

## DYNAMIC QUALITY ANALYSIS OF THE ELEVATING PLATFORM TRUCK

V. Čech\*, O. Smolík\*\*

**Summary:** *The “Sněžka” Reconnaissance and Observation System is the special military design of the elevating platform truck. The authors of this paper took part in the experimental and theoretical analysis of the vibration of the mechanical construction of this system. It is given some data together with their explanation in the paper, which clears up natural vibration of the system.*

### 1. Úvod

V posledních přibližně dvaceti letech se začala ve vyspělých armádách světa uplatňovat zařízení, která svou konstrukcí vycházejí z pojezdných vysokozdvíhacích pracovních plošin užívaných v civilním sektoru již řadu let. Použití této koncepce zvyšuje pasivní ochranu těchto prostředků a umožňuje jejich efektivní činnost i v zalesněném terénu a v osadách (zastavěném terénu).

Na vojenské aplikace jsou kladeny velmi tvrdé požadavky, neboť na vlastní plošinu jsou umístovány průzkumné prostředky (televizní a infračervené kamery, radiolokátory atd.) a také palebné prostředky, nejčastěji odpalovací zařízení protitankových (OZ PTRS) a protiletadlových řízených střel (OZ PLRS).

Působení větru a řídicí síly a momenty nutné k řízení pohybu částí celého mechanického systému vyvolávají buzení konstrukce, která pak kmitá a tím ztěžuje dosažení požadované přesnosti měření souřadnic cílů resp. přesné zamerování PTRS a PLRS do směru na cíl a navádění PTRS za jejího letu. Konstrukce je také intenzivně vybudena tlakem plynů vytékajících z trysek startující rakety.

Autoři příspěvku se aktivně podíleli na vývoji československého resp. českého průzkumně pozorovacího kompletu „Sněžka“ (dále jen „objekt“). Celý projekt měl stupeň utajení „Tajné“. Údaje zde publikované [2,3,4,5] jsou převzaty z jeho dílčích úkolů, které měly stupeň utajení „Obyčejné“. Navíc číselné údaje se týkají pouze funkčního vzorku objektu s cílem zachování obchodního tajemství podle obchodního zákoníku.

V květnu 1990 provedl kolektiv pod vedením Čecha, V. první orientační měření vlastního kmitání objektu, které potvrdilo, že danou problematikou je nutné se zabývat. Byla zpracovaná první verze metodiky měření dynamických vlastností objektu.

\* Doc.Ing. Vladimír Čech, CSc., poradce, Pavlovská 35, 623 00 Brno, e-mail: cech.vladimir@post.cz

\*\* Doc.Ing. Otakar Smolík, CSc., INTEGR s. r. o., Brno, osmolik@volny.cz

V následném období byl vytvořen výpočtový model pro metodu konečných prvků [2] a byla provedena další měření [4]. Získané poznatky vyústily v práci [3] a [5].

V příspěvku se soustředíme pouze na problematiku související s přesným zjišťováním souřadnic cílů.

## 2. Vymezení problematiky

*Objekt* (obr.1) se skládá, s ohledem na zaměření dalšího výkladu, především z

- pásového vozidla (modifikace podvozku bojového vozidla pěchoty BVP-1 resp. 2),
- manipulátoru polohy (MP) a
- manipulátoru směrového vektoru (MSV).

*Manipulátor polohy* (MP) je rovinný mechanismus pracující v rovině podélné symetrie vozidla, který umožňuje zdvíhat MSV až do výšky cca 14m nad terénem. Skládá se především ze

- dvou dlouhých ramen,
- jednoho krátkého ramena,
- pracovní plošiny (základy) pro připevnění MSV a
- čtyřech přímočarých hydromotorů (PČH) spolu s příslušnými zdroji a ovladači.

Na obr. 1 se MP nachází v poloze, kdy dolní dlouhé rameno je v horizontální (zcela sklopené) poloze a horní dlouhé rameno spolu s krátkým ramenem je v jedné ze svých pracovních poloh.

MP lze přemístit z jeho přepravní, mechanicky fixované, polohy do prakticky neomezeného počtu poloh pracovních. Z nich jsou nejdůležitější dvě

- jízdní pracovní poloha MSV (obě dlouhá ramena horizontálně a zaaretovaná, krátké rameno vztyčeno a pracovní plošina ve „vodorovné“ poloze)
- pracovní poloha s maximální pracovní výškou MSV.

Každá z pracovních poloh MP je aretována s využitím hydraulických zámků.

*Manipulátor směrového vektoru* (MSV) je v podstatě řízený kardanův závěs, skládající se ze

- základové desky připojené k pracovní plošině (základně) MP,
- otočné (přístrojové) části MSV (řízené otáčení okolo „vertikální“ osy – tzv. udílení odměru MSV) a
- elevační části MSV (řízené otáčení okolo „horizontální“ osy - tzv. udílení náměru MSV)

Na otočných a elevačních částech MSV jsou umístěny potřebné průzkumné receptory a palebné efekторы (*užitečné zatížení*).

Maximální požadovaná nosnost MP je 600kg (MSV včetně užitečného zatížení).

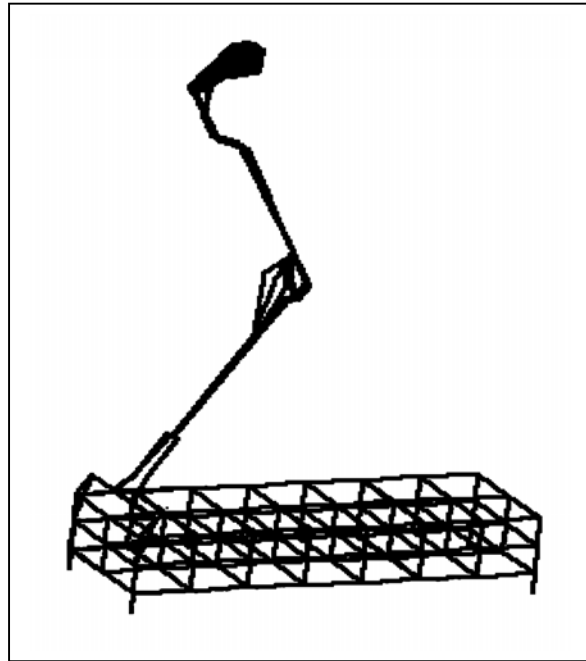
Ke *zjišťování souřadnic cílů* jsou využívány následující systémy

- pozemní navigační aparatura resp. systém GPS navigace určující okamžité zeměpisné souřadnice zvoleného bodu na vozidle ( $X_v, Y_v, h_v$ )
- *systém měření úhlových odchylek* (SMUO) poskytující velikost *směrníku cíle* v relativní souřadné soustavě otočných částí MSV
- náklonoměr vozidla (NV) poskytující údaje o úhlech náklonu vozidla vůči místní vertikále.

*SMUO* je umístěn na otočných částech MSV a jeho součástí jsou tři snímače, jejichž měřicí osy jsou orientovány rovnoběžně s osami kardanova závěsu MSV. Snímače sklonu a náklonu měří okamžitý sklon a náklon základové desky MSV tzn. i pracovní plošiny (základny) MP vůči místní vertikále.



Obr. 1 Pohled na objekt



Obr. 2 Výpočtový model MKP

Jádrem SMUO je snímač směru MSV (gyroagregát) určující okamžité natočení roviny kolmé na osu kardanova závěsu MSV, která umožňuje udílení „náměru“ elevačním částem MSV a to vůči zeměpisnému severu (obvykle „kilometrovému“ tzn. směru osy X).

Je-li zaměřovačem (pozorovací přístroj resp. radiolokátor), který je umístěn na elevačních částech MSV, zaměřeno na cíl, pak SMUO generuje tzv. *směrník cíle*  $\alpha_c$  měřený ve směru pohybu hodinových ručiček v rovině kolmé na místní vertikálu tzn. úhel mezi zeměpisným severem (směr osy X) a směrem na zvolený bod cíle. K potřebným transformacím souřadnic využívá SMUO údajů svých snímačů, snímačů NV a snímačů MSV (snímač relativního natočení otočných částí MSV vůči základové desce a snímač relativního natočení elevačních částí vůči rovině základové desky).

*Poloha cíle* je určována jeho okamžitými topografickými souřadnicemi

$$X_C = X_V + D_C \cdot \cos \alpha_C, \quad (1a)$$

$$Y_C = Y_V + D_C \cdot \sin \alpha_C, \quad (1b)$$

kde  $D_C$  je délka cíle od MSV měřená pomocí laserového dálkoměru nebo radiolokátoru.

Z podrobného rozboru problému vyplývá, že největší obtíže jsou spojeny s dostatečně přesným zjištěním směrníku cíle  $\alpha_C$ .

Dá se ukázat, že pro *směrodatnou odchylku směrníku cíle* platí [2]

$$\sigma_\alpha = \sqrt{(\sigma_V^2 + \sigma_P^2) + \sigma_Z^2 + \sigma_C^2} \quad a \quad (2)$$

$$\sigma_V = \sigma_{V0} \cdot \sqrt{1 + s_V^2(t)} \quad , \quad s_V(t) = \sigma_{VX}(t) / \sigma_{V0}$$

kde  $\sigma_{V0}$  je směrodatná odchylka určení a nastavení počáteční orientace snímače směru MSV (SMUO) v čase  $t_0$  ve výchozím bodě  $(X_{V0}, Y_{V0})$  vůči zeměpisnému severu. Pro dostatečně přesné nastavení je nutné, aby MP byl v přepravní poloze.

$\sigma_{vX}(t)$  je složka směrodatné odchylky  $\sigma_v$  v čase  $t > t_0$  (pro  $t = 0$  je  $\sigma_{vX} = 0$ ) způsobená nepřesností SMUO, která monotónně narůstá v čase ( $s_v(t) \geq 0$ ) a jejím hlavním zdrojem jsou vlastnosti reálného gyroskopického snímače směru s horizontální a směrovou korekcí obvykle označované jako „únik gyroskopu“ [2].

$\sigma_Z$  je směrodatná odchylka relativního natočení otočných částí MSV vůči podélné ose vozidla měřená (transformovaná) do horizontální roviny

$\sigma_P$  je směrodatná odchylka zvětšující  $\sigma_v$  v důsledku kmitání konstrukce objektu resp. MP v intervalu od  $t_0$  do  $t$ . Přičemž hlavním zdrojem kmitání je jízda objektu terénem z bodu  $(X_{V0}, Y_{V0})$  do bodu  $(X_V, Y_V)$  a kmitání konstrukce v bodě  $(X_V, Y_V)$  způsobené větrem.

$\sigma_C$  je směrodatná odchylka zamíření MSV na cíl daná

- dynamickými vlastnostmi člověka jako operátora [1]
- kvalitou regulačních obvodů pro manipulaci s MSV
- kmitáním konstrukce objektu [6].

V takticko-technických požadavcích (TTP) na vývoj objektu a následně v oficiálních prospektech je uváděno, že *přesnost určování směrníku cíle*  $a_C$  charakterizovaná směrodatnou odchylkou  $\sigma_a$  (vzorec (2)) má být po celou dobu jednoho „bojového cyklu objektu“ trvajících 60min menší nebo rovna  $3dc$  ( $3,14$  mrad resp.  $0,18^\circ$  resp.  $10,8'$ ). Pro dodržení této hodnoty je rozhodující konečná fáze bojového cyklu, kdy složka  $\sigma_{vX}(t)$  v důsledku „úniku gyroskopu“ bude největší. Zároveň je největší i únava případně i stres operátora [1] a kumulovaný efekt kmitání konstrukce objektu charakterizovaný  $\sigma_P$ .

Podle požadavků TTP má být tato přesnost dodržena i za působení větru o rychlosti až  $60\text{km/h}$  ( $16,67\text{ms}^{-1}$ ) v pracovním prostředí charakterizovaném teplotou atmosféry  $-30^\circ$  až  $+50^\circ\text{C}$ , relativní vlhkostí vzduchu až 98% a atmosférickým tlakem 80 až 140 kPa.

Člověk jako řídicí prvek regulační soustavy (operátor) je schopen reagovat na regulační odchylku (poloha cíle vůči záměrnému kříži na obrazovce), která má náhodný charakter, a přiměřeně ji kompenzovat ovládním ovladače ve frekvenčním pásmu 0 až cca 0,3 Hz [1]. Je-li frekvenční pásmo větší, roste především fázová chyba operátora jako přenosového članku. To znamená, že *bude-li nejnižší vlastní frekvence konstrukce objektu větší jak 0,3Hz, je nepravděpodobné, že za působení silnějšího nárazového větru bude možné požadovanou přesnost určení směrníku cíle  $a_C$  dodržet.*

Řešení daného problému spočívá v použití adaptivní regulační soustavy [3] a nebo použití systému stabilizace zorného pole zaměřovače resp. radiolokační antény. Na tento problém byl řešitelský tým upozorněn již v září 1988 (Čech, V. – oponentní posudek na Zpráva ze zkoušek funkčního vzorku výsuvné plošiny – úkol “ Soprán – Vyhlídka“).

### 3. Hlavní výsledky získané měřením kmitání objektu

Některé vybrané výsledky měření jsou publikovány v [4] a souhrnně jsou uvedeny v [5].

K vybuzení kmitání konstrukce byly používány elektrodynamické budiče (vibrátory) buzené monoharmonickým signálem [7]. Pro ověření chování konstrukce ve frekvenčním pásmu do cca 1 Hz byla konstrukce vybuzena lidskou silou přes lano a bylo zaznamenáváno volné dokmitávání konstrukce (Obr.3). Buzení bylo přikládáno v různých bodech konstrukce a z různých směrů.

K záznamu kmitání vybraných míst konstrukce bylo použito současně 3 akcelerometrických snímačů [7]. Dva z nich zaznamenávaly kmitání pracovní plošiny MP

s ekvivalentní zátěží 460kg ve dvou na sebe kolmých směrech (osa vertikální – y a osa boční – z) a jeden snímač byl přikládán na různá místa konstrukce k určení kmiten a uzlů vlastních tvarů kmitání. Frekvenční spektra záznamů kmitání ve směru osy vertikální – y a podélné – x se prakticky nelišila v průběhu předběžných měření, proto bylo dále měřeno pouze ve směru osy y.

Měření probíhala ve dvou pracovních polohách konstrukce (jízdni pracovní poloha MSV a pracovní poloha téměř odpovídající maximální pracovní výšce MSV určená výškou montážní haly [4]).

Později bylo k měření také využito záznamů signálů o úhlových natočeních pracovní plošiny MP ze tří snímačů SMUO [5] a to umožnilo zpřesnit hodnotu vlastních frekvencí v pásmu do 0,75Hz.

Měřené signály byly zaznamenávány systémem M32 [8] a následně zpracovány na počítači.

Pozornost byla věnována frekvenčnímu pásmu do 5 Hz. Měřením bylo prokázáno, že konstrukce, ač „výkresově“ symetrická podle podélné roviny symetrie vozidla má prostorové vlastní tvary kmitání. V důsledku toho i buzení v rovině symetrie vyvolává kmitání na ní kolmé atd.

Konstrukce vykazuje některé znaky nelineární soustavy. Pravděpodobnou příčinou jsou vůle v čepových spojích mechanismů, silná nelinearita pérování vozidla a vlastnosti přímočarých hydromotorů (PČH).

Měřením [4] bylo prokázáno, že vlastní frekvence a vlastní tvary kmitání konstrukce prakticky nezávisí na tom zda vozidlo stojí na

- pásovém podvozku nebo
- čtyřech hydraulických nohách systému stabilizace a nivelace podvozku (SSNP)
- nebo na pásovém podvozku při částečném nadzvednutí pomocí SSNP.

Na základě toho bylo rozhodnuto o odstranění SSNP z objektu a zároveň to umožnilo používat velmi jednoduchý model podvozku objektu ve výpočtovém modelu MKP (obr.2) [2].

V *jízdni pracovní poloze* je rozhodující vlastní frekvence rovna 1,80 až 2,2 Hz s poměrným útlumem 0,024 až 0,037. Rozdíly závisí na tom, zda dlouhá ramena MP jsou mechanicky zaaretována či nikoli [4, 5]. K tomu dodejme, že typické periody vlastních kmitů korby BVP za jízdy jsou pro

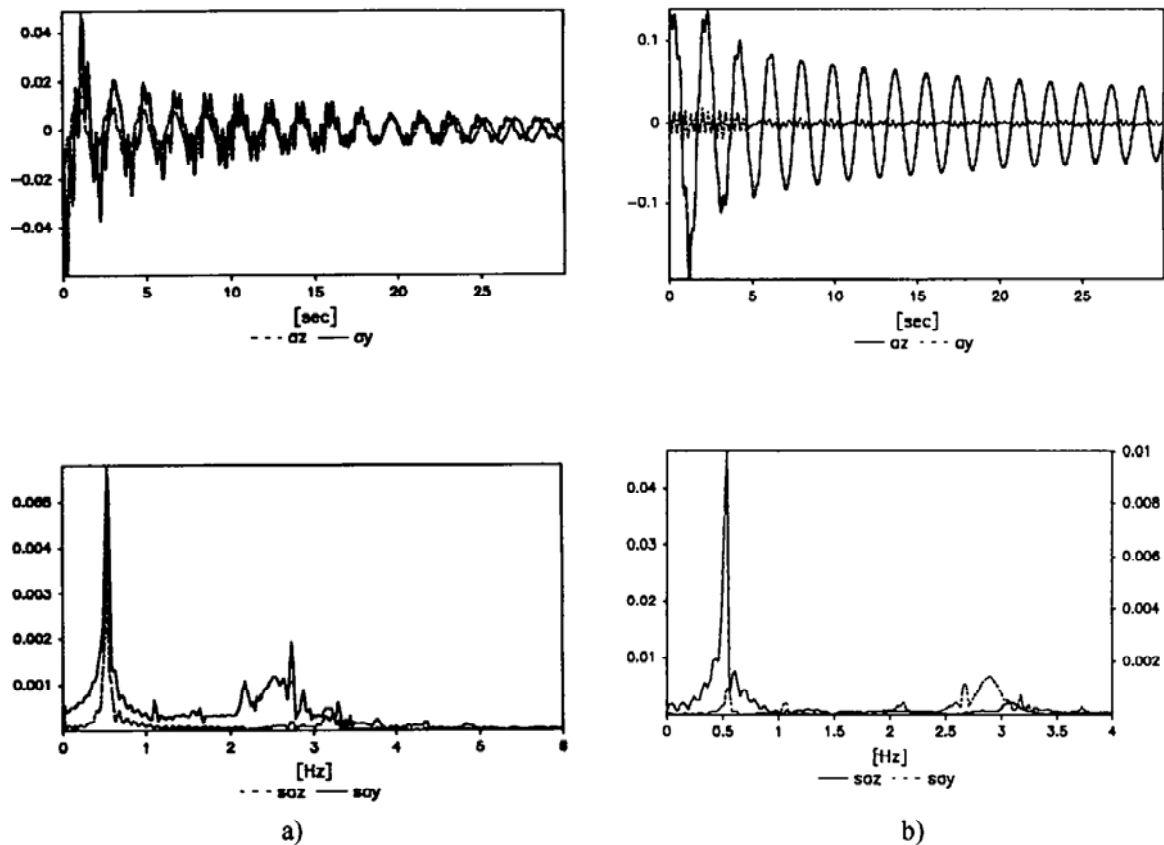
- podélné úhlové kmity cca 0,94s (1.06Hz) při poměrném útlumu cca 0,19,
- příčné úhlové kmity cca 0,35s (2.86Hz) při poměrném útlumu cca 0,37 a
- vertikální kmity středu hmotnosti cca 0,79s (1.27Hz) při poměrném útlumu cca 0,2.

Pérování pásových vozidel je úmyslně konstruováno jako nelineární soustava, proto skutečné hodnoty závisejí na okamžité velikosti neseného nákladu a amplitudě kmitů.

V *pracovní poloze „maximální pracovní výška MSV v montážní hale“* se nejdůležitější vlastní frekvence konstrukce nalézají v pásmu 0,3 až 0,7 Hz při poměrném útlumu cca 0,02.

*Prvnímu vlastnímu tvaru* odpovídá kmitání konstrukce objektu ve směru převážně kolmém na rovinu podélné symetrie vozidla (boční kmitání MP ve směru osy z) o vlastní frekvenci 0,34 až 0,53 Hz.

*Druhému vlastnímu tvaru* odpovídá kmitání konstrukce objektu převážně v rovině podélné symetrie vozidla (podélné – osa x a vertikální y) o vlastní frekvenci 0,50 až 0,56 Hz. Při bočním náklonu objektu o 8° se zvýší na 0,575 Hz. Je-li spodní dlouhé rameno MP sklopeno (obr.1), její hodnota vzroste na cca 0,71 Hz, přičemž první vlastní frekvence se prakticky nezmění. Byl pozorován *vznik zánějů* o periodě cca 18,5 až 19 s, který lze objasnit vzájemnou blízkostí prvních dvou vlastních frekvencí konstrukce objektu.



Obr. 3 Záznam volného kmitání (zrychlení v ose y  $a_y$  resp. v ose z  $a_z$ ) po vybuzení ve směru osy x (podélně ad a)) resp. osy z (příčně ad b)) a odpovídající frekvenční spektra, přičemž objekt stojí na pásech v pracovní poloze „maximální pracovní výška MSV v montážní hale“

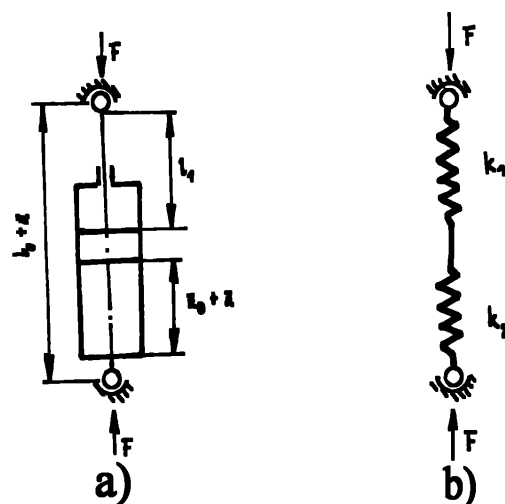
Dále bylo pozorováno „přelévání“ volných kmitů a to bez zjevné příčiny z jedné do další osy (x,y,z), přičemž nakonec soustava kmitá na jediné (průměrné) frekvenci cca 0,5Hz.

Nakonec je nutné upozornit na to, že kmity ve směru os x a z se prakticky nezeslabeně přenášejí do torzních kmitů okolo vertikální osy y, což je velmi nebezpečné z hlediska přesnosti měření směrníku cíle  $\alpha_C$ , neboť vítr vybuzuje právě kmity ve směru os x a z.

Třetí a vyšší vlastní frekvence nejsou již příliš výrazné (obr.3). Jejich přehled je uveden v tabulce 1.

#### 4. Výpočet vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitání konstrukce objektu

Struktura modelu objektu pro výpočty metodou konečných prvků je patrná



Obr.4 Výpočtové schéma osové tuhosti přímočarého hydromotoru (PČH)

Tabulka 1. Přehled naměřených a vypočtených vlastních frekvencí objektu v pracovní poloze „maximální pracovní výška MSV v montážní hale“

poř.č.	vlastní frekvence (Hz)	
	měření	výpočet MKP
1	0,34 – 0,53	0,32
2	0,50 – 0,75	0,48
3	1,10 – 1,20	1,14
4	1,55 – 1,74	1,36
5	2,10 – 2,20	1,85
6	2,53 – 2,70	?
7	3,05 – 3,45	3,24
8	3,70 - 3,90	3,31
9	4,00 – 4,10	?

tuhostí a výrobce zaručuje jejich dostatečnou vzpěrnou tuhost. Ekvivalentní osová tuhost prutu  $k$  je dána jako harmonický průměr osových tuhostí pístnice PČH  $k_1$  (Obr.4) a ekvivalentní tuhosti  $k_2$  stlačovaného sloupce tekutiny o výpočtové výšce  $(z_0 + z) = V/S$ , kde  $V$  je objem stlačované tekutiny a  $S$  je pracovní plocha pístu. Hodnota  $k_2$  podstatně závisí na okamžitém pracovním zdvihu pístu PČH  $z$  (objemu  $\Delta V = V - V_0$ ), přičemž pro všechny hodnoty pracovního zdvihu je  $k_2$  o řád nižší než  $k_1$ , takže přibližně platí, že  $k = k_2$ .

Tuhost  $k_2$  závisí na velikosti objemového modulu pružnosti kapaliny  $K$  a na objemu nerozpuštěného (dispergovaného) vzduchu  $V_v$  v objemu  $V$  při daném pracovním tlaku  $p$  tekutiny (stupeň „zavzdušnění“ objemu  $V$ ) [2]. Hodnota objemového modulu pružnosti kapaliny  $K$  je teplotně závislá, takže byl uvažován jeho rozsah pesimisticky od 0.9 do 1.6 GPa, pak pro použité čtyři rozdílné typy PČH v jejich základní poloze ( $z = 0$ ) se hodnota  $k_2$  přibližně pohybuje od 28 do 200 MN/m (nezavzdušněno). Pro jejich maximální zdvih (100%) hodnota  $k_2$  klesne na 9 až 24% její základní hodnoty ( $z = 0$ ) [2]. Zadaný rozsah teplot okolí objektu (-30 až +50°C viz odst. 2) vyžaduje, aby použitá hydraulická kapalina měla velmi plochou viskozitní křivku. Nedostatkem těchto kapalin je, že jsou schopny v sobě rozpustit 10 až 15% vzduchu (absorbovaný vzduch, který nemá vliv na velikost  $k_2$ ). Při změnách pracovního tlaku a teploty kapaliny dochází k vzájemným změnám objemů vzduchu absorbovaného a dispergovaného tzn. mění se zavzdušnění PČH a tudíž i hodnota  $k_2$ . Čím je větší zavzdušnění, tím je hodnota  $k_2$  menší [2]. V reálných provozních podmínkách nelze prakticky zjišťovat okamžitou hodnotu zavzdušnění jednotlivých PČH.

Tyto skutečnosti, spolu s vědomím, že podvozek je nelineární pružnou soustavou, nás vedly k tomu, že od počátku jsme výsledky výpočtů pomocí MKP považovali za sekundární vůči výsledkům zjištěným experimentálně (3. odstavec).

z obr.2. Byly použity prutové prvky. K výpočtům byl použit programový systém TPS-10.

Výsledky zpřesněného (opakovaného) výpočtu vlastních frekvencí konstrukce objektu v jeho pracovní poloze „maximální pracovní výška MSV v montážní hale“ jsou uvedeny v tabulce 1. Původní výsledky byly publikovány, včetně vlastních tvarů kmitání, v [2] a [5].

Základní problém modelování vlastních kmitů konstrukce objektu pomocí MKP spočíval v náhradě přímočarých hydromotorů (PČH) prutovými prvky o ekvivalentní osově tuhosti [2].

PČH jsou uloženy v konstrukci na obou svých koncích kloubově, proto nebylo nutné se podrobněji zabývat jejich ohybovou

## 5. Závěr

V našem příspěvku jsme mohli naznačit pouze část z celého spektra problémů souvisejících s vývojem objektu „Sněžka“, a které vyústilo ve zpracování práce [3]. V příspěvku jsme se vůbec nezabývali problémy spojenými se startem PTRS resp. PLRS.

## 6. Literatura

- [1] CIBULEVSKIJ, I, E.: Čelovek kak zveno sledjaščej sistěmy. Moskva, Nauka 1981, s.288
- [2] ČECH,V. aj.: Systém měření úhlových odchylek a náklonoměr vozidla pro objekt "Sněžka". (Výzkumná zpráva na závěr etapy E1/VUSZ Brno), Centrum a.s. Brno 1991, s.183
- [3] ČECH,V.-SMOLÍK,O.: Matematický model dynamických vlastností manipulátoru polohy pro potřeby řízení pohybů manipulátoru směrového vektoru. (Výzkumná zpráva na závěr etapy E2/VUSZ Brno), Centrum a.s. Brno 1992, s.27. In: Konečný projekt objektu "Sněžka" - průzkumný a pozorovací komplet s výsuvnou plošinou na pásovém podvozku, úkol: 01000 (FMO/STR HS VTZ), VU 010/01 Slavičín 1992.
- [4] ČECH,V.-SMOLÍK,O.-VESELÝ,J.: Vyhodnocení dynamických zkoušek funkčního vzoru objektu Sněžka (Výzkumná zpráva pro VUSZ Brno), Centrum, a.s. Brno 1992, s.30, In: Doplněk č. 1 ke Konečnému projektu objektu Sněžka, VU 010/01 Slavičín 1992
- [5] JALOVECKÝ,R. aj.: Konečný projekt SMUO. Centrum a.s. Brno 1993, s.158
- [6] PIRNER, M. aj.: Dynamika stavebních konstrukcí. Technický průvodce 33, Praha, SNTL 1989
- [7] Technická dokumentace k akcelerometrické aparatuře VEB Roboton – Messelektronik "Otto Schön“, Dresden, DDR a k akcelerometrickým snímačům firmy VEB Metra Mess-und Frequenztechnik, Radebeul, DDR
- [8] Technická dokumentace k digitálnímu Měřicímu a záznamovému systému MC32, firmy BMC Mnichov, BRD