zdvihadla. Patří zde například výtahy, kladkostroje, jeřáby a také nůžkové zdvihací plošiny. Nůžková zdvihací plošina transportuje břemeno pomocí nůžkového mechanismu, jehož výpočet je předmětem mé bakalářské práce.

Nůžkový mechanismus má díky své jednoduché konstrukci uplatnění v různých odvětvích lidské činnosti. Jeho výhodou je nenáročná údržba, vysoká spolehlivost a kompaktní rozměry. Nůžkový mechanismus se používá nejčastěji u zdvihacích pracovních plošin, ale také u automobilových zvedáků, a pracovních stolů. V současné době mají zdvihací plošiny využití např. při manipulaci s břemeny ve skladech a expedicích, při řešení bezbariérového přístupu do budov a prostranství pro občany se sníženou pohyblivostí a také při náhradě výtahů. Ovládání takovéto plošiny je poměrně snadné a díky řadě bezpečnostních prvků bezpečné.

1 KONCEPCE NAVRŽENÉHO ŘEŠENÍ

1.1 HLAVNÍ ČÁSTI NŮŽKOVÉHO MECHANISMU

Mezi hlavní části zdvihací plošiny patří:

- základní rám,
- nůžkový mechanismus,
- horní rám s pracovním košem,
- pohonná jednotka (hydraulická nebo mechanická).

1.1.1 ZÁKLADNÍ RÁM

Nůžková zdvihací plošina může být vybavena základním rámem s pojezdovými koly umožňující snadné přemístění nůžkové zdvihací plošiny. Nebo může být základní rám pevně připevněn k rámu např. nákladních automobilů. Takovéto automobily mají široké uplatnění např. při opravách elektrické sítě, při opravě a servisu semaforů apod.

a) *b)*

Obr. 1 a) Renault Midlum – NP vybaven nůžkovou zdvihací plošinou [16], b) nůžková zdvihací plošina se základním rámem s pojezdovými koly [17].

1.1.2 NŮŽKOVÝ MECHANISMUS

Nůžkový mechanismus se skládá ze dvou kloubově uložených rámů, kde jsou jednotlivé části mechanismu spojeny čepy. Nůžkový mechanismus je spojen se spodním rámem a rovněž i s horním rámem na dvou místech ložisky. Na protější straně se nacházejí vodící kladky, které pojíždějí v kolejnicích uložených v podlaze v případě, když se horní pracovní plošina pohybuje. Pohyb horního rámu s pracovním košem, který se pohybuje souběžně a kolmo k základnímu rámu, je způsoben roztahováním nůžek.

Podle pracovního zdvihu může nůžkový mechanismus:

- jednonůžkový,
- dvojnůžkový,
- trojnůžkový,
- vícenůžkový,
- tandemový.

a)

b)

c)

Obr. 2 a) Jednonůžkový mechanismus [18], b) tandemový nůžkový mechanismus [8], c). vícenůžkový mechanismus [10].

1.1.3 PRACOVNÍ KOŠ ZDVIHACÍ PLOŠINY

Pracovní koše zdvihací plošiny jsou vybaveny ochranným rámem a mohou být:

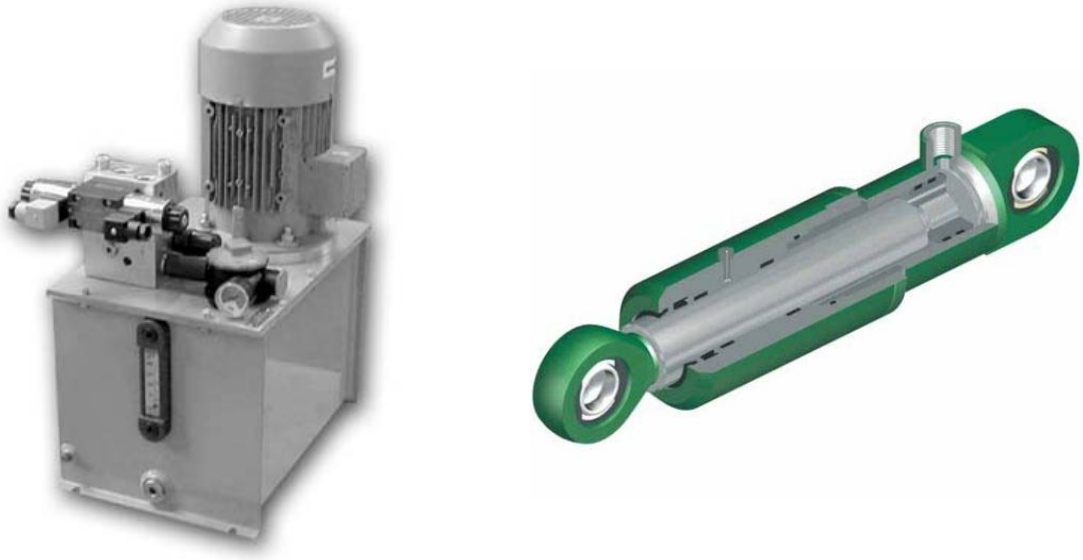
- otočné, viz obrázek 1a),
- s výsuvnou plošinou pro zlepšení manipulovatelnosti v prostoru, viz obrázek 1b),
- pevné (nepohyblivé).

1.1.4 POHONNÁ JEDNOTKA

Pohonnou jednotkou nůžkového mechanismu může být:

- hydraulická pohonná jednotka,
- mechanická pohonná jednotka.

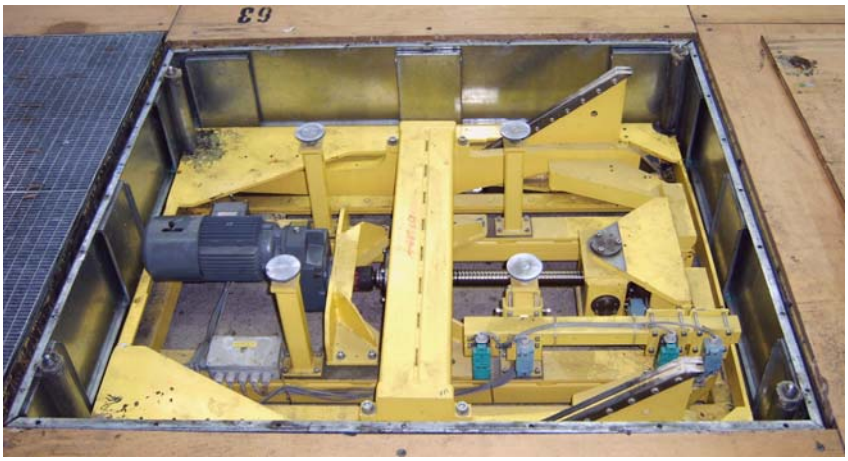
Hydraulická jednotka je složena z hydraulického válce, hydraulického agregátu, bezpečnostních prvků v hydraulickém obvodu, hadic a nastavovacích a ovládacích prvků. Pohonné hydraulické jednotky jsou jednočinné, to znamená, že zařízení spotřebovává elektrickou energii pouze při zvedání, spouštění je již bez chodu elektromotoru.



a) *b)*

Obr. 3 a) Hydraulická pohonná jednotka [11], b) jednočinný hydraulický válec[6].

Mechanická pohonná jednotka je složena z matice a trapézového šroubu poháněného elektromotorem. Tento způsob pohonu je vhodný především díky své jednoduchosti.



Obr. 4 Mechanická pohonná jednotka [vlastní zdroj].

1.2 ZVOLENÉ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Pro řešení mechanismu nůžkové zdvihací plošiny je potřeba kromě zadaných parametrů zvolit další předpoklady.

Pracovní koš bude nepohyblivý s nepohyblivou pracovní plošinou. Tento předpoklad je důležitý pro rozložení zatížení na pracovní ploše a výpočet sil v nůžkovém mechanismu. Hmotnost pracovního koše se předpokládá na 300 kg.

Pohon mechanismu bude pomocí hydraulického válce, popř. dvou hydraulických válců. Velikost hydraulického válce je určena podle síly potřebné ke zvednutí břemene.

Pro požadovanou výšku zdvihu 6 m a rozměry pracovní plošiny je volen **pětinůžkový mechanismus** znázorněný na obrázku 5. Délka ramen mechanismu je volena tak, aby ve složené poloze nepřesáhla délku pracovního koše a v maximální poloze působila ramena v těžišti pracovního koše. (viz obrázek 5).

Výpočet pohyblivosti soustavy těles se provede na pravé části mechanismu. Pro určení stupňů volnosti je použito následujícího vztahu:

$$n = 3 \cdot (m-1) - 2 \cdot d_2 - d_1 \qquad (1)$$

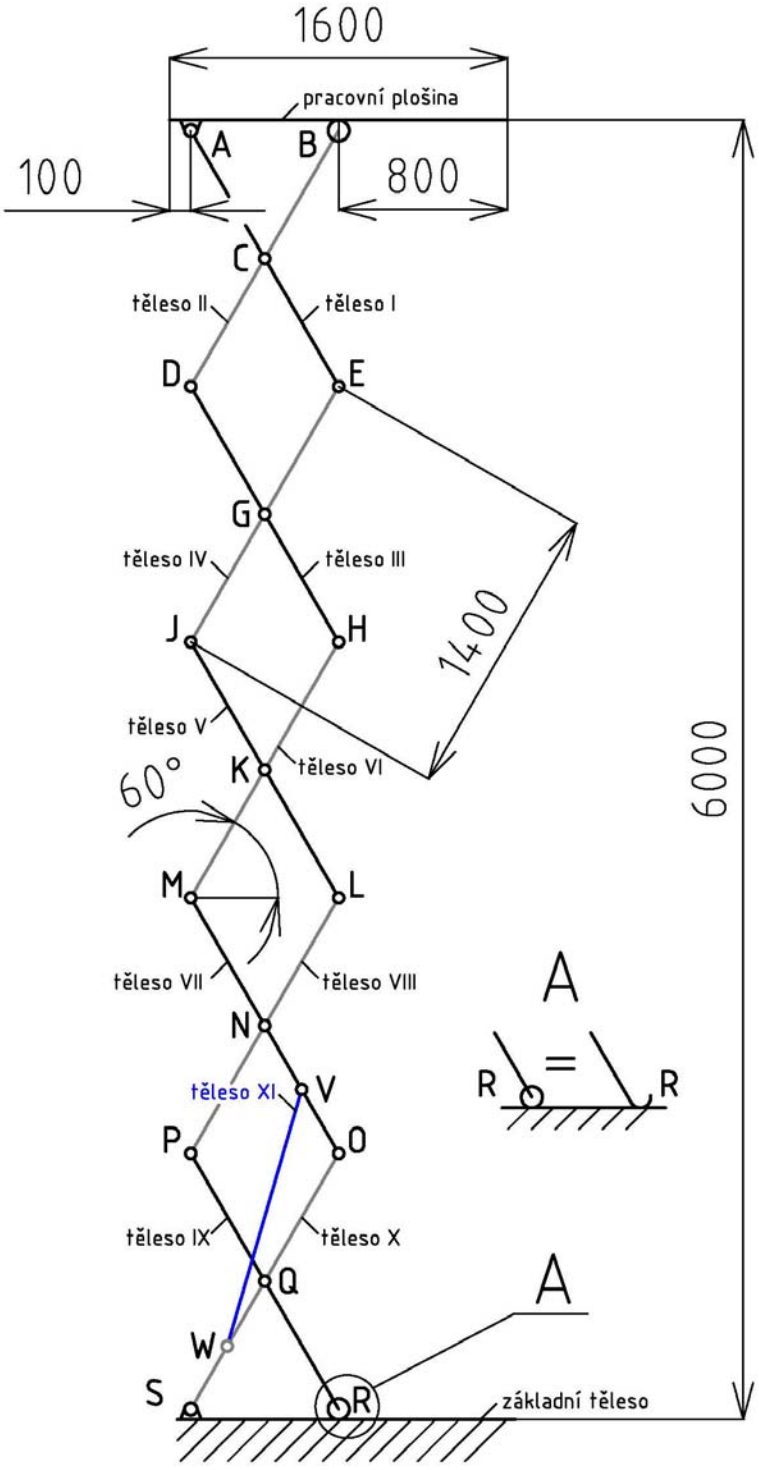
Kde n je počet stupňů volnosti, m je počet těles včetně rámu, d_2 je počet rotačních, posuvných a valivých vazeb a d_1 je počet obecných vazeb.

Při určování stupňů volnosti je nahrazeno spojení valivého tělesa s ramenem mechanismu obecnou vazbou, viz detail A na obrázku 2. Tato změna zjednoduší výpočet a neovlivní výsledek.

$$n = 3 \cdot (13-1) - 2 \cdot 17 - 2$$

$n = 0$

Soustava má 0 stupňů volnosti, avšak těleso označené modrou barvou na obrázku 2 představuje hydraulický válec. To znamená, že při změně vzdálenosti ok hydraulického válce se bude celá soustava pohybovat.



Obr. 5 Schématické znázornění konstrukce nůžkového mechanismu.

2 FUNKČNÍ A PEVNOSTNÍ VÝPOČET NŮŽKOVÉHO MECHANISMU

Pro zjednodušení je úloha řešena jako rovinná. Tíhová síla pracovního koše F_{Gk} je přenášena oběma páry nůžkového mechanismu stejnou měrou. Z tohoto předpokladu se počítá s polovinou celkové tíhové síly pracovního koše F_{Gk}.

$$F_G = \frac{F_{Gk}}{2} = \frac{m_k \cdot g}{2} \tag{2}$$

Kde F_G je polovina tíhové síly pracovního koše, m_k je hmotnost pracovního koše a g je tíhové zrychlení.

$$F_G = \frac{300 \cdot 9{,}81}{2}$$

$$F_G = 1\,471{,}5\ N \cong 1\,500\ N$$

$$F = m \cdot g \tag{3}$$

Kde F je síla od hmotnosti břemene a m je hmotnost břemene.

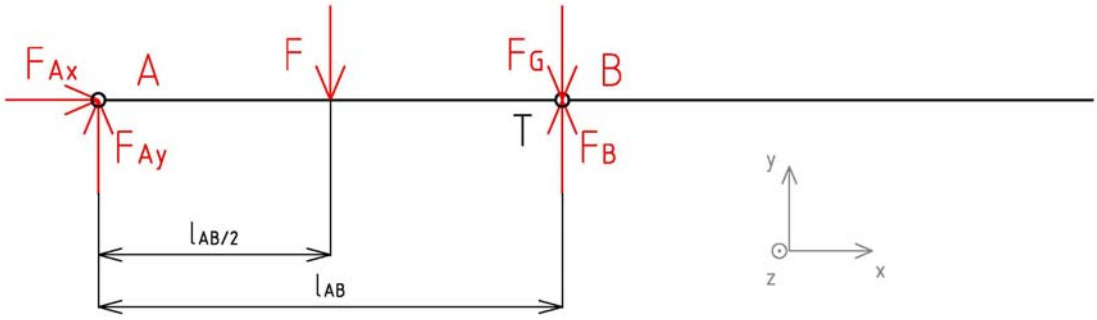
$$F = 250 \cdot 9{,}81$$

$$F = 2\,452{,}5\ N \cong 2\,500\ N$$

2.1 ZPŮSOBY ZATÍŽENÍ MECHANISMU

Způsob zatížení mechanismu znamená v podstatě rozložení sil na ploše pracovního koše. Ve směru osy x nepůsobí žádné zatížení, síla F_{Ax} je nulová. Proto rovnice statické rovnováhy ve směru x nebudou zapisovány.

2.1.1 I. ZPŮSOB ZATÍŽENÍ



Obr. 6 I. způsob zatížení mechanismu.

Vzdálenost mezi body A a B je $l_{AB} = 700\ mm$.

$$\sum F_y = 0: \quad F_{Ay} - F - F_G + F_B = 0 \tag{4}$$

$$\sum M_{zA} = 0: \quad -F \cdot \frac{l_{AB}}{2} - F_G \cdot l_{AB} + F_B \cdot l_{AB} = 0 \tag{5}$$

Kde F_{Ay} je síla v podpoře A ve směru osy y a F_B je síla v podpoře B.

Z rovnice (5) se určí velikost síly F_B:

$$-F \cdot \frac{l_{AB}}{2} - F_G \cdot l_{AB} + F_B \cdot l_{AB} = 0$$

Po úpravě:

$$\frac{-F}{2} - F_G + F_B = 0$$

$$F_B = \frac{F}{2} + F_G$$

$$F_B = \frac{2\,500}{2} + 1\,500$$

$$F_B = 2\,750\ N$$

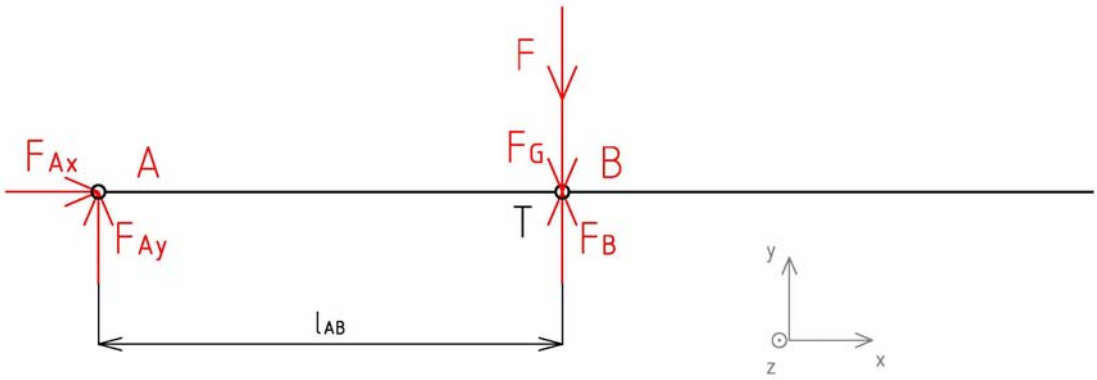
Z rovnice (4) se určí velikost síly F_{Ay}:

$$F_{Ay} = F + F_G - F_B$$

$$F_{Ay} = 2\,500 + 1\,500 - 2\,750$$

$$F_{Ay} = 1\,250\ N$$

2.1.2 II. ZPŮSOB ZATÍŽENÍ



Obr. 7 II. způsob zatížení mechanismu.

$$\sum F_y = 0: \quad F_{Ay} - F - F_G + F_B = 0 \tag{6}$$

$$\sum M_{zA} = 0: \quad -F \cdot l_{AB} - F_G \cdot l_{AB} + F_B \cdot l_{AB} = 0, \tag{7}$$

Z rovnice (7) se určí velikost síly F_B:

$$-F \cdot l_{AB} - F_G \cdot l_{AB} + F_B \cdot l_{AB} = 0$$

Po úpravě:

$$-F - F_G + F_B = 0$$

$$F_B = F + F_G$$

$$F_B = 2\,500 + 1\,500$$

$$F_B = 4\,000\ N$$

Z rovnice (6) se určí velikost síly F_{Ay}:

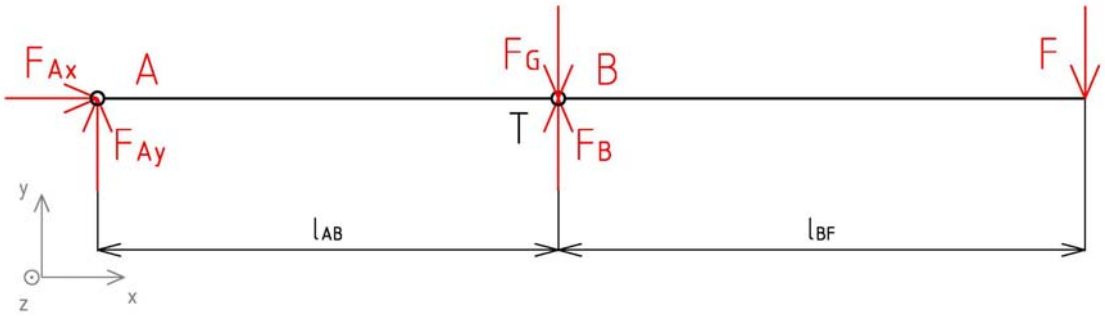
$$F_{Ay} = F + F_G - F_B$$

$$F_{Ay} = 2\,500 + 1\,500 - 4\,000$$

$$F_{Ay} = 0\ N$$

Ve skutečnosti tento případ nenastane, protože výrobními odchylkami nemusí tíhová síla pracovního koše působit nad vazbou v místě B.

2.1.3 III. ZPŮSOB ZATÍŽENÍ



Obr. 8 III. způsob zatížení mechanismu.

Vzdálenost mezi bodem *B* a silou *F* je $l_{BF} = 800\ mm$.

$$\sum F_y = 0: \quad F_{Ay} - F - F_G + F_B = 0 \tag{8}$$

$$\sum M_{zA} = 0: \quad -F \cdot l_{AB} - F_G \cdot l_{AB} + F_B \cdot l_{AB} = 0, \tag{9}$$

Z rovnice (9) se určí velikost síly F_{Ay}:

$$F_{Ay} = -F \cdot \frac{l_{BF}}{l_{AB}}$$

$$F_{Ay} = -2\,500 \cdot \frac{800}{700}$$

$$F_{Ay} = -2\,857{,}14\ N$$

Z rovnice (8) se určí velikost síly F_B:

$$F_B = F + F_G - F_{Ay}$$

$$F_B = 2\,500 + 1\,500 - \left(-2\,857{,}14\right)$$

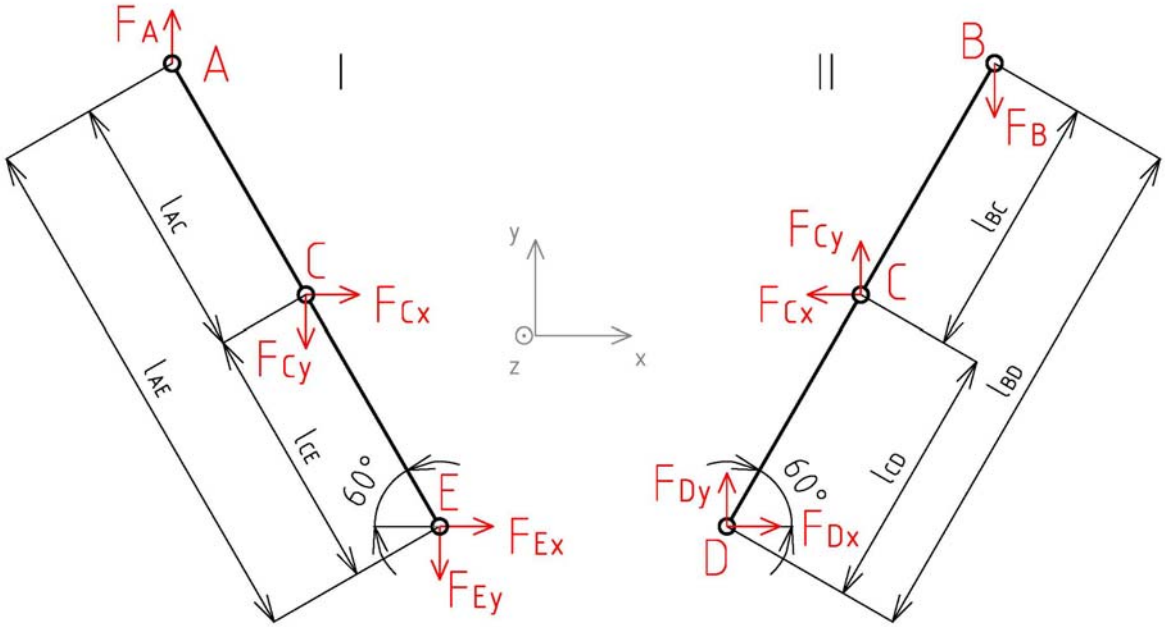
$$F_B = 6\,857{,}14\ N$$

Orientace síly F_{Ay} je otočena, a protože ve směru *x* není působení žádné síly, je možno psát $\boldsymbol{F_{Ay} = F_A}$. Toto zatížení je nejnebezpečnější a bude na něj navrhován nůžkový mechanismus.

2.2 UVOLNĚNÍ NOSNÍKŮ NŮŽKOVÉHO MECHANISMU

Jednotlivé nosníky (tělesa) nůžkového mechanismu jsou uvolněny a popsány rovnicemi statické rovnováhy.

2.2.1 TĚLESA I A II



Obr. 9 tělesa I. a II.

Vzdálenosti jednotlivých bodů se zapíší do rovnic:

$$l_{AE} = l_{BD} = l = 1\,400\ mm$$

$$l_{AC} = l_{CE} = l_{BC} = l_{CD} = \frac{l}{2} = 700\ mm$$

Rovnice statické rovnováhy I. tělesa:

$$\sum F_x = 0: \quad F_{Cx} + F_{Ex} = 0 \tag{10}$$

$$\sum F_y = 0: \quad F_A - F_{Cy} - F_{Ey} = 0 \tag{11}$$

$$\sum M_{zE} = 0: \quad F_{Cy} \cdot l_{CE} \cdot \cos 60° - F_{Cx} \cdot l_{CE} \cdot \sin 60° - F_A \cdot l_{AE} \cdot \cos 60° = 0 \tag{12}$$

Kde F_{Cx} a F_{Cy} jsou síly působící v bodě C a F_{Ex} a F_{Ey} jsou síly působící v bodě E.

Rovnice statické rovnováhy II. tělesa:

$$\sum F_x = 0: \quad -F_{Cx} + F_{Dx} = 0 \tag{13}$$

$$\sum F_y = 0: \quad -F_B + F_{Cy} + F_{Dy} = 0 \tag{14}$$

$$\sum M_{zD} = 0: \quad F_{Cx} \cdot l_{CD} \cdot \sin 60° + F_{Cy} \cdot l_{CD} \cdot \cos 60° - F_B \cdot l_{BD} \cdot \cos 60° = 0 \tag{15}$$

Kde F_{Dx} a F_{Dy} jsou síly působící v bodě D.

$NP = \{F_{Cx}, F_{Cy}, F_{Dx}, F_{Dy}, F_{Ex}, F_{Ey}\}$, kde NP jsou neznámé parametry.

$\mu = 6$, kde μ je počet neznámých parametrů.

$\nu = 6$, kde ν je počet použitelných podmínek statické rovnováhy (počet rovnic).

$\mu = \nu$

$\mu_M + \mu_R \leq \nu_M$, kde μ_M je počet neznámých momentů, μ_R je počet neznámých poloh působení sil a ν_M je počet použitelných podmínek momentové statické rovnováhy.

$0 \leq 2$

Ověřením podmínek je potvrzena řešitelnost soustavy rovnic.

Rovnice (12) a (15) se upraví, sečtou a určí se velikost síly F_{Cy}:

$$F_{Cy} \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° - F_{Cx} \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin 60° - F_A \cdot l \cdot \cos 60° = 0$$

$$F_{Cx} \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin 60° + F_{Cy} \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° - F_B \cdot l \cdot \cos 60° = 0$$

Po úpravě:

$$F_{Cy} \cdot l \cdot \cos 60° - F_B \cdot l \cdot \cos 60° - F_A \cdot l \cdot \cos 60° = 0$$

$$F_{Cy} = F_A + F_B$$

$$F_{Cy} = 2\,857{,}14 + 6\,857{,}14$$

$$F_{Cy} = 9\,714{,}28\ N$$

Z rovnice (12) se určí síla F_{Cx}.

$$F_{Cx} = \frac{F_{Cy} \cdot l_{CE} \cdot \cos 60° - F_A \cdot l_{AE} \cdot \cos 60°}{l_{CE} \cdot \sin 60°} = \frac{F_{Cy} \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° - F_A \cdot l \cdot \cos 60°}{l \cdot \sin 60°}$$

Po úpravě:

$$F_{Cx} = \frac{\frac{F_{Cy}}{2} \cdot \cos 60° - F_A \cdot \cos 60°}{\sin 60°}$$

$$F_{Cx} = \frac{\frac{9\,714{,}28}{2} \cdot \cos 60° - 2\,857{,}14 \cdot \cos 60°}{\frac{1}{2} \cdot \sin 60°}$$

$$F_{Cx} = 2\,309{,}4\ N$$

Z rovnice (10) se určí síla F_{Ex}.

$$F_{Ex} = -F_{Cx}$$

$$F_{Ex} = -2\,309{,}4\ N$$

Z rovnice (11) se určí síla F_{Ey}.

$$F_{Ey} = F_A - F_{Cy}$$

$$F_{Ey} = 2\,857{,}14 - 9\,714{,}28$$

$$F_{Ey} = -6\,857{,}14\ N$$

Z rovnice (13) se určí síla F_{Dx}.

$$F_{Dx} = F_{Cx}$$

$$F_{Dx} = 2\,309{,}4\ N$$

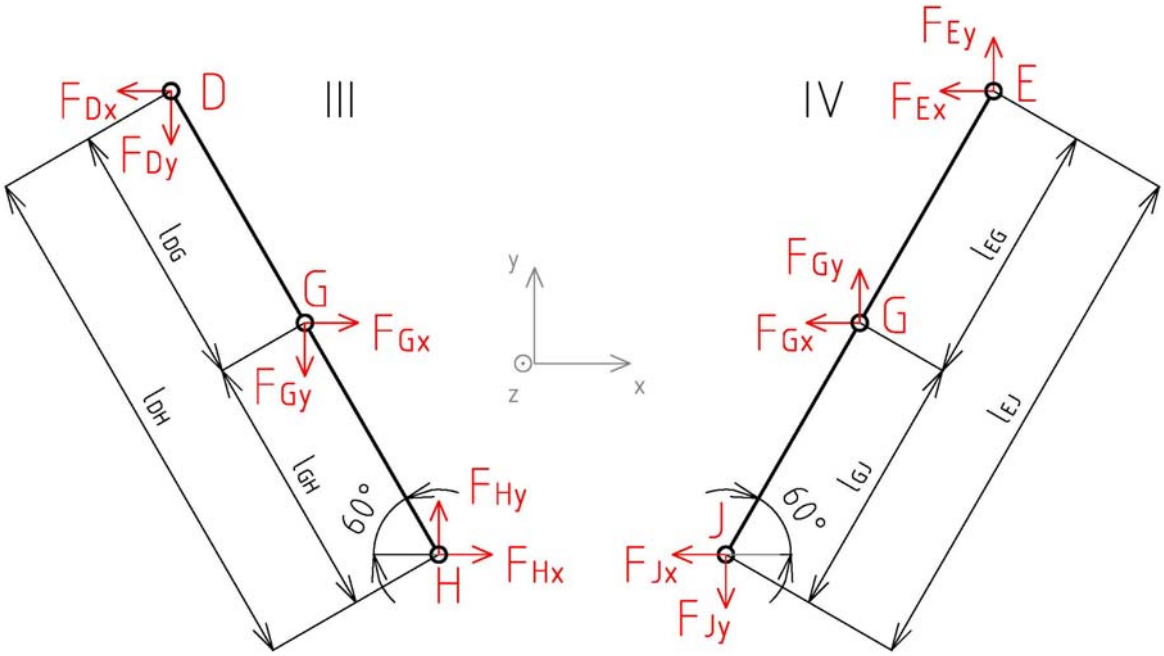
Z rovnice (14) se určí síla F_{Dy}.

$$F_{Dy} = F_B - F_{Cy}$$

$$F_{Dy} = 6\,857{,}14 - 9\,714{,}28$$

$$F_{Dy} = -2\,857{,}14\ N$$

2.2.2 TĚLESA III A IV



Obr. 10 tělesa III. a IV.

Vzdálenosti jednotlivých bodů se zapíší do rovnic:

$$l_{DH} = l_{EJ} = l = 1\,400\ mm$$

$$l_{DG} = l_{GH} = l_{EG} = l_{GJ} = \frac{l}{2} = 700\ mm$$

Rovnice statické rovnováhy III. tělesa:

$$\sum F_x = 0: \quad -F_{Dx} + F_{Gx} + F_{Hx} = 0 \tag{16}$$

$$\sum F_y = 0: \quad -F_{Dy} - F_{Gy} + F_{Hy} = 0 \tag{17}$$

$$\sum M_{zG} = 0: \quad F_{Dx} \cdot l_{DG} \cdot \sin 60° + F_{Dy} \cdot l_{DG} \cdot \cos 60° + F_{Hx} \cdot l_{GH} \cdot \sin 60° + F_{Hy} \cdot l_{GH} \cdot \cos 60° = 0 \tag{18}$$

Kde F_{Gx} a F_{Gy} jsou síly působící v bodě G a F_{Hx} a F_{Hy} jsou síly působící v bodě H.

Rovnice statické rovnováhy IV. tělesa:

$$\sum F_x = 0: \quad -F_{Ex} - F_{Gx} - F_{Jx} = 0 \tag{19}$$

$$\sum F_y = 0: \quad F_{Ey} + F_{Gy} - F_{Jy} = 0 \tag{20}$$

$$\sum M_{zG} = 0: \quad F_{Ex} \cdot l_{EG} \cdot \sin 60° + F_{Ey} \cdot l_{EG} \cdot \cos 60° - F_{Jx} \cdot l_{GJ} \cdot \sin 60° + F_{Jy} \cdot l_{GJ} \cdot \cos 60° = 0 \tag{21}$$

Kde F_{Jx} a F_{Jy} jsou síly působící v bodě J.

$$NP = \{F_{Gx}, F_{Gy}, F_{Hx}, F_{Hy}, F_{Jx}, F_{Jy}\}$$

$$\mu = 6$$

$$\nu = 6$$

$$\mu = \nu$$

$$\mu_M + \mu_R \leq \nu_M$$

$$0 \leq 2$$

Rovnice (18) a (21) se upraví, sečtou a určí se velikost síly F_{Gy}:

$$F_{Dx} \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin 60° + F_{Dy} \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° + F_{Hx} \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin 60° + F_{Hy} \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° = 0$$

$$F_{Ex} \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin 60° + F_{Ey} \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° - F_{Jx} \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin 60° + F_{Jy} \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° = 0$$

Po sečtení:

$$F_{Dx} \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin 60° + F_{Dy} \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° + F_{Hx} \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin 60° + F_{Hy} \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° + F_{Ex} \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin 60° + F_{Ey} \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° - F_{Jx} \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin 60° + F_{Jy} \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° = 0$$

Po úpravě:

$$F_{Dx} \cdot \sin 60° + F_{Dy} \cdot \cos 60° + F_{Hx} \cdot \sin 60° + F_{Hy} \cdot \cos 60° + F_{Ex} \cdot \sin 60° + F_{Ey} \cdot \cos 60° - F_{Jx} \cdot \sin 60° + F_{Jy} \cdot \cos 60° = 0$$

Z obrázku 10 je patrné, že platí:

$$-F_{Dx} = F_{Ex} \text{ a } F_{Hx} = F_{Jx}$$

Po dosazení do předchozí rovnice:

$$F_{Dx} \cdot \sin 60° + F_{Dy} \cdot \cos 60° + F_{Hx} \cdot \sin 60° + F_{Hy} \cdot \cos 60° - F_{Dx} \cdot \sin 60° + F_{Ey} \cdot \cos 60° - F_{Hx} \cdot \sin 60° + F_{Jy} \cdot \cos 60° = 0$$

$$F_{Dy} \cdot \cos 60° + F_{Hy} \cdot \cos 60° + F_{Ey} \cdot \cos 60° + F_{Jy} \cdot \cos 60° = 0$$

Z rovnice (17) se určí síla F_{Hy}

$$F_{Hy} = F_{Dy} + F_{Gy}$$

Z rovnice (20) se určí síla F_{Jy}

$$F_{Jy} = F_{Ey} + F_{Gy}$$

Po úpravě:

$$F_{Dy} \cdot \cos 60° + \left(F_{Dy} + F_{Gy}\right) \cdot \cos 60° + F_{Ey} \cdot \cos 60° + \left(F_{Ey} + F_{Gy}\right) \cdot \cos 60° = 0$$

Další úpravou je vyjádřena síla F_{Gy}:

$$F_{Dy} + F_{Dy} + F_{Gy} + F_{Ey} + F_{Ey} + F_{Gy} = 0$$

$$F_{Gy} = \frac{-F_{Dy} - F_{Dy} - F_{Ey} + F_{Ey}}{2} = -F_{Dy} - F_{Ey}$$

$$F_{Gy} = -\left(-2\,857{,}14\right) - \left(-6\,857{,}14\right)$$

$$F_{Gy} = 9\,714{,}28\ N$$

Do rovnice (18) jsou dosazeny rovnice $F_{Hx} = F_{Dx} - F_{Gx}$ (16) a $F_{Hy} = F_{Dy} + F_{Gy}$ (17) a po úpravě je vyjádřena síla F_{Gx}.

$$F_{Dx} \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin 60° + F_{Dy} \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° + F_{Hx} \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin 60° + F_{Hy} \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° = 0$$

$$F_{Dx} \cdot \sin 60° + F_{Dy} \cdot \cos 60° + \left(F_{Dx} - F_{Gx}\right) \cdot \sin 60° + \left(F_{Dy} + F_{Gy}\right) \cdot \cos 60° = 0$$

$$F_{Dx} \cdot \sin 60° + F_{Dy} \cdot \cos 60° + F_{Dx} \cdot \sin 60° - F_{Gx} \cdot \sin 60° + F_{Dy} \cdot \cos 60° + F_{Gy} \cdot \cos 60° = 0$$

$$2 \cdot F_{Dx} \cdot \sin 60° + 2 \cdot F_{Dy} \cdot \cos 60° + F_{Gy} \cdot \cos 60° = F_{Gx} \cdot \sin 60°$$

$$F_{Gx} = \frac{2 \cdot F_{Dx} \cdot \sin 60° + 2 \cdot F_{Dy} \cdot \cos 60° + F_{Gy} \cdot \cos 60°}{\sin 60°}$$

$$F_{Gx} = \frac{2 \cdot 2\,309{,}4 \cdot \sin 60° + 2 \cdot (-2\,857{,}14) \cdot \cos 60° + 9\,714{,}28 \cdot \cos 60°}{\sin 60°}$$

$$F_{Gx} = 6\,928{,}2\ N$$

Z rovnice (16) se určí síla F_{Hx}.

$$F_{Hx} = F_{Dx} - F_{Gx}$$

$$F_{Hx} = 2309{,}4 - 6928{,}2\ N$$

$$F_{Hx} = -4\,618{,}8\ N$$

Z rovnice (17) se určí síla F_{Hy}.

$$F_{Hy} = F_{Dy} + F_{Gy}$$

$$F_{Hy} = -2\,857{,}14 + 9\,714{,}28$$

$$F_{Hy} = 6\,857{,}14\ N$$

Z rovnice (19) se určí síla F_{Jx}.

$$F_{Jx} = -F_{Ex} - F_{Gx}$$

$$F_{Jx} = -(-2\,309{,}4) - 6\,928{,}2$$

$$F_{Jx} = -4\,618{,}8\ N$$

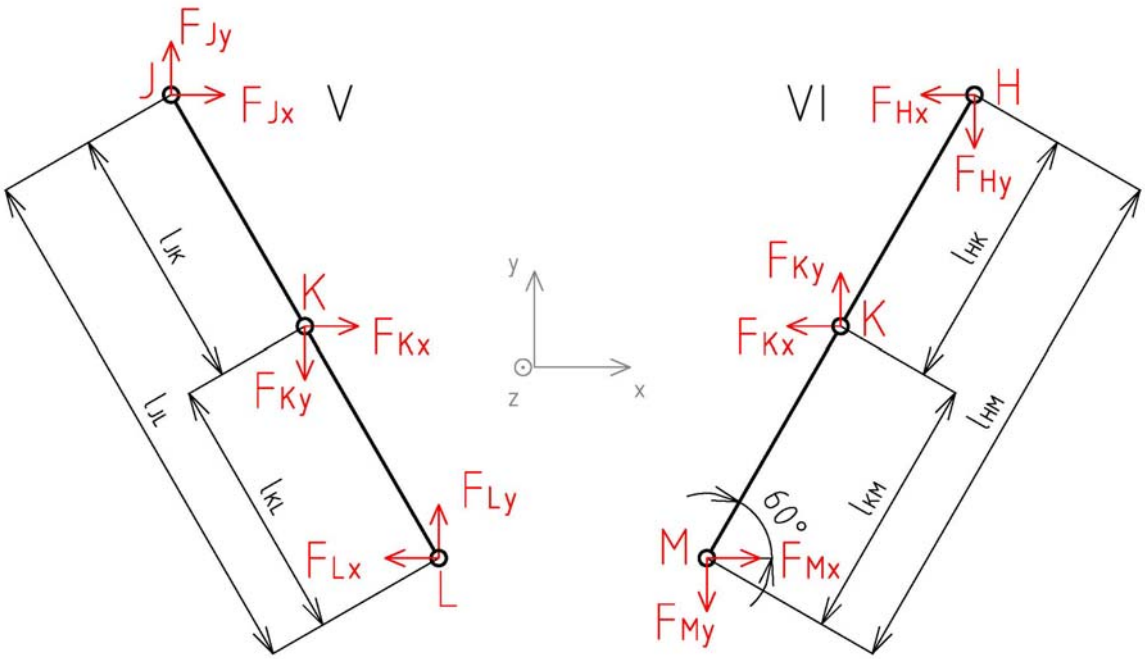
Z rovnice (20) se určí síla F_{Jy}.

$$F_{Jy} = F_{Ey} + F_{Gy}$$

$$F_{Jy} = -6\,857{,}14 + 9\,714{,}28$$

$$F_{Jy} = 2\,857{,}14\ N$$

2.2.3 TĚLESA V A VI



Obr. 11 tělesa V. a VI.

Vzdálenosti jednotlivých bodů jsou zapsány do rovnic:

$$l_{JL} = l_{HM} = l = 1\,400\ mm$$

$$l_{JK} = l_{KL} = l_{HK} = l_{KM} = \frac{l}{2} = 700\ mm$$

Rovnice statické rovnováhy V. tělesa:

$$\sum F_x = 0: \quad F_{Jx} + F_{Kx} - F_{Lx} = 0 \tag{22}$$

$$\sum F_y = 0: \quad F_{Jy} - F_{Ky} + F_{Ly} = 0 \tag{23}$$

$$\sum M_{zK} = 0: \quad -F_{Jx} \cdot l_{JK} \cdot \sin 60° - F_{Jy} \cdot l_{JK} \cdot \cos 60° - F_{Lx} \cdot l_{KL} \cdot \sin 60° + F_{Ly} \cdot l_{KL} \cdot \cos 60° = 0 \tag{24}$$

Kde F_{Kx} a F_{Ky} jsou síly působící v bodě K a F_{Lx} a F_{Ly} jsou síly působící v bodě L.

Rovnice statické rovnováhy VI. tělesa:

$$\sum F_x = 0: \quad -F_{Hx} - F_{Kx} + F_{Mx} = 0 \tag{25}$$

$$\sum F_y = 0: \quad -F_{Hy} + F_{Ky} - F_{My} = 0 \tag{26}$$

$$\sum M_{zK} = 0: \quad F_{Hx} \cdot l_{HK} \cdot \sin 60° - F_{Hy} \cdot l_{HK} \cdot \cos 60° + F_{Mx} \cdot l_{KM} \cdot \sin 60° + F_{My} \cdot l_{KM} \cdot \cos 60° = 0 \tag{27}$$

Kde F_{Mx} a F_{My} jsou síly působící v bodě M.

$$NP = \{F_{Kx}, F_{Ky}, F_{Lx}, F_{Ly}, F_{Mx}, F_{My}\}$$

$$\mu = 6$$

$$\nu = 6$$

$$\mu = \nu$$

$$\mu_M + \mu_R \leq \nu_M$$

$$0 \leq 2$$

Rovnice (24) a (27) se upraví, sečtou a určí se velikost síly F_{Ky}:

$$-F_{Jx} \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin 60° - F_{Jy} \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° - F_{Lx} \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin 60° + F_{Ly} \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° = 0$$

$$F_{Hx} \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin 60° - F_{Hy} \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° + F_{Mx} \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin 60° + F_{My} \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° = 0$$

Po sečtení:

$$-F_{Jx} \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin 60° - F_{Jy} \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° - F_{Lx} \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin 60° + F_{Ly} \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° + F_{Hx} \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin 60° - F_{Hy} \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° + F_{Mx} \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin 60° + F_{My} \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° = 0$$

Po úpravě:

$$-F_{Jx} \cdot \sin 60° - F_{Jy} \cdot \cos 60° - F_{Lx} \cdot \sin 60° + F_{Ly} \cdot \cos 60° + F_{Hx} \cdot \sin 60° - F_{Hy} \cdot \cos 60° + F_{Mx} \cdot \sin 60° + F_{My} \cdot \cos 60° = 0$$

Z obrázku 11 je patrné, že platí:

$$F_{Jx} = F_{Hx} \text{ a } F_{Lx} = F_{Mx}$$

Po dosazení do předchozí rovnice:

$$-F_{Jx}\cdot\sin 60°-F_{Jy}\cdot\cos 60°-F_{Lx}\cdot\sin 60°+F_{Ly}\cdot\cos 60°+F_{Jx}\cdot\sin 60°-F_{Hy}\cdot\cos 60°+F_{Lx}\cdot\sin 60°+F_{My}\cdot\cos 60°=0$$

$$-F_{Jy}\cdot\cos 60°+F_{Ly}\cdot\cos 60°-F_{Hy}\cdot\cos 60°+F_{My}\cdot\cos 60°=0$$

Z rovnice (23) se určí síla F_{Ly}.

$$F_{Ly}=F_{Ky}-F_{Jy}$$

Z rovnice (26) se určí síla F_{My}.

$$F_{My}=F_{Ky}-F_{Hy}$$

Po dosazení do předchozí rovnice:

$$-F_{Jy}\cdot\cos 60°+\left(F_{Ky}-F_{Jy}\right)\cdot\cos 60°-F_{Hy}\cdot\cos 60°+\left(F_{Ky}-F_{Hy}\right)\cdot\cos 60°=0$$

Po úpravě je určena síla F_{Ky}:

$$-F_{Jy}+F_{Ky}-F_{Jy}-F_{Hy}+F_{Ky}-F_{Hy}=0$$

$$F_{Ky}=\frac{F_{Jy}+F_{Hy}+F_{Jy}+F_{Hy}}{2}=F_{Jy}+F_{Hy}$$

$$F_{Ky}=2\,857{,}14+6\,857{,}14$$

$$F_{Ky}=9\,714{,}28\ N$$

Do rovnice (24) jsou dosazeny rovnice $F_{Lx}=F_{Jx}+F_{Kx}$ (22) a $F_{Ly}=F_{Ky}-F_{Jy}$ (23) a po úpravě je vyjádřena síla F_{Kx}.

$$-F_{Jx}\cdot\frac{l}{2}\cdot\sin 60°-F_{Jy}\cdot\frac{l}{2}\cdot\cos 60°-F_{Lx}\cdot\frac{l}{2}\cdot\sin 60°+F_{Ly}\cdot\frac{l}{2}\cdot\cos 60°=0$$

$$-F_{Jx}\cdot\sin 60°-F_{Jy}\cdot\cos 60°-\left(F_{Jx}+F_{Kx}\right)\cdot\sin 60°+\left(F_{Ky}-F_{Jy}\right)\cdot\cos 60°=0$$

$$-2\cdot F_{Jx}\cdot\sin 60°-2\cdot F_{Jy}\cdot\cos 60°-F_{Kx}\cdot\sin 60°+F_{Ky}\cdot\cos 60°=0$$

$$F_{Kx}=\frac{-2\cdot F_{Jx}\cdot\sin 60°-2\cdot F_{Jy}\cdot\cos 60°+F_{Ky}\cdot\cos 60°}{\sin 60°}$$

$$F_{Kx}=\frac{-2\cdot\left(-4\,618{,}8\right)\cdot\sin 60°-2\cdot 2\,857{,}14\cdot\cos 60°+9\,714{,}28\cdot\cos 60°}{\sin 60°}$$

$F_{Kx} = 11\,547\ N$

Z rovnice (22) se určí síla F_{Lx}.

$F_{Lx} = F_{Jx} + F_{Kx}$

$F_{Lx} = -4\,618{,}8 + 11\,547$

$F_{Lx} = 6\,928{,}2\ N$

Z rovnice (23 se určí síla F_{Ly}.

$F_{Ly} = F_{Ky} - F_{Jy}$

$F_{Ly} = 9\,714{,}28 - 2\,857{,}14$

$F_{Ly} = 6\,857{,}14\ N$

Z rovnice (25) se určí síla F_{Mx}.

$F_{Mx} = F_{Kx} + F_{Hx}$

$F_{Mx} = 11\,547 + (-4\,618{,}8)$

$F_{Mx} = 6\,928{,}2\ N$

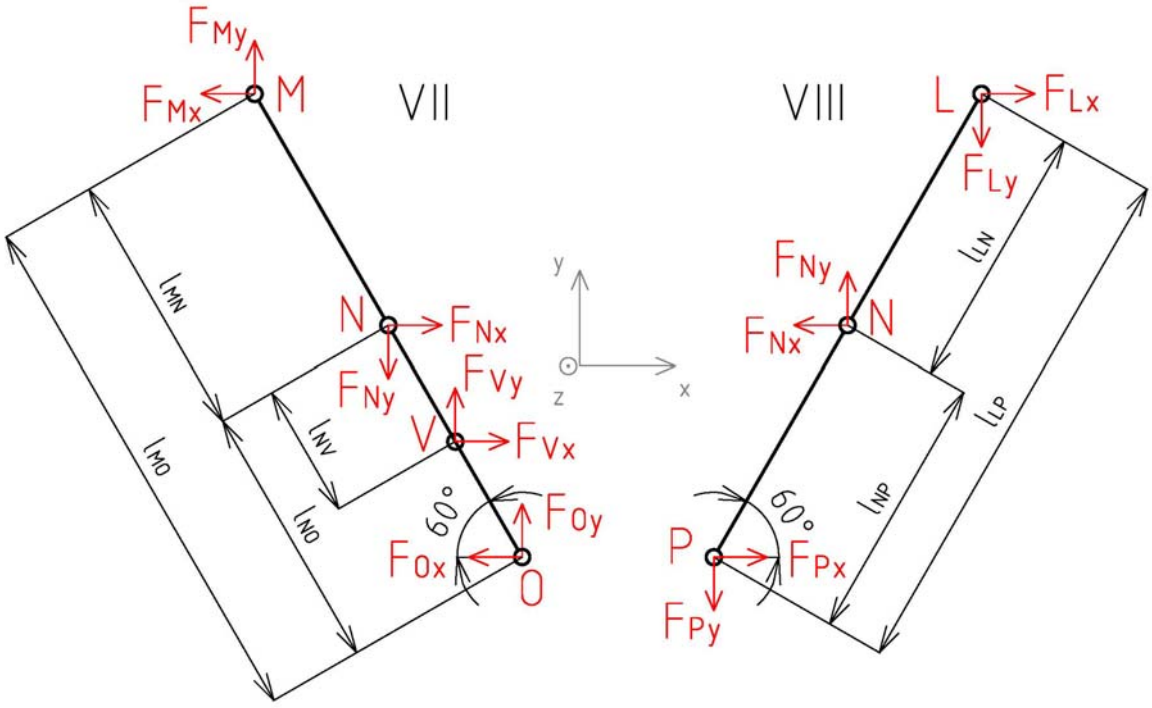
Z rovnice (26) se určí síla F_{My}.

$F_{My} = F_{Ky} - F_{Hy}$

$F_{My} = 9\,714{,}28 - 6\,857{,}14$

$F_{My} = 2\,857{,}14\ N$

2.2.4 TĚLESA VII, VIII, IX, X A XI



Obr. 12 tělesa VII. a VIII.

Vzdálenosti jednotlivých bodů jsou zapsány do rovnic:

$$l_{MO} = l_{LP} = l = 1\,400\ mm$$

$$l_{MN} = l_{NO} = l_{LN} = l_{NP} = \frac{l}{2} = 700\ mm$$

$$l_{NV} = l_{OV} = \frac{l}{4} = 350\ mm$$

Rovnice statické rovnováhy VII. tělesa:

$$\sum F_x = 0: \quad -F_{Mx} + F_{Nx} + F_{Vx} - F_{Ox} = 0 \tag{28}$$

$$\sum F_y = 0: \quad F_{My} - F_{Ny} + F_{Vy} + F_{Oy} = 0 \tag{29}$$

$$\sum M_{zN} = 0: \quad F_{Mx} \cdot l_{MN} \cdot \sin 60° - F_{My} \cdot l_{MN} \cdot \cos 60° + F_{Vx} \cdot l_{NV} \cdot \sin 60° + F_{Vy} \cdot l_{NV} \cdot \cos 60° - F_{Ox} \cdot l_{NO} \cdot \sin 60° + F_{Oy} \cdot l_{NO} \cdot \cos 60° = 0 \tag{30}$$

Kde F_{Nx} a F_{Ny} jsou síly působící v bodě N, F_{Vx} a F_{Vy} jsou síly působící v bodě V a F_{Ox} a F_{Oy} jsou síly působící v bodě O.

Momentová rovnice (30) po úpravě:

$$F_{Mx} \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin 60° - F_{My} \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° + F_{Vx} \cdot \frac{l}{4} \cdot \sin 60° + F_{Vy} \cdot \frac{l}{4} \cdot \cos 60° - F_{Ox} \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin 60° + F_{Oy} \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° = 0$$

$$F_{Mx} \cdot \sin 60° - F_{My} \cdot \cos 60° + \frac{F_{Vx}}{2} \cdot \sin 60° + \frac{F_{Vy}}{2} \cdot \cos 60° - F_{Ox} \cdot \sin 60° + F_{Oy} \cdot \cos 60° = 0$$

Rovnice statické rovnováhy VIII. tělesa:

$$\sum F_x = 0: \quad F_{Lx} - F_{Nx} + F_{Px} = 0 \tag{31}$$

$$\sum F_y = 0: \quad -F_{Ly} + F_{Ny} - F_{Py} = 0 \tag{32}$$

$$\sum M_{zN} = 0: \quad -F_{Lx} \cdot l_{LN} \cdot \sin 60° - F_{Ly} \cdot l_{LN} \cdot \cos 60° + F_{Px} \cdot l_{NP} \cdot \sin 60° + F_{Py} \cdot l_{NP} \cdot \cos 60° = 0 \tag{33}$$

Kde F_{Px} a F_{Py} jsou síly působící v bodě P.

Momentová rovnice (33) po úpravě:

$$-F_{Lx} \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin 60° - F_{Ly} \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° + F_{Px} \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin 60° + F_{Py} \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° = 0$$

$$-F_{Lx} \cdot \sin 60° - F_{Ly} \cdot \cos 60° + F_{Px} \cdot \sin 60° + F_{Py} \cdot \cos 60° = 0$$

$$NP = \{F_{Nx}, F_{Ny}, F_{Ox}, F_{Oy}, F_{Px}, F_{Py}, F_{Vx}, F_{Vy}\}$$

$$\mu = 8$$

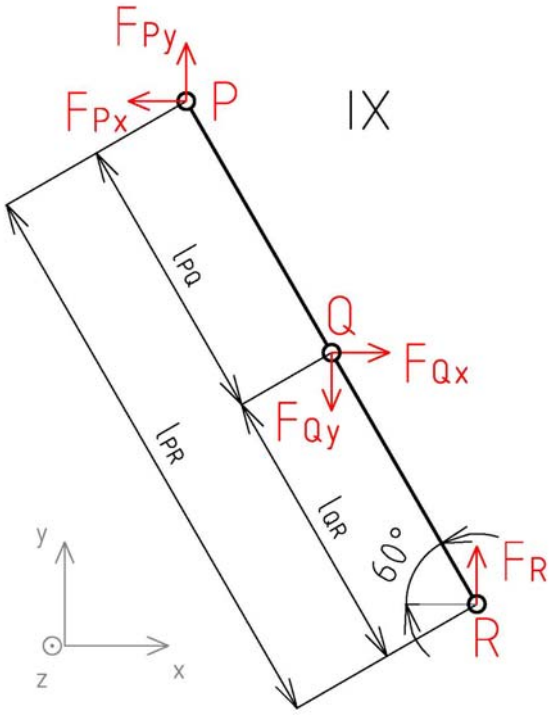
$$\nu = 6$$

$$\mu \neq \nu$$

$$\mu_M + \mu_R \leq \nu_M$$

$$0 \leq 2$$

Ze statického rozboru plyne, že k určení sil působících na tělesa je nutno použít rovnice statické rovnováhy dalších těles. K rovnicím těles VII a VIII se připíší rovnice těles IX, X a XI.



Obr. 13 těleso IX.

Vzdálenosti jednotlivých bodů jsou zapsány do rovnic:

$$l_{PR} = l = 1\,400\ mm$$

$$l_{PQ} = l_{QR} = \frac{l}{2} = 700\ mm$$

Rovnice statické rovnováhy IX. tělesa:

$$\sum F_x = 0: \quad -F_{Px} + F_{Qx} = 0 \tag{34}$$

$$\sum F_y = 0: \quad F_{Py} - F_{Qy} + F_R = 0 \tag{35}$$

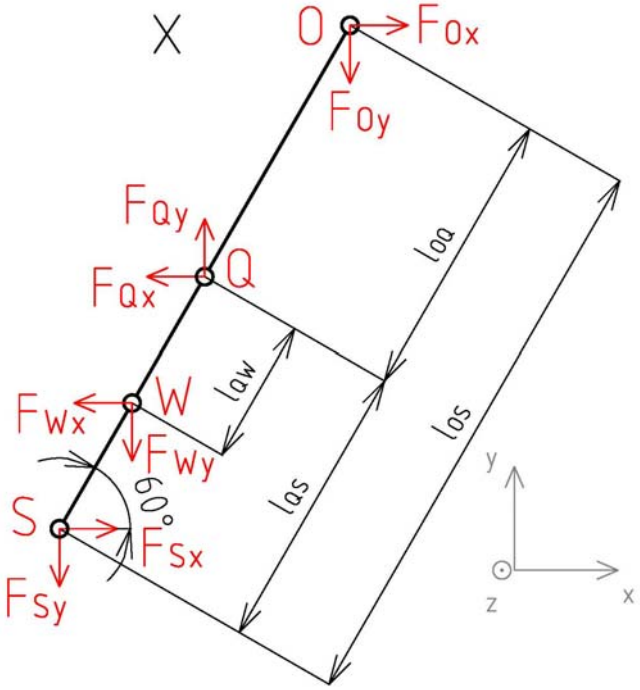
$$\sum M_{zQ} = 0: \quad F_{Px} \cdot l_{PQ} \cdot \sin 60° - F_{Py} \cdot l_{PQ} \cdot \cos 60° + F_R \cdot l_{QR} \cdot \cos 60° = 0 \tag{36}$$

Kde F_{Qx} a F_{Qy} jsou síly působící v bodě Q a F_R je síla působící v bodě R.

Momentová rovnice (36) po úpravě:

$$F_{Px} \cdot \frac{l}{2} \cdot \sin 60° - F_{Py} \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° + F_R \cdot \frac{l}{2} \cdot \cos 60° = 0$$

$$F_{Px} \cdot \sin 60° - F_{Py} \cdot \cos 60° + F_R \cdot \cos 60° = 0$$



Obr. 14 těleso X.

Vzdálenosti jednotlivých bodů jsou zapsány do rovnic:

$$l_{OS} = l = 1\,400\ mm$$

$$l_{OQ} = l_{QS} = \frac{l}{2} = 700\ mm$$

$$l_{QW} = l_{SW} = \frac{l}{4} = 350\ mm$$

Rovnice statické rovnováhy X. tělesa:

$$\sum F_x = 0: \quad F_{Ox} - F_{Qx} - F_{Wx} + F_{Sx} = 0 \tag{37}$$

$$\sum F_y = 0: \quad -F_{Oy} + F_{Qy} - F_{Wy} - F_{Sy} = 0 \tag{38}$$

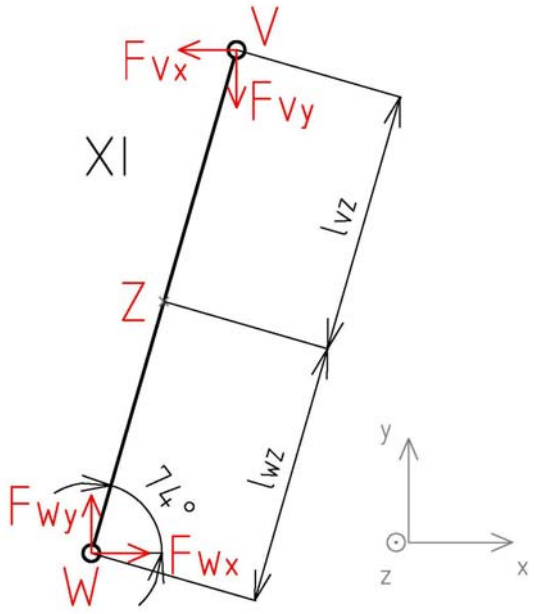
$$\sum M_{zQ} = 0: \quad -F_{Ox} \cdot l_{OQ} \cdot \sin 60° - F_{Oy} \cdot l_{OQ} \cdot \cos 60° - F_{Wx} \cdot l_{QW} \cdot \sin 60° + F_{Wy} \cdot l_{QW} \cdot \cos 60° + F_{Sx} \cdot l_{QS} \cdot \sin 60° + F_{Sy} \cdot l_{QS} \cdot \cos 60° = 0 \tag{39}$$

Kde F_{Wx} a F_{Wy} jsou síly působící v bodě W a F_{Sx} a F_{Sy} jsou síly působící v bodě S.

Momentová rovnice (39) po úpravě:

$$-F_{Ox}\cdot\frac{l}{2}\cdot\sin 60°-F_{Oy}\cdot\frac{l}{2}\cdot\cos 60°-F_{Wx}\cdot\frac{l}{4}\cdot\sin 60°+F_{Wy}\cdot\frac{l}{4}\cdot\cos 60°+F_{Sx}\cdot\frac{l}{2}\cdot\sin 60°+$$
$$F_{Sy}\cdot\frac{l}{2}\cdot\cos 60°=0$$

$$-F_{Ox}\cdot\sin 60°-F_{Oy}\cdot\cos 60°-\frac{F_{Wx}}{2}\cdot\sin 60°+\frac{F_{Wy}}{2}\cdot\cos 60°+F_{Sx}\cdot\sin 60°+F_{Sy}\cdot\cos 60°=0$$



Obr. 15 těleso XI.

Vzdálenosti jednotlivých bodů jsou zapsány do rovnic:

$$l_{VW}=1\,262\ mm$$

$$l_{VZ}=l_{WZ}=\frac{l_{VW}}{2}=631\ mm$$

Těleso XI představuje hydraulický válec, proto musí být zatížen pouze tlakovou silou.

Rovnice statické rovnováhy XI. tělesa:

$$\sum F_x = 0: \quad -F_{Vx} + F_{Wx} = 0 \tag{40}$$

$$\sum F_y = 0: \quad -F_{Vy} + F_{Wy} = 0 \tag{41}$$

$$\sum M_{zZ} = 0: \quad F_{Vx} \cdot l_{VZ} \cdot \sin 74° - F_{Vy} \cdot l_{VZ} \cdot \cos 74° + F_{Wx} \cdot l_{WZ} \cdot \sin 74° - F_{Wy} \cdot l_{WZ} \cdot \cos 74° = 0 \tag{42}$$

Momentová rovnice (42) po úpravě:

$$F_{Vx} \cdot \frac{l_{VW}}{2} \cdot \sin 74° - F_{Vy} \cdot \frac{l_{VW}}{2} \cdot \cos 74° + F_{Wx} \cdot \frac{l_{VW}}{2} \cdot \sin 74° - F_{Wy} \cdot \frac{l_{VW}}{2} \cdot \cos 74° = 0$$

$$F_{Vx} \cdot \sin 74° - F_{Vy} \cdot \cos 74° + F_{Wx} \cdot \sin 74° - F_{Wy} \cdot \cos 74° = 0$$

Pro tělesa VII až IX jsou neznámé parametry:

$$NP = \left\{F_{Nx}, F_{Ny}, F_{Ox}, F_{Oy}, F_{Px}, F_{Py}, F_{Qx}, F_{Qy}, F_R, F_{Sx}, F_{Sy}, F_{Vx}, F_{Vy}, F_{Wx}, F_{Wy}\right\}$$

$$\mu = 15$$

$$\nu = 15$$

$$\mu = \nu$$

$$\mu_M + \mu_R \leq \nu_M$$

$$0 \leq 5$$

Pro řešení soustavy patnácti rovnic o patnácti neznámých, je použit program Mathcad. Matice A_M charakterizuje čtvercovou maticí 19x19. Matice x představuje sloupovou matici obsahující označení jednotlivých sil. A matice b představuje pravou stranu rovnic.

Rovnice použité pro vytvoření matic:

1) $-F_{Mx}+F_{Nx}+F_{Vx}-F_{Ox}=0$

2) $F_{My}-F_{Ny}+F_{Vy}+F_{Oy}=0$

3) $F_{Mx}\cdot\sin 60°-F_{My}\cdot\cos 60°+\frac{F_{Vx}}{2}\cdot\sin 60°+\frac{F_{Vy}}{2}\cdot\cos 60°-F_{Ox}\cdot\sin 60°+F_{Oy}\cdot\cos 60°=0$

4) $F_{Lx}-F_{Nx}+F_{Px}=0$

5) $-F_{Ly}+F_{Ny}-F_{Py}=0$

6) $-F_{Lx}\cdot\sin 60°-F_{Ly}\cdot\cos 60°+F_{Px}\cdot\sin 60°+F_{Py}\cdot\cos 60°=0$

7) $-F_{Px}+F_{Qx}=0$

8) $F_{Py}-F_{Qy}+F_{R}=0$

9) $F_{Px}\cdot\sin 60°-F_{Py}\cdot\cos 60°+F_{R}\cdot\cos 60°=0$

10) $F_{Ox}-F_{Qx}-F_{Wx}+F_{Sx}=0$

11) $-F_{Oy}+F_{Qy}-F_{Wy}-F_{Sy}=0$

12) $-F_{Ox}\cdot\sin 60°-F_{Oy}\cdot\cos 60°-\frac{F_{Wx}}{2}\cdot\sin 60°+\frac{F_{Wy}}{2}\cdot\cos 60°+F_{Sx}\cdot\sin 60°+F_{Sy}\cdot\cos 60°=0$

13) $-F_{Vx}+F_{Wx}=0$

14) $-F_{Vy}+F_{Wy}=0$

15) $F_{Vx}\cdot\sin 74°-F_{Vy}\cdot\cos 74°+F_{Wx}\cdot\sin 74°-F_{Wy}\cdot\cos 74°=0$

16) $F_{Mx}=6\,928{,}2\ N$

17) $F_{My}=2\,857{,}14\ N$

18) $F_{Lx}=6\,928{,}2\ N$

19) $F_{Ly}=6\,857{,}14\ N$

Rovnice jsou zapsány do matic podle tvaru:

$$A_M \cdot x = b \tag{43}$$

Rovnice (43) po úpravě:

$$x = b \cdot A_M^{-1}$$

Matice A_M^{-1} je inverzní k matici A_M.

$$A_M := \begin{pmatrix}
0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & \sin(60°) & -\cos(60°) & 0 & 0 & -\sin(60°) & \cos(60°) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5\cdot\sin(60°) & 0.5\cdot\cos(60°) & 0 & 0 \\
1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
-\sin(60°) & -\cos(60°) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sin(60°) & \cos(60°) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sin(60°) & -\cos(60°) & 0 & 0 & \cos(60°) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin(60°) & -\cos(60°) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sin(60°) & \cos(60°) & 0 & 0 & -0.5\cdot\sin(60°) & 0.5\cdot\cos(60°) \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sin(74°) & -\cos(74°) & \sin(74°) & -\cos(74°) \\
1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
\end{pmatrix}$$

$$x := \begin{pmatrix} F_{Lx} \\ F_{Ly} \\ F_{Mx} \\ F_{My} \\ F_{Nx} \\ F_{Ny} \\ F_{Ox} \\ F_{Oy} \\ F_{Px} \\ F_{Py} \\ F_{Qx} \\ F_{Qy} \\ F_R \\ F_{Sx} \\ F_{Sy} \\ F_{Vx} \\ F_{Vy} \\ F_{Wx} \\ F_{Wy} \end{pmatrix} \qquad b := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 6928.2 \\ 6857.14 \\ 6928.2 \\ 2857.14 \end{pmatrix}$$

$A_M^{-1} \cdot b =$

	0
0	6928.2
1	6857.14
2	6928.2
3	2857.14
4	10417.97
5	19669.81
6	11119.31
7	-9794.7
8	3489.77
9	12812.67
10	3489.77
11	19580.88
12	6768.21
13	-0
14	2768.21
15	7629.54
16	26607.37
17	7629.54
18	26607.37

Výsledky jsou zapsány do tabulky.

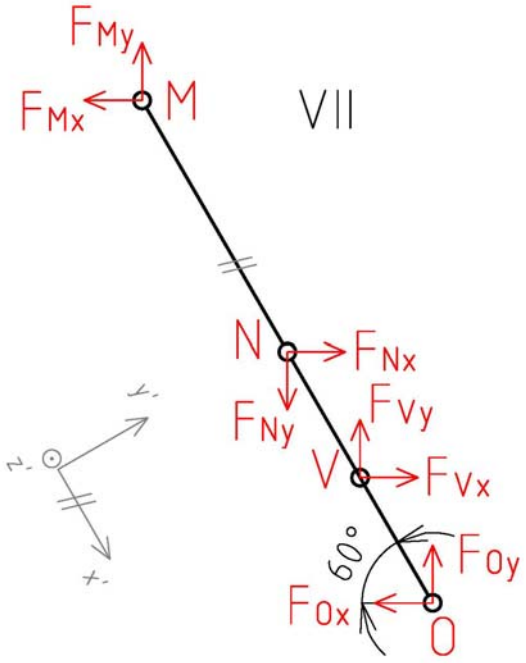
Tab. 1 Síly působící v charakteristických bodech na VII. až IX. Tělese.

Složky sil	Velikosti sil	Složky sil	Velikosti sil
F_{Nx}	10 417,97 N	F_R	6 768,21 N
F_{Ny}	19 669,81 N	F_{Sx}	0 N
F_{Ox}	11 199,31 N	F_{Sy}	2 768,21 N
F_{Oy}	−9 794,7 N	F_{Vx}	7 629,54 N
F_{Px}	3 489,77 N	F_{Vy}	26 607,37 N
F_{Py}	12 812,67 N	F_{Wx}	7 629,54 N
F_{Qx}	3 489,77 N	F_{Wy}	26 607,37 N
F_{Qy}	19 580,88 N	-	-

2.3 VÝSLEDNÉ VNITŘNÍ ÚČINKY

Výsledné vnitřní účinky (VVÚ) budeme počítat na tělesech VII až X z důvodu velkých zátěžných sil.

2.3.1 VÝSLEDNÉ VNITŘNÍ ÚČINKY VII. TĚLESA



Obr. 16 Rozložení sil v VII. tělese.

$$F_{Mx}' = -F_{Mx} \cdot \cos 60° - F_{My} \cdot \cos 30° \tag{44}$$

Kde F_{Mx}' je průmět síly působící v bodě M do osy x'.

$$F_{Mx}' = -6\,928{,}2 \cdot \cos 60° - 2\,857{,}14 \cdot \cos 30°$$

$$F_{Mx}' = -5\,938{,}46\ N$$

$$F_{My}' = -F_{Mx} \cdot \sin 60° + F_{My} \cdot \sin 30° \tag{45}$$

Kde F_{My}' je průmět síly působící v bodě M do osy y'.

$$F_{My}' = -6\,928{,}2 \cdot \sin 60° + 2\,857{,}14 \cdot \sin 30°$$

$$F_{My}' = -4\,571{,}43\ N$$

$$F_{Nx}' = F_{Nx} \cdot \cos 60° + F_{Ny} \cdot \cos 30° \quad (46)$$

Kde F_{Nx}' je průmět síly působící v bodě N do osy x'.

$$F_{Nx}' = 10\,417{,}97 \cdot \cos 60° + 19\,669{,}81 \cdot \cos 30°$$

$$F_{Nx}' = 22\,243{,}54\ N$$

$$F_{Ny}' = F_{Nx} \cdot \sin 60° - F_{Ny} \cdot \sin 30° \quad (47)$$

Kde F_{Ny}' je průmět síly působící v bodě N do osy y'.

$$F_{Ny}' = 10\,417{,}97 \cdot \sin 60° - 19\,669{,}81 \cdot \sin 30°$$

$$F_{Ny}' = -812{,}68\ N$$

$$F_{Vx}' = F_{Vx} \cdot \cos 60° - F_{Vy} \cdot \cos 30° \quad (48)$$

Kde F_{Vx}' je průmět síly působící v bodě V do osy x'.

$$F_{Vx}' = 7\,629{,}54 \cdot \cos 60° - 26\,607{,}37 \cdot \cos 30°$$

$$F_{Vx}' = -19\,227{,}89\ N$$

$$F_{Vy}' = F_{Vx} \cdot \sin 60° + F_{Vy} \cdot \sin 30° \quad (49)$$

Kde F_{Vy}' je průmět síly působící v bodě V do osy y'.

$$F_{Vy}' = 7\,629{,}54 \cdot \sin 60° + 26\,607{,}37 \cdot \sin 30°$$

$$F_{Vy}' = 19\,911{,}06\ N$$

$$F_{Ox}' = -F_{Ox} \cdot \cos 60° - F_{Oy} \cdot \cos 30° \quad (50)$$

Kde F_{Ox}' je průmět síly působící v bodě O do osy x'.

$$F_{Ox}' = -11119{,}31 \cdot \cos 60° - \left(-9\,794{,}7\right) \cdot \cos 30°$$

$$F_{Ox}' = 2922{,}8\ N$$

$$F_{Oy}' = -F_{Ox} \cdot \sin 60° + F_{Oy} \cdot \sin 30° \tag{51}$$

Kde F_{Oy}' je průmět síly působící v bodě O do osy y'.

$$F_{Oy}' = -11119{,}31 \cdot \sin 60° + (-9\,794{,}7) \cdot \sin 30°$$

$$F_{Oy}' = -14\,526{,}95\ N$$

$$M_{zN}' = |F_{My}'| \cdot l_{MN} \tag{52}$$

Kde M_{zN}' je ohybový moment v místě N k ose z' na VII. tělese.

$$M_{zN}' = |-4\,571{,}43| \cdot 0{,}7$$

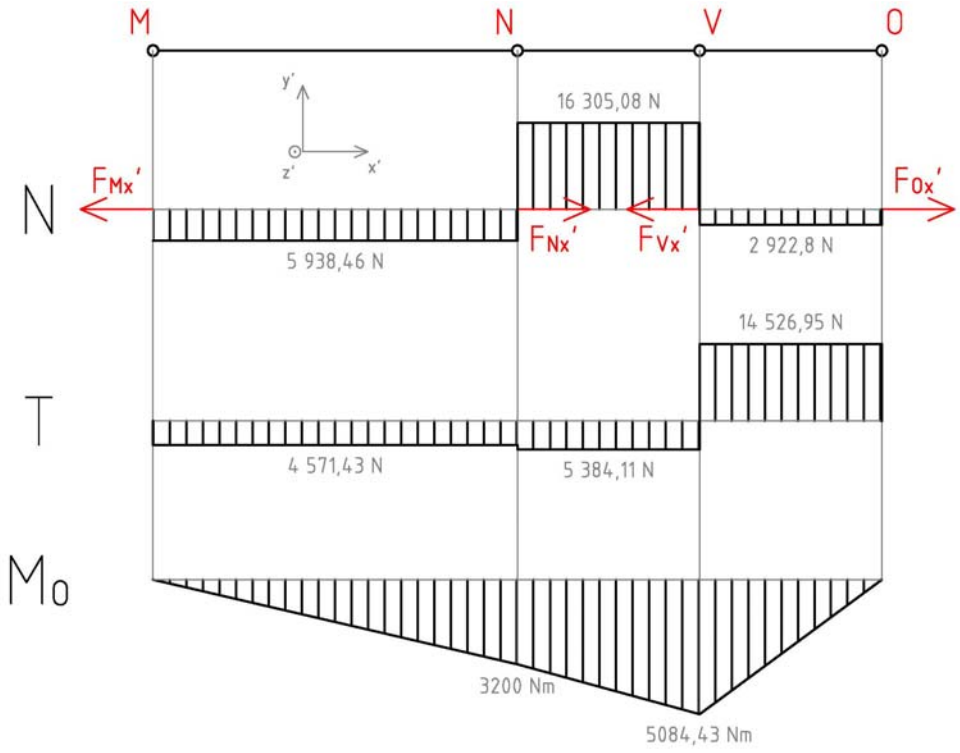
$$M_{zN}' = 3\,200\ Nm$$

$$M_{zO}' = |F_{Oy}'| \cdot l_{OV} \tag{53}$$

Kde M_{zO}' je ohybový moment v místě O k ose z' na VII. tělese.

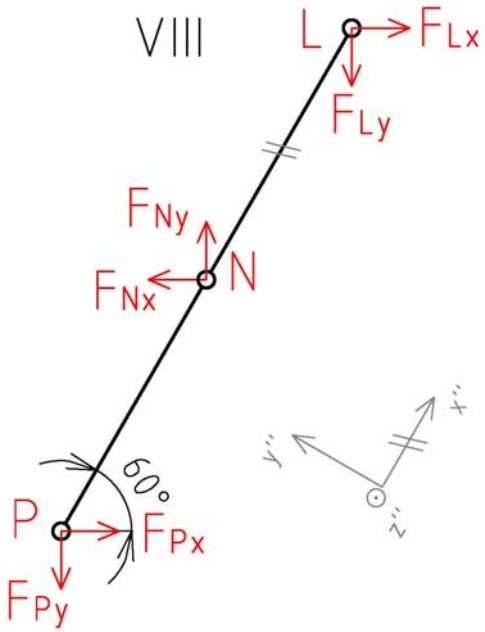
$$M_{zO}' = |-14\,526{,}95| \cdot 0{,}35$$

$$M_{zO}' = 5\,084{,}43\ Nm$$



Obr. 17 Výsledné vnitřní účinky VII. tělesa.

2.3.2 VÝSLEDNÉ VNITŘNÍ ÚČINKY VIII. TĚLESA



Obr. 18 Rozložení sil v VIII. tělese.

$$F_{Lx}'' = F_{Lx} \cdot \cos 60° - F_{Ly} \cdot \cos 30° \tag{54}$$

Kde F_{Lx}'' je průmět síly působící v bodě L do osy x''.

$$F_{Lx}'' = 6\,928{,}2 \cdot \cos 60° - 6\,857{,}14 \cdot \cos 30°$$

$$F_{Lx}'' = -2\,474{,}36\ N$$

$$F_{Ly}'' = -F_{Lx} \cdot \sin 60° - F_{Ly} \cdot \sin 30° \tag{55}$$

Kde F_{Ly}'' je průmět síly působící v bodě L do osy y''.

$$F_{Ly}'' = -6\,928{,}2 \cdot \sin 60° - 6\,857{,}14 \cdot \sin 30°$$

$$F_{Ly}'' = -9\,428{,}57\ N$$

$$F_{Nx}'' = -F_{Nx} \cdot \cos 60° + F_{Ny} \cdot \cos 30° \tag{56}$$

Kde F_{Nx}'' je průmět síly působící v bodě N do osy x''.

$$F_{Nx}'' = -10\,417{,}97 \cdot \cos 60° + 19\,669{,}81 \cdot \cos 30°$$

$$F_{Nx}'' = 11\,825{,}57\ N$$

$$F_{Ny}'' = F_{Nx} \cdot \sin 60° + F_{Ny} \cdot \sin 30° \tag{57}$$

Kde F_{Ny}'' je průmět síly působící v bodě N do osy y''.

$$F_{Ny}'' = 10\,417{,}97 \cdot \sin 60° + 19\,669{,}81 \cdot \sin 30°$$

$$F_{Ny}'' = 18\,857{,}13\ N$$

$$F_{Px}'' = F_{Px} \cdot \cos 60° - F_{Py} \cdot \cos 30° \tag{58}$$

Kde F_{Px}'' je průmět síly působící v bodě P do osy x''.

$$F_{Px}'' = 3\,489{,}77 \cdot \cos 60° - 12\,812{,}67 \cdot \cos 30°$$

$$F_{Px}'' = -9\,351{,}21\ N$$

$$F_{Py}'' = -F_{Px} \cdot \sin 60° - F_{Py} \cdot \sin 30° \tag{59}$$

Kde F_{Py}'' je průmět síly působící v bodě P do osy y''.

$$F_{Py}'' = -3\,489{,}77 \cdot \sin 60° - 12\,812{,}67 \cdot \sin 30°$$

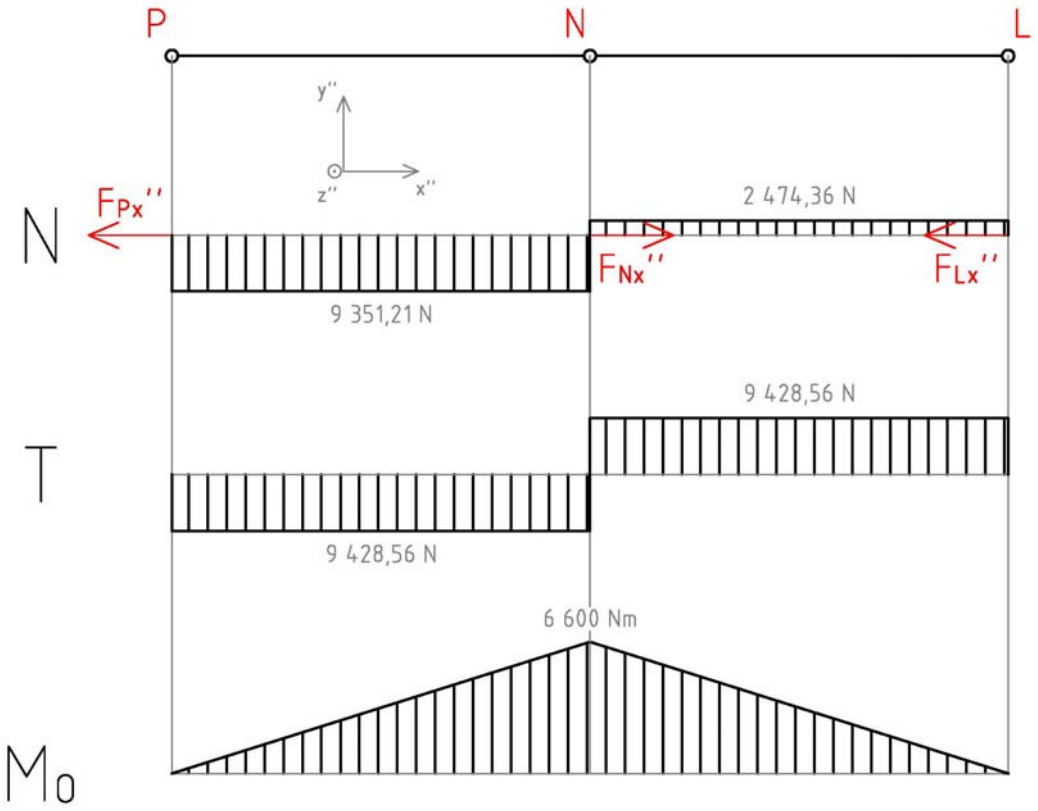
$$F_{Py}'' = -9\,428{,}56\ N$$

$$M_{zN}'' = \left|F_{Py}''\right| \cdot l_{NP} \tag{60}$$

Kde M_{zN}'' je ohybový moment v místě N k ose z'' na VIII. tělese.

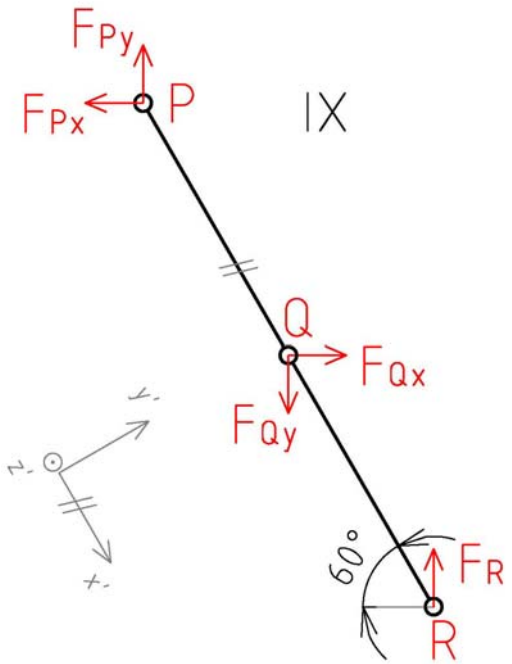
$$M_{zN}'' = \left|-9\,428{,}56\right| \cdot 0{,}7$$

$$M_{zN}'' = 6\,600\ Nm$$



Obr. 19 Výsledné vnitřní účinky VIII. tělesa.

2.3.3 VÝSLEDNÉ VNITŘNÍ ÚČINKY IX. TĚLESA



Obr. 20 Rozložení sil v IX tělese.

$$F_{Px}' = -F_{Px} \cdot \cos 60° - F_{Py} \cdot \cos 30° \quad (61)$$

Kde F_{Px}' je průmět síly působící v bodě P do osy x'.

$$F_{Px}' = -3\,489{,}77 \cdot \cos 60° - 12\,812{,}67 \cdot \cos 30°$$

$$F_{Px}' = -12\,840{,}98\ N$$

$$F_{Py}' = -F_{Px} \cdot \sin 60° + F_{Py} \cdot \sin 30° \quad (62)$$

Kde F_{Py}' je průmět síly působící v bodě P do osy y'.

$$F_{Py}' = -3\,489{,}77 \cdot \sin 60° + 12\,812{,}67 \cdot \sin 30°$$

$$F_{Py}' = 3\,384{,}11\ N$$

$$F_{Qx}' = F_{Qx} \cdot \cos 60° + F_{Qy} \cdot \cos 30° \quad (63)$$

Kde F_{Qx}' je průmět síly působící v bodě Q do osy x'.

$$F_{Qx}' = 3\,489{,}77 \cdot \cos 60° + 19\,580{,}88 \cdot \cos 30°$$

$$F_{Qx}' = 18\,702{,}42\ N$$

$$F_{Qy}' = F_{Qx} \cdot \sin 60° - F_{Qy} \cdot \sin 30° \quad (64)$$

Kde F_{Qy}' je průmět síly působící v bodě Q do osy y'.

$$F_{Qy}' = 3\,489{,}77 \cdot \sin 60° - 19\,580{,}88 \cdot \sin 30°$$

$$F_{Qy}' = -6\,768{,}21\ N$$

$$F_{Rx}' = -F_R \cdot \cos 30° \quad (65)$$

Kde F_{Rx}' je průmět síly působící v bodě R do osy x'.

$$F_{Rx}' = -6\,768.21 \cdot \cos 30°$$

$$F_{Rx}' = -5\,861{,}44\ N$$

$$F_{Ry}' = F_{Ry} \cdot \sin 30° \tag{66}$$

Kde F_{Ry}' je průmět síly působící v bodě R do osy y'.

$$F_{Ry}' = 6\,768.21 \cdot \sin 30°$$

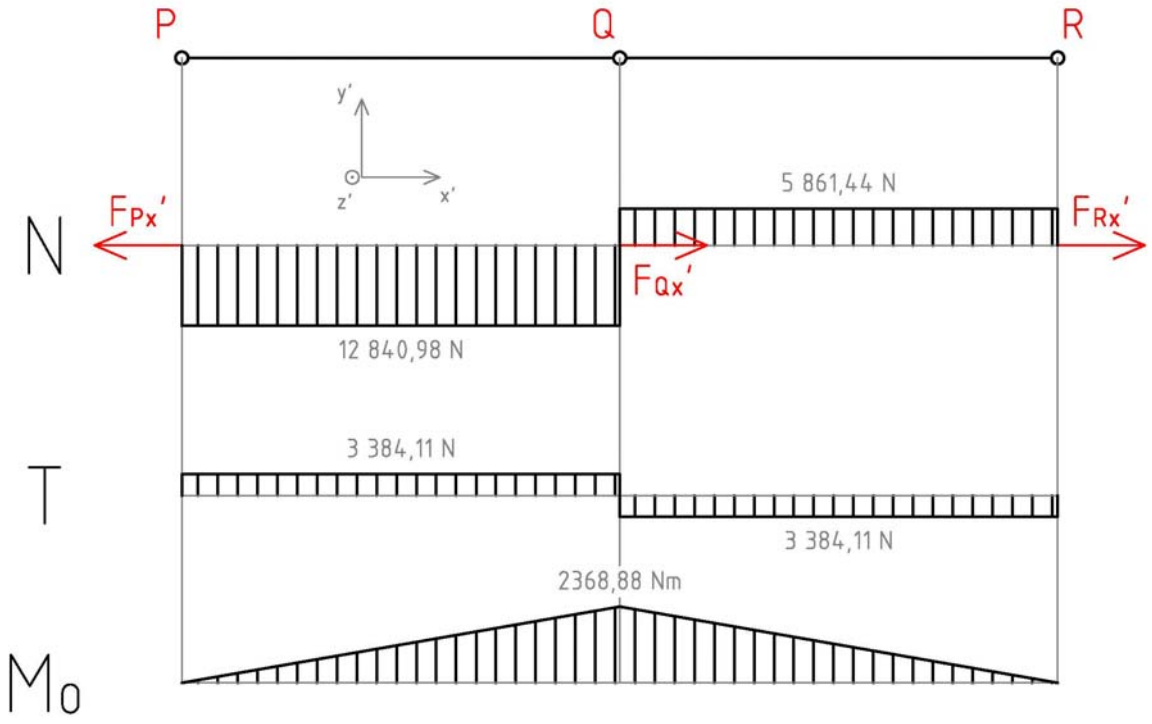
$$F_{Ry}' = 3\,384{,}11\ N$$

$$M_{zQ}' = \left|F_{Py}'\right| \cdot l_{PQ} \tag{67}$$

Kde M_{zQ}' je ohybový moment v místě Q k ose z' na IX. tělese.

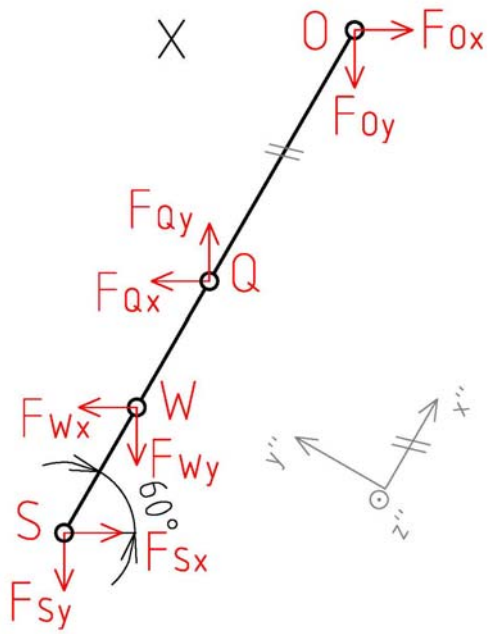
$$M_{zQ}' = \left|3\,384{,}11\right| \cdot 0{,}7$$

$$M_{zQ}' = 2\,368{,}88\ Nm$$



Obr. 21 Výsledné vnitřní účinky IX. tělesa.

2.3.4 VÝSLEDNÉ VNITŘNÍ ÚČINKY X. TĚLESA



Obr. 22 Výsledné vnitřní účinky X. tělesa.

$$F_{Ox}'' = F_{Ox} \cdot \cos 60° - F_{Oy} \cdot \cos 30° \tag{68}$$

Kde F_{Ox}'' je průmět síly působící v bodě O do osy x''.

$$F_{Ox}'' = 11119{,}31 \cdot \cos 60° - \left(-9\,794{,}7\right) \cdot \cos 30°$$

$$F_{Ox}'' = 14\,042{,}11\ N$$

$$F_{Oy}'' = -F_{Ox} \cdot \sin 60° - F_{Oy} \cdot \sin 30° \tag{69}$$

Kde F_{Oy}'' je průmět síly působící v bodě O do osy y''.

$$F_{Oy}'' = -11119{,}31 \cdot \sin 60° - \left(-9\,794{,}7\right) \cdot \sin 30°$$

$$F_{Oy}'' = -4\,732{,}25\ N$$

$$F_{Qx}'' = -F_{Qx} \cdot \cos 60° + F_{Qy} \cdot \cos 30° \tag{70}$$

Kde F_{Qx}'' je průmět síly působící v bodě Q do osy x''.

$$F_{Qx}'' = -3\,489{,}77 \cdot \cos 60° + 19\,580{,}88 \cdot \cos 30°$$

$$F_{Qx}'' = 15\,212{,}65\ N$$

$$F_{Qy}'' = F_{Qx} \cdot \sin 60° + F_{Qy} \cdot \sin 30° \tag{71}$$

Kde F_{Qy}'' je průmět síly působící v bodě Q do osy y''.

$$F_{Qy}'' = 3\,489{,}77 \cdot \sin 60° + 19\,580{,}88 \cdot \sin 30°$$

$$F_{Qy}'' = 12\,812{,}67\ N$$

$$F_{Wx}'' = -F_{Wx} \cdot \cos 60° - F_{Wy} \cdot \cos 30° \tag{72}$$

Kde F_{Wx}'' je průmět síly působící v bodě W do osy x''.

$$F_{Wx}'' = -7\,629{,}54 \cdot \cos 60° - 26\,607{,}37 \cdot \cos 30°$$

$$F_{Wx}'' = -26\,857{,}43\ N$$

$$F_{Wy}'' = F_{Wx} \cdot \sin 60° - F_{Wy} \cdot \sin 30° \tag{73}$$

Kde F_{Wy}'' je průmět síly působící v bodě W do osy y''.

$$F_{Wy}'' = 7\,629{,}54 \cdot \sin 60° - 26\,607{,}37 \cdot \sin 30°$$

$$F_{Wy}'' = -6\,696{,}31\ N$$

$$F_{Sx}'' = F_{Sx} \cdot \cos 60 - F_{Sy} \cdot \cos 30° \tag{74}$$

Kde F_{Sx}'' je průmět síly působící v bodě S do osy x''.

$$F_{Sx}'' = 0 \cdot \cos 60 - 2\,768{,}21 \cdot \cos 30°$$

$$F_{Sx}'' = -2\,397{,}34\ N$$

$$F_{Sy}'' = -F_{Sx} \cdot \sin 60 - F_{Sy} \cdot \sin 30° \tag{75}$$

Kde F_{Sy}'' je průmět síly působící v bodě S do osy y''.

$$F_{Sy}'' = -0 \cdot \sin 60 - 2\,768{,}21 \cdot \sin 30°$$

$$F_{Sy}'' = -1\,384{,}11\ N$$

$$M_{zW}'' = \left|F_{Sy}''\right| \cdot l_{SW} \tag{76}$$

Kde M_{zW}'' je ohybový moment v místě W k ose z'' na X. tělese.

$$M_{zW}'' = \left|-1\,384{,}11\right| \cdot 0{,}35$$

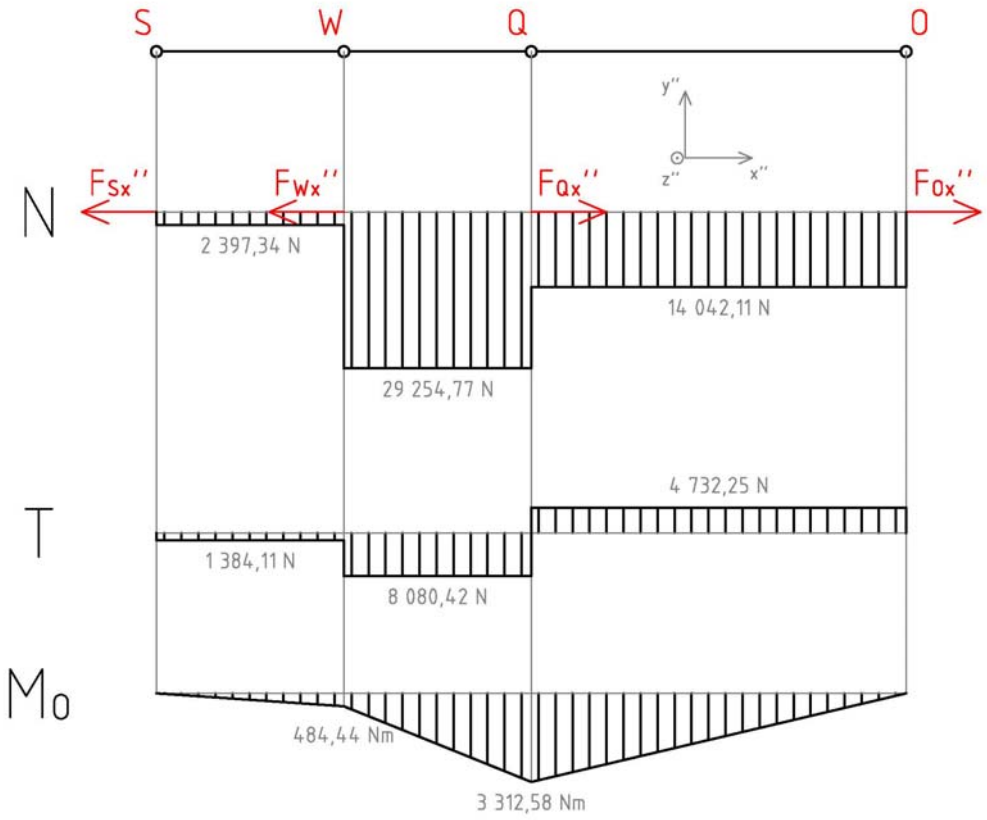
$$M_{zW}'' = 484{,}44\ Nm$$

$$M_{zQ}'' = \left|F_{Oy}''\right| \cdot l_{OQ} \tag{77}$$

Kde M_{zQ}'' je ohybový moment v místě Q k ose z'' na X. tělese.

$$M_{zQ}'' = \left|-4\,732{,}25\right| \cdot 0{,}7$$

$$M_{zQ}'' = 3\,312{,}58\ Nm$$



Obr. 23 Výsledné vnitřní účinky X. tělesa.

2.4 VÝPOČET PRŮMĚRŮ ČEPŮ

Průměry čepů jsou vypočítány podle vzorce:

$$\tau_s = \frac{\beta \cdot T}{S_č} \leq \tau_{s\,dov} \tag{78}$$

Kde β je opravný součinitel vycházející ze Žuravského vztahu, T je smyková síla a $S_č$ je plocha čepu.

Pro kruhové průřezy je $\beta = \frac{4}{3}$. Pro materiál čepů 11 500 je dovolené smykové napětí čepů $\tau_{s\,dov}$ 55 ÷ 85 MPa. Volíme 60 MPa.

2.4.1 VÝPOČET SMYKOVÝCH SIL

Pro posouzení místa s největším smykovým zatížení jsou vypočteny smykové síly působící na čepy mechanismu u VII. až X. tělesa.

$$F_L = \sqrt{F_{Lx}{}^2 + F_{Ly}{}^2} \tag{79}$$

Kde F_L je síla působící v místě L.

$$F_L = \sqrt{6\,928{,}2^2 + 6\,857{,}14^2}$$

$$F_L = 9\,747{,}84\ N$$

Protože je postup výpočtů pro ostatní síly stejný, jsou výsledky rovnou zapsány do tabulky.

Tab. 2 Smykové síly působící na čepy.

Síla	Velikost síly	Síla	Velikost síly
F_L	9 747,84 N	F_R	6 768,21 N
F_N	22 258,38 N	F_S	2 768,21 N
F_O	14 818,06 N	F_V	27 679,63 N
F_P	13 279,42 N	F_W	27 679,63 N
F_Q	19 889,43 N	-	-

Kde F_i je síla působící v místě i, kde $i \in \{L, N, O, P, Q, R, S, V, W\}$.

Výsledné smykové vnitřní účinky se rovnají velikostem těchto sil. Podle velikostí smykových sil se bude počítat průměr čepů v místech N, O a V.

Z rovnice (78) se určí průměr čepu.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{4}{3} \cdot T}{\tau_{s\,dov} \cdot \pi}} \tag{80}$$

Kde d je průměr čepu.

2.4.2 VÝPOČET PRŮMĚRU ČEPU V MÍSTĚ *N*

Do rovnice (80) jsou dosazeny konkrétní hodnoty a poznatek, že $T = F_N$ při návrhu čepu v místě N.

$$d_N = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{4}{3} \cdot F_N}{\tau_{s\,dov} \cdot \pi}} \tag{81}$$

Kde d_N je průměr čepu v místě N.

$$d_N = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{4}{3} \cdot 22\,258{,}38}{60 \cdot \pi}}$$

$$d_N = 25{,}1\ mm$$

2.4.3 VÝPOČET PRŮMĚRU ČEPU V MÍSTĚ *O*

Do rovnice (80) jsou dosazeny konkrétní hodnoty a poznatek, že $T = F_O$ při návrhu čepu v místě O.

$$d_O = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{4}{3} \cdot F_O}{\tau_{s\,dov} \cdot \pi}} \tag{82}$$

Kde d_O je průměr čepu v místě O.

$$d_O = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{4}{3} \cdot 14\,818{,}06}{60 \cdot \pi}}$$

$$d_O = 20{,}5\ mm$$

2.4.4 VÝPOČET PRŮMĚRU ČEPU V MÍSTĚ *V*

Do rovnice (80) jsou dosazeny konkrétní hodnoty a poznatek, že $T = F_V$ při návrhu čepu v místě *V*.

$$d_V = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{4}{3} \cdot F_V}{\tau_{s\,dov} \cdot \pi}} \tag{83}$$

Kde d_V je průměr čepu v místě *V*.

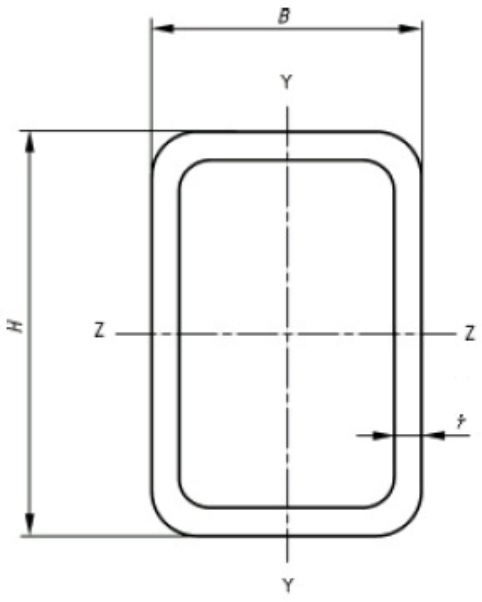
$$d_V = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{4}{3} \cdot 27\,679{,}63}{60 \cdot \pi}}$$

$$d_V = 28\ mm$$

Průměry všech čepů jsou zvoleny 26 mm podle průměru čepu v místě *N*. A průměry čepů v místech *V* a *W* musí být zvoleny podle průměru ok na hydraulickém válci.

2.5 NÁVRH PROFILU NOSNÍKU

Pro nosníky je volen jäcklový profil, viz obrázek 24.



Obr. 24 Průřez nosníku [5].

Maximální ohybový moment je v místě *N* na VIII. tělese. Platí $M_{ozN} = M_{zN}'' = 6\,600$ N. Materiál nosníků je ocel S355J2H (1.0576), obdobná s 11 503. Pro 11 503 je dovolené napětí v ohybu $\sigma_{o\,dov}$ 100 ÷ 150 MPa.

Tab. 3 Tabulka rozměrů jäcklového profilu.

Výška profilu	H	120 mm
Šířka profilu	B	80 mm
Tloušťka profilu	t	5 mm
Plocha průřezu nosníku	S_n	18,4 cm^2
Kvadratický moment průřezu k ose y	J_y	187,78 cm^4
Kvadratický moment průřezu k ose z	J_z	353,14 cm^4
Pružný modul průřezu v ohybu k ose y	W_{oy}	46,64 cm^3
Pružný modul průřezu v ohybu k ose z	W_{oz}	58,86 cm^3

$$\sigma_o = \frac{M_{oz}}{W_o} \leq \sigma_{o\,dov} \tag{84}$$

Kde σ_o je ohybové napětí, M_{oz} je ohybový moment k ose z

$$\sigma_o = \frac{6\,600}{58{,}86 \cdot 10^{-6}}$$

$$\sigma_o = 112{,}13 \cdot 10^6 \ Pa = 112{,}13 \ MPa$$

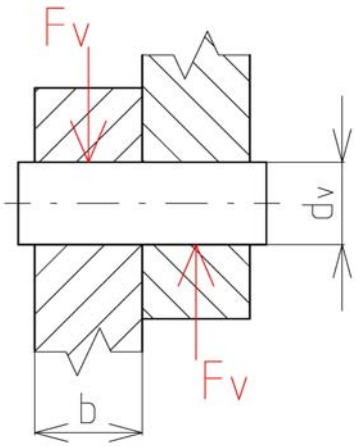
Ohybové napětí je menší než dovolené. Zvolený profil nosníku vyhovuje.

2.6 PEVNOSTNÍ KONTROLA ČEPŮ

Čep je zkontrolován na otlačení a na ohyb vyvolaný silou od hydraulického válce v místě *V*. Čepy jsou uloženy v pouzdrech, které jsou přivařeny k profilu nosníku.

2.6.1 KONTROLA ČEPŮ NA OTLAČENÍ

Kontrola je provedena pro místo *V,* kde působí největší smyková síla.



Obr. 25 Působení síly na čep.

$$p_s = \frac{F_V}{b \cdot d_V} \leq p_{dov} \tag{85}$$

Platí, že stykový tlak p_s mezi čepem a ramenem mechanismu je menší než dovolený stykový tlak p_{dov}. Dovolený stykový tlak materiálu čepu 11 500 je 90 ÷135 MPa.

$$p_s = \frac{27\,679{,}63}{80 \cdot 30}$$

$$p_s = 11{,}53\ MPa \leq p_{dov}$$

2.7 KONTROLA NOSNÍKŮ VŮČI ZTRÁTĚ VZPĚRNÉ STABILITY

Kontrola vůči ztrátě vzpěrné stability je provedena pro nosník VII mezi body *N* a *V*, kde působí velká osová síla a pro nosník IX mezi body *Q* a *R*, kde je poměrně velká vzdálenost mezi těmito body.

Štíhlost nosníků je dána vztahem:

$$\lambda = \frac{l}{\sqrt{\frac{J_{\min}}{S_n}}} \tag{86}$$

Kde λ je štíhlost prutu, l je délka prutu, J_{min} je minimální kvadratický moment průřezu.

Kritická štíhlost je definována:

$$\lambda_{kr} = \alpha \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_k}} \tag{87}$$

Kde λ_{kr} je kritická štíhlost prutu, α součinitel závislý na typu uložení, E je modul pružnosti oceli a σ_k kritické tlakové napětí.

Pro nosníky uložené na obou koncích v kloubových vazbách platí, že $\alpha = \pi$.

2.7.1 KONTROLA VII. NOSNÍKU

Pro výpočet štíhlosti prutu mezi body *N* a *V* jsou dosazeny konkrétní hodnoty do rovnice (86). V tomto případě platí, že $J_{min} = J_y$ (viz tabulka 3).

$$\lambda = \frac{l_{NV}}{\sqrt{\frac{J_{\min}}{S_n}}}$$

$$\lambda = \frac{35}{\sqrt{\frac{187,78}{18,4}}}$$

$$\lambda = 10,96$$

Kritické tlakové napětí materiálu 11 500 je 90 ÷ 135 MPa. Je zvoleno 100 MPa. Modul pružnosti oceli je $2,1 \cdot 10^5$ MPa.

$$\lambda_{kr} = \alpha \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_k}}$$

$$\lambda_{kr} = \pi \cdot \sqrt{\frac{2{,}1 \cdot 10^5}{100}}$$

$$\lambda_{kr} = 143{,}97$$

Ke ztrátě vzpěrné stability nedojde, $\lambda < \lambda_{kr}$.

2.7.2 KONTROLA IX. NOSNÍKU

Pro výpočet štíhlosti prutu mezi body Q a R jsou dosazeny konkrétní hodnoty do rovnice (86).

$$\lambda = \frac{l_{QR}}{\sqrt{\frac{J_{\min}}{S_n}}}$$

$$\lambda = \frac{70}{\sqrt{\frac{187{,}78}{18{,}4}}}$$

$$\lambda = 21{,}91$$

Kritická štíhlost nosníku se vypočítá stejně jako u VII. nosníku.

$$\lambda_{kr} = \alpha \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_k}}$$

$$\lambda_{kr} = \pi \cdot \sqrt{\frac{2{,}1 \cdot 10^5}{100}}$$

$$\lambda_{kr} = 143{,}97$$

Ke ztrátě vzpěrné stability nedojde, $\lambda < \lambda_{kr}$.

2.8 VOLBA HYDRAULICKÉHO VÁLCE

Síla působící na hydraulický válec (hydromotor) v místě *V* a *W* je 27 679,63 N. Požadovaná vzdálenost ok hydraulického válce při maximálním zdvihu nůžkového mechanismu je 1 262 mm. Minimální průměr oka hydraulického válce se rovná průměru čepu v místě *V* a *W*, tedy 28 mm.

Hydraulické válce jsou použity dva, přičemž každý z nich působí na jednu stranu nůžkového mechanismu. Hydraulické válce jsou vybrány z katalogu od firmy HYDRAULICS s.r.o. Pro minimální průměr čepu mm je předběžně zvolen hydraulický válec typu ZH-PL1 55xZ 42,5/20/25. Maximální tlak ve válci je 25 MPa, jmenovitý je stanoven výrobcem na 20 MPa

Pro posouzení velikosti hydraulického válce se použije rovnice (88).

$$p = \frac{F_V}{S_v} \tag{88}$$

Kde p je jmenovitý tlak a S_v je plocha válce.

Po úpravě:

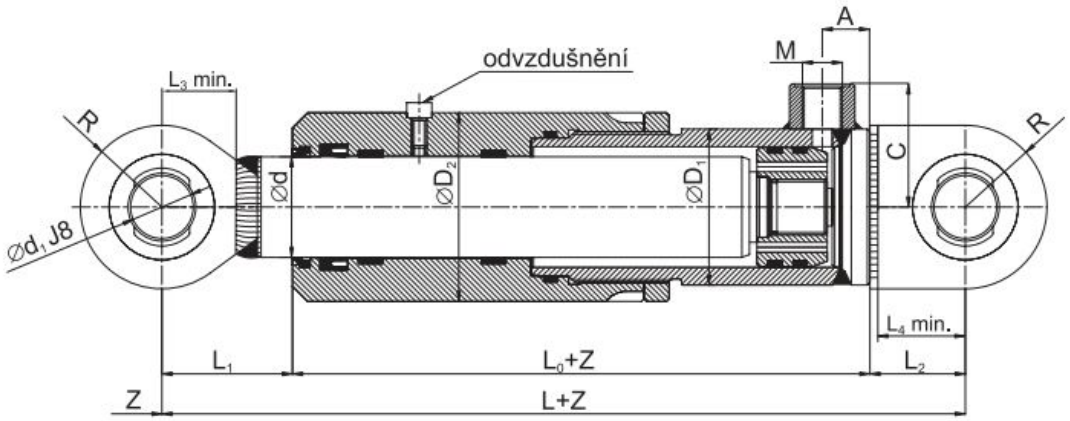
$S_v = \frac{F_V}{p} = \frac{\pi \cdot D_{píst}{}^2}{4}$, kde $D_{píst}$ je průměr hydraulického pístu.

$$D_{píst} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_V}{\pi \cdot p}}$$

$$D_{píst} = \sqrt{\frac{4 \cdot 27\,679{,}63}{\pi \cdot 20}}$$

$$D_{píst} = 42\ mm$$

Vzhledem k podmínce, že průměr otvoru pro čep musí být 28 mm, je z katalogu výrobce zvolen hydraulický válec s průměrem pístní tyče 55 mm. Maximální vzdálenost ok je 1 205 mm.



Obr. 26 Nákres hydraulického válce[6].

Tab. 4 Rozměry hydraulického válce.

Průměr pístní tyče	d	55 mm
Vnější průměr válce	D_2	98 mm
Průměr otvoru pro čep	d_1	30 mm
Minimální vzdálenost středů ok	L	225 mm
Zdvih	Z	490 mm
Požadovaná vzdálenost středů ok	$L+Z$	715 mm
Poloměr oka	R	42,5 mm
Šířka oka	-	22 mm
Maximální tlak	-	25 MPa
Jmenovitý tlak	-	20 MPa

ZÁVĚR

Zatížení nůžkového mechanismu jsem realizoval tak, že jsem tíhu břemene nahradil silou působící v místě, které vyvolávalo největší zatížení nůžkového mechanismu. Tíha pracovního koše byla nahrazena silou působící v těžišti pracovního koše.

Při výpočtu silového zatížení nůžkového mechanismu jsem jednotlivá tělesa nahradil pruty spojenými rotačními vazbami, kterými se přenáší zatížení. Začal jsem výpočtem silového zatížení těles I a II spojenými s pracovním košem. Po vyřešení rovnic statické rovnováhy jsem vypočítal silové zatížení na tělesech III až VI. Pro výpočet silového zatížení těles VII až XI jsem využil maticového výpočtu v programu MathCAD. Po vyřešení všech sil působících ve vazbách jsem počítal výsledné vnitřní účinky na tělesech VII až X, protože silové zatížení těchto těles bylo poměrně velké.

Během návrhu čepů jsem předpokládal, že jsou čepy namáhány otlačením v pouzdrech nůžkového mechanismu a střihem od přenášených sil.

Volil jsem jäcklový profil nosníku díky relativně jednoduché výrobě, nízké hmotnosti a dobré odolnosti vůči namáhání ohybem. Při návrhu jsem vycházel z maximální velikosti ohybového momentu v prutové konstrukci. Při návrhu profilu nosníku by se mělo počítat s vrubovým účinkem otvoru pro čep. Protože se do otvorů vloží pouzdra pro čepy, které se přivaří k nosníkům a tím dojde k zpevnění v místě uložení čepů, nemusel jsem tento vrubový účinek zvažovat.

Nosníky nejvíce namáhané tlakem jsem zkontroloval vůči ztrátě vzpěrné stability. Z výsledných hodnot vyplývá, že ke ztrátě vzpěrné stability nedojde ve směru minimálního kvadratického momentu průřezu jäcklového profilu.

Úlohu jsem řešil jako rovinnou a tak mnou navržené profily a čepy musí být umístěny na obou stranách pracovního koše.

U volby velikosti hydraulických válců jsem vycházel ze silového zatížení členu, který nahrazoval hydraulický válec. Protože jsem pominul ztráty třením v čepech, zvolil jsem velikosti hydraulických válců o něco vyšší než vypočítaná velikost.

Tato práce může poskytnout základní informace a návod, jak postupovat při řešení a návrhu nůžkových mechanismů pro různé požadavky a použití.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

[1] LEINVEBER, J – VÁVRA, P. *Strojnické tabulky druhé doplněné vydání.* Úvaly: Albra, 2005. ISBN 80-7361-011-6

[2] HÁJEK, O. *Alternativy řešení plošinového zvedáku.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 135 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Malášek, Ph.D.

[3] BUREŠ, M. *Návrh zdvihadla výzbroje pro leteckou techniku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 58 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc.

[4] ČSN EN 280+A2. *Pojízdné zdvihací pracovní plošiny, konstrukční výpočty, kritéria stability, konstrukce, přezkoušení a zkoušky*. Březen 2010. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

[5] Sortimentální katalog. FERONA A.S. *Ferona* [online]. [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: http://www.ferona.cz/cze/katalog/search.php

[6] Výrobní katalog přímočarých motorů. HYDRAULICS S.R.O. *Hydraulics* [online]. 2009 [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: http://www.hydraulics.cz/system/pdf_czs/1/original/Vyrobni_katalog_primocarych_hydromotoru.pdf?1281090037

[7] Nůžkové plošiny. *Portcz* [online]. 2010 [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: http://www.portcz.com/cs/produkty/nuzkove-plosiny.html

[8] Air technical industries. *Airtechnical* [online]. [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: http://www.airtechnical.com/products.php?page=tandem.htm

[9] Produkty – nůžkové plošiny. LIFTCORP A.S. *Liftcorp* [online]. [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: http://www.liftcomp.cz/cz/produkty/plosiny/nuzkove/

[10] Iteco. *Direct industry* [online]. [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: http://www.directindustry.com/prod/imer-international-spa-iteco-powered-access-divi/articulating-boom-lifts-22511-51171.html

[11] Stavebnice hydraulických agregátù. AGRO HYTOS S.R.O. *Argo Bitux* [online].[cit. 2012-05-17]. Dostupné z: http://argo.bitux.de/site/pdf/hytos/hc7212.pdf

[12] Katalog trakčních baterií. BRANNER BATTERIES. *Banner batterien* [online]. [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: http://www.bannerbatterien.com/banner/files/FolderTractionBullGelPzV_cz.pdf

[13] Katalog pojezdových kol. BLICKLE. *Blickle* [online]. [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: http://www.blickle.cz/rubrika-vyrobniho-programu.html?rid=19

[14] Katalog kombinovaných kladek. WINKEL. *Winkel* [online]. [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: http://www.winkel.de/cz/vyrobky/komponenty/kombinovane-kladky/kombinovane-kladky-polyamid/jednotlive-kladky-polyamid/

[15] Katalog kluzných pouzder. SKF. *Tpb* [online]. 2000 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: http://www.tpb.cz/editor/filestore/File/SKF%20-%20KluznaPouzdra.pdf

[16] Renault Midlum - NP. SAZ S.R.O. *Road-rail* [online]. [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: http://www.road-rail.eu/products/renault_midlum_np/renault_midlum_np_sk.htm

[17] Nůžková plošina SkyJack. TRASEK TS S.R.O. *Logismarket* [online]. [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: http://www.logismarket.cz/trasek-ts/nuzkova-plosina/1309608997-947644179-p.html

[18] Zdvihací plošina DG01. DELTALIFT. *Deltalift* [online]. [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: http://www.deltalift.cz/staticka-zdvihaci-plosina-dg01-1t-zdvih-1000-mm-2/

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A_M	[-]	čtvercová matice 19x19
A_M^{-1}	[N]	inverzní matice k matici A_M
b	[-]	sloupcová matice představující pravou stranu rovnic
d	[mm]	průměr čepu
d_1	[-]	počet obecných vazeb
d_2	[-]	počet rotačních, posuvných a valivých vazeb
d_N	[mm]	průměr čepu v místě N
d_O	[mm]	průměr čepu v místě O
$D_{píst}$	[mm]	průměr hydraulického pístu
d_V	[mm]	průměr čepu v místě V
E	[MPa]	modul pružnosti oceli
F	[N]	síla od hmotnosti břemene
F_A	[N]	síla působící v bodě A
F_{Ax}	[N]	síla v podpoře A ve směru osy x
F_{Ay}	[N]	síla v podpoře A ve směru osy y
F_B	[N]	síla v podpoře B
F_{Cx}	[N]	síla působící v bodě C ve směru osy x
F_{Cy}	[N]	síla působící v bodě C ve směru osy y
F_{Dx}	[N]	síla působící v bodě D ve směru osy x
F_{Dy}	[N]	síla působící v bodě D ve směru osy y
F_{Ex}	[N]	síla působící v bodě E ve směru osy x
F_{Ey}	[N]	síla působící v bodě E ve směru osy y
F_G	[N]	polovina tíhové síly pracovního koše
F_{Gk}	[N]	tíhová síla pracovního koše
F_{Gx}	[N]	síla působící v bodě G ve směru osy x
F_{Gy}	[N]	síla působící v bodě G ve směru osy y
F_{Hx}	[N]	síla působící v bodě H ve směru osy x
F_{Hy}	[N]	síla působící v bodě H ve směru osy y
F_i	[N]	síla působící v místě i, kde $i \in \{L, N, O, P, Q, R, S, V, W\}$
F_{Jx}	[N]	síla působící v bodě J ve směru osy x
F_{Jy}	[N]	síla působící v bodě J ve směru osy y
F_{Kx}	[N]	síla působící v bodě K ve směru osy x

F_{Ky}	[N]	síla působící v bodě K ve směru osy y
F_{Lx}	[N]	síla působící v bodě L ve směru osy x
F_{Lx}''	[N]	průmět síly působící v bodě L do osy x''
F_{Ly}	[N]	síla působící v bodě L ve směru osy y
F_{Ly}''	[N]	průmět síly působící v bodě L do osy y''
F_{Mx}	[N]	síla působící v bodě M ve směru osy x
F_{Mx}'	[N]	průmět síly působící v bodě M do osy x'
F_{My}	[N]	síla působící v bodě M ve směru osy y
F_{My}'	[N]	průmět síly působící v bodě M do osy y'
F_{Nx}	[N]	síla působící v bodě N ve směru osy x
F_{Nx}'	[N]	průmět síly působící v bodě N do osy x'
F_{Nx}''	[N]	průmět síly působící v bodě N do osy x''
F_{Ny}	[N]	síla působící v bodě N ve směru osy y
F_{Ny}'	[N]	průmět síly působící v bodě N do osy y'
F_{Ny}''	[N]	průmět síly působící v bodě N do osy y''
F_{Ox}	[N]	síla působící v bodě O ve směru osy x
F_{Ox}'	[N]	průmět síly působící v bodě O do osy x'
F_{Ox}''	[N]	průmět síly působící v bodě O do osy x''
F_{Oy}	[N]	síla působící v bodě O ve směru osy y
F_{Oy}'	[N]	průmět síly působící v bodě O do osy y'
F_{Oy}''	[N]	průmět síly působící v bodě O do osy y''
F_{Px}	[N]	síla působící v bodě P ve směru osy x
F_{Px}'	[N]	průmět síly působící v bodě P do osy x'
F_{Px}''	[N]	průmět síly působící v bodě P do osy x''
F_{Py}	[N]	síla působící v bodě P ve směru osy y
F_{Py}'	[N]	průmět síly působící v bodě P do osy y'
F_{Py}''	[N]	průmět síly působící v bodě P do osy y''
F_{Qx}	[N]	síla působící v bodě Q ve směru osy x
F_{Qx}'	[N]	průmět síly působící v bodě Q do osy x'
F_{Qx}''	[N]	průmět síly působící v bodě Q do osy x''
F_{Qy}	[N]	síla působící v bodě Q ve směru osy y
F_{Qy}'	[N]	průmět síly působící v bodě Q do osy y'
F_{Qy}''	[N]	průmět síly působící v bodě Q do osy y''

F_R	[N]	síla působící v bodě R
F_{Rx}'	[N]	průmět síly působící v bodě R do osy x'
F_{Ry}'	[N]	je průmět síly působící v bodě R do osy y'
F_{Sx}	[N]	síla působící v bodě S ve směru osy x
F_{Sx}''	[N]	průmět síly působící v bodě S do osy x''
F_{Sy}	[N]	síla působící v bodě S ve směru osy y
F_{Sy}''	[N]	průmět síly působící v bodě S do osy y''
F_{Vx}	[N]	síla působící v bodě V ve směru osy x
F_{Vx}'	[N]	průmět síly působící v bodě V do osy x'
F_{Vy}	[N]	síla působící v bodě V ve směru osy y
F_{Vy}'	[N]	průmět síly působící v bodě V do osy y'
F_{Wx}	[N]	síla působící v bodě W ve směru osy x
F_{Wx}''	[N]	průmět síly působící v bodě W do osy x''
F_{Wy}	[N]	síla působící v bodě W ve směru osy y
F_{Wy}''	[N]	průmět síly působící v bodě W do osy y''
g	[ms^{-2}]	tíhové zrychlení
J_{min}	[mm^4]	minimální kvadratický moment průřezu
J_y	[cm^4]	kvadratický moment průřezu k ose y
J_z	[cm^4]	kvadratický moment průřezu k ose z
l	[mm]	délka těles nůžkového mechanismu, délka obecně
l_{AB}	[mm]	vzdálenost mezi body A a B
l_{AC}	[mm]	vzdálenost mezi body A a C
l_{AE}	[mm]	vzdálenost mezi body A a E
l_{BC}	[mm]	vzdálenost mezi body B a C
l_{BD}	[mm]	vzdálenost mezi body B a D
l_{BF}	[mm]	vzdálenost mezi bodem B a silou
l_{CD}	[mm]	vzdálenost mezi body C a D
l_{CE}	[mm]	vzdálenost mezi body C a E
l_{DG}	[mm]	vzdálenost mezi body D a G
l_{DH}	[mm]	vzdálenost mezi body D a H
l_{EG}	[mm]	vzdálenost mezi body E a G
l_{EJ}	[mm]	vzdálenost mezi body E a J
l_{GH}	[mm]	vzdálenost mezi body G a H

l_{GJ}	[mm]	vzdálenost mezi body G a J
l_{HK}	[mm]	vzdálenost mezi body H a K
l_{HM}	[mm]	vzdálenost mezi body H a M
l_{JK}	[mm]	vzdálenost mezi body J a K
l_{JL}	[mm]	vzdálenost mezi body J a L
l_{KL}	[mm]	vzdálenost mezi body K a L
l_{KM}	[mm]	vzdálenost mezi body K a M
l_{LN}	[mm]	vzdálenost mezi body L a N
l_{LP}	[mm]	vzdálenost mezi body L a P
l_{MN}	[mm]	vzdálenost mezi body M a N
l_{MO}	[mm]	vzdálenost mezi body M a O
l_{NO}	[mm]	vzdálenost mezi body N a O
l_{NP}	[mm]	vzdálenost mezi body N a P
l_{NV}	[mm]	vzdálenost mezi body N a V
l_{OQ}	[mm]	vzdálenost mezi body O a Q
l_{OS}	[mm]	vzdálenost mezi body O a S
l_{OV}	[mm]	vzdálenost mezi body O a V
l_{PQ}	[mm]	vzdálenost mezi body P a Q
l_{PR}	[mm]	vzdálenost mezi body P a R
l_{QR}	[mm]	vzdálenost mezi body Q a R
l_{QS}	[mm]	vzdálenost mezi body Q a S
l_{QW}	[mm]	vzdálenost mezi body Q a W
l_{SW}	[mm]	vzdálenost mezi body S a W
l_{VW}	[mm]	vzdálenost mezi body V a W
l_{VZ}	[mm]	vzdálenost mezi body V a Z
l_{WZ}	[mm]	vzdálenost mezi body W a Z
m	[-]	počet těles včetně rámu
m	[kg]	hmotnost břemene
m_k	[kg]	hmotnost pracovního koše
M_{oz}	[Nm]	ohybový moment k ose z
M_{zN}'	[Nm]	ohybový moment v místě N k ose z' na VII. tělese
M_{zN}''	[Nm]	ohybový moment v místě N k ose z'' na VIII. tělese
M_{zO}'	[Nm]	ohybový moment v místě O k ose z' na VII. tělese

$M_{zQ'}$	[N]	ohybový moment v místě Q k ose z' na IX. tělese
$M_{zQ''}$	[N]	ohybový moment v místě Q k ose z'' na X. tělese
$M_{zW''}$	[N]	ohybový moment v místě W k ose z'' na X. tělese
n	[-]	počet stupňů volnosti
NP	[-]	neznámé parametry
p	[MPa]	jmenovitý tlak
p_{dov}	[MPa]	dovolený stykový tlak
p_s	[MPa]	stykový tlak
$S_č$	[mm]	plocha čepu
S_n	[cm^2]	plocha průřezu nosníku
S_v	[mm^2]	plocha válce
T	[N]	smyková síla
W_{oy}	[cm^3]	pružný modul průřezu v ohybu k ose y
W_{oz}	[cm^3]	pružný modul průřezu v ohybu k ose z
x	[-]	sloupcová matice obsahující označení jednotlivých sil
α	[-]	součinitel závislý na typu uložení
β	[-]	opravný součinitel vycházející ze Žuravského vztahu
λ	[-]	štíhlost prutu
λ_{kr}	[-]	kritická štíhlost prutu
μ	[-]	počet neznámých parametrů
μ_M	[-]	počet neznámých momentů
μ_R	[-]	počet neznámých poloh působení sil
ν	[-]	počet použitelných podmínek statické rovnováhy
ν_M	[N]	počet použitelných podmínek momentové statické rovnováhy
σ_k	[MPa]	kritické tlakové napětí
σ_o	[Pa]	ohybové napětí
$\sigma_{o\,dov}$	[Pa]	dovolené ohybové napětí
τ_s	[MPa]	smykové napětí
$\tau_{s\,dov}$	[MPa]	dovolené smykové napětí

SEZNAM PŘÍLOH

Výkresová dokumentace:

NŮŽKOVÁ ZDVIHACÍ PLOŠINA	0-BP-2012/č.01
NŮŽKOVÁ ZDVIHACÍ PLOŠINA	4-BP-2012/č.01-1
NŮŽKOVÁ ZDVIHACÍ PLOŠINA	4-BP-2012/č.01-2
NŮŽKOVÝ MECHANISMUS PRAVÝ	1-BP-2012/č.02
ZÁKLADNÍ RÁM	1-BP-2012/č.03
JÄCKEL	3-BP-2012/č.04
ČEP	3-BP-2012/č.05