



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**OPTIMALIZACE KONSTRUKCE SANÍ CNC
HORIZONTÁLNÍCH VYVRTÁVACÍCH STROJŮ**

OPTIMIZING DESIGN OF THE SLIDE CNC HORIZONTAL BORING MACHINES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Valenta

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Jiří Marek, Dr.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Bc. Tomáš Valenta
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Inženýrská mechanika a biomechanika
Vedoucí práce:	prof. Ing. Jiří Marek, Dr.
Akademický rok:	2015/16

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 diplomové práce:

Optimalizace konstrukce saní CNC horizontálních vyvrtávacích strojů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je provést tuhostní, pevnostní a nákladovou optimalizaci saní svislé osy u horizontálního vyvrtávacího stroje typu WFT 13 R CNC. Je možné měnit současné konstrukční provedení saní. Výpočtový model bude řešen pomocí Metody konečných prvků (MKP) např. programovým systémem ANSYS nebo jiným.

Cíle diplomové práce:

Řešením této diplomové práce má být dosaženo zvýšení tuhosti a pevnosti saní osy Y u CNC vyvrtávacích strojů z produkce firmy Fermať. Výsledkem budou nejméně tři varianty návrhu konstrukce saní. Výběr optimální varianty bude proveden pomocí technicko - ekonomického zhodnocení.

Vypracujte:

1. Technickou zprávu.
2. Systémový rozbor a popis vlivů které působí na stroj.
3. Návrh nového uspořádání saní Y stroje WFT 13R CNC s nejméně třemi ideovými návrhy.
4. Výběr optimální varianty na základě technického zhodnocení jednotlivých variant.
5. Výběr optimální varianty na základě ekonomického zhodnocení jednotlivých variant.
6. Výběr optimální varianty na základě technicko - ekonomického zhodnocení jednotlivých variant.
7. Doporučení pro konstrukci saní WFT 13 R CNC.
8. Rozbor možností aplikace těchto závěrů na jiné typy strojů z produkce firmy FERMAT.

Seznam literatury:

Marek, J., a kol., (2014): Konstrukce CNC obráběcích strojů III. MM Průmyslové spektrum, Praha.

Fermať CZ, <http://www.fermatmachinery.com/uvod>, přístup 25.listopadu 2015.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhy řešení zvýšení tuhosti saní u CNC horizontálního vyvrtávacího stroje s cílem optimalizovat konstrukci saní. Zvolený problém byl vyřešen pomocí citlivostní analýzy s využitím plánování měření v podmínkách lineární regresní analýzy. Data pro citlivostní analýzu byla získána pomocí výpočtového modelování metodou konečných prvků. Řešení poskytuje pohled na míru vlivu právě na deformaci saní u zkoumaných prvků. Na základě získaných výsledků se vybraly prvky s největším vlivem a vytvořili se tři ideové návrhy zlepšení. Z vytvořených návrhů se vybrala optimální varianta na základě technického, ekonomického a technicko-ekonomického hlediska metodou PATTERN. Tato práce přináší nový pohled a přístup sloužící k inovaci konstrukce s cílem zlepšení tuhosti již existujícího zařízení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tuhost, citlivostní analýza, plánované měření, metoda konečných prvků, horizontální vyvrtávací stroje, deformace saní, optimalizace konstrukce, snížení deformací, metoda PATTERN

ABSTRACT

This master's thesis deals with proposals for solutions to increase the stiffness of the slide for CNC horizontal boring standing in order to optimize the design of the slide. Selected problem was solved by sensitivity analysis using design of experiment in conditions of linear regression analysis. Data for the sensitivity analysis were obtained by using computational modeling using finite element method. The solution provides a view of the degree of influence on the deformation of the examined elements of the slide. Based on these results were selected elements with the greatest influence and created three ideological designs for improvement. Of these designs, was chose an optimal variant by PATTERN method according on the technical, economic and technical-economic aspect. This work offers a new look for the innovating the design to increase rigidity.

KEYWORDS

Stiffness, sensitivity analysis, design of experiment, finite element method, horizontal boring machines, deformation of slide, optimisation of design, reducing of deformations, PATTERN method

VALENTA, Tomáš *Optimalizace konstrukce saní CNC horizontálních vyvrtávacích strojů*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, 2016. 109 s. Vedoucí práce byl prof. Ing. Jiří Marek, Dr.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Optimalizace konstrukce saní CNC horizontálních vyvrtávacích strojů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce panu prof. Dr. Jiřímu Markovi za odborný dohled z oblasti obráběcích strojů a trpělivost. Dále bych rád poděkoval panu prof. Ing. Jindřichu Petruškovi, CSc. za vedení v oblasti metody konečných prvků a aplikování inženýrské mechaniky v praxi. Za pomoc a ochotu při konzultacích s ovládáním programu ANSYS APDL bych rád poděkoval Ing. Petru Lošákovi, PhD.

Panu doc. Ing. Tomášovi Návratovi, PhD. bych rád poděkoval za výpomoc při měření na akademické půdě. Také bych rád poděkoval panu prof. Ing. Přemyslovi Janíčkoví, DrSc. za vedení v oblasti systémového pojetí a pomoci vynést a formulovat určité myšlenky.

Rád bych poděkoval i panu doc. RNDr. Bohumilu Marošovi, CSc. za konzultace v oblasti statistiky.

Dále bych rád poděkoval panu Milanovi Královi, jako zadavateli práce a za přístup k interním dokumentům firmy Fermat. A také bych rád poděkoval Všem pracovníkům, firmy Fermat, kteří byly ochotni pomáhat a poskytnout potřebné informace k tvorbě této práce.

Brno

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	17
1 Formulace problému a cíle řešení	19
1.1 Horizontální vyvrtávací stroje a jejich přesnost	19
1.2 Problémová situace	21
1.3 Formulace problému	22
1.4 Cíle práce	22
2 Systém podstatných veličin	25
2.1 Okolí	25
2.2 Topologie a struktura saní	25
2.3 Vazby s okolím	25
2.4 Aktivace saní z okolí	26
2.5 Ovlivnění saní z okolí	26
2.6 Oborové vlastnosti saní	27
2.7 Procesy probíhající na saních	27
2.8 Projevy saní	27
2.9 Důsledky projevů saní	28
3 Volba metody řešení	29
3.1 Výběr přístupu	29
3.2 Výběr metody	29
3.3 Výběr matematického přístupu	30
3.4 Výsledná metoda řešení	33
4 Vstupní a výstupní údaje do výpočtu a dílčí výpočtové modely	35
4.1 Výběr vstupních údajů	35
4.1.1 Stojan	35
4.1.2 Kuličkový šroub	35
4.1.3 Vřeteník	36
4.1.4 Frézovací vřeteno	38
4.1.5 Výsuvné vyvrtávací vřeteno	38
4.1.6 Saně osy Y	38
4.1.7 Přítlačné lišty	38
4.1.8 Kluzné lišty	39
4.1.9 Kluzné plochy	39
4.1.10 Šedá litina	39
4.1.11 Ocel	39

4.1.12	GS Super Fluid	40
4.1.13	Turcite	41
4.1.14	Gravitace	41
4.1.15	Síly od obrábění	41
4.1.16	Tření	41
4.1.17	Vibrace	41
4.1.18	Olejevý film	42
4.1.19	Teplota v okolí stroje	42
4.1.20	Prašnost a nečistoty v okolí stroje	42
4.2	Výběr výstupních údajů	42
4.2.1	Deformace na makro úrovni	42
4.2.2	Napjatost na makro úrovni	42
4.3	Posouzení zvolené metody se vstupními a výstupními parametry . . .	43
5	Realizace řešení	47
5.1	Díličí modely	47
5.1.1	Model geometrie	47
5.1.2	Model vlastností struktury objektu	50
5.1.3	Okrajové podmínky	54
5.1.4	Model kontaktu mezi saněmi a vřeteníkem	56
5.1.5	Model aktivace saní - zatížení	56
5.2	Díličí výpočet	59
5.3	Citlivostní analýza	60
5.3.1	Výběr vstupních prvků konstrukce saní	60
5.3.2	Plánování měření v podmínkách lineární regresní analýzy . . .	68
6	Prezentace a analýza výsledků	81
6.1	Analýza zkoumaných prvků saní a návrhy zlepšení	82
6.1.1	Kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na vodorovném vedení	82
6.1.2	Kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na svislém vedení . .	82
6.1.3	Kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na svislém vedení stojanu blíže k čelu vřeteníku	82
6.1.4	Kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na svislém vedení stojanu vzdálenějšího od čela vřeteníku	83
6.1.5	Přítlačné lišty v dolní části saní, jako vedení vřeteníku na saních	83
6.1.6	Přítlačné lišty v horní části saní, jako vedení vřeteníku na saních	83
6.1.7	Přítlačné lišty v zadní části saní, pro vymezení pohybu ve směru osy X, blíže k čelu vřeteníku	84

6.1.8	Přítlačné lišty v zadní části saní, pro vymezení pohybu ve směru osy X, vzdálenější od čela vřeteníku	85
6.1.9	Žebrování saní v zadní části	85
6.1.10	Žebrování saní ve spodní části	86
6.2	Statistické posouzení výsledných hodnot regresních koeficientů	86
7	Ideové návrhy zlepšení	89
7.1	T-konstrukce saní	89
7.2	Změna žebrování saní	89
7.3	Materiál pro kluzné plochy	90
7.4	Zhodnocení ideových návrhů metodou PATTERN	91
7.4.1	Technické hledisko	91
7.4.2	Ekonomické hledisko	95
7.4.3	Technicko-ekonomické hledisko	96
7.4.4	Určení optimálního návrhu zlepšení deformace saní a vřeteníku	98
8	Stanovení metodiky pro jiné typy strojů	99
9	Závěr	101
	Literatura	103
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	105
	Seznam příloh	107
	A CD-ROM	109

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Schéma křížové horizontální vyvrtávačky	20
1.2	Výsuvné vyvrtávací vřeteno Fermat [13]	20
1.3	Výsuvné vyvrtávací vřeteno Fermat [Konstrukce Fermat s.r.o.]	20
1.4	Deformace rámu vodorovného vyvrtávacího stroje [1]	21
1.5	Schéma měření kruhové interpolace	22
1.6	WFT 13 R CNC [Fermat s.r.o.]	23
1.7	Saně osy Y [Konstrukce Fermat s.r.o.]	23
3.1	Vetknutý prut	31
4.1	Stojan a KŠ [Konstrukce Fermat s.r.o.]	36
4.2	Tělo vřeteníku [Konstrukce Fermat s.r.o.]	37
4.3	Závislost $\sigma - \epsilon$ materiálu GS Super Fluid	40
5.1	Ukázka modelu saní pro MKP a modelu konstrukce	48
5.2	Ukázka modelu vřeteníku pro MKP a modelu konstrukce	49
5.3	Závislost posuvu na počtu elementů	49
5.4	Konečno-prvková síť saní s kuličkovým šroubem	51
5.5	Konečno-prvková síť vřeteníku	52
5.6	Mesh Metrics	53
5.7	Vetknutí kuličkového šroubu	54
5.8	Detail spojení KŠ se saněmi	54
5.9	Zamezení posuvu vřeteníku v ose z	54
5.10	Okrajové podmínky nahrazující vedení stojanu	55
5.11	Zatížení sestavy	59
5.12	Deformace saní	61
5.13	Deformace sestavy	62
5.14	Skupina vstupních parametrů - materiál Turcite	64
5.15	Skupina vstupních parametrů - kluzné plochy, materiál GS Super Fluid	65
5.16	Skupina vstupních parametrů - přítlačné lišty	66
5.17	Skupina vstupních parametrů - žebrování saní	67
5.18	Sledovaný bod pro jedno-faktoriální experiment	71
5.19	Sledované body pro více-faktoriální experiment s $n = 7$ zkoumanými prvky	75
5.20	Sledované body pro více-faktoriální experiment s $n = 10$ zkoumanými prvky	77
6.1	Rozložení napětí u kluzné plochy červeně zvýrazněné	84
6.2	Deformace saní ve směru osy X	86
6.3	Deformace saní ve směru osy X	87
7.1	Nová T-konstrukce saní a srovnání se stávající	89

7.2	Naznačení konstrukce žebek dle gradientů posuvů X	90
8.1	Vývojový diagram postupu	100

SEZNAM TABULEK

4.1	Posouzení zvolené metody se vstupními a výstupními parametry . . .	44
5.1	Parametry pro model materiálu jednotlivých komponent	50
5.2	Spektrum zatěžující síly poměrově	57
5.3	Spektrum zatěžující síly při použití maximální síly pro posuvy v osách stroje	58
5.4	Spektrum zatěžující síly při použití maximální síly pro výsuv vřetena	58
5.5	Spektrum plánu měření pro jedno-faktoriální experiment s $n = 15$ zkoumanými prvky	70
5.6	Míra citlivosti při jedno-faktoriálním experimentu	73
5.7	Ukázka spektra plánu měření pro více-faktoriální experiment s $n = 7$ zkoumanými prvky	74
5.8	Míra citlivosti při více-faktoriálním experimentu s $n = 7$ zkoumanými prvky	76
5.9	Ukázka spektra plánu měření pro více-faktoriální experiment s $n = 10$ zkoumanými prvky	78
5.10	Míra citlivosti při více-faktoriálním experimentu s $n = 10$ zkoumanými prvky	79
6.1	Míra citlivosti 10 zkoumaných prvků na tuhost saní (výběr)	81
6.2	Statistické hodnoty regresních koeficientů	88
7.1	Porovnávací parametry pro technické hledisko s tendencí změny . . .	92
7.2	Párové porovnání parametrů pro technické hledisko	92
7.3	Stanovení váhy významnosti porovnávaných parametrů pro technické hledisko	93
7.4	Stanovení pořadí srovnávaných ideových návrhů z technického hlediska	94
7.5	Porovnávací parametry pro ekonomické hledisko s tendencí změny . .	95
7.6	Párové porovnání parametrů pro ekonomické hledisko	95
7.7	Stanovení váhy významnosti porovnávaných parametrů pro ekonomické hledisko	95
7.8	Stanovení pořadí srovnávaných ideových návrhů z ekonomického hlediska	96
7.9	Porovnávací parametry pro technicko-ekonomické hledisko s tendencí změny	96
7.10	Párové porovnání parametrů pro technicko-ekonomické hledisko . . .	97
7.11	Stanovení váhy významnosti porovnávaných parametrů pro technicko-ekonomické hledisko	97
7.12	Stanovení pořadí srovnávaných ideových návrhů z technicko-ekonomického hlediska	97

7.13 Určení optimální návrhu	98
--	----

ÚVOD

Obráběcí stroje patří ve strojírenském oboru k nejrozšířenější oblasti. Realizace výrobních, dopravních a dalších prostředků a též užitných předmětů začíná na papíře a končí u výroby. Proto jejich potřeba je více než žádoucí a tvoří tak dnes obrovskou oblast zahrnující v dnešní době mnoho strojírenských odvětví a specifikací. Udržet si získané postavení, technický pokrok v oblasti obráběcích strojů a světové trendy je v dnešní době velmi náročné. Mnoho firem se nejenom snaží, ale dokáže se i prosadit v oblasti své produkce. Brněnská firma Fermat, specializující se na výrobu CNC horizontálních vyvrtávacích strojů, není výjimkou a má snahu neustále zlepšovat a inovovat svoje stroje a portfolio. Tato diplomová práce je psána za účelem pomoci firmě Fermat dosáhnout vytyčených cílů v oblasti kvality u strojů vlastní produkce. Cílem je využít moderních výpočtových metod a znalostí z oblasti inženýrské mechanicky těles, získaných na akademické půdě a aplikovat je na vybraný problém v průmyslu. V této práci je snahou propojit dva i více technických oborů. Jedním je výroba a konstrukce strojů, druhým je mechanika těles a technické analýzy za podpory numerických metod a statistických analýz. Pomocí výpočtového modelování se vytvoří abstraktní model, na kterém se provede řada analýz a výpočtů.

Pro zvýšení kvality stroje je klíčová jeho přesnost při obrábění. Jedním z velmi důležitých technických uzlů u horizontálních vyvrtávacích strojů je vřeteník se saněmi. V této práci se budeme zabývat optimalizací konstrukce saní tak, aby bylo dosaženo menších deformací sestavy saní s vřeteníkem. Pomocí citlivostní analýzy se určí, na které vytypované prvky saní je potřeba se zaměřit, aby bylo dosaženo vytyčeného cíle. Práce je psána formou systémového přístupu. To nám umožní aplikaci celého algoritmu optimalizace pro další stroje z produkce firmy Fermat. Výsledky získané touto diplomovou prací mohou pomoci v budoucnu velmi příznivě ovlivnit konstrukční činnost a to nejen při navrhování nové konstrukce saní.

1 FORMULACE PROBLÉMU A CÍLE ŘEŠENÍ

1.1 Horizontální vyvrtávací stroje a jejich přesnost

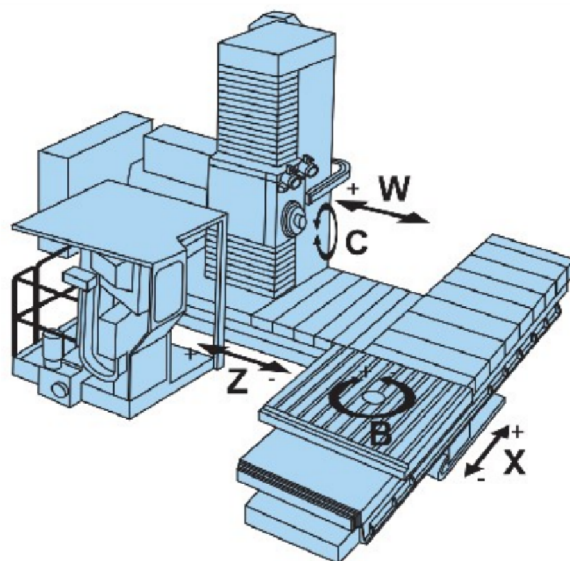
[1] Vyvrtávací stroje tvoří rozsáhlou a významnou skupinu různých koncepčních variant obráběcích strojů, určených jak k výkonnému, tak i přesnému obrábění otvorů a čelních ploch u širokého sortimentu zejména nerotačních součástí.

Vodorovné vyvrtávačky jsou univerzální stroje vhodné k obrábění složitých součástí v kusové a malosériové výrobě. Umožňují při jednom upnutí provést současně nebo postupně různé operace až z pěti stran obroku. Je na nich možno vrtat, vyvrtávat, vystružovat, zahlubovat, soustružit čelní i vnější a vnitřní plochy, frézovat, někdy i protahovat a obrážet, případně brousit.

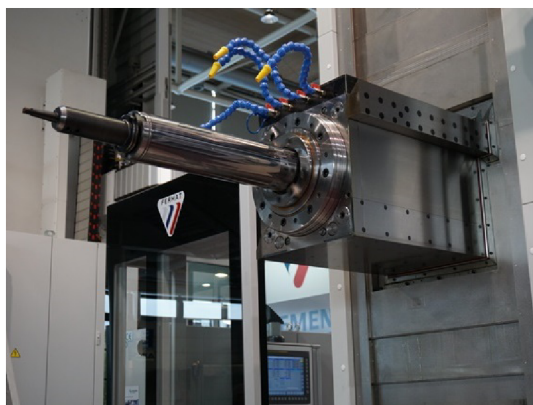
Podle základní konstrukční koncepce dané oblasti využití lze vyvrtávací stroje členit na tyto typy:

- Vodorovná osa vřetena
 - Stolové
 - Křížové
 - Deskové
 - Souřadnicové
- Svislá osa vřetena
 - Souřadnicové

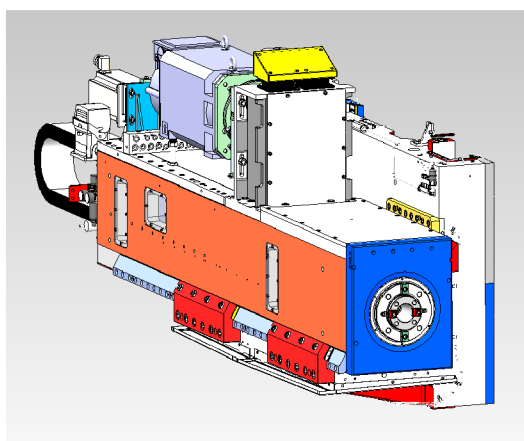
V této práci se budeme zabývat křížovým typem horizontálních vyvrtávaček viz obr. 1.1. Hlavní řezný pohyb uděluje nástroji vřeteno. Typickou součástí horizontálních vyvrtávaček je výsuvný frézovací vřeteník s výsuvným vyvrtávacím vřetenem viz obr. 1.2 Frézovací vřeteno je uloženo nevýsuvně v tělese pohyblivého vřeteníku (smýkadla). Vyvrtávací vřeteno (pinola) je uloženo v přesných ložiskách, buď v dutém frézovacím vřetenu a s ním v tělese vřeteníku, nebo přímo ve vřeteníku. Osově výsuvné vyvrtávací vřeteno je na obrázku obr. 1.2. Příklad uložení frézovacího vřeteníku je na obr. 1.3 Kvůli zvyšujícím se požadavkům na přesnost věnují výrobci obráběcích strojů stále větší pozornost problematice deformace rámu vodorovných vyvrtávacích strojů. Stroj z obr. 1.4 má lože 35 umístěné na základu 33 a obrobkovou část 32. Váhovými deformacemi vzniká v závislosti na vysunutí horizontálně výsuvných částí 2 zaboření lože do základu a jeho náklon o uhel α_1 . Po loži pojíždí stojan 36 na vodících prvcích 34, které svojí poddajností vyvolávají úhlový sklon α_2 . Při vysouvání těžiště výsuvné části 2 vzniká ohyb stojanu 36 tak, že v místě nosiče horizontálně výsuvné části 3 je ohybem vyvolaná úhlová deformace α_3 . Nosič horizontálně výsuvné části 3 koná vertikální pohyb po stojanu stroje 36 a jeho vodící



Obr. 1.1: Schéma křížové horizontální vyvrtávačky



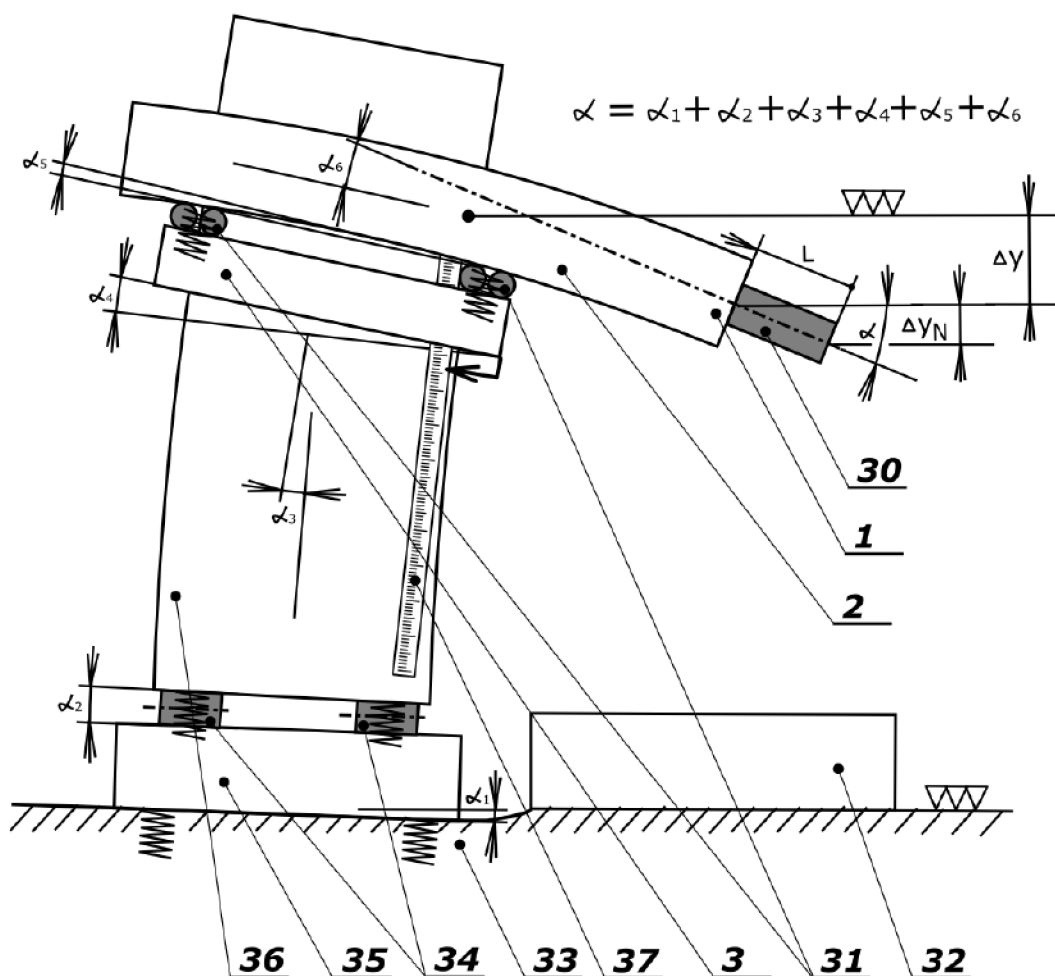
Obr. 1.2: Výsuvné vyvrtávací vřeteno Fermat [13]



Obr. 1.3: Výsuvné vyvrtávací vřeteno Fermat [Konstrukce Fermat s.r.o.]

prvky (v obr. 1.4 nejsou nezobrazeny) vertikálního pohybu mají určitou poddajnost, která způsobí další úhlovou deformaci α_4 . Horizontálně výsuvná část 2 se vysouvá z nosiče výsuvné části 3, přičemž jejich vzájemnou polohu zajišťují prvky vedení 31, které svou poddajností způsobují další přídatnou úhlovou deformaci α_5 . V závislosti na vysunutí horizontálně výsuvné části 2 nastává její ohyb, který vyvolává na jejím předním konci 1 v místě upnutí nástroje přídatnou úhlovou deformaci α_6 . Výsledný náklon v místě upnutí nástroje je součtem všech úhlových deformací α_1 až α_6 . U strojů je v podstatě samozřejmostí kompenzování průhybu frézovacího vřeteníku spolu s pinolou, který je způsoben jejich vlastní hmotností. Bylo stanoveno, že tato

problematika nebude v této diplomové práci brána do úvahy. Nosič horizontálně výsuvné části 3 budeme nazývat saně osy Y.



Obr. 1.4: Deformace rámu vodorovného vyvrtávacího stroje [1]

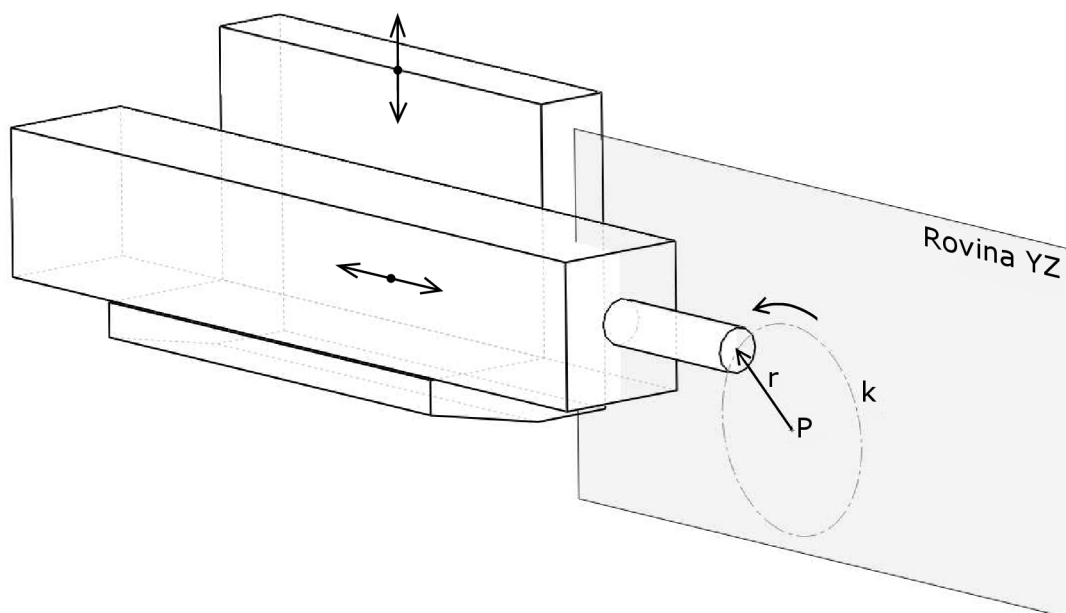
1.2 Problémová situace

Zadavatelem této diplomové práce je firma Fermat s.r.o. sídlící v Brně Slatina. Firma Fermat pracuje na zlepšení přesnosti strojů vlastní produkce a přesnost stanovují na základě vyhodnocení několika měření. Jedním z měření je tzv. kruhová interpolace v rovině. Na obr.1.5 je schéma měření. Provádí se opsáním ideální kružnice k se středem v bodě P , přičemž se měří poloměr r . Při tomto měření dochází často k překročení dovolené tolerance poloměru r . Výsledky toho měření jsou často mimo povolenou toleranci. Velmi důležitým technickým celkem, který ovlivňuje celkovou přesnost stroje a přímo se podílí na výsledcích měření kruhové interpolace je sestava

saní osy Y a vřeteníku. Cílem firmy Fermat je zlepšit a inovovat konstrukci saní tak, aby při měření kruhové interpolace se dosahovalo příznivějších výsledků.

1.3 Formulace problému

Předmětem této diplomové práce je návrh optimalizace konstrukce saní osy Y (dále jen saně), která by měla zvýšit jejich tuhost a tím zlepšit deformace sestavy saní a vřeteníku. Tím bude dosaženo lepších výsledků při měření kruhové interpolace, tedy odchylky poloměru r budou v požadované toleranci. Díky tomu se nepřímo dosáhne lepší přesnosti procesu obrábění. Optimalizace bude provedena na stroji typu *WFT 13 CNC R* viz obr. 1.6. Saně osy Y jsou zobrazeny na obr. 1.7.



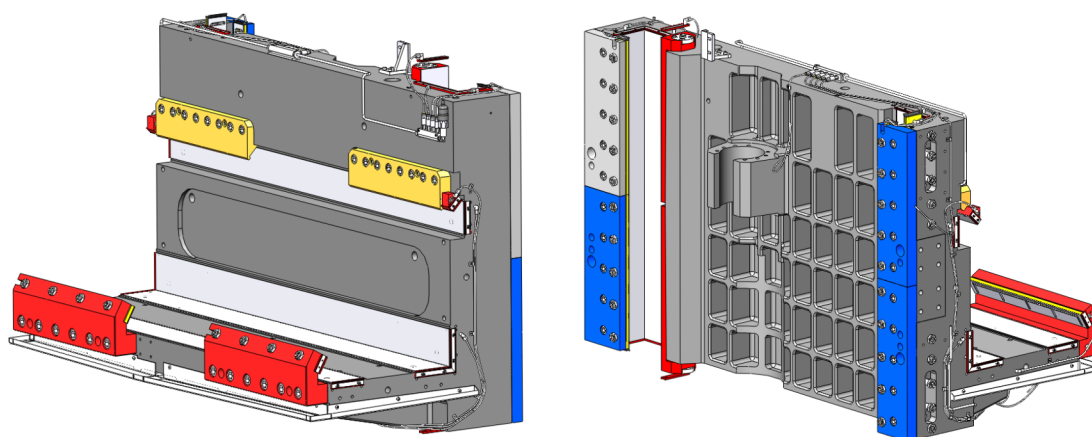
Obr. 1.5: Schéma měření kruhové interpolace

1.4 Cíle práce

Jak již bylo popsáno výše, cílem práce je zvýšení tuhosti saní a tím zmenšit deformace saní. Provede se citlivostní analýza předem definovaných částí saní a určí se jejich vliv na celkovou deformaci saní. Citlivostní analýza bude provedena s využitím plánovaného měření. Následně s využitím poznatků z citlivostní analýzy jsme schopni odhadnout, které části saní bude nutné inovovat a jakým směrem by se mohla konstrukce firmy Fermat ubírat. Bude navrženo nové uspořádání saní stroje



Obr. 1.6: WFT 13 R CNC [Fermat s.r.o.]



Obr. 1.7: Saně osy Y [Konstrukce Fermat s.r.o.]

WFT 13R CNC s třemi ideovými návrhy, které se pak podrobí konstrukčnímu, technologickému a ekonomickému zhodnocení.

Firma Fermat jako zadavatel problémové situace poskytuje volné pole působnosti a možnosti využití prostředků, které mohou zkvalitnit a urychlit vypracování práce. Problém se jeví jako ostrý. Lze jasně vymezit kroky, formulaci problému, cíle, řešitelský tým a metody řešení. Jako možný nedostatek bude ověřitelnost výsledků. Vyrobit nový design saní na základě výsledků řešení této práce by bylo velice nákladné časově i finančně.

2 SYSTÉM PODSTATNÝCH VELIČIN

2.1 Okolí

Bezprostředním okolím saní jsou prvé řadě další části stroje. Jedná se o stojan stroje a vřeteník. Tyto části jsou se saněmi v přímém kontaktu. Za běžného provozu stroje jsou tyto kontakty v průběhu času aktivní. Saně jsou také v kontaktu s kuličkovým pohybovým šroubem. Dalším okolím stroje, které není v kontaktu přímo, je teplota, prašnost, nečistoty a základ na kterém je stroj ukotven. Teplota a prašnost se v průběhu provozu stroje mění. Do okolí stroje lze zahrnout i člověka.

2.2 Topologie a struktura saní

Jedná se o odlitek ze šedé liti (GG30). Současný design připomíná tvar písmene L. Design saní využívá rozmístěné žebrování. Jelikož se jedná o odlitek, jsou saně na několika místech opatřeny rádiusy a zkosenými plochami. Dále je zde možný výskyt dutin a staženin, který zapříčiní nehomogenost struktury materiálu. Případný výskyt vad odlitku bude vždy stochastického charakteru. Saně jsou následně obráběny, tím se mění rozložení zbytkového napětí, které vzniklo z předchozích technologických operací (odlévání, žíhání). Saně jsou osazeny několika dalšími částmi, které jsou osazeny pomocí šroubových spojů. Jedná se zejména o vodící a zároveň přítlačné lišty, které vymezují vůle, krytování, hydraulické obvody a mazací systémy. Umístění a konstrukce prvků, které vymezují vůli v kluzných plochách mohou ovlivňovat celkovou deformaci saní. Do saní je vyhotoveno velké množství závitových otvorů o různých velikostech závitů a hloubky otvoru. Konstrukce saní podléhá technologickým možnostem výroby.

Na saních jsou odlité kluzné plochy z materiálu *GS Super Fluid*. Tento materiál se připravuje z dvousložkové směsi a jejich vzájemný poměr ovlivňuje mechanické vlastnosti materiálu. Na vodících a přítlačných lištách je aplikována vrstva z materiálu *Turcite*, která slouží k lepším třecím vlastnostem při velmi dobré obrobitelnosti.

2.3 Vazby s okolím

Saně jsou v přímém kontaktu se stojanem, který slouží jako vedení pohybu saní. Do pohybu jsou uváděny kuličkovým šroubem, který pohybuje saněmi ve svislém směru. Dále se prostřednictvím výsuvného vyvrtávacího vřetene a vřeteníku přenáší síly od obrábění. Přenos sil je umožněn pomocí kluzných ploch a vodících lišt. Na

všech kluzných plochách je vytvořen olejový film, pro lepší třecí odpory. Důležitým faktorem je i gravitační pole země.

2.4 Aktivace saní z okolí

Jde o procesy z aktivované na saních vlivem okolí. Gravitační pole, síly od obrábění, a tepelné ovlivnění způsobují deformaci saní a vznik napětí v saních. Deformace se pohybuje v oblasti malých deformací. Síly od obrábění jsou stochastická veličina v čase proměnná, která vyvolává vibrace celého stroje a únavové namáhání saní. Vlivem deformace dochází k nerovnoměrnému styčnému tlaku v kontaktních plochách. Ten způsobí, že veškeré kontaktní plochy v průběhu provozu stroje podléhají opotřebení. Důsledkem je, že mění svůj tvar a třecí vlastnosti.

Ideálním teoretickým stavem je, že deformace saní se blíží nulové deformaci. Z toho plyne, že tuhost roste do nekonečna. Tento stav je pouze teoretický. Z praktického hlediska se jedná o ideální stav, kde z konstrukčního, technologického a ekonomického hlediska se vybere taková kombinace, aby deformace saní při daných zkouškách dosahovala bezproblému předepsané hodnoty tolerance, byla vyrobena dosud používanými technologiemi firmy Fermat a z ekonomického hlediska se snižovala hmotnost saní a nákladnost technologických operací.

2.5 Ovlivnění saní z okolí

Jsou to interakce, které nevyvolávají procesy na saních, ale ovlivňují je. Jedná se například o způsob obrábění, který vykonává stroj. Zde je několik parametrů, které ovlivňují aktivaci saní z okolí (popsané v odstavci 2.4) od obrábění. Mezi tyto parametry patří typ nástroje, charakter a kvalita ostří, řezné podmínky apod. Dále kvalita kluzných ploch z hlediska tření, také ovlivňuje z aktivované procesy na saních. Dalším ovlivněním jsou zbytková napětí z technologických operací jako je odlévání saní, žíhání a třískové obrábění.

Deformací saní také ovlivňuje kvalita odlitého polotovaru saní a poměr směsi pro odlévání kluzných ploch. V průběhu času provozu stroje bude docházet k uvolňování šroubových spojů vlivem vibrací a relaxací napětí v šroubech a saních. Tím se budou zvětšovat vůle v kontaktech. Vůle v kontaktech jsou také ovlivněny drsností povrchu kluzných ploch. Při zatížení se výstupky na povrchu velmi rychle opotřebují a tím může dojít ke změně tloušťky kluzné vrstvy a vzniku vůlí. Tento jev nebude mít podstatný vliv, neboť bude umožněno vytvořit olejový film na kluzných plochách.

2.6 Oborové vlastnosti saní

Saně jsou třískově obráběný odlitek ze šedé litiny. Šedá litina je technická slitina železa s uhlíkem o obsahu vyšším než 2,14 %. Je to kovový materiál, který vykazuje elastické chování a pružně-plastické chování. Elastické chování probíhá do meze kluzu Re . Tato oblast v závislosti napětí na přetvoření je popsána Hookovým zákonem, takže závislost je lineární. Šedá litina je litina s lupínkovým grafitem, který působí jako vrub (koncentrátor napětí) ve struktuře materiálu. Šedá litina se vyznačuje velmi dobrým tlumením vibrací a pevností v tlaku. Pevnosti v tlaku je výrazně jiná, než pevnost v tahu. Je dobře obrobitelná a pomalu korodující.

Na saně jsou namontované ocelové lišty, které slouží k vedení vřeteníku při jeho vysouvání. Ocel je technická slitina železa s uhlíkem o obsah uhlíku do 2,14%. Je to kovový materiál, který vykazuje elastické chování a pružně-plastické chování. Elastické chování probíhá do meze kluzu Re . Tato oblasti v závislosti napětí na přetvoření je popsána Hookovým zákonem, takže závislost je lineární. Jednotlivé mechanické vlastnosti se liší dle typu a množství legujících prvků ve slitině.

Kluzné plochy na saních jsou z litého samonivelačního materiálu *GS Super Fluid*. Jedná se o polotekutou, epoxidovou konstrukční hmotu s mimořádně nízkým koeficientem tření. Hmota má vynikající adhezi k povrchu a po vytvrzení lze dobře opracovat [14]. GS Super Fluid je dvousložkový epoxid s nelineární závislostí napětí na přetvoření. V oblasti malých přetvoření se závislost jeví lineární. Má velmi vysokou pevnost v tlaku.

Přítlačné lišty jsou osazeny kluznou vrstvou z materiálu *Turcite*. Jedná se o termoplast PTFE s velmi nízkým koeficientem tření a dobře tlumí vibrace. V oblasti malých přetvoření se závislost napětí na přetvoření jeví jako lineární.

Dále je zde olejový film na kluzných plochách, který slouží k mazání a tím ke snižování koeficientu tření.

2.7 Procesy probíhající na saních

V této práci řeším problém deformace a napjatosti na makroúrovni. Procesy probíhající ve struktuře materiálu, na mikro úrovni, nejsou předmětem této práce. Jsou to například pohyby dislokací, změna vzdáleností atomů v krystalografické mřížce apod.

2.8 Projevy saní

Projevem je vznik napětí a jeho konkrétních složek tenzoru napětí (normálová a smyková napětí). Dále deformováním tělesa se mění tvar geometrie saní. Vlivem

pohybujících částí dochází v místech kontaktu k opotřebení materiálu.

2.9 Důsledky projevů saní

Vlivem vzniku napětí může dojít k mezním stavům (mezní stav pružnosti, únavové pevnosti, stability šíření trhlin). Kvůli deformaci, které se projeví změnou geometrie je ovlivněna přesnost a chod stroje. Jelikož se jedná o malé deformace, nenastane zde zplastizování materiálu.

3 VOLBA METODY ŘEŠENÍ

V této kapitole budu pojednávat o volbě metody pro řešení problému deformací saní Y. Vybraná metoda způsobu modelování musí respektovat systém podstatných veličin viz odstavec 2 a to tak, aby vystihla vše podstatné [2].

3.1 Výběr přístupu

Deformace saní je přímý příčinný problém. Vyplývá to ze vstupů do algoritmu. Těmi jsou vlastnosti okolí saní, určitá geometrie a topologie saní, vazby na okolí, aktivace saní z okolí a její ovlivňování a vlastnosti jednotlivých prvků saní (viz odstavec 2.1 až 2.6). Výstupem pak jsou procesy a stavy saní. Obvykle to jsou projevy a důsledky projevů (viz odstavec 2.7 až 2.9). Dále je nutno určit jakým přístupem bude problém řešen. Jedná se o volbu mezi přímým a nepřímým přístupem. Cesta přímého přístupu by bylo řešení deformací přímo na reálném objektu. Vytvořit a realizovat citlivostní analýzu na reálném dílu saní by bylo vysoce nákladné a smysluplně ne-realizovatelné. Jako další možnost je tedy přístup nepřímý tzn, že řešení deformace saní bude realizované s využitím určitého pomocného modelu. Problém nebude řešen přímo na reálném dílu saní.

3.2 Výběr metody

Nyní definujeme metodu modelování. Smyslem modelování je soubor činností realizovaných na modelu, s cílem vyřešit problém. Charakter činností na modelu závisí na typu modelování. Vlastnosti a podrobný popis jednotlivých typů modelování jsou popsány v [2].

Typy modelování:

- Mentální modelování
- Prehistorické materiální modelování
- Podobnostní modelování
- Analogové modelování
- Materiální modelování
- Abstraktní modelování
- Hybridní modelování
- Měkké výpočty

Jelikož se jedná o nepřímý přístup řešení problému, vede nás to k volbě abstraktního modelování. Abstraktní modelování se dále dělí na:

- Znalostní modelování
- Teoretické modelování
- Výpočtové modelování
- Datové modelování
- Formální modelování

V oblasti vědy a techniky se v současnosti nejčastěji využívá výpočtové modelování. Jeho modifikace jsou:

- Klasické výpočtové modelování
- Simulační výpočtové modelování
- Citlivostní analýza
- Optimalizace

Už v cílech práce je popsáno, že bude provedena citlivostní analýza viz odstavec 1.4. Je tedy jasné, že realizace řešení bude provedena abstraktním modelováním, konkrétně výpočtovým modelováním. Z výpočtového modelování bude provedena citlivostní analýza.

3.3 Výběr matematického přístupu

Cílem práce je zvýšení tuhosti saní osy Y. Tuhost lze chápat jako míru odolávání deformacím při stanoveném zatížení. Tuhost lze vyjádřit i takto: čím více zatěžíme, tím více se saně deformují. Míra toho jak moc se chtějí saně vrátit do původního tvaru (energeticky méně náročný stav), můžeme nazývat tuhostí. Při větší tuhosti se entitě daří odolávat zatížení více, tzn. méně se deformují. Tuhost lze obecně vyjádřit dle vztahu:

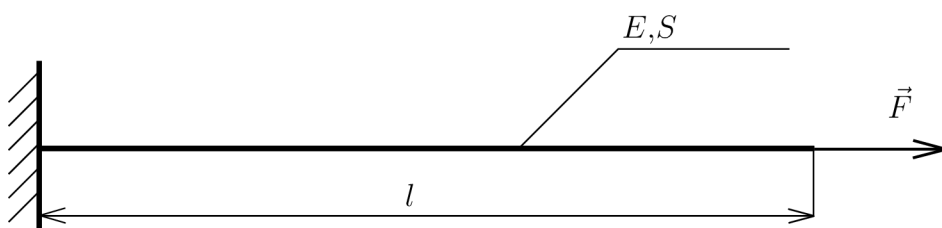
$$\vec{F} = -k \cdot \vec{x} \quad (3.1)$$

kde: F - je působící síla [N]
 k - je tuhost [$\frac{N}{m}$]
 x - je posunutí [m] ve směru působení síly F

Tuhost v oblasti mechaniky těles je vždy složena z:

- Geometrické (konstrukční)
- Materiálové

Pro vysvětlení použijí prostý prut z pružnosti pevnosti. Mějme vetknutý ocelový prut dle obr.3.1, který má průřez S , délku l , modul pružnosti v tahu E a je zatežován



Obr. 3.1: Vetknutý prut

silou \vec{F} . Z prosté pružnosti pevnosti víme, že prodloužení prutu na obr.3.1 je dáno vztahem:

$$u(x) = \int_0^l \frac{N(x)}{E \cdot S} dx \quad (3.2)$$

Vztah 3.2 aplikuji na tažený prut na obr.3.1. Potom pro prodloužení prutu dostaneme:

$$u = \frac{F \cdot l}{E \cdot S} \quad (3.3)$$

Vztah 3.1 upravíme tak, aby prodloužení bylo na levé straně a porovnámeho se vztahem 3.3.

$$\begin{aligned} \vec{x} &= \frac{\vec{F}}{-k} \\ u &= \frac{F \cdot l}{E \cdot S} \end{aligned}$$

Je patrné, že mezi vztahy je jistá analogie. Vidíme, že tuhost je:

$$\frac{1}{k} = \frac{l}{E \cdot S} \quad (3.4)$$

tedy

$$k = \frac{E \cdot S}{l} \quad (3.5)$$

Nyní můžeme prokázat, že obecná tuhost se skládá z geometrické a materiálové části. Geometrická část, nebo-li konstrukční je:

$$k_{geom} = \frac{S}{l}$$

a materiálová je:

$$k_{mat} = E$$

Obdobnou analogii můžeme nalézt i v případě ohýbání prutu.

V předchozím textu jsem odvodil, jaké parametry ovlivňují tuhost viz vztah 3.5. Pokud chceme zlepšit deformaci saní, bude nutné se zaměřit buď na změnu modulu

pružnosti, tedy změnu materiálu, nebo změnu konstrukce saní. Oba přístupy při následném ověření deformací vedou na prostou pružnost pevnost. Tu lze v zásadě řešit dvěma přístupy:

- Diferenciálně
 - Analyticky
 - Numericky
- Variačně
 - Numericky

Diferenciální přístup má svá omezení v podobě stanovení analytických rovnic popisující chování tělesa. V současnosti jsme schopni popsat základní typy těles. Saně jsou specifické těleso. V porovnání se základními typy těles mají saně složitou geometrii. Popsat exaktně deformaci saní by bylo pravděpodobně nad lidské síly.

V současnosti tento problém řeší Variační přístup. Variační přístup využívá variační počet. Variační počet je odvětví matematické analýzy, které hledá minima nebo maxima funkcionálu.

Numerickou metodou variačního přístupu, která se používá v technické praxi, je Metoda konečných prvků (MKP, ang. Finite Element Method, FEM). V případě deformační varianty MKP je východiskem Lagrangeův variační přístup. Ten lze definovat takto:

„Mezi všemi funkcemi posuvů, které zachovávají spojitost tělesa a splňují geometrické okrajové podmínky, se realizují ty, které udělají celkovou potenciální energii Π stacionární hodnotu“ [6]. Lze dokázat, že uvedená stacionární hodnota existuje, je jednoznačná a představuje zároveň minimum Π . Π lze vyjádřit jako:

$$\Pi = W - P \quad (3.6)$$

kde W je energie napjatosti tělesa.

$$W = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \sigma^T \cdot \epsilon dV \quad (3.7)$$

a P je potenciál vnějšího zatížení

$$P = \int_{\Omega} u^T \cdot o dV + \int_{\Gamma_p} u^T \cdot p dS. \quad (3.8)$$

V uvedených vztazích 3.7 a 3.8 vystupují sloupcové matice:

– posuvů	$u^T = [u, v, w]$
– přetvoření	$\epsilon^T = [\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}]$
– napětí	$\sigma^T = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}]$
– objemové zatížení	$o^T = [o_x, o_y, o_z]$
– plošné zatížení	$p^T = [p_x, p_y, p_z]$

3.4 Výsledná metoda řešení

Shrneme-li výběr metody ve výše popsaném textu, tak se jedná o:

Přímý příčinný problém s nepřímým přístupem, abstraktně modelovaným konkrétně výpočtovým modelováním s využitím citlivostní analýzy. Výpočtové modelování bude provedeno numerickou metodou a to Metodou konečných prvků.

Zbývá ověřit, zda vybraná metoda modelování zahrne veškeré podstatné veličiny z odstavce 2.

4 VSTUPNÍ A VÝSTUPNÍ ÚDAJE DO VÝPOČTU A DÍLČÍ VÝPOČTOVÉ MODEL Y

Ze systému podstatných veličin (viz odst. 2) postupně vybereme vstupní údaje do algoritmů metody řešení. Bude popsáno na jaké úrovni, za jakých podmínek a míře podstatnosti budou použity. Dále budou popsány podstatné výstupní parametry. Následně se rozhodne, jestli zvolená metoda řešení vystihne úroveň vstupním parametry.

4.1 Výběr vstupních údajů

4.1.1 Stojan

Stojan je odlitek ze šedé litiny (viz na obr. 4.1). Slouží jako vedení pro svyslí pohyb saní Y. U stroje *WFT 13 CNC R* je pohyblivý v jednom vodorovném směru. Je ukotven pomocí šroubového spojení na saně stojanu, které se pohybují po ložeti. Lože je ukotveno do základu v hale. Pokud bychom měli modelovat na co nejpřesnější úrovni deformace stroje, bylo by zapotřebí začít od základu na hale. Už zde začíná deformace celého stroje, která pak následně ovlivňuje i deformaci saní viz obr. 1.4. Pro samotné řešení deformace saní není podstatné modelovat veškeré části a uzly stroje. Stojan budeme modelovat jako dokonale tuhé těleso. Při zavedení tohoto zjednodušení není potřebné modelovat jeho geometrii. V místě kontaktu na kluzných plochách saní a stojanu stroje zavedeme deformační okrajové podmínky tak, aby modelovaly možné posuvy na stojanu. Posuv bude zamezen kolmo na plochu kontaktu.

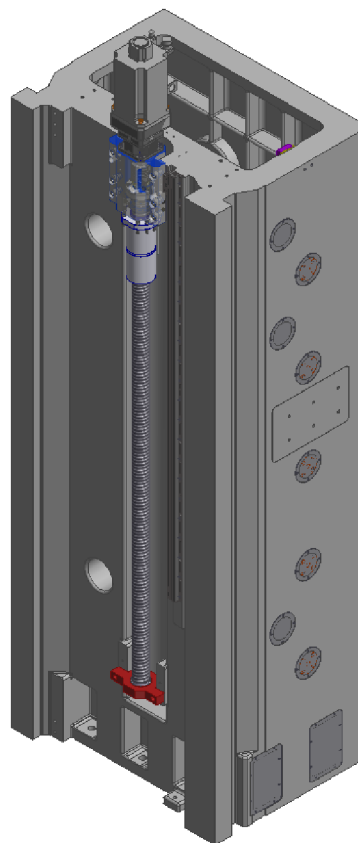
4.1.2 Kuličkový šroub

Jedná se o kuličkový pohybový šroub, který uvádí saně do pohybu (viz na obr. 4.1). Je namontovaný na stojanu stroje a poháněný servomotorem. Je mu umožněn rotační pohyb, na konci se servomotorem je zamezen radiální i axiální směr pomocí valivých ložisek, na druhém konci je zamezen radiální směr pomocí valivých ložisek. Kuličkový šroub (KŠ) je spojen se saněmi pomocí matice KŠ a domečku na saních. KŠ ovlivňuje svojí tuhostí posuvy domečku. Bude sloužit jako okrajová podmínka pro zamezení posuvů ve svislém směru. Ve skutečnosti je matice KŠ přimontovaná na saně pomocí šroubového spoje. Pro zjednodušení nebudeme modelovat matici KŠ ani šroubové spojení. Posuvy plochy domečku, na kterou dosedá matice KŠ, budou spjaty s posuvy KŠ v místě spojení. KŠ budeme modelovat jako prut.

4.1.3 Vřeteník

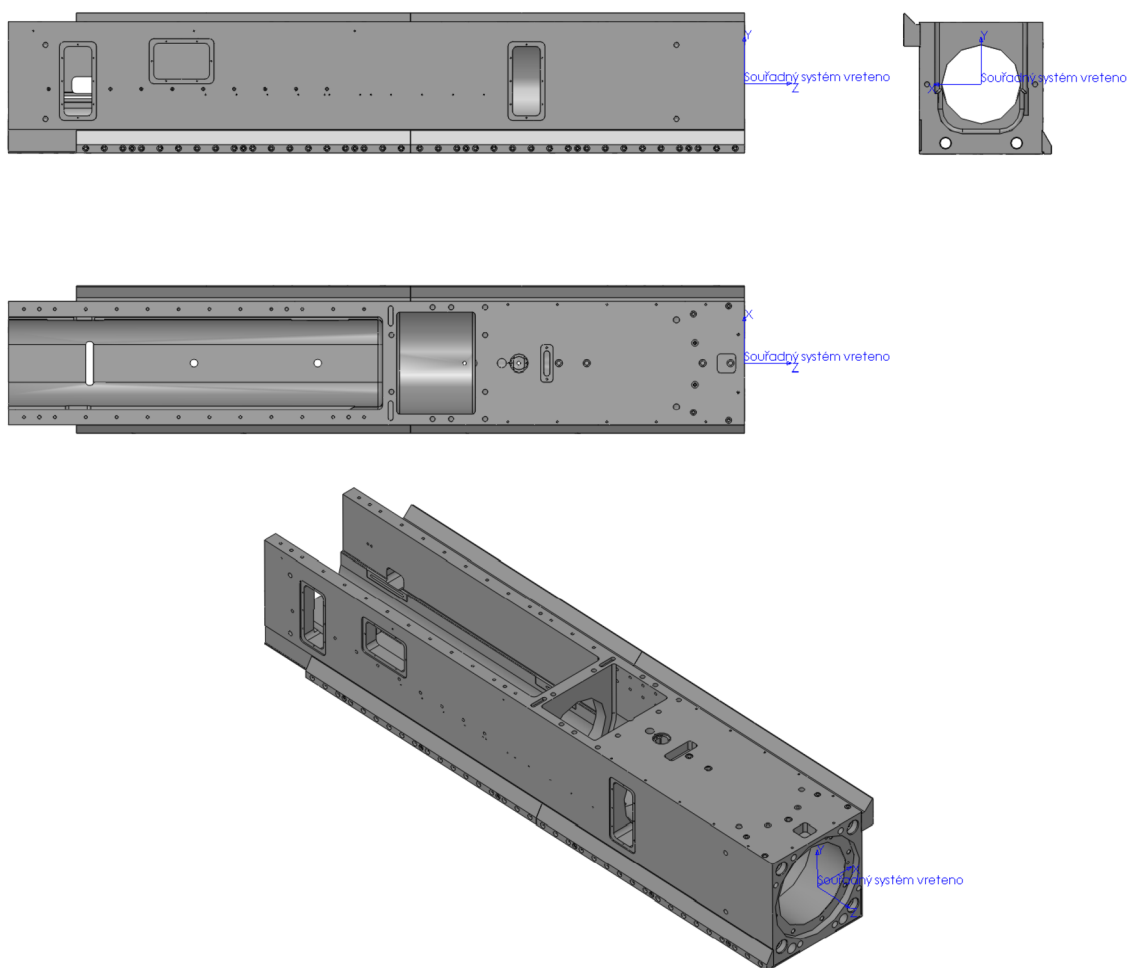
K sestavě strojního zařízení jehož hlavním cílem je provádět obrábění, patří vřeteník. Pomocí vřeteníku je právě obrábění umožněno. Vřeteník se skládá z těla vřeteníku, výsuvného vyvrtávacího vřetene a frézovacího vřetene. Na vřeteník se také montuje hnací motor s řemenovou skříní. Tělo vřeteníku je odlitek ze šedé litiny (viz obr. 4.2). Frézovací vřeteno je uloženo na valivých ložiskách, kde vnější kroužek je vsazen v tělu vřeteníku. Ve frézovacím vřeteni se otáčí a vysouvá výsuvné vyvrtávací vřeteno, které je uloženo na kluzných ložiskách. Na výsuvném vřeteni se upíná nástroj, který koná hlavní řezný pohyb. Vřetena jsou z oceli. Vřeteník je také osazen dalšími systémy jako např., chlazením nástroje, mazacím systémem, odměřování mpolohy apod. Vřeteník se při provozu stroje deformuje v oblasti malých deformací. Jelikož tělo vřeteníku je vyrobeno ze šedé litiny a to je slitina železa s uhlíkem, vykazuje při zatížení lineární odezvu deformace v oblasti malých deformací. Tento fakt je podložen Hookovým zákonem. Šedá litina má výrazně odlišnou mez pevnosti v tahu a tlaku. V této práci se zabýváme deformací saní, tedy napjatostní stav zde není řešen. Proto budeme modelovat materiál se stejnou mezí pevnosti v tahu i tlaku. Z hlediska napjatosti by bylo podstatné zkoumat vliv cyklického namáhání. Struktura materiálu může být nehomogenní z důvodu defektů v odlitku. Tento fakt bude ovlivňovat deformaci, ale vliv nebude natolik významný, abychom ho zahrnovali do modelu. Lupínkový grafit bude mít vliv na tvorbu trhlin. Z důvodu zaměření této práce na deformaci nebudeme vliv lupínkového grafitu zahrnovat. Vlastnosti materiálu získané z tahových zkoušek dostatečně zahrnou vliv lupínkového grafitu na deformaci. Jedná se hlavně o modul pružnosti v tahu.

Na celkovou deformaci saní má velmi významný vliv i vřeteník. Proto je nezbytné vytvořit jeho model. Protože vřeteník je velice komplexní a složitá sestava, nebudeme zde modelovat veškeré prvky. Tímto zjednodušením bude odlišná tuhost modelu a reálné sestavy. Nicméně pro řešení problému deformací saní, není natolik nutné, aby



Obr. 4.1: Stojan a KŠ [Konstrukce Fermat s.r.o.]

tuhost modelu vřeteníku byla v co největší shodě s tuhostí reálné sestavy. Cílem práce je zlepšit deformaci saní, tedy charakter deformace. Není cílem modelovat skutečné deformace číselně, které dokonce firma zná z měření. Podstatný vliv bude mít rozložení hmoty modelu vřeteníku. Modelováno bude tělo vřeteníku, obě vřetena a jejich hlavní díly pro výsuv. Dále zde bude zjednodušený model hnacího motoru a řemenové skříně. Na těle vřeteníku je vyrobeno značné množství závitových děr, vybrání a rádiusů. Tyto prvky nebudou modelovány, neboť nemají valný vliv na deformaci a složitost tvorby konečno-prvkové sítě pro MKP by enormně narostla. Zbytkového napětí z předchozích technologických operací bude ovlivňovat deformaci saní. Tuhost ovlivňuje možným předpětím v konstrukci. Modelovat tuto skutečnost je mimo rozsah a cíl práce. Na citlivostní analýzu nebude mít tento jev významný vliv.



Obr. 4.2: Tělo vřeteníku [Konstrukce Fermat s.r.o.]

4.1.4 Frézovací vřeteno

Frézovací vřeteno je uloženo nevýsuvně v těle vřeteníku. Jedná se o dutý hřídel, který je poháněn vřeteníkovým servomotorem přes řemenový převod. Je uložen na třech řadách s valivými ložisky. Slouží jako vedení pro výsuvné vyvrtávací vřeteno. Od výsuvného vyvrtávacího vřetene se přenáší síly od obrábění pomocí jeho vedení a následně přes uložení frézovacího vřetene na tělo vřeteníku. Tyto uložení budou modelována jako pevné spojení s tělem vřeteníku v místech kde jsou ložiska a vedení. Model geometrie zjednodušíme o sražení a rádiusy, neboť na deformaci nemají podstatný vliv. Frézovací vřeteno je vyrobeno z oceli.

4.1.5 Výsuvné vyvrtávací vřeteno

Výsuvné vyvrtávací vřeteno je uloženo ve frézovacím vřetenu pomocí kluzných ložisek. Je vysouváno kuličkovým pohybovým šroubem, který je uložen ve vřeteníku. Uložení v ložiscích bude modelováno tak, že posuvy výsuvného vřetene v místě ložiska budou spjaty s posuvy frézovacího vřetene. Model geometrie zjednodušíme o sražení a rádiusy, neboť na deformaci nemají podstatný vliv. Výsuvné vyvrtávací vřeteno je vyrobeno z oceli.

4.1.6 Saně osy Y

Saně osy Y jsou nosičem vřeteníku umožňující jeho pohyby. Jedná se o odlitek ze šedé litiny. Model saní bude velice podobný jako model vřeteníku v odstavci 4.1.3. Geometrie bude zjednodušena o závitové díry, rádiusy a zkosení. Dále vliv struktury materiálu nebude uvažován, pouze jenom samotný materiál viz odst. 4.1.10. Možné zbytkové napětí nebude modelováno z důvodů popsaných v odst. 4.1.3.

4.1.7 Přítlačné lišty

Saně jsou osazeny přítlačnými lištami pomocí šroubových spojů. Geometrie lišt bude zjednodušena o sražení a rádiusy. Šroubové spoje nebudou modelovány. Předpětí v šroubech vnesené při montáži je voleno tak, aby spoj byl funkční. Nefunkční stav je nepřípustný a v provozu stroje je nutné, aby pravidelný servis výskyt tohoto stavu odstraňoval. Proto budeme uvažovat, že šroubový spoj je stále funkční. Předpětí v šroubovém spoji ovlivňuje deformaci. V jaké míře není snadné určit a určení míry vlivu by bylo nad rámec rozsahu této práce. Pokud by vliv byl značný, tak změny velikosti nebo počtu šroubů, ovlivní deformaci, ale při celkové změně konstrukce saní je v zásadě jedno, jestli šroubové spojení dosahuje tuhostí y nebo tuhostí x , kde

$y \neq x$. Při citlivostní analýze budou lišty uvažovány jako jeden z parametrů a tím zahrneme i vliv šroubového spoje.

4.1.8 Kluzné lišty

Přítlačné lišty jsou nosičem pro kluzné lišty. Kluzné lišty slouží k vymezení vůlí pomocí stavěcích šroubů. Na kluzných lištách je vrstva materiálu *Turcite*, která slouží ke zlepšení třecích vlastností a k rozvodu mazacího oleje. Lišty budou modelované bez sražení a rádiusů. Spojení s přítlačnými lištami bude zjednodušeno. Tuhost stavěcích šroubů bude ovlivňovat celkovou deformaci saní. Stavěcí šrouby nebudou modelovány, budou pouze „naznačeny“ v podobě disků, které budou vloženy mezi přítlačné lišty a kluzné lišty.

4.1.9 Kluzné plochy

Aby při vysouvání vřeteníku bylo dosaženo co nejnižších odporů, jsou na saních odlité kluzné plochy, po kterých se posouvá vřeteník. Také v místě styku saní se stojanem jsou tyto plochy odlitky. Jedná se o epoxidový samonivelační materiál s nízkým koeficientem tření a vysokou pevností v tlaku. Jeho obchodní název je *GS Super Fluid* a je popsán v odstavci 4.1.12.

4.1.10 Šedá litina

Šedá litina je slitina železa s uhlíkem, vykazující izotropní chování s lineární závislostí při malých deformacích. Model bude popsán modulem pružnosti v tahu a poissonovou konstantou. Hodnoty modulu pružnosti v tahu a poissonovy konstanty jsou stochastického charakteru. Pro řešení našeho problému budeme uvádět deterministickou hodnotu z norem ČSN, kde již proběhlo měření a vyhodnocení statistického souboru z měření. Při citlivostní analýze není podstatné, pokud modul pružnosti v tahu reálného dílu bude o 10 % větší nebo menší než zvolená hodnota z norem ČSN. Šedá litina nebude posuzována z časového (dynamického) hlediska. Pro tuhostní analýzu časové hledisko není podstatné.

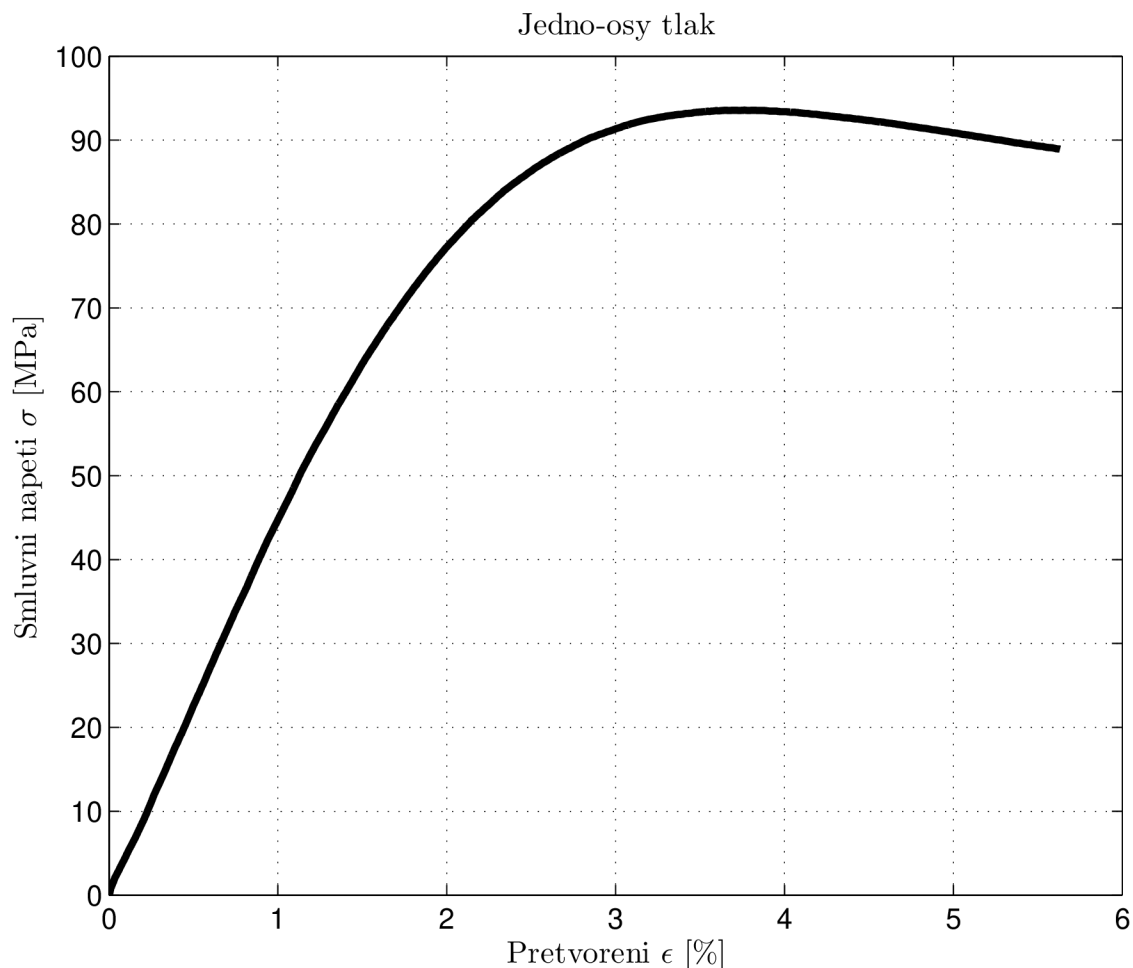
4.1.11 Ocel

Ocel je slitina železa s uhlíkem, vykazující izotropní chování s lineární závislostí při malých deformacích. Materiálový model oceli bude popsán dvěma parametry a to modulem pružnosti v tahu a poissonovou konstantou. Hodnoty modulu pružnosti v

tahu a poissonovy konstanty jsou stochastického charakteru. Pro řešení našeho problému budeme uvádět deterministickou hodnotu z norem ČSN, jak již bylo popsáno v odstavci 4.1.10.

4.1.12 GS Super Fluid

Jedná se o polotekutou, epoxidovou konstrukční hmotu s mimořádně nízkým koeficientem tření. Výrobce neudával v technických parametrech modul pružnosti v tahu nebo tlaku, proto se provedlo měření na ÚMTMB VUT v Brně. Záznam měření je na obr. 4.3 a jedná se o jedno-osou tlakovou zkoušku. Po zpracování měření jsme stanovili potřebné parametry pro model materiálu. GS Super Fluid je dvousložkový epoxid s nelineární závislostí napětí na přetvoření, a však v oblasti malých přetvoření se závislost jeví lineární. GS Super Fluid má oproti epoxidovým materiálům zvýšenou pevnost v tlaku.



Obr. 4.3: Závislost $\sigma - \epsilon$ materiálu GS Super Fluid

4.1.13 Turcite

Jedná se o termoplast PTFE s velmi nízkým koeficientem tření, který dobře tlumí vibrace. Tloušťka kluzné vrstvy Turcitu na saních se pohybuje mezi 1 mm až 2,5 mm. Závislost napětí na přetvoření v oblasti malých přetvoření se u Turcitu jeví jako lineární, proto budeme modelovat tento materiál jako lineární, izotropní.

4.1.14 Gravitace

Na celý stroj působí gravitační pole země a tím i na saně. Hmotnost saní se pohybuje kolem 1 000 kg a celková hmotnost sestavy saní a vřeteníku se pohybuje kolem 4 000 kg. Vzhledem k těmto hmotnostem lze tvrdit, že gravitační pole bude mít významný vliv na deformaci. Proto je i podstatné z hlediska modelování dosahovat co nejrealističtějšího rozložení hmotnosti.

4.1.15 Síly od obrábění

Vznikají řezným procesem při obrábění materiálu. Jejich velikost a směr působení jsou proměnné v čase. Vlivem proměnlivosti v čase dochází k únavovému namáhání a vibracím celého stroje. Tento jev má opodstatnění při řešení napjatosti, ale v našem případě při zkoumání tuhosti není nutné uvažovat stochastičnost sil od obrábění. Přesné stanovení zatížení bude projednáno v odstavci 5.1.5.

4.1.16 Tření

Tření je neodmyslitelnou součástí veškerého pohybu. Při návrhu konstrukcí je cílem, aby bylo dosaženo co nejmenších pasivních (třecích) odporů. V našem případě se jedná o tření na kluzných plochách. Pro případ výpočtového modelování se tření uvažuje v některých kontaktních úlohách. Pro citlivostní analýzu deformace saní, nemá tření podstatný vliv i když ho lze modelovat.

4.1.17 Vibrace

Vibrace vznikají při obrábění. Jejich charakter je silně stochastický. Způsobují únavové namáhání, přispívají k uvolňování šroubových spojů apod. Únavové hledisko v této práci není posuzováno a u šroubových spojů předpokládáme jejich plnou funkci. V citlivostní analýze tuhosti nemá význam uvažovat časové hledisko vlivu procesů působící na saně. Proto časové posouzení nebude modelováno a uvažováno.

4.1.18 Olejový film

Olejový film je na všech kluzných plochách. Slouží ke zlepšení třecích vlastností navzájem po sobě pohybuje se dílů. Svými parametry viskozity ovlivňuje tuhost kontaktů. Zkoumání vlivu olejového filmu není předmětem této práce. Jeho vliv bude stejný, pokud se použije jiná konstrukce s lepší deformací oproti stávající. Olejový film bude stále stejný, při zachování stejného maziva, proto není podstatné jeho vliv zahrnovat.

4.1.19 Teplota v okolí stroje

Teplota ovlivňuje deformaci saní. Změnou teploty ale nedojde k ovlivnění tuhosti saní, neboť změny se pohybují v rozmezí 15 °C až 35 °C. Značnější vliv teploty je teplem, které je generováno motorem a pohybem vřeten. To může dosahovat v některých místech až 60 °C. Změna teploty nebude mít podstatný vliv na tuhost saní, protože její rozmezí je velmi malé, a valná většina dílů v sestavě saní a vřeteníku jsou z materiálu se stejným koeficientem tepelné roztažnosti. Změna teploty nebude ve výpočtovém modelu uvažovaná.

4.1.20 Prašnost a nečistoty v okolí stroje

Při procesu obrábění vznikají třísky a při obrábění litiny grafitový prach. Tyto nečistoty jsou působí na stroj různými vlivy, ale na deformaci saní nemají vliv. Prašnost a nečistoty nebudou ve výpočtovém modelu uvažovány.

4.2 Výběr výstupních údajů

4.2.1 Deformace na makro úrovni

Hlavním cílem výpočtu je získání charakteru deformace. Bude provedena citlivostní analýza vlivu vybraných částí saní na celkovou deformaci saní.

4.2.2 Napjatost na makro úrovni

Při navrhování obráběcích strojů je podstatné získat určitou tuhost stroje, aby s posouzení konstrukčního, technologického a ekonomického hlediska jsme získali co nejmenší deformace. Při provozu stroje se pohybujeme v oblasti velmi malých deformací ve srovnání s charakteristickými rozměry stroje, z toho nám plyne, že napjatost se pohybuje ve velmi malých hodnotách. Není tedy potřebné u saní posuzovat bezpečnost k meznímu stavu pružnosti, ale spíše k přípustné deformaci.

Posuzovat napjatost je významné při přístupu, kde zahrneme časové hledisko. Stroj je vlivem obrábění rozvibrován a namáhán cyklickým zatížením. V současné době je trendem v konstrukci strojů se zabývat hlavně dynamickou odezvou strojů. V této práci není předmětem zkoumání dynamické odezvy saní.

4.3 Posouzení zvolené metody se vstupními a výstupními parametry

Vybranou metodou pro výpočtové modelování je *Metoda Konečných Prvků*. V tabulce 4.1 vlevo je výpis hlavních vstupujících a vystupujících parametrů a jejich podstatnost s ohledem k cíli práce a vliv. Jsou vypsány na základě kapitoly 2 (Systém podstatných veličin). V další části tabulky je posouzeno, zda MKP je schopna tyto veličiny vystihnout na daném dílčím modelu.

Je potřeba zmínit, že podstatnost a vliv zahrnutých parametrů jsou v této tabulce pouze odhadem. Následným výpočtem bude ověřena podstatnost a vliv u některých vstupních parametrů.

Ze shrnutí v tabulce 4.1 je vidět, které ze vstupních parametrů jsou podstatné a které nejsou. Dále vidíme jejich dílčí modely. Je patrné, že zvolená metoda řešení problému a to MKP s danou úrovní vstupních parametrů a dílčích modelů vystihuje problém citlivostní analýzy deformace saní. Použitý software pro MKP bude *ANSYS 14.5*. V něm se provedou jednotlivé výpočty deformace pro vstup do citlivostní analýzy. Citlivostní analýza se vyhodnotí za pomoci softwaru *MATLAB R2012a*.

Parametr	Podstatnost a vliv	Dílčí model	MKP
Stojan	podstatný, slouží jako vedení saní	tuhé těleso nahrazeno okrajovou podmínkou posuvů	ano, plně vystihuje
KŠ	podstatný, slouží jako okrajová podmínka ve svislém směru	modelován jako prutové těleso s odpovídající průřezovými charakteristikami, na koncích vetknutý	ano, plně vystihuje
Vřeteník	velmi podstatný, ovlivňuje celkovou tuhost a deformaci saní	geometricky zjednodušený objemový model	ano, plně vystihuje
Frézovací vřeteno	podstatný, ovlivňuje celkovou tuhost a deformaci saní	geometricky zjednodušený model, modelovaný jako prutové těleso s odpovídající průřez. charakt.	ano, plně vystihuje
Výsuvné vyvrtávací vřeteno	podstatný, ovlivňuje celkovou tuhost a deformaci saní	geometricky zjednodušený model, modelovaný jako prutové těleso s odpovídající průřez. charakt.	ano, plně vystihuje
Saně osy Y	sledovaný parametr	geometricky zjednodušený objemový model	ano, plně vystihuje
Přítlačné lišty	podstatný, spojují posuvy vřeteníku se saněmi	geometricky zjednodušený objemový model	ano, plně vystihuje
Kluzné lišty	podstatný, spojují posuvy vřeteníku se saněmi	geometricky zjednodušený objemový model	ano, plně vystihuje
Kluzné plochy	podstatný, vlivem poddajnějšího materiálu	objemový model	ano, plně vystihuje

Tab. 4.1: Posouzení zvolené metody se vstupními a výstupními parametry

Parametr	Podstatnost a vliv	Dílčí model	MKP
Šroubové spoje	podstatný, vliv na deformaci	modelované pouze některé, jako válcový disk v malé mezeře mezi kluznými lištami a přítláčnými lištami	ano, plně vystihuje
Šedá litina	velmi podstatný, materiál saní a těla vřeteníku	model materiálu jako izotropní hookovský	ano, plně vystihuje
Ocel	podstatný, materiál přítláčných lišt, kluzných lišt a vřeten	model materiálu jako izotropní hookovský	ano, plně vystihuje
GS Super Fluid	podstatný, materiál kluzných ploch	model materiálu jako izotropní hookovský	ano, plně vystihuje
Turcite	podstatný, materiál kluzných lišt	model materiálu jako izotropní hookovský	ano, plně vystihuje
Gravitace	velmi podstatná, vliv dle rozložení hmotnosti	modelováno jako působící zrychlení	ano, plně vystihuje
Síly od obrábění	nepodstatný, ovlivňuje dynamickou odezvu saní	modelováno jako deterministická veličina	ano, plně vystihuje
Struktura odlitku	méně podstatný, způsobuje nehomogenost materiálu	nemodelováno, nepřímo zahrnuto v materiálových charakteristikách odlitku	velmi obtížně
Zbytkové napětí	méně podstatný, stochasticky ovlivňuje deformaci	nemodelováno, musel by se modelovat průběh předchozích technolog. operací	možné použití
Styčný tlak	nepodstatný na deformaci, ovlivňuje opotřebení kluzných ploch	nemodelováno	pouze tlak, nikoliv opotřebení povrchu
Vibrace	nepodstatný, ovlivňují z dynamického hlediska	nemodelováno	ano, plně vystihuje

Pokračování tab. 4.1 – Posouzení zvolené metody se vstupními a výstupními parametry

Parametr	Podstatnost a vliv	Dílčí model	MKP
Únavové namáhání	nepodstatný, ovlivňují z dynamického hlediska	nemodelováno	jako podpora pro výpočet
Tření	nepodstatné, vliv pouze v případě použití kontaktní úlohy	nemodelováno	ano, plně vystihuje
Olejevý film	méně podstatný, vliv viskozity oleje	nemodelováno, případně možné nahradit konstitutivním vztahem za předpokladu nestlačitelnosti	ano, s určitými předpoklady
Teplota	nepodstatná, působí na celkovou deformaci	nemodelováno	ano, plně vystihuje
Prašnost	nepodstatná	nemodelováno	nevystihuje

Pokračování tab. 4.1 – Posouzení zvolené metody se vstupními a výstupními parametry

5 REALIZACE ŘEŠENÍ

Tato kapitola se zabývá samotnou realizací výpočtu. Nejprve popíšeme vytvořené dílčí modely a následně dílčí výpočet. Navážeme na citlivostní analýzu s popisem plánovaného měření.

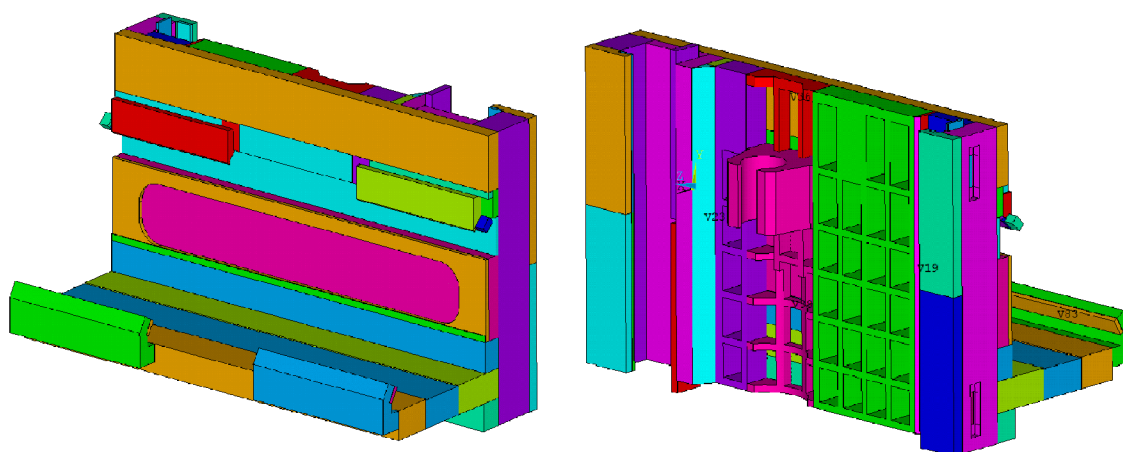
5.1 Dílčí modely

5.1.1 Model geometrie

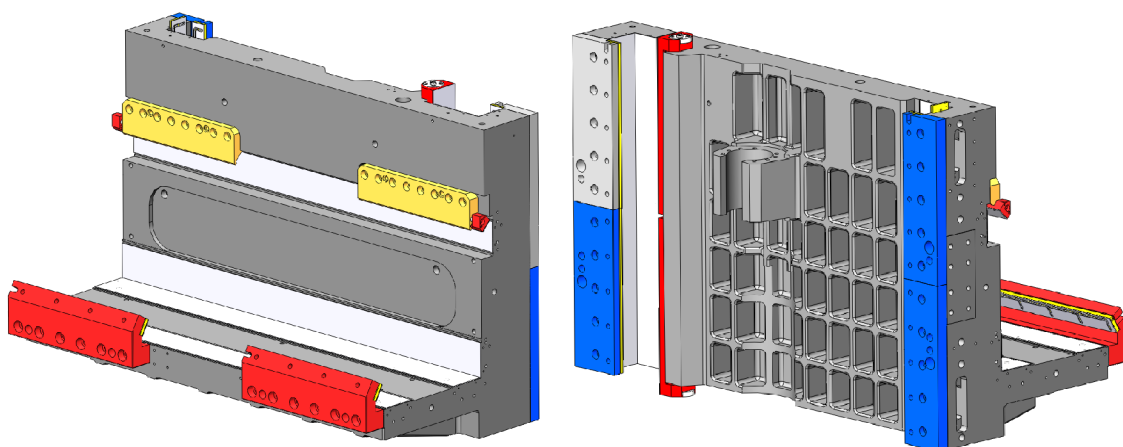
Geometrie většiny dílů v sestavě vřeteníku a saní jsou obecná tělesa, proto jsme zvolili prvek konečno-prvkové sítě SOLID185 a v některých případech i SOLI186. Model geometrie je zjednodušený o rádiusy, sražení, úhlové plochy žeber, otvory, závitové díry a některé geometrické prvky. Geometrie je modelovaná tak, aby při síťování vznikala co nejvíce mapovaná síť. V některých případech je konečno-prvková síť tvořena degenerovanými SOLID prvky. Geometrie je kompletně vytvořena v prostředí programu ANSYS Mechanical APDL. Některá žebra saní jsou modelovaná prvkem SHELL181. Model geometrie je modelován na základě výkresové dokumentace firmy *Fermat s.r.o.*

Na obrázku 5.1(a) můžeme vidět model geometrie saní. Je patrné, že je tvořen z několika objemů, různého tvaru. Je to z důvodu tvorby mapované sítě. Pro srovnání zjednodušené geometrie s reálnou geometrií je na obr. 5.1(b) 3D model z konstrukce firmy Fermat. Obdobným způsobem byl vytvořen model geometrie vřeteníku. Na obr. 5.2(a) můžeme vidět model geometrie vřeteníku a na obr. 5.2(b) je pro srovnání 3D model z konstrukce. Nejsou zde vidět modely vřeten, neboť ty jsou modelovány pomocí úseček s BEAM prvky, nikoliv objemovými prvky.

Konečno-prvková síť u objemových dílů byla tvořena převážně funkcí *SWEEP* s cílem vytvořit mapovanou síť. V některých případech, zejména u složitých tvarů, síť mapovaná není a prvky jsou degenerované. Některá žebra na saních jsou modelována pomocí prvku SHELL181. Vřetena a pohybové kuličkové šrouby jsou modelovány jako prut pomocí prvku BEAM188. Hustota sítě byla volena na základě zjištění závislosti posuvu na počtu elementů. Tato závislost je zobrazena na obr. 5.3. Parametry výsledné sítě odpovídají červenému kříži na obr. 5.3. Hodnota deformace zvolené sítě, tj. při 473 203 elementů, je o 7% větší než síť s 2 004 266 elementů. Výpočtový čas se tím výrazně zmenší s určitou nepřesností, kterou tolerujeme. Výsledná konečno-prvková síť saní je na obr. 5.4(a) a 5.4(b). Kvalita sítě je popsána na obr. 5.6(a) až 5.6(c). Jsou zobrazeny tři kritéria dle prostřední ANSYS Workbench z Mesh Metrics. Jako první je Element Quality viz obr. 5.6(a). Hodnota se pohybuje mezi 0 a 1, a vyjadřuje poměr mezi objemem a délkou hrany elementu.



(a) 3D model geometrie saní pro MKP

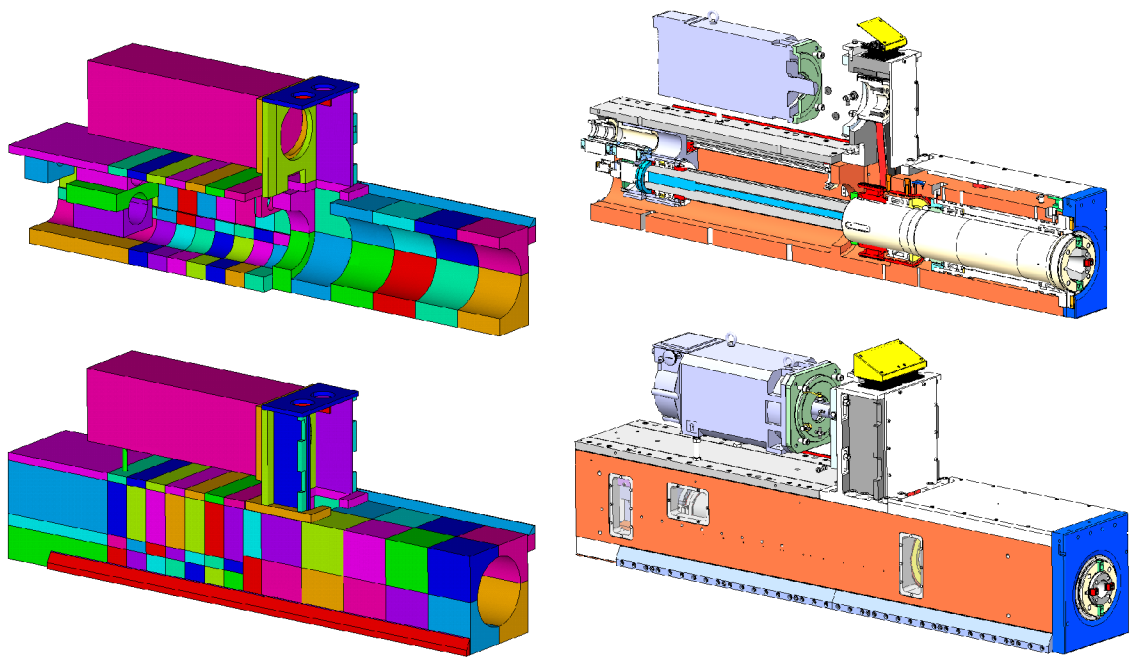


(b) 3D model geometrie saní z CAD programu [Konstrukce Fermat s.r.o.]

Obr. 5.1: Ukázka modelu saní pro MKP a modelu konstrukce

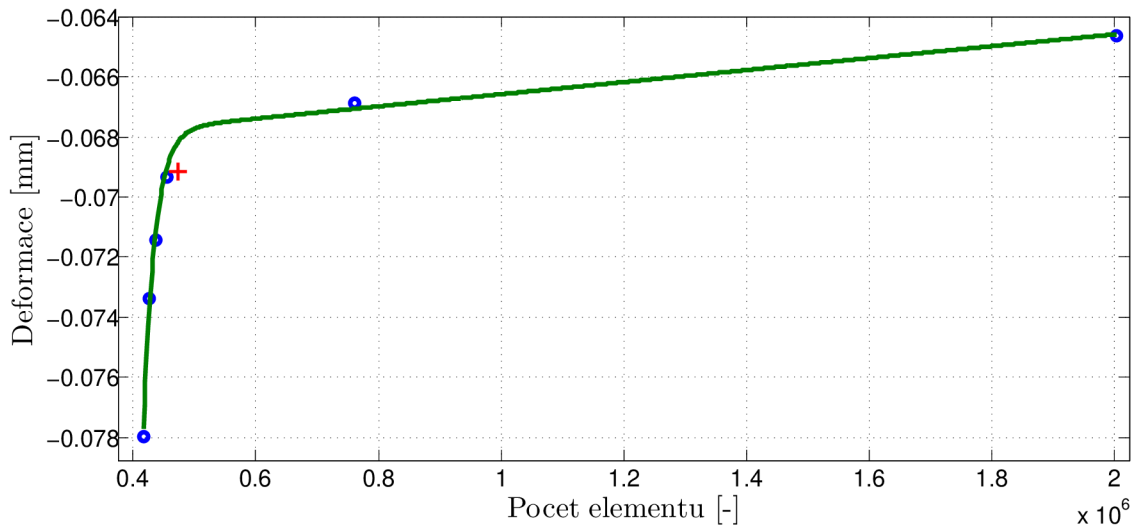
Hodnota 1 charakterizuje ideální krychli a 0 element s nulovým objemem [10]. V našem případě dosahuje síť hodnoty $EQ = 0,8907 \pm 0,13220$. Dalším kritériem je Aspect Ratio viz obr. 5.6(b). Hodnota se pohybuje od 1 a více, a obecně vyjadřuje poměr dvou stran elementu. Čtverec má hodnotu 1. V našem případě dosahuje síť hodnoty $AR = 1,5631 \pm 0,63495$. Posledním zvoleným kritériem je Maximum Corner Angel viz obr. 5.6(c). Vyjadřuje velikost úhlu, kterou svírají dvě sousedící hrany elementu. Hodnota se pohybuje mezi 0° až 180° . Pro 4-uzlové plochy je ideální hodnota 90° a pro 3-uzlové plochy je ideální hodnota 60° . V našem případě dosahuje síť hodnoty $MCA = 97,52^\circ \pm 10,01^\circ$. Podle těchto tří kritérií lze konstatovat, že konečno-prvková síť saní je velmi dobrá a pro účely řešení deformace je plně dostatečná. Pokud bychom řešili i problém napjatosti, bylo by potřebné modelovat veškeré detaily, např. rádiusy a zjemňovat síť v místech s gradientem napětí.

Jak již bylo popsáno, geometrie je tvořena z několika objemů. Ty jsou spojeny kon-



(a) 3D model geometrie vřeteníku pro MKP (b) 3D model geometrie vřeteníku z CAD programu [Konstrukce Fermat s.r.o.]

Obr. 5.2: Ukázka modelu vřeteníku pro MKP a modelu konstrukce



Obr. 5.3: Závislost posuvu na počtu elementů

taktem typu *BONDED*. Algoritmus řešení kontaktu je zvolen *MPC Algorithm* a chování kontaktu je nastaveno na *Bonded always*. Toto nastavení způsobí, že v místě kontaktu se síť bude chovat tak, jako by byla svařená, nebo plně spojená k sobě. Provází se tak posuvy v uzlech plochy na jednom objemu s plochou na druhém ob-

jemu. Kontaktní prvky jsou zvoleny TARGE170 a CONTA173. Pro spojení žeber tvořených prvkem SHELL181 je nutné použít CONTA177, který slouží ke kontaktu mezi úsečkou a plochou.

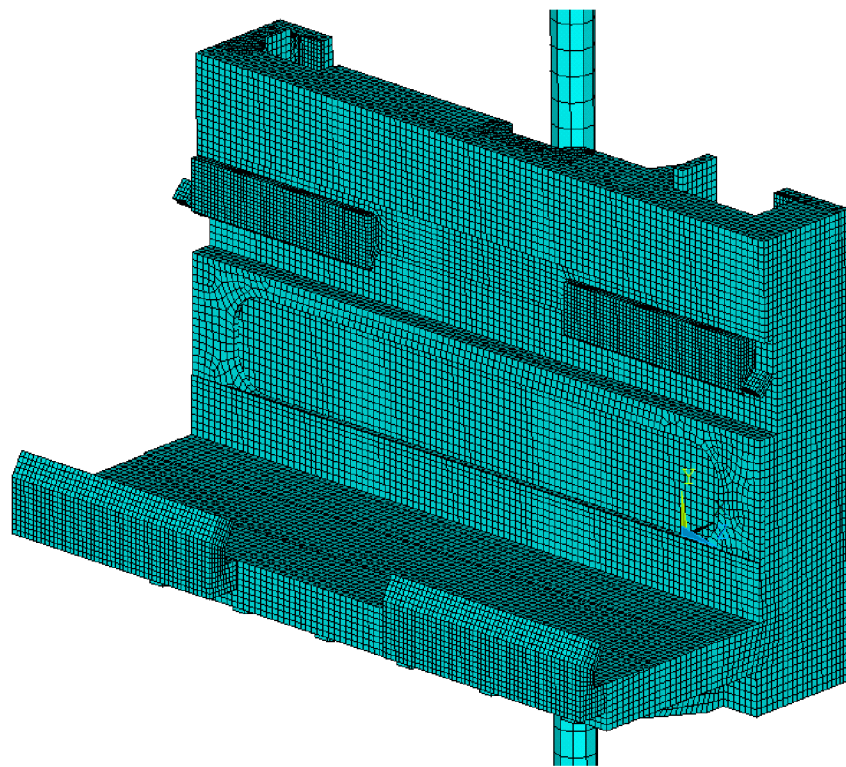
Frézovací vřeteno je spojeno s tělem vřeteníku v místě ložisek pomocí funkce *CERIG*. Tímto se provádí posuvy těla vřeteníku s frézovacím vřetenem. Výsuvné vyvrtávací vřeteno je spojeno s frézovacím vřetenem v místě ložisek pomocí funkce *CPINTF*. Tato funkce spojí uzly, které leží v oblasti s daným poloměrem rozsahu. Takto se provádí posuvy obou vřeten v místech, kde jsou ložiska. Veškeré výše popsané kontakty se po celou dobu výpočtu nemění.

5.1.2 Model vlastností struktury objektu

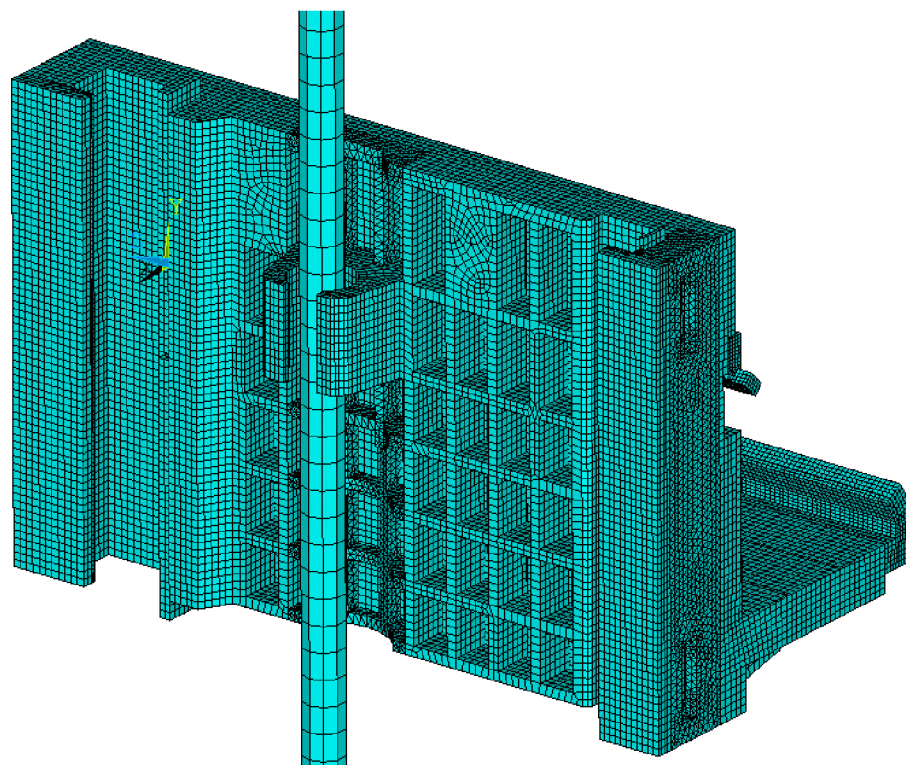
Tab. 5.1 udává přehled použitých parametrů pro izotropní modely materiálu pro jednotlivé komponenty.

Materiál	Komponenta	Modul pružnosti v tahu E [MPa]	Poissunův poměr μ [-]	Hustota [$\frac{kg}{m^3}$]
Šedá litina	Saně, tělo vřeteníku	144 400	0,26	7 250
Ocel	Přítlačné, kluzné lišty	206 000	0,30	7 850
GS Super Fluid	Kluzné plochy	4 500	0,40	1 650
Turcite	Kluzné plochy	1 000	0,45	1 500

Tab. 5.1: Parametry pro model materiálu jednotlivých komponent

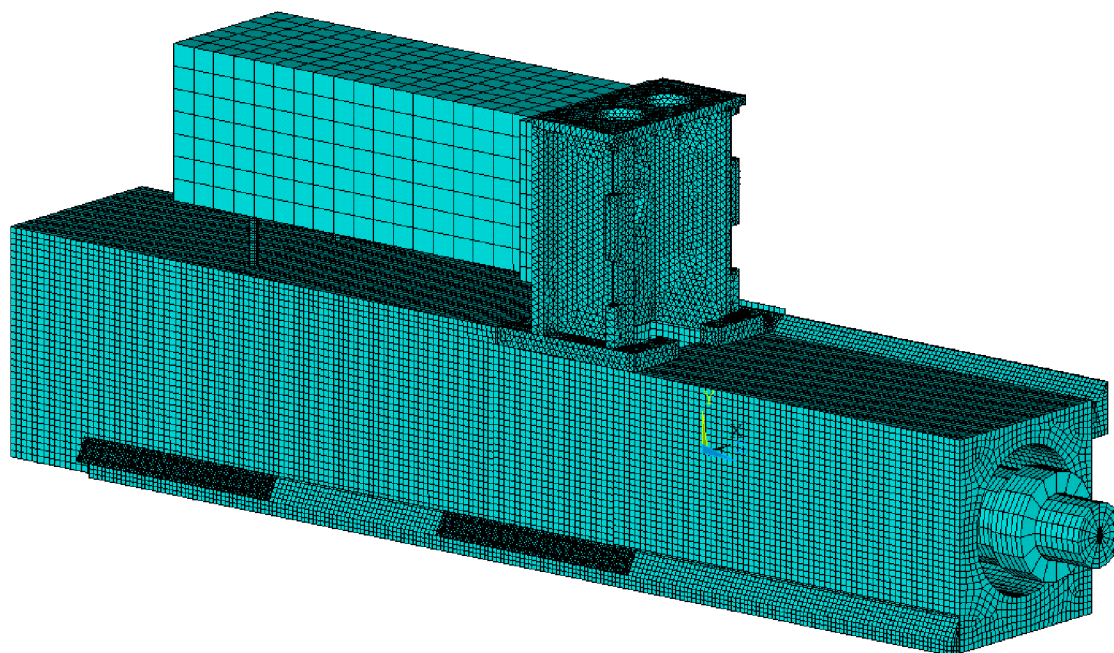


(a) Axo zepředu

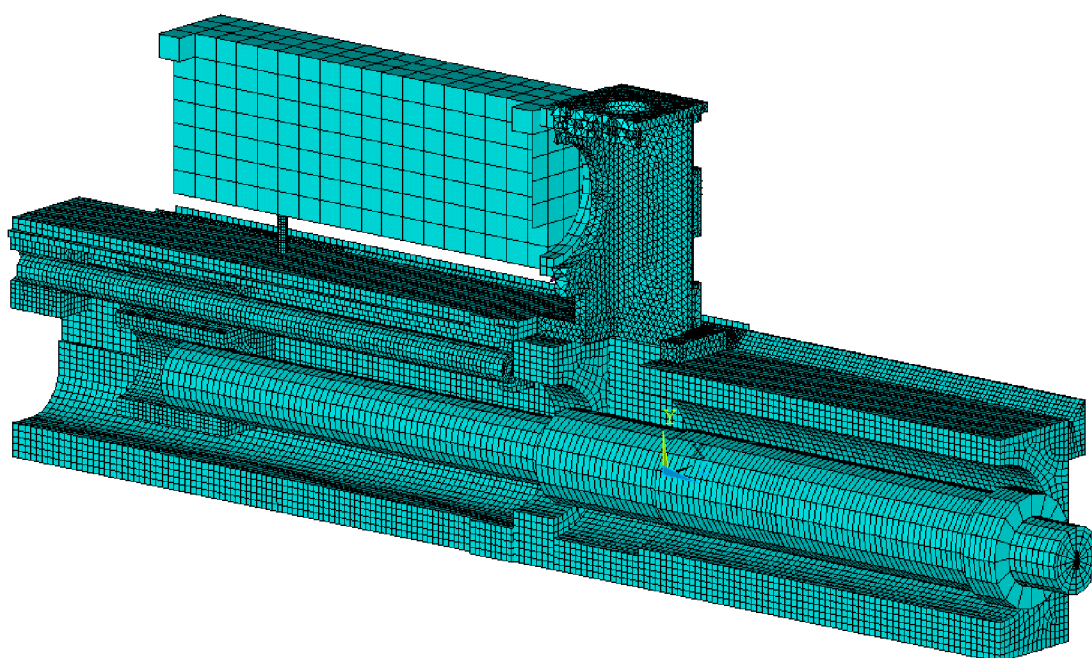


(b) Axo zezadu

Obr. 5.4: Konečno-prvková síť saní s kuličkovým šroubem

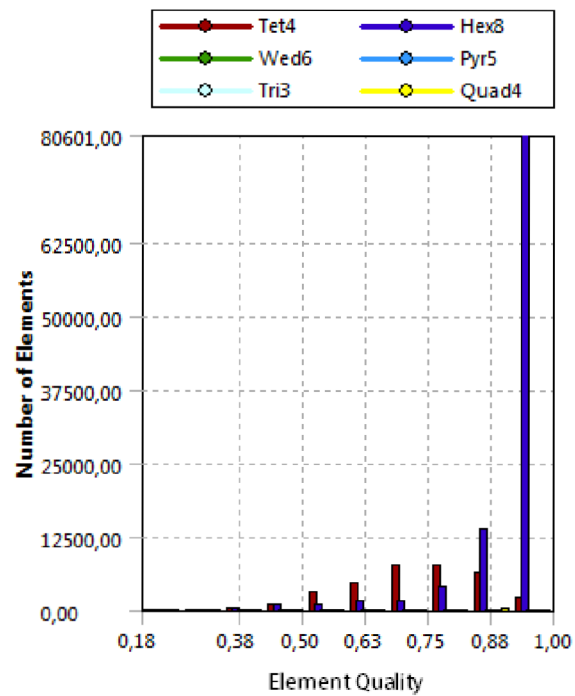


(a) Axo zepředu s řezem

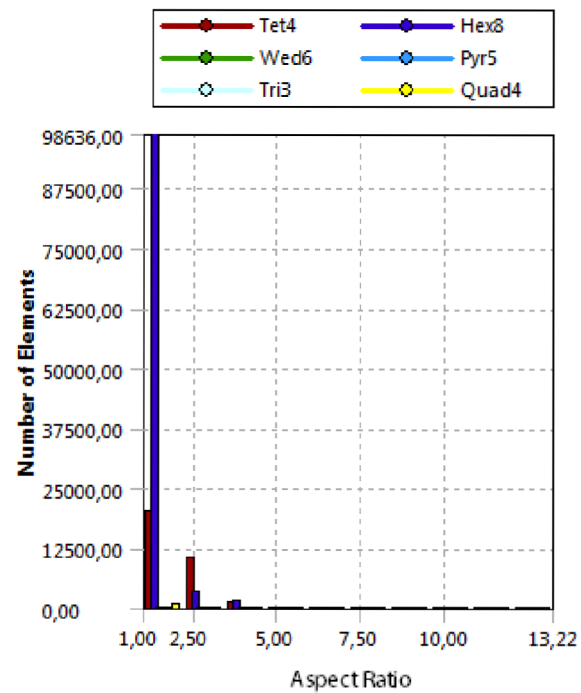


(b) Axo zepředu s řezem

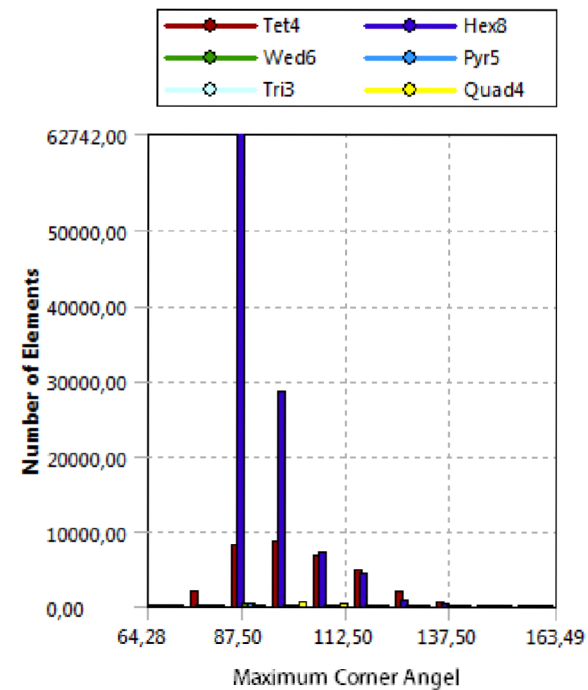
Obr. 5.5: Konečno-prvková síť vřeteníku



(a) Element Quality



(b) Aspect Ration

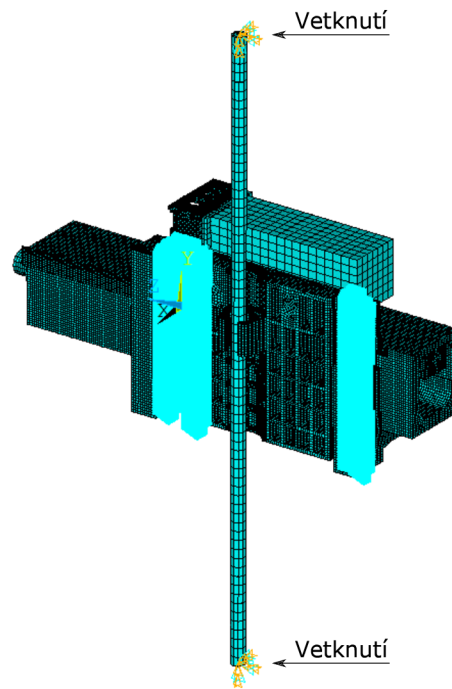


(c) Maximum Corner Angel

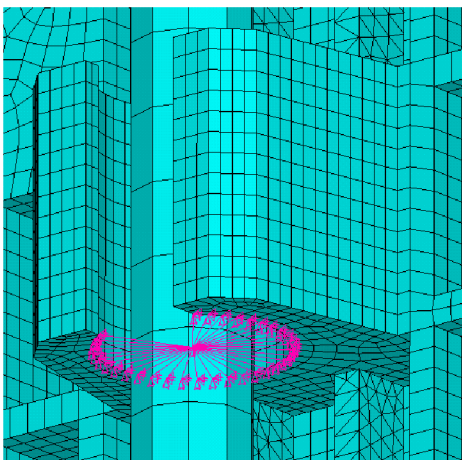
Obr. 5.6: Mesh Metrics

5.1.3 Okrajové podmínky

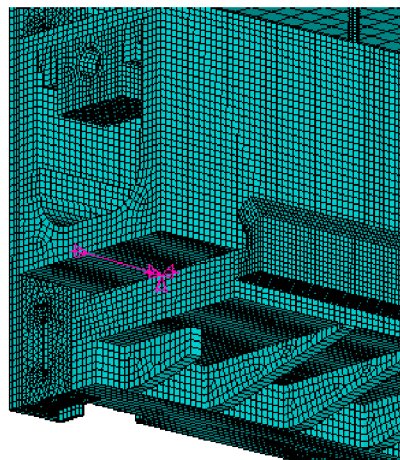
V reálné situaci nese celé saně kuličkový pohybový šroub osy Y. Dále jsou saně vedeny stojanem. Tyto skutečnosti jsou podkladem pro okrajové podmínky. Kuličkový šroub (KŠ) je na svých koncích vetknutý viz obr. 5.7. V místě spojení se saněmi je pomocí funkce *CERIG* spojen posuv KŠ s plochou, na které je přišroubovaná matice KŠ viz obr. 5.8. Posuvy jsou svázány ve všech třech směrech. Vedení stojanu je modelováno, jak již bylo zmíněno v odstavci 4.1.1, pomocí zamezení posuvů na kluzných plochách. Vodící plochy stojanu jsou na sebe kolmé a jsou rovnoběžné s plochami globální souřadného systému, takže na kluzných plochách je vždy odebrán $1^\circ V$ dle směru normály dané plochy v globálním souřadném systému viz obr. 5.10. Dále je nutné definovat okrajovou podmínku pro posuv vřeteníku po saních. To je zajištěno svázáním posuvu dvou uzlů pomocí funkce *CERIG* ve směru výsuvu, v našem případě osy z viz obr. 5.9.



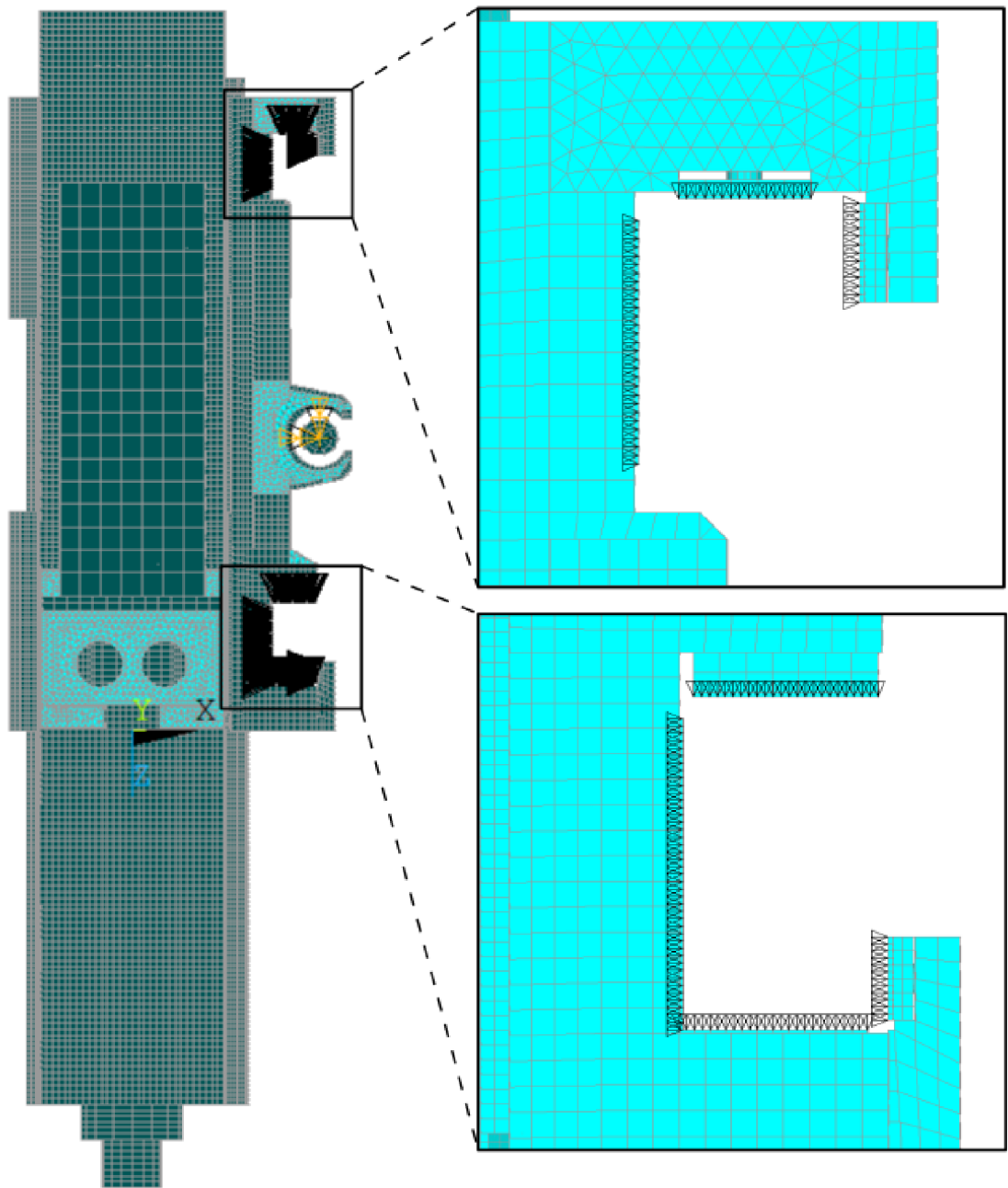
Obr. 5.7: Vetknutí kuličkového šroubu



Obr. 5.8: Detail spojení KŠ se saněmi



Obr. 5.9: Zamezení posuvu vřeteníku v ose z



Obr. 5.10: Okrajové podmínky nahrazující vedení stojanu

5.1.4 Model kontaktu mezi saněmi a vřeteníkem

Vřeteník při vysouvání na saních je veden přítlačnými lištami (viz odst. 4.1.7), které jsou osazeny kluznými lištami (viz odst. 4.1.8). Kluzné lišty pomocí stavěcích šroubu přitlačují vřeteník na kluzné plochy z materiálu GS Super Fluid (viz odst. 4.1.12). Kontakt mezi kluznými lištami a vřeteníkem je zvolen lineárního typu a to *BONDED*. Pokud modelujeme materiály lineárním modelem, zatížení nesmí nikdy překročit mez kluzu a strukturu považujeme za homogenní, tak odezva modelu saní na zatížení, charakter deformace, bude mít také lineární chování. Nastavení kontaktu bude mít jistě vliv na výsledné hodnoty deformace. Pokud bychom modelovali nelineární kontakt, přiblížili bychom se více reálnému chování. Pro řešení této práce není potřebné zjišťovat rozložení kontaktního tlaku, případně uvažovat, že kontakt se v průběhu zatížení stane v některých místech nefunkční, tedy že se otevře. Jelikož se zaměřujeme na zlepšení konstrukce saní, tak stávající i nová konstrukce bude mít pořád stejné spojení vřeteníku a saní, tedy stejné kontakty. Proto není nutné se zaměřit na kontaktní nelinearitu.

Algoritmus řešení kontaktu je zvolen *MPC Algorithm* a chování kontaktu je nastaveno na *Bonded always*. Toto nastavení kontaktu způsobí, že se spojí posuvy uzlů na plochách vstupujících do kontaktu. Proto je nutné nadefinovat, aby algoritmus *MPC Algorithm* spojil posuvy pouze v normálním směru na kontaktní plochu, abychom modelovali možné posouvání vřeteníku po saních. Toto nastavení lze provést v nastavení prvku elementu, kterým jsou kontaktní plochy síťované. Prvek TAREG170 umožňuje ve svém nastavení určit, jaké stupně volnosti mají být omezeny a to posuvy v osách (UX, UY, UZ) a rotace (ROTX, ROTY, ROTZ). Toto nastavení prvku je pod kódem *KEYOPT(4)* [11].

5.1.5 Model aktivace saní - zatížení

Obráběcí stroje jsou zatěžovány od procesu obrábění, od dynamických účinků při posuvech částí stroje a od gravitačního pole země. Zatížení od obrábění a dynamických účinků je silně stochastické. Tato práce se nezabývá uvažováním časového hlediska, není řešen mezní stav únavové pevnosti a dynamické chování konstrukce. Proto je nutné rozsáhlé spektru zatížení nahradit ekvivalentní statickou silou. V zásadě je několik způsobů, jak přistupovat ke stanovení ekvivalentního zatížení. Je možno vycházet z:

- Řezného výkonu (spojeno s výkonem vřetena)
- Příkladu obrábění
- Kroutícího momentu vřetena
- Maximálních sil vyvozených osami stroje

Při výběru způsobu stanovení zatížení je nutno uvažovat, že se jedná o numerický výpočet objektu, který váží cca $4t$ a jeho charakteristické rozměry se pohybují až do 2000 mm . Takovýto objekt bude vykazovat vysokou tuhost. Jelikož díly obráběcích strojů se navrhují tak, aby dosahovaly velké tuhosti, bude tomu i v případě sestavy saní a vřeteníku. Při měření funkčnosti vyrovnávacího systému vřeteníku, které slouží k omezení průhybu vřeteníku při nasazení frézovací hlavy na vřeteník, bylo změřeno, že hodnoty změny deformace se pohybují v rozmezí $0,02\text{ mm}$ až $0,06\text{ mm}$ při plném vysunutí vřeteníku. Frézovací hlava působí přibližně silou $11\,100\text{ N}$ (vychází se z hmotnosti hlavy a vzdálenosti těžiště hlavy od saní) ve svislém směru na konci vřeteníku. Deformace v řádech 10^{-2} mm objektu s rozměry v řádech 10^2 mm až 10^3 mm vyvolají velmi malé přetvoření v řádech $0,001\%$ až $0,1\%$. Protože se jedná o numerické řešení vstupují do vlivu výpočtu i zaokrouhlovací chyby. Ty mají větší míru vlivu, čím menší budou posuvy konečno-prvkové sítě. Z toho plyne, že bude vhodné modelovat zatížení tak, aby vycházelo z největší možné hodnoty na reálném modelu. Jelikož se práce zabývá analýzou tuhosti saní a porovnávacím hlediskem je charakter deformace saní, je teoreticky možné zatěžovat i jednotkovou silou. Z praktického hlediska to možné není, viz popsáno v textu výše. Největší možné síly, které konstrukce stroje dovede přenést budou omezeny konstrukcí a pohonem jednotlivých os stroje a výkonem motoru. Firma Fermat udává, že v osách X , Y a Z dovede stroj vyvinout sílu až $40\,000\text{ N}$. Pro výsuv smykadla dovede stroj vyvinout sílu až $20\,000\text{ N}$. Nominální výkon motoru je $P_m = 41\text{ kW}$ s tím, že je závislý na otáčkách vřetene.

Zatížení stanovené od maximálních sil vyvozených strojem v jednotlivých osách

Je nutné převést stochastický charakter zatěžujících sil na ekvivalentní statickou sílu. Tento postup se využívá i při návrhu valivých ložisek s ohledem na trvanlivost. Nejprve se zvolilo spektrum zatěžující síly, které reprezentuje stochastické zatěžování po dobu provozu stroje. Spektrum se stanovilo tak, že daná velikost zatěžující síly působí po danou dobu provozu stroje. Velikost síly je stanovena poměrným dílem z maximální zatěžující síly a doba zatěžování je také zvolena poměrem z celkové doby provozu stroje. Výsledné spektrum je zobrazeno v tabulce 5.2.

Zatěžující síla	100%	75%	45%	30%
Čas působení síly	20%	30%	30%	20%

Tab. 5.2: Spektrum zatěžující síly poměrově

To znamená, že 100% z maximální zatěžující síly působí 20% času, 75% z maximální

Zatěžující síla [N]	40 000	30 000	18 000	12 000
Čas působení síly	20%	30%	30%	20%

Tab. 5.3: Spektrum zatěžující síly při použití maximální síly pro posuvy v osách stroje

zatěžující síly působí 30% času atd.

Maximální zatěžující síla bude síla vyvozena osami stroje. První případ je při posuvu osami a to je 40 000 N. Při aplikaci spektra bude výsledné zatížení vypadat takto: Pro výpočet ekvivalentní síly použijeme vzorec, který se používá při proměnném zatížení ložiska ([3], 1. svazek, s. 743):

$$F_{ekv} = \sqrt[3]{\frac{F_1^3 \cdot N_1 + F_2^3 \cdot N_2 + F_3^3 \cdot N_3 + \dots}{N}}, \quad (5.1)$$

- kde: F_{ekv} - je ekvivalentní neproměnná síla [N],
 F_1 - je neproměnné předpokládané zatížení [N], působící na stroj za čas N_1 ,
 F_2 - je neproměnné předpokládané zatížení [N], působící na stroj za čas N_2 atd.,
 N - je celkový čas, při kterém působí zatížení $N = N_1 + N_2 + N_3 + \dots$

po dosazení spektra z tab. 5.3 do vzorce 5.1 dostaneme:

$$F_{ekv1} = \sqrt[3]{\frac{40\,000^3 \cdot 0,2 + 30\,000^3 \cdot 0,3 + 18\,000^3 \cdot 0,3 + 12\,000^3 \cdot 0,2}{1}} = 28\,437\,N \quad (5.2)$$

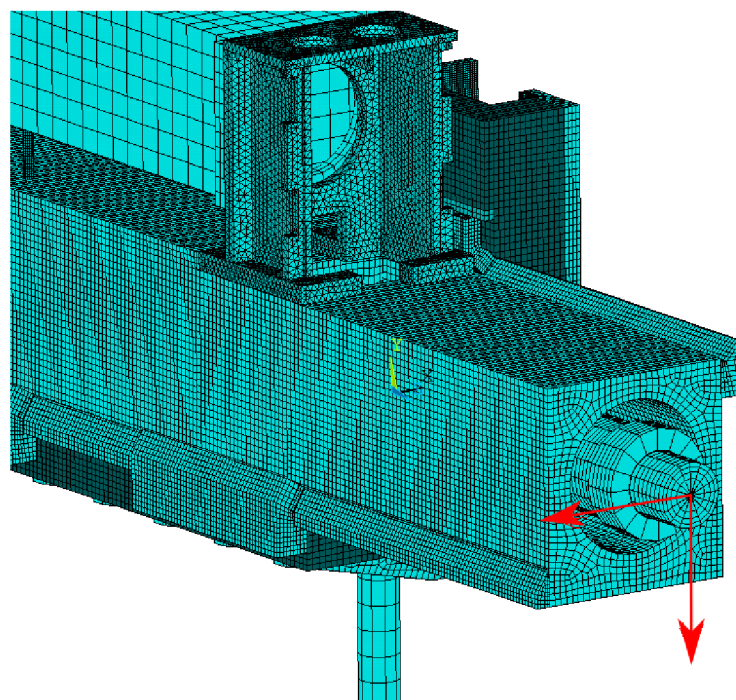
Druhý případ pro stanovení zatížení od maximálních zatěžujících sil vyvozených osami stroje je při výsuvu vřeteníku. Zde stroj umí vyvinout maximální sílu 20 000 N. Pak při aplikaci spektra bude výsledné zatížení vypadat takto:

Zatěžující síla [N]	20 000	15 000	9 000	6 000
Čas působení síly	20%	30%	30%	20%

Tab. 5.4: Spektrum zatěžující síly při použití maximální síly pro výsuv vřetena

Po dosazení spektra z tab. 5.4 do vzorce 5.1 dostaneme:

$$F_{ekv2} = \sqrt[3]{\frac{20\,000^3 \cdot 0,2 + 15\,000^3 \cdot 0,3 + 9\,000^3 \cdot 0,3 + 6\,000^3 \cdot 0,2}{1}} = 14\,218\,N \quad (5.3)$$



Obr. 5.11: Zatížení sestavy

Zatížení stanovené od výkonu vřetena

Pokud budeme uvažovat, že stroj plně využívá výkon vřetene a obrábí nástrojem, který umožňuje řeznou rychlost $v_c = 150 \text{ m/min}$, tak řezná síla působící na vřeteno je dle vztahu [4]:

$$F_c = \frac{P \cdot 60}{v_c} = \frac{41\,000 \cdot 60}{150} = 16\,400 \text{ N} \quad (5.4)$$

Z výše uvedených výpočtů vybereme minimální sílu, ze všech možných maximálních sil, které stroj dovede vyvinout. Tj. při uvažování vysouvání smykadla a při uvažování plného výkonu stroje. Tyto síly jsou $14\,218 \text{ N}$ a $16\,400 \text{ N}$. Velikost výsledné síly, která bude použita pro citlivostní analýzu, je zvolena $15\,000 \text{ N}$. Další zatížením je aplikace gravitačního pole země. Zatížení je aplikováno dle odhadu možného nejhoršího směru působení síly na vřeteno tak, aby došlo k největším deformacím ve svislém směru viz obr. 5.11.

5.2 Dílčí výpočet

V odst. 5.1 jsou popsány vstupy do dílčího výpočtu. Dílčí výpočet je vstupem pro citlivostní analýzu. Jedná se o statickou strukturální analýzu. Řešic výpočtu byl

nastaven na *PCG* (Preconditioned Conjugate Gradient), tedy iterační řešič, s tolerancí 10^{-4} . *PCG* řešič je volen zdůvodu typu úlohy dle poznatků v [12]. Výpočtový čas se velmi zkrátí oproti standardně používanému řešiči *Sparse Direct*. Výstupem dílčího výpočtu jsou hodnoty posuvů a vizuální charakter deformace.

Vizuální kontrola správnosti dílčího výpočtu

Je zapotřebí vizuálně prověřit deformace sestavy a saní vzlášť, zda jsou v souladu s předpokladem a měřením ve firmě Fermat. Na obr. 5.12 a obr. 5.13 jsou zobrazeny posuvy v jednotlivých směrech. Při aplikovaném zatížení viz obr. 5.11 předpokládáme deformaci ve svislém směru. Ta je prokázána na obr. 5.12(b) a na obr. 5.13(b). Ve firmě Fermat bylo také změřeno, že saně se v oblasti uchycení na kuličkový šroub otvírají. Na obr. 5.12(a) je prokázáno, že v horní části uprostřed je záporný posuv ve směru x , od kuličkového šroubu, takže saně se otvírají. Je tedy vidět, že deformace modelu sestavy odpovídají předpokládaným a změřeným deformacím reálné sestavy.

5.3 Citlivostní analýza

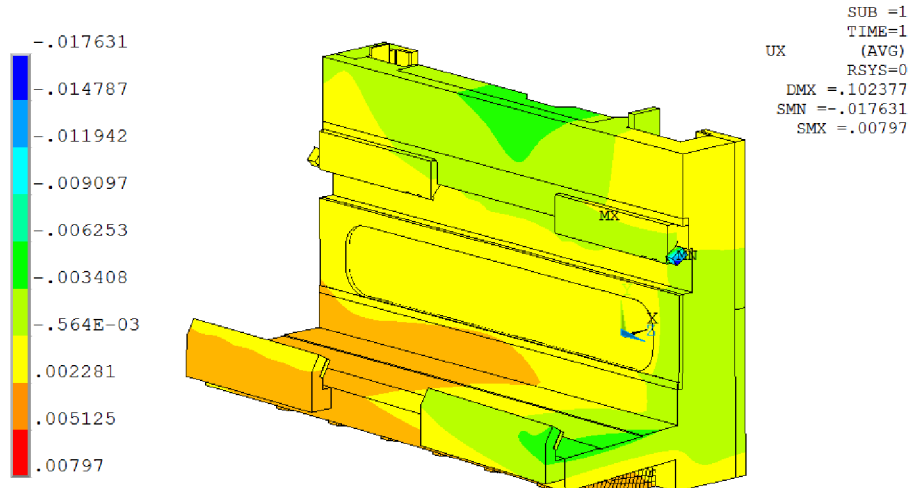
Citlivostní analýza patří k velmi důležitým nástrojům při řešení nejrůznějších typů problémů. U citlivostní analýzy se zkoumá vliv jednoho vstupního parametru na parametry výstupní [2]. V našem případě výstupním parametrem je deformace saní, nepřímo tuhost saní. V odst. 3.3 je rozbor tuhosti saní. Ta je v zásadě složena z *konstrukční tuhosti* a *materiálové tuhosti*. Pro návrh nové konstrukce bude analyzována stávající konstrukce saní, na které se provede citlivostní analýza.

Protože konstrukce saní má několik charakteristických prvků, bude zkoumán vliv těchto prvků na celkovou tuhost. Tento vliv budeme simulovat změnou tuhosti jednotlivých prvků. Jako vstupní parametr použijeme modul pružnosti v tahu, standardně označovaný E . Jeho změnou jsem schopni simulovat celkovou tuhost jednotlivých prvků, jak materiálovou tuhost, tak i konstrukční tuhost. Modul pružnosti v tahu v MKP figuruje v matici tuhosti prvku, jako lineární člen. Spolu s ním figurují v matici tuhosti prvku také průřezové charakteristiky a délkové charakteristiky prvku [6]. Tímto zahrneme i vliv změny konstrukce. Obdobně jako v případě analytického popisu posuvů u taženého prutu viz rovnice 3.5. Pokud se zvýší modul pružnosti v tahu, tak se zvýší celkově tuhost prvku.

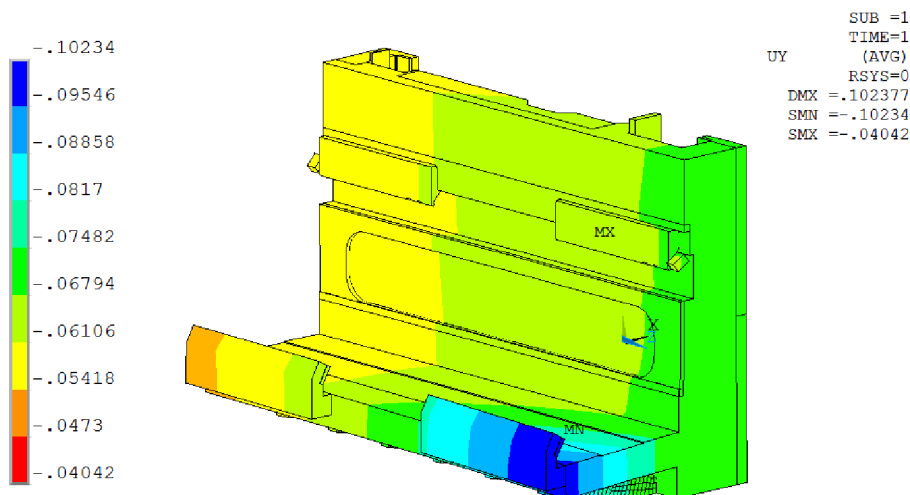
5.3.1 Výběr vstupních prvků konstrukce saní

Byly vybrány skupiny prvků, které je možné přímo konstrukčně měnit. Je to:

- materiál Turcite,



(a) posuvy ve směru X



(b) posuvy ve směru Y

Obr. 5.12: Deformace saní

který je na kluzných lištách a vymešovacím klínu. Změna je možná volbou jiného materiálu a tloušťkou vrstvy. Dále to jsou:

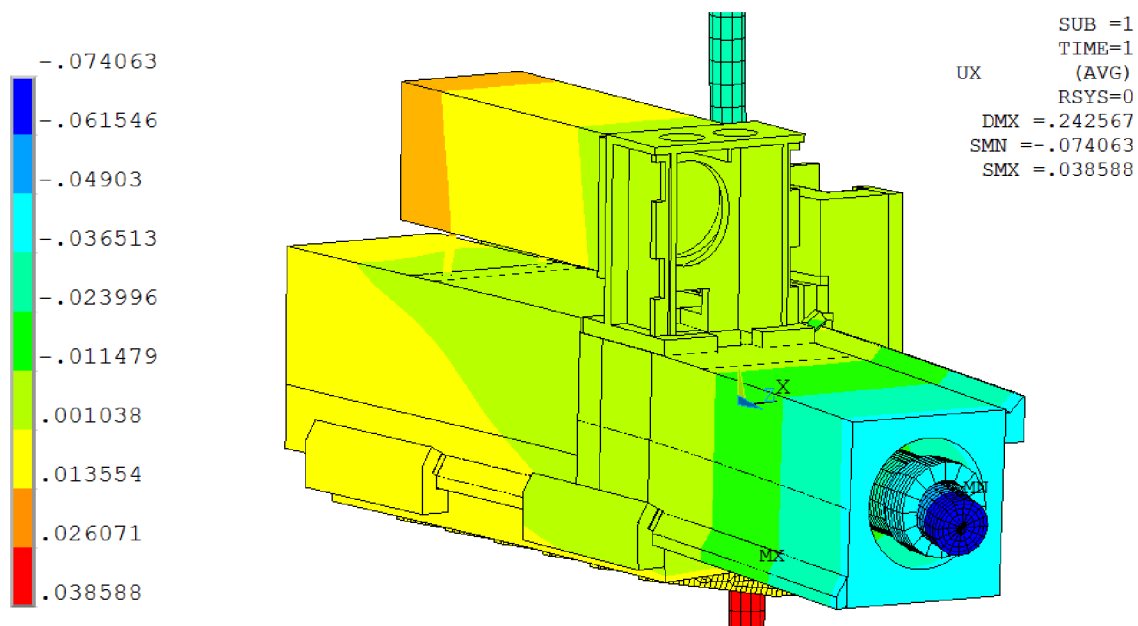
- kluzné plochy,

které jsou vyrobeny z materiálu GS Super Fluid. Změna je možná volbou jiného materiálu a tloušťkou vrstvy. Dalším zvoleným prvkem jsou:

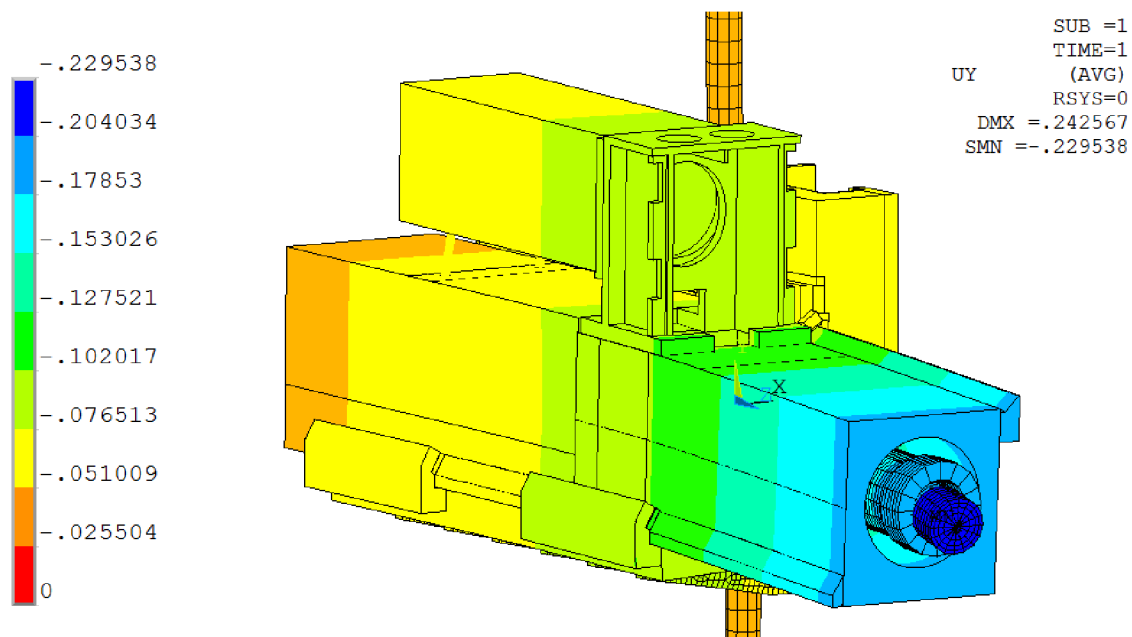
- přitlačné lišty,

které slouží jako vedení vřeteníku na saních, a také jako vedení saní na stojanu. Posledním prvkem je:

- žebrování saní,



(a) posuvy ve směru X

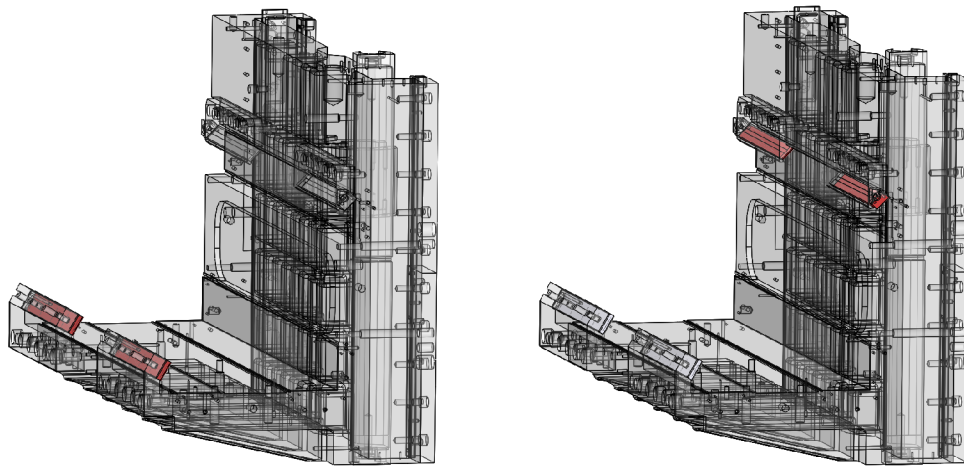


(b) posuvy ve směru Y

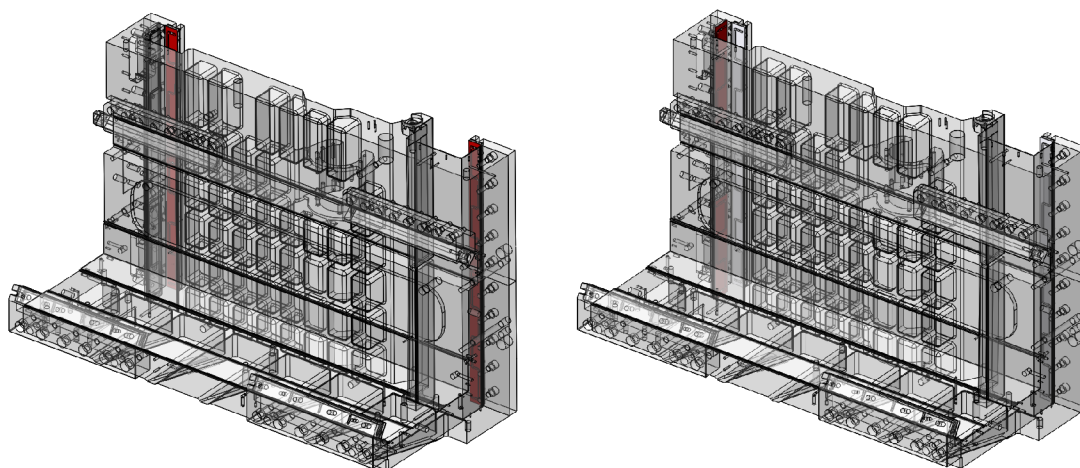
Obr. 5.13: Deformace sestavy

které reprezentuje celkovou konstrukci saní a samotný tvar a uspořádání žeber. Tyto skupiny jsou dále rozděleny dle umístění jednotlivých prvků a to takto:

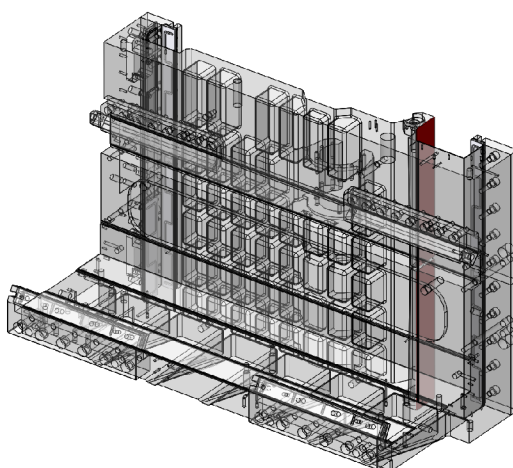
- materiál Turcite
 - na kluzných lištách v dolní části saní viz obr. 5.14(a)
 - na kluzných lištách v horní části saní viz obr. 5.14(b)
 - na kluzných lištách, vymežující pohyb ve směru osy X (dle souřadného systému na obr. 5.10) viz obr. 5.14(c)
 - na kluzných lištách, vymežující pohyb ve směru osy Z (dle souřadného systému na obr. 5.10) viz obr. 5.14(d)
 - na vymezovacích klínech viz obr. 5.14(e)
- kluzné plochy, materiál GS Super Fluid
 - na vodorovném vedení (dolní část saní) viz obr. 5.15(a)
 - na svislém vedení (boční část saní) viz obr. 5.15(b)
 - na svislém vedení stojanu blíže k čelu vřeteníku viz obr. 5.15(c)
 - na svislém vedení stojanu vzdálenějšího od čela vřeteníku viz obr. 5.15(d)
- přítlačné lišty
 - v dolní části saní, jako vedení vřeteníku na saních viz obr. 5.16(a)
 - v horní části saní, jako vedení vřeteníku na saních viz obr. 5.16(b)
 - v zadní části saní, pro vymezení pohybu ve směru osy X, jako vedení saní na stojanu blíže k čelu vřeteníku viz obr. 5.16(c)
 - v zadní části saní, pro vymezení pohybu ve směru osy X, jako vedení saní na stojanu vzdálenější od čela vřeteníku viz obr. 5.16(d)
- žebrování saní
 - žebra v zadní části saní viz obr. 5.17(a)
 - žebra v spodní části saní viz obr. 7.1(c)



(a) na kluzných lištách v dolní části saní (b) na kluzných lištách v horní části saní

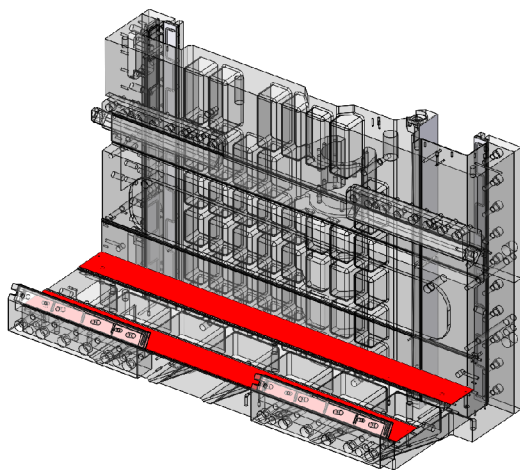


(c) na kluzných lištách, vymezení pohybu ve směru osy X (d) na kluzných lištách, vymezení pohybu ve směru osy Z

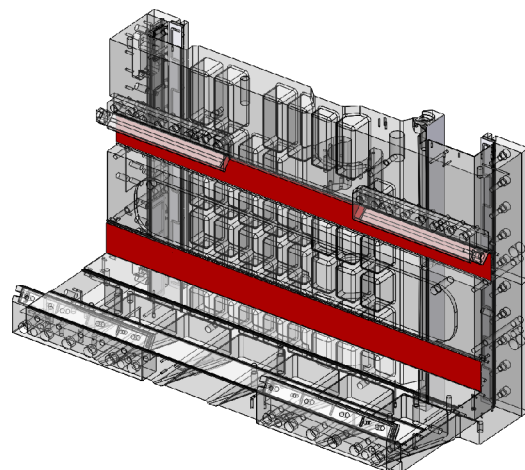


(e) na vymezovacích klínech

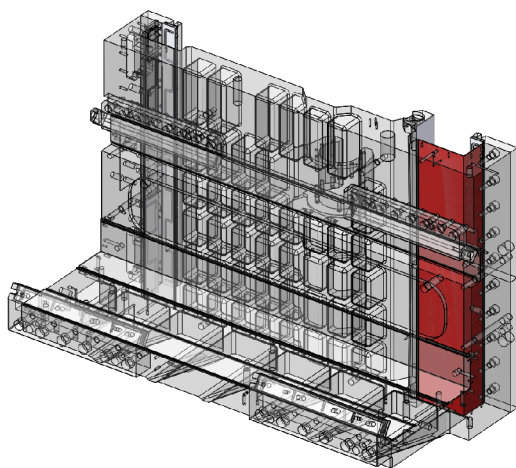
Obr. 5.14: Skupina vstupních parametrů - materiál Turcite



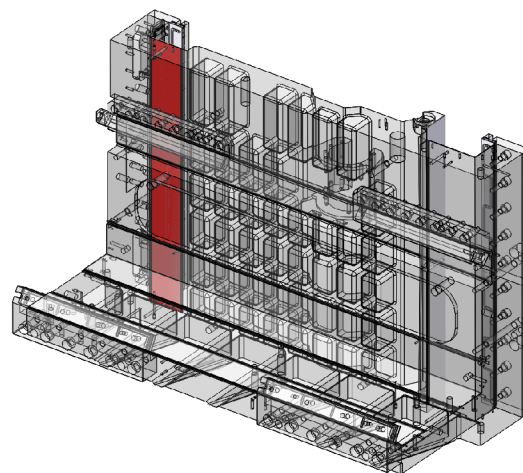
(a) na vodorovném vedení (dolní část saní)



(b) na svislém vedení (boční část saní)

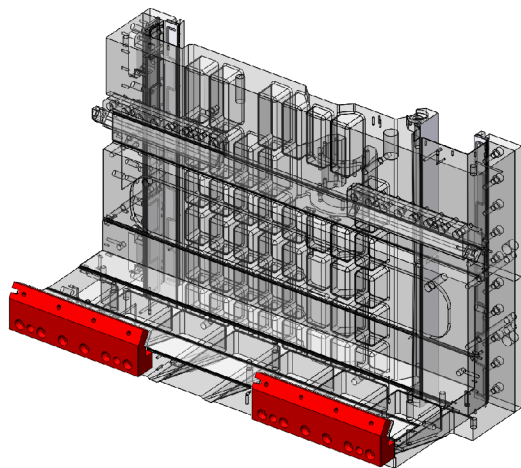


(c) na svislém vedení stojanu blíže k čelu vřeteníku

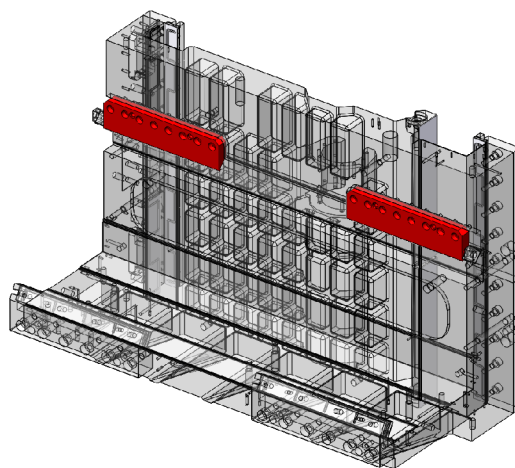


(d) na svislém vedení stojanu vzdálenějšího od čela vřeteníku

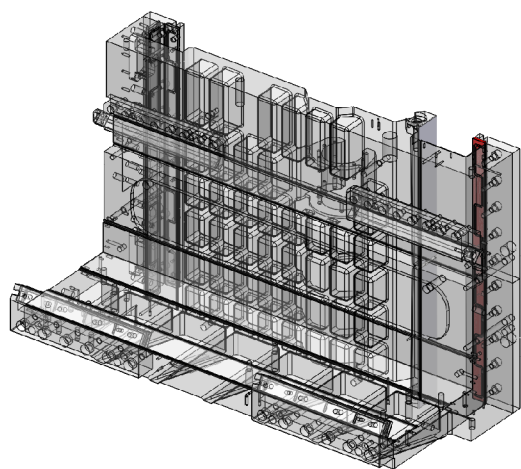
Obr. 5.15: Skupina vstupních parametrů - kluzné plochy, materiál GS Super Fluid



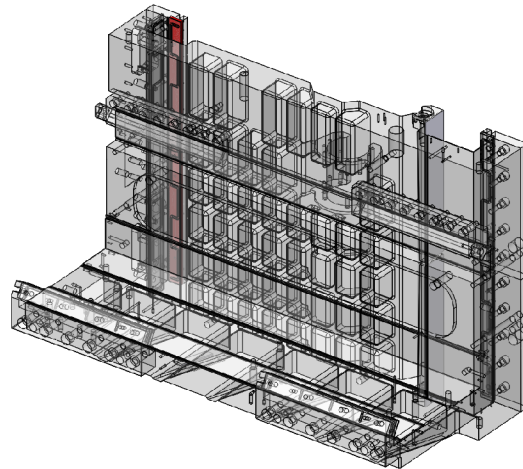
(a) v dolní části saní, jako vedení vřeteníku na saních



(b) v horní části saní, jako vedení vřeteníku na saních

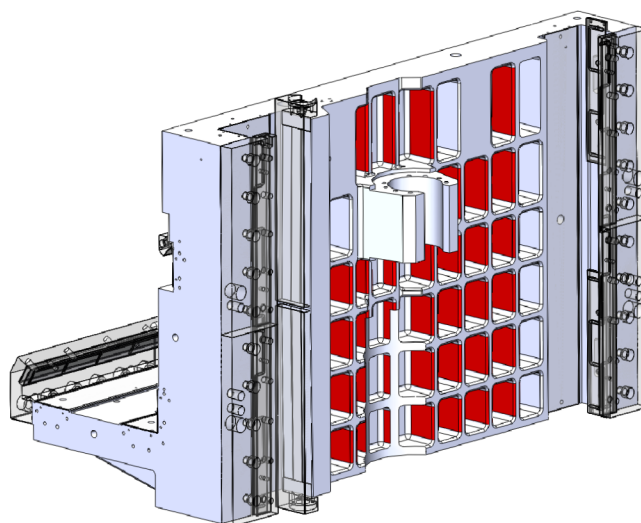


(c) v zadní části saní, pro vymezení pohyby ve směru osy X, jako vedení saní na stojanu blíže k čelu vřeteníku

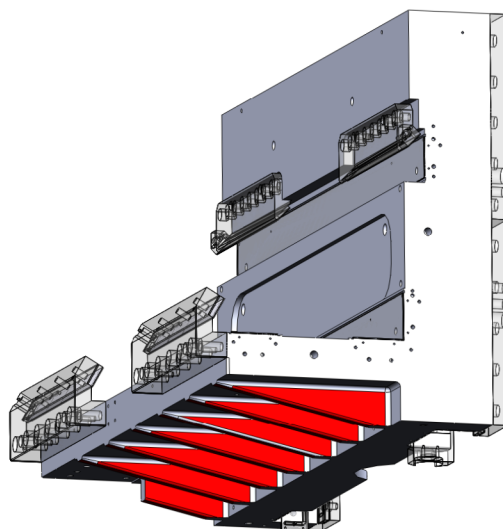


(d) v zadní části saní, pro vymezení pohyby ve směru osy X, jako vedení saní na stojanu vzdálenější od čela vřeteníku

Obr. 5.16: Skupina vstupních parametrů - přítlačné lišty



(a) žebra v zadní části saní



(b) žebra v spodní části saní

Obr. 5.17: Skupina vstupních parametrů - žebrování saní

5.3.2 Plánování měření v podmínkách lineární regresní analýzy

V odstavci 5.3.1 jsme definovali 15 nezávislých vstupních paramterů (prvky saní) vstupujících do citlivostní analýzy. Abychom zjistili vliv jednotlivého prvku na celkovou tuhost saní, budeme nejprve měnit každému prvku modul pružnosti v tahu a to ve dvou hodnotách:

- reálný odhad¹
- 200-násobek reálného odhadu

Následně budeme sledovat odezvu modelu saní na změnu tuhosti jednotlivých prvků, tedy budeme sledovat deformaci sestavy saní a vřeteníku v předem definovaných bodech. K určení vlivu jednotlivých prvků nám poslouží *lineární regresní analýza*. Tu lze chápat tak, že v regresní závislosti, vyjádřené vztahem

$$y = \beta_0 + \beta_1 f_1(x_1) + \beta_2 f_2(x_2) + \beta_3 f_3(x_2) + \beta_4 f_4(x_2) + \beta_5 f_5(x_3) + \dots \quad (5.5)$$

kde β_j jsou hledané regresní koeficienty, přičemž funkce $f_j(x)$ tyto koeficienty neobsahují. Je to tedy linearita vzhledem k regresním koeficientům, nikoli k funkcím $f_j(x)$. Ty mohou být zcela libovolné [2]. Proto si můžeme dovolit použít lineární regresní analýzu přestože vstupní prvky saní (sledované nezávislé parametry) jsou z různého materiálu a různé konstrukce. Potom hodnota regresních koeficientů vyjadřuje míru vlivu daného prvku (nezávislého parametru). Větší hodnota znamená větší vliv mezi vybranými prvky a naopak.

Vstupní údaje do citlivostní analýzy (modul pružnosti v tahu) jsou vybírány z intervalu hodnot (reálný odhadu a 200-násobek reálného odhadu) a cílem je zjistit jak, tyto údaje ovlivňují závislé proměnné veličiny (deformace sestavy saní a vřeteníku). Tato skutečnost vyžaduje použití *Plánování měření (Design of experiment)*. Plánované měření lze vymežit takto [2]: *Při jakých kombinacích jednotlivých vstupních parametrů a při jakých jejich hodnotách se mají realizovat jednotlivá měření, aby se minimalizoval jejich počet a získané statistické závislé proměnné byly optimální.* Jako měření je v našem případě dílčí výpočet s předem navolenými moduly pružnosti v tahu jednotlivých prvků.

Zkrácený algoritmus plánu měření² začíná stanovením středních hodnot jednotlivých nezávislých proměnných, tedy modul pružnosti v tahu prvků saní. Dále je nutné sestavit spektrum plánu měření, což znamená, že se určí kombinace úrovní jednotlivých faktorů, v našem případě kombinace mezi reálnou hodnotou modulu pružnosti v tahu nebo 200-násobkem této hodnoty. Potom můžeme přejít k realizaci

¹Reálný odhad modulu pružnosti v tahu je zde myšleno jako převzatá hodnota z norem nebo z měření.

²Úplný algoritmus je možné najít v [2] s.165-B, a v [5]

dílčích měření (výpočtů).

Abychom mohli provést dílčí výpočty, je nutné sestavit spektrum plánu měření pro určení kombinací faktorů. V teorii plánovaného měření se používá přístup tzv. úplného nebo více-faktoriálního experimentu. V případě neplánovaného měření se používá přístup jedno-faktoriálního experimentu. Pro oba přístupy je nutné sestavit spektrum plánu měření. Volba přístupu ovlivňuje podobu spektra plánu měření a také počet realizovaných dílčích výpočtů. V případě jedno-faktoriálního experimentu je N dílčích výpočtů v našem případě roven n nezávislých parametrů vstupujících do citlivostní analýzy (jednotlivé prvky saní) tedy $N = 15$. V případě více-faktoriálního experimentu je počet dílčích výpočtů roven $N = 2^n$, v našem případě $N = 2^{15} = 32\,768$. Je tedy vidět, že počet vstupujících parametrů zásadně ovlivňuje časovou náročnost výpočtu. Jelikož nejsme schopni predikovat, který z patnácti prvků saní má větší nebo menší vliv na deformaci saní, provedeme nejprve jedno-faktoriální experiment, který nám vytvoří představu o možné míře vlivu jednotlivých prvků, které následně použijeme pro více-faktoriální experiment. Tím snížíme časovou náročnost výpočtu.

Jedno-faktoriální experiment

Jeho podstata spočívá v tom, že se postupně každý z faktorů spektra plánu měření pro jeden výpočet mění na dvou úrovních (+1) a (-1), přičemž ostatní zůstávají na své určité konstantní úrovni [2]. V našem případě úroveň (+1) reprezentuje 200-násobek modulu pružnosti v tahu a hodnota (-1) reprezentuje reálný odhad modulu pružnosti v tahu. Spektrum plánu měření pro jedno-faktoriální experiment je zobrazeno v tabulce 5.5, kde řádky spektra reprezentují dílčí výpočty a sloupce reprezentují nastavení hodnot modulů pružnosti pro jednotlivé prvky saní. Sledovaným parametrem bude posuv daného bodu na sestavě saní a vřeteníku pro každý dílčí výpočet.

Aplikace regresní analýzy pro jedno-faktoriálním experimentu

Abychom určili vliv prvků saní při jedno-faktoriálním experimentu bude zapotřebí stanovit koeficienty regresní funkce dle vztahu 5.5. Regresní funkci při lineární re-

+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1

Tab. 5.5: Spektrum plánu měření pro jedno-faktoriální experiment s $n = 15$ zkoumanými prvky

gresní analýze lze zapsat v maticovém tvaru takto [2] [9]:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_i \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2j} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{im} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nj} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_i \\ \vdots \\ \beta_m \end{bmatrix}$$

a vektorově:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{XB} \tag{5.6}$$

kde: Y - je sloupcový vektor závislých proměnných (posuvy daného bodu)

X - je matice nezávislých proměnných (modul pružnosti v tahu jednotlivých prvků)

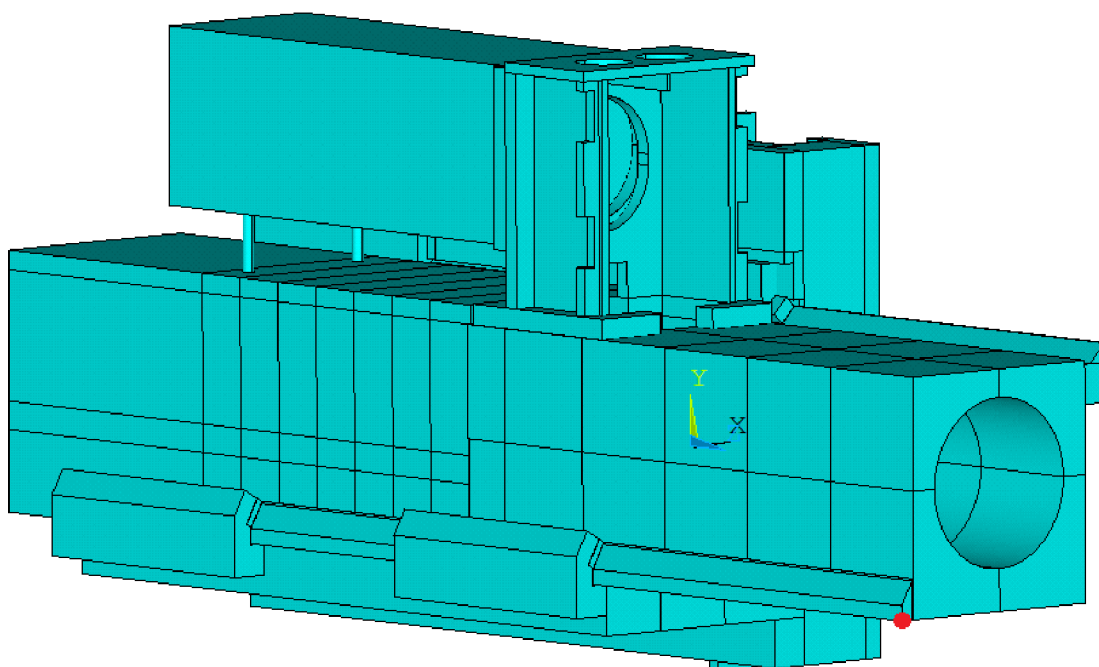
β - je sloupcový vektor regresních koeficientů

Při aplikaci spektra plánu měření z tab. 5.5 a materiálových charakteristik z tab. 5.1 dostaneme nastavení modulů pružnosti pro jednotlivé prvky saní pro každý dílčí výpočet. Potom se provede sekvence dílčích výpočtů, kde výstupem jsou posuvy

sledovaného bodu, který je zobrazen na obr. 5.18 červeným bodem. Pro získání regresních koeficientů, které charakterizují svojí hodnotou míru vlivu, je třeba vyřešit následující soustavu rovnic odvozenou ze vztahu 5.6

$$\mathbf{B} = \mathbf{X}^{-1}\mathbf{Y} \quad (5.7)$$

a to tak, že za sloupcový vektor Y dosadíme posuvy sledovaného bodu a za matici X dosadíme spektrum plánu měření. Řešením soustavy rovnic 5.7 dostaneme regresní koeficienty pro jedno-faktoriální experiment. Hodnota regresního koeficientu udává míru vlivu daného prvku saní. Výsledek je interpretován v tabulce 5.6 a lze jej považovat za citlivostní analýzu bez plánování měření. Výsledky z tabulky 5.6 nám



Obr. 5.18: Sledovaný bod pro jedno-faktoriální experiment

poslouží k výběru menšího množství vstupních parametrů pro plánované měření. Je vidět, že největší vliv mají kluzné vodorovné plochy a hned za nimi jsou žebra v zadní části saní apod., dle hodnoty koeficientů. Nejprve vybereme prvních sedm prvků s největším vlivem s malou změnou a to, že místo materiálu Turcite na kluzných lištách v horní části saní vybereme materiál Turcite na vymešovacích klínech. Je to z důvodu, že se jedná o jedno-faktoriální výpočet, který nezahrnuje souvislosti mezi vybranými prvky. Protože mezi prvních sedm prvků s největším vlivem jsou i přítlačné lišty, tak vliv materiálu Turcite na kluzných lištách zahrneme spolu s vlivem přítlačných lišt. Naopak vliv klínů můžeme zahrnout pouze ponecháním materiálu

Turcite na klínech v seznamu zkoumaných prvků. Vybranými prvky pro další vstup do více-faktoriálního experimentu jsou:

- Materiál Turcite na vymežovacích klínech
- Kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na vodorovném vedení
- Kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na svislém vedení
- Kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na svislém vedení stojanu bližšího k čelu vřeteníku
- Přítlačné lišty v horní části saní, jako vedení vřeteníku na saních
- Žebrování saní v zadní části saní
- Žebrování saní ve spodní části saní

Prvek saní	Ve směru X	Ve směru Y	Ve směru Z
Materiál Turcite na kluzných lištách v dolní části saní	0.00346	0.01263	0.00201
Materiál Turcite na kluzných lištách v horní části saní	0.00581	0.02667	0.00227
Materiál Turcite na kluzných lištách, vymezení pohybu ve směru osy X	0.00348	0.01282	0.00204
Materiál Turcite na vmezovacích klínech	0.00341	0.01526	0.00238
Materiál Turcite na kluzných lištách, vymezení pohybu ve směru osy Z	0.00343	0.01323	0.00210
Kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na vodorovném vedení	0.00268	0.03636	0.00207
Kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na svislém vedení	0.01063	0.01703	0.00304
Kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na svislém vedení stojanu bližšího k čelu vřeteníku	0.00294	0.02540	0.00255
Kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na svislém vedení stojanu vzdálenějšího od čela vřeteníku	0.00408	0.01348	0.00271
Přítlačné lišty v dolní části saní, jako vedení vřeteníku na saních	0.00348	0.01292	0.00203
Přítlačné lišty v horní části saní, jako vedení vřeteníku na saních	0.00578	0.01933	0.00246
Přítlačné lišty v zadní části saní, pro vymezení pohybu ve směru osy X , jako vedení saní na stojanu blíže k čelu vřeteníku	0.00342	0.01378	0.00202
Přítlačné lišty v zadní části saní, pro vymezení pohybu ve směru osy X , jako vedení saní na stojanu vzdálenější od čela vřeteníku	0.00359	0.01296	0.00223
Žebrování saní v zadní části	0.00329	0.03225	0.00283
Žebrování saní ve spodní části	0.00345	0.01262	0.00202

Tab. 5.6: Míra citlivosti při jedno-faktoriálním experimentu

Více-faktoriální experiment se 7 zkoumanými prvky

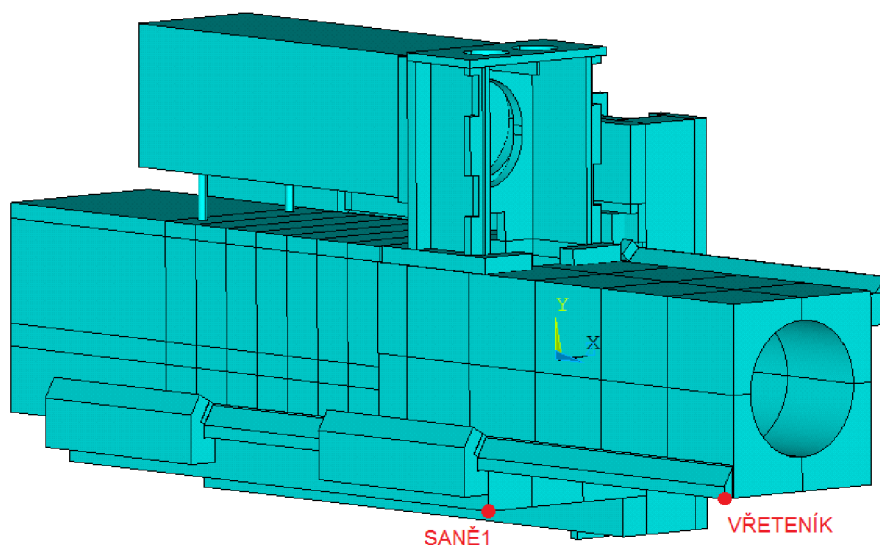
Pro tento plán měření je charakteristické, že spektrum plánu měření obsahuje všechny kombinace faktorů na dvou jejich úrovních, dolní (-1) a horní úrovni (+1). Tyto dvě úrovně postačují pro určení lineární závislosti mezi závislou proměnnou y a jednotlivými faktory [2]. Postup je v podstatě stejný jako u jedno-faktoriálního experimentu, liší se pouze maticí spektra plánu měření. Pro $n = 7$ zkoumaných prvků saní bude spektrum obsahovat $N = 2^n = 2^7 = 128$ dílčích výpočtů. Část spektra plánu měření pro více-faktoriální experiment s $n = 7$ zkoumanými prvky je zobrazena v tab. 5.7. Systém vytváření spektra plánu měření, který jsme schopni vidět v tab. 5.7 se do-
držuje pro každý sloupec. Při aplikaci spektra plánu měření z tab. 5.7 a materiálo-

$$\begin{array}{c} \left| \begin{array}{cccccc} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right. \end{array}$$

Tab. 5.7: Ukázka spektra plánu měření pro více-faktoriální experiment s $n = 7$ zkoumanými prvky

vých charakteristik z tab. 5.1 dostaneme nastavení modulů pružnosti pro jednotlivé

prvky saní pro každý dílčí výpočet. Potom se provede sekvence dílčích výpočtů, kde výstupem jsou posuvy dvou sledovaných bodů viz obr. 5.19 červeným bodem. Pro získání regresních koeficientů, které charakterizují svojí hodnotou míru vlivu, je třeba vyřešit soustavu rovnic viz 5.7. Postup je obdobný jako u jedno-faktoriálního experimentu viz str. 71. Výsledky jsou zobrazeny v tab. 5.8.



Obr. 5.19: Sledované body pro více-faktoriální experiment s $n = 7$ zkoumanými prvky

Výsledky nám ukázaly, že prvky s materiálem Turcite nemají výrazný vliv. Dále je vidět, že kluzné plochy z materiálu GS Super Fluid ovlivňují nejméně tuhost při tomto výběru prvků. Žebra jasně dominují. Mají opět značný vliv. Provedeme ještě jeden experiment. Nově odebereme materiál Turcite a rozšíříme experiment tak, že zahrneme všechny kluzné plochy s materiálem GS Super Fluid, všechny přítláčné lišty a obě žebrování saní. Přítláčné lišty i žebrování saní jsou konstrukční prvky, které se dají s malými obtížemi měnit, proto je upřednostníme a zahrneme je všechny. Kluzné plochy uvedeme proto, že je vidět z předchozích experimentů, že mají také vliv na tuhost, proto prozkoumáme vliv všech kluzných ploch s materiálem GS Super Fluid. Kluzné plochy s materiálem Turcite budou ve své podstatě zahrnuty v posouzení přítláčných lišt.

Prvek saní	VŘETENÍK			SANĚ1		
	Ve směru X	Ve směru Y	Ve směru Z	Ve směru X	Ve směru Y	Ve směru Z
Materiál Turcite na vymešovacích klínech	-0.00009	0.00041	0.00008	0.00001	0.00019	0.00012
Kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na vodorovném vedení	0.00196	0.00025	0.00032	0.00001	0.00007	-0.00004
Kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na svislém vedení	0.00196	0.00025	0.00032	0.00001	0.00007	-0.00004
Kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na svislém vedení stojanu blíže k čelu vřeteníku	0.00025	0.00111	0.00006	-0.00017	0.00092	0.00008
Přítlačné lišty v horní části saní, jako vedení vřeteníku na saních	0.00031	0.00252	0.00013	-0.00021	0.00159	0.00017
Žebrování saní v zadní části	0.00061	0.00889	0.00049	-0.00013	0.00600	0.00067
Žebrování saní ve spodní části	-0.00101	0.00880	0.00023	-0.00014	0.00602	0.00070

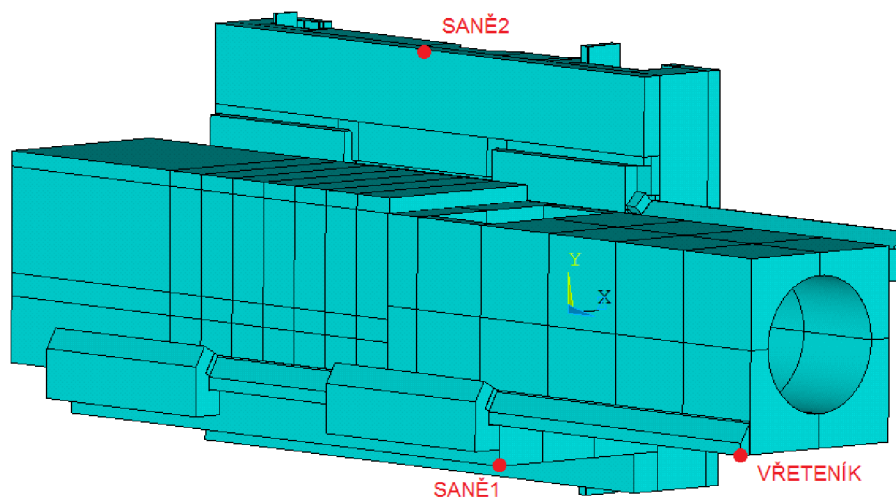
Tab. 5.8: Míra citlivosti při více-faktoriálním experimentu s $n = 7$ zkoumanými prvky

Více-faktoriální experiment se 10 zkoumanými prvky

Na základě výsledku uvedených v tab. 5.8 jsme sestavili novou matici zkoumaných prvků popsanych na str. 75. Jsou jimi:

- Kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na vodorovném vedení
- Kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na svislém vedení
- Kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na svislém vedení stojanu blížšího k čelu vřeteníku
- Kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na svislém vedení stojanu vzdálenějšího od čela vřeteníku
- Přítlačné lišty v dolní části saní
- Přítlačné lišty v horní části saní
- Přítlačné lišty v zadní části saní, pro vymezení pohyby ve směru osy X, blíže k čelu vřeteníku
- Přítlačné lišty v zadní části saní, pro vymezení pohyby ve směru osy X, vzdálenější od čela vřeteníku
- Žebrování saní v zadní části
- Žebrování saní ve spodní části

Postup se opět opakuje jako při více-faktoriálním experimentu se 7 zkoumanými prvky. Liší se pouze maticí spektra plánu měření. Pro $n = 10$ zkoumaných prvků saní bude spektrum obsahovat $N = 2^n = 2^{10} = 1024$ dílčích výpočtů. Část spektra plánu měření pro více-faktoriální experiment s $n = 10$ zkoumanými prvky je zobrazena v tab. 5.9. Systém vytváření spektra plánu měření, který jsme schopni vidět v tab. 5.9 se dodržuje pro každý sloupec. Při aplikaci spektra plánu měření z



Obr. 5.20: Sledované body pro více-faktoriální experiment s $n = 10$ zkoumanými prvky

-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
-1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1
-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1
-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tab. 5.9: Ukázka spektra plánu měření pro více-faktoriální experiment s $n = 10$ zkoumanými prvky

tab. 5.9 a materiálových charakteristik z tab. 5.1 dostaneme nastavení modulů pružnosti pro jednotlivé prvky saní pro každý dílčí výpočet. Potom se provede sekvence dílčích výpočtů, kde výstupem jsou posuvy tří sledovaných bodů viz obr. 5.20 červeným bodem. Pro získání regresních koeficientů, které charakterizují svojí hodnotou míru vlivu, je třeba vyřešit soustavu rovnic viz 5.7. Postup je obdobný jako u jedno-faktoriálního experimentu viz str. 71. Výsledky jsou zobrazeny v tab. 5.10.

Prvek saní	VŘETENÍK			SANĚ1			SANĚ2		
	Ve směru X	Ve směru Y	Ve směru Z	Ve směru X	Ve směru Y	Ve směru Z	Ve směru X	Ve směru Y	Ve směru Z
Kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na vodorovném vedení	0.000028	0.010947	0.000293	-0.000623	0.003523	0.000000	0.000015	-0.000025	-0.000070
Kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na svislém vedení	0.003653	0.002004	0.000693	-0.000000	0.001437	0.000064	0.000454	0.000226	-0.000071
Kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na svislém vedení stojanu blíže k čelu vřeteníku	0.000408	0.003896	0.000316	-0.000439	0.002562	0.000412	0.001523	0.000448	-0.000274
Kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na svislém vedení stojanu vzdálenějšího od čela vřeteníku	0.000420	0.000376	0.000268	0.000018	0.000398	0.000299	0.000374	0.000174	-0.000044
Přítlačné lišty v dolní části saní, jako vedení vřeteníku na saních	0.000321	0.000361	0.000076	-0.000082	0.000315	0.000097	0.000117	0.000042	-0.000019

Tab. 5.10: Míra citlivosti při více-faktoriálním experimentu s $n = 10$ zkoumanými prvky

Prvek saní	VŘETENÍK			SANĚ1			SANĚ2		
	Ve směru X	Ve směru Y	Ve směru Z	Ve směru X	Ve směru Y	Ve směru Z	Ve směru X	Ve směru Y	Ve směru Z
Přítlačné lišty v horní části saní, jako vedení vřeteníku na saních	0.000010	-0.009363	-0.000238	0.000529	-0.002951	0.000029	0.000153	0.000085	0.000029
Přítlačné lišty v zadní části saní, pro vymezení pohybu ve směru osy X , blíže k čelu vřeteníku	-0.003169	-0.001535	-0.000588	-0.000016	-0.001119	-0.000026	-0.000195	-0.000127	0.000024
Přítlačné lišty v zadní části saní, pro vymezení pohybu ve směru osy X , vzdálenější od čela vřeteníku	-0.000215	-0.003157	-0.000232	0.000373	-0.002051	-0.000324	-0.001160	-0.000327	0.000201
Žebrování saní v zadní části	-0.000053	0.006154	0.000147	0.000011	0.004483	0.000261	0.004045	0.003211	-0.000867
Žebrování saní ve spodní části	0.000017	0.006171	0.000324	0.000106	0.004566	0.000452	0.004287	0.003335	-0.000891

Pokračování tab. 5.10 - Míra citlivosti při více-faktoriálním experimentu s $n = 10$ zkoumanými prvky

6 PREZENTACE A ANALÝZA VÝSLEDKŮ

V kapitole 5 je popsán postup stanovení vlivu vybraných prvků saní na tuhost saní. Výsledky z více-faktoriálního experimentu s 10 prvky budeme považovat jako konečný výsledek. V tab.6.1 jsou uvedeny výsledky prvků saní ve vybraných směrech. Směry jsou voleny s ohledem na problémovou situaci viz odst.1.2 a odst.1.3 a volbu zatížení viz obr.5.11. V tab.5 je také uvedeno číselné pořadí pod hodnotami regresních koeficientů, přičemž 1. značí největší vliv, 10. nejmenší vliv atd. V každém směru jsou pak tučně vyznačeny první čtyři prvky s významným vlivem.

Prvek saní ¹	VŘETENÍK		SANĚ1		SANĚ2
	Ve směru <i>X</i>	Ve směru <i>Y</i>	Ve směru <i>X</i>	Ve směru <i>Y</i>	Ve směru <i>X</i>
GS Super Fluid, na vodorovném vedení	0.000028 8.	0.010947 1.	-0.000623 1.	0.003523 3.	0.000015 10.
GS Super Fluid, na svislém vedení	0.003653 1.	0.002004 8.	-0.000000 10.	0.001437 7.	0.000454 5.
GS Super Fluid, na svislém vedení stojanu blíže	0.000408 4.	0.003896 5.	-0.000439 3.	0.002562 5.	0.001523 3.
GS Super Fluid, na svislém vedení stojanu vzdáleněji	0.000420 3.	0.000376 6.	0.000018 8.	0.000398 9.	0.000374 6.
Přítlačné lišty dole	0.000321 5.	0.000361 10.	-0.000082 6.	0.000315 10.	0.000117 9.
Přítlačné lišty nahoře	0.000010 10.	-0.009363 4.	0.000529 2.	-0.002951 4.	0.000153 8.
Přítlačné lišty vzadu, směr X blíže	-0.003169 2.	-0.001535 9.	-0.000016 7.	-0.001119 8.	-0.000195 7.
Přítlačné lišty vzadu, směr X, vzdáleněji	-0.000215 6.	-0.003157 7.	0.000373 4.	-0.002051 6.	-0.001160 4.
Žebra vzadu	-0.000053 7.	0.006154 3.	0.000011 9.	0.004483 2.	0.004045 2.
Žebra vespod	0.000017 9.	0.006171 2.	0.000106 5.	0.004566 1.	0.004287 1.

Tab. 6.1: Míra citlivosti 10 zkoumaných prvků na tuhost saní (výběr)

¹Názvy prvků jsou zkráceny kvůli úspoře místa. Jejich plné znění je v tab.5.10

6.1 Analýza zkoumaných prvků saní a návrhy zlepšení

6.1.1 Kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na vodorovném vedení

Tato plocha jasně dominuje svým vlivem na deformaci bodu na konci vřeteníku. Je vidět, že hodnota regresního koeficientu pro bod VŘETENÍK ve směru Y je největší ze všech ostatních koeficientů. Tím lze tvrdit, že zvětšením modulu pružnosti v tahu (v tom případě v tlaku) o dva řády, by vedlo k výraznému zlepšení. Tento fakt není úplně realizovatelný, neboť většina kluzných materiálů pro tyto účely je z oblasti plastů. Více o zlepšení kluzné plochy je psáno v odst. 7.3. Tato kluzná plocha také značně ovlivňuje posuvy bodu SANĚ1 (viz obr. 5.20). V tomto bodě ve směru X můžeme najít v tab. 6.1 zápornou hodnotu regresního koeficientu. To znamená, že pro zlepšení posuvů ve směru X bodu SANĚ1 by bylo vhodné, aby tato kluzná plocha byla poddajnější. Nebo jinak řečeno, pro zlepšení posuvů v tomto bodě a směru tato kluzná plocha nepřispívá svou tuhostí.

Jako možné zlepšení, kromě volby jiného materiálu, může být i změna tloušťky materiálu. Zmenšením tloušťky této plochy se sníží absolutní hodnoty deformací této plochy.

6.1.2 Kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na svislém vedení

U této plochy je dominantní vliv pro posuvy bodu VŘETENÍK ve směru X. Tento fakt vychází i z logického uvažování. Vřeteník při zatížení dle obr. 5.11 se velkou měrou opírá do této plochy. Jak tomu bylo u kluzné plochy vodorovné pro směr Y, je tomu zde stejně pro směr X. V ostatních bodech a směrech se tato plocha neprojevuje výrazným vlivem.

Možné zlepšení je stejné jako u kluzné plochy popsané výše (viz odst. 6.1.2).

6.1.3 Kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na svislém vedení stojanu bližšího k čelu vřeteníku

Vliv této plochy není dominantní, avšak je vidět, že dle pořadí se pohybuje od 3. až 5. místa. Zaměřit se na ní je vhodné z toho důvodu, že má vliv na posuvy všech zkoumaných bodů a i téměř ve všech směrech. Zvýšením její tuhosti přispějeme komplexněji k deformaci saní a vřeteníku. Pouze v případě bodu SANĚ1 ve směru

X tato plocha zvýšením svojí tuhosti nepřispívá ke zmenšení deformací saní. Možné zlepšení je stejné jako u kluzné plochy popsané výše (viz odst. 6.1.2).

6.1.4 Kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na svislém vedení stojanu vzdálenějšího od čela vřeteníku

V případě této plochy můžeme konstatovat, že nemá podstatný vliv. Pouze v jednom případě a to u bodu VŘETENÍK ve směru X zvýšením svojí tuhosti přispívá ke snížení posuvů v tomto bodě. V ostatních měřených bodech a směrech její vliv je podprůměrný. Hodnota regresních koeficientů je kladná, takže komplexně přispívá ke zlepšení deformací sestavy, ale pouze průměrným vlivem.

Možné zlepšení je stejné jako u kluzné plochy popsané výše (viz odst. 6.1.2).

6.1.5 Přítlačné lišty v dolní části saní, jako vedení vřeteníku na saních

Tyto přítlačné lišty mají z hlediska konstrukce a funkčnosti velký význam. Z hlediska snižování deformací sestavy tomu tak není. Pořadí vlivu se pohybuje mezi 5. až 10. místě. V průměru mají velmi nízký vliv na deformaci saní a vřeteníku.

Jejich změnou tvaru se nepřispěje výrazně k tuhosti sestavy, ale není otestováno, zda zmenšením tvaru, průřezových charakteristik, se deformace zhorší, nebo zůstane stejná. Pokud by zůstala stejná, je možné zmenšit jejich tvar, tím snížíme hmotnost a přispějeme pozitivně k ekonomickému hledisku stroje a výroby.

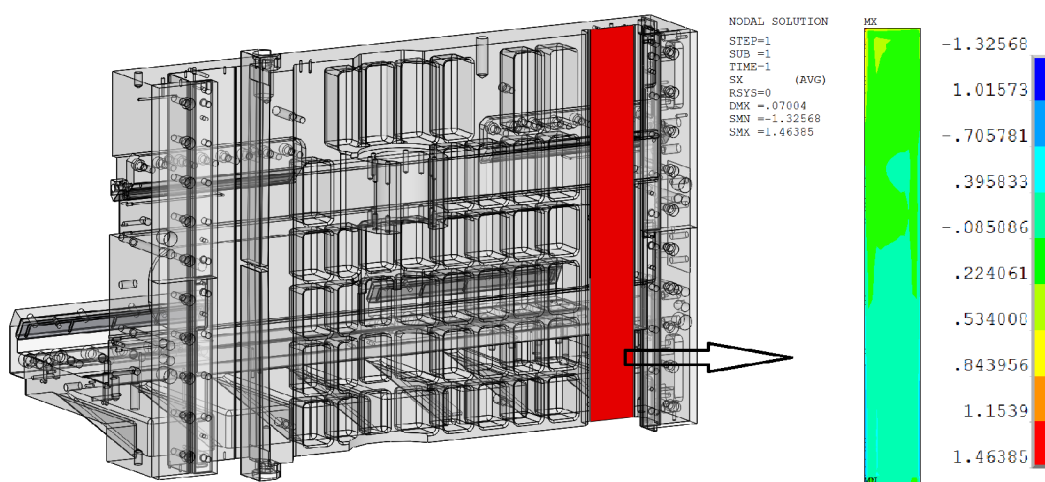
6.1.6 Přítlačné lišty v horní části saní, jako vedení vřeteníku na saních

U těchto přítlačných lišt dochází k jistému, na první pohled, nelogickému vlivu. V tab. 6.1 vidíme, že u bodů VŘETENÍK a SANĚ1 ve směru Y jsou záporné hodnoty regresní koeficientů. To nám říká, že snížení posuvů v těchto dvou bodech ve směru Y nastane, jestliže se sníží tuhost těchto dvou dílů. Když se podíváme na vztah 3.5 můžeme si všimnout, že změnou délky u prutu se přispívá ke zvýšení celkové tuhosti. Je tedy fyzikálně možné zvyšovat tuhost odebíráním materiálu. V tomto případě se to jeví jako nelogické. Možné vysvětlení je, že pokud u těchto prvků snížíme tuhost, tak nastane takové ovlivnění ostatních prvků a celkově konstrukce saní, že některé deformace se mohou zvětšit, ale jiné zase výrazně zmenšit. Saně jsou topologicky složitá entita, proto predikovat takovéto chování logikou nebo citem nemusí být správné. V podstatě může nastat, že některé deformace se „přičtou“, ale jinde se výrazně „odečtou“.

Zajímavé je, že při posuvech bodu SANĚ1 ve směru X jsou tyto přítlačné lišty 2. v pořadí pro snížení posuvů. Jako zlepšení by mohla být změna konstrukce tak, aby průřezové charakteristiky ve svislém směru (v montované pozici, osa Y) měli menší hodnoty než současná konstrukce a ve vodorovném směru (v montované pozici, osa X) větší hodnoty, než současná konstrukce. Pokud by se takto zkonstruovaly tyto lišty, bylo by pravděpodobně přínosné, kdyby se montovali jako jedna lišta po celé délce saní (v současném stavu se montují jako dvě samostatné lišty). Toto řešení by mohlo pomoci i ke snížení posuvů bodu SANĚ2 ve směru X a tím v návaznosti na to i zmenšení posuvů bodu SANĚ1 ve směru Y. Ke snížení posuvů bodu SANĚ2 ve směru X by mohlo vést posunutí domečku ve svislé poloze směrem dolů.

6.1.7 Přítlačné lišty v zadní části saní, pro vymezení pohybu ve směru osy X, blíže k čelu vřeteníku

Výsledky citlivostní analýzy ukazují, že hodnoty regresních koeficientů jsou ve všech směrech záporné. Jak bylo popsáno výše, znamená to, že ke snížení deformace sestavy dojde, jestliže se sníží tuhost těchto lišt. V případě bodu VŘETENÍK ve směru X je tento vliv značný. V ostatních případech je vliv velice nízký. V jistém pohledu lze tvrdit, že tyto lišty na saních nemusí vůbec figurovat. Toto tvrzení by bylo ale unáhlené, kvůli velkému zjednodušení okrajových podmínek. Vazby u vedení saní a od stojanu jsou lineární a ve směru kolmém na plochu působí v obou směrech. Tedy jak při tlaku na tyto plochy tak i při tahu. Proto by bylo zapotřebí tomuto zjednodušení se věnovat více a zjistit, jestli právě hodnoty u těchto přítlačných lišt nejsou ovlivněny těmito vazbami. Na obr. 6.1 je zobrazeno rozložení napětí kolmého na plo-



Obr. 6.1: Rozložení napětí u kluzné plochy červeně zvýrazněné

chy vedení. Vidíme, že v horní části napětí přechází na tahová, tedy v tomto místě vzniká chyba vlivem zjednodušení. Při simulování otevřeného kontaktu v místě tahového napětí se může vliv těchto přítláčných lišt změnit, neboť tahové napětí ukazuje tendence kluzné plochy se „odlepovat“ od vedení stojanu ve směru X, kde právě tyto přítláčné lišty slouží zabránění „odlepování“ v tomto směru.

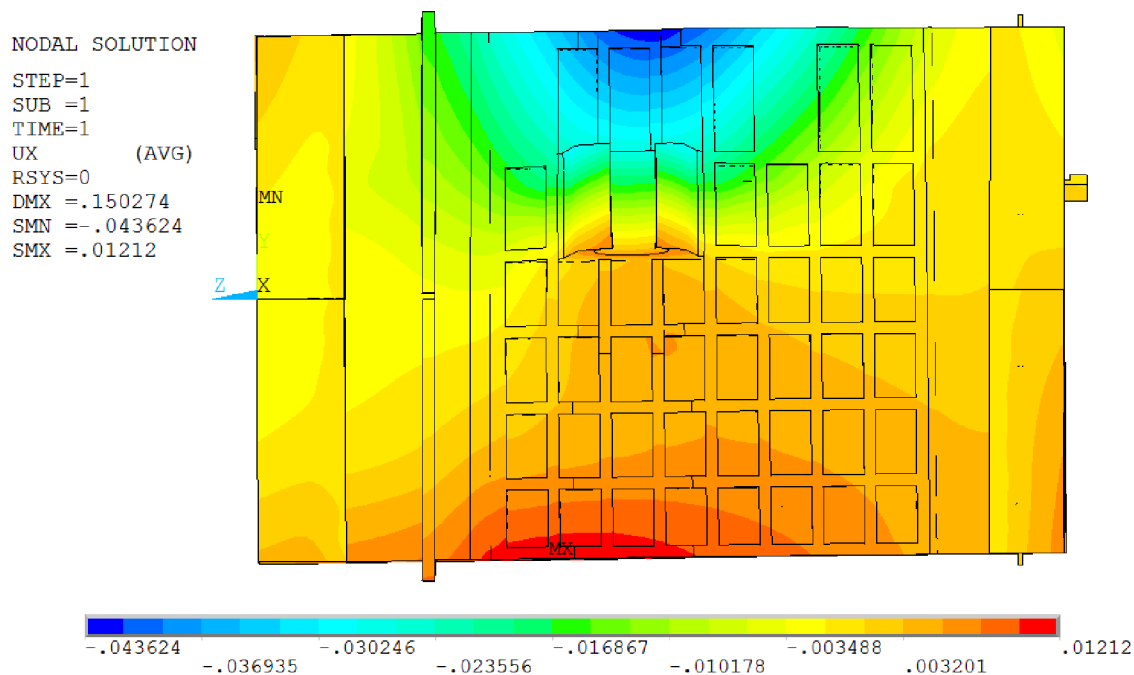
6.1.8 Přítláčné lišty v zadní části saní, pro vymezení pohybu ve směru osy X, vzdálenější od čela vřeteníku

Tyto přítláčné lišty jsou ohledně vlivu velmi podobné jako předchozí přítláčné lišty v zadní části. Výsledky ukazují, že hodnoty regresních koeficientů jsou záporné, kromě bodu SANĚ1 ve směru X. Zde mají tyto přítláčné lišty v pořadí 4. největší vliv. Tyto lišty slouží k vymezení vůlí ve směru X, tedy jejich funkčnost je zde z části opodstatněná.

6.1.9 Žebrování saní v zadní části

Žebrování je velmi důležitý prvek. Ovlivňuje celkovou tuhost sestavy a také její hmotnost. Jeho důležitost ukazuje i výsledek z citlivostní analýzy. Žebrování v zadní části saní má značný vliv na většinu zkoumaných posuvů. V případě bodu VŘETENÍK ve směru Y, při bodu SANĚ1 ve směru Y a při bodu SANĚ2 ve všech směrech je 2. v pořadí v míře citlivosti. Při bodu SANĚ1 ve směru Y dosahuje regresní koeficient vysoké hodnoty ze všech koeficientů.

Tvorba žeber obecně slouží ke zvýšení tuhosti zvětšením kvadratických momentů os, kolem kterých se prvek deformuje. Proto je důležité věnovat pozor poloze a tvaru žebra, aby se co nejvíce využil jeho materiál. Směr žeber by měl být shodný s gradientem posuvů. Na obrázku 6.2 vidíme pohled na zadní žebrování. Barevné zobrazení posuvů můžeme interpretovat jako vrstevnice. Jednotlivé rozhraní barev si představme jako jednu vrstevnici. Oblast s modrou barvou má záporný posuv a oblast s červenou barvou je kladný směr a je směrem k nám. Tedy modrou oblast lze chápat jako údolí a červenou oblast jako horu vystupující směrem k nám, neboť má kladné posuvy. Gradient na tomto obrázku bude vždy kolmý na vrstevnice. Z toho nám plyne, aby se co nejvíce využilo materiálu žeber a jejich kvadratických momentů, tak směr žeber by měl být kolmý na vrstevnice, nebo-li na přechody barevného spektra. Je jasné, že žebra se nebudou vytvářet jako obecná křivka. Možný tvar žeber je zobrazen na obr. 7.2.



Obr. 6.2: Deformace saní ve směru osy X

6.1.10 Žebrování saní ve spodní části

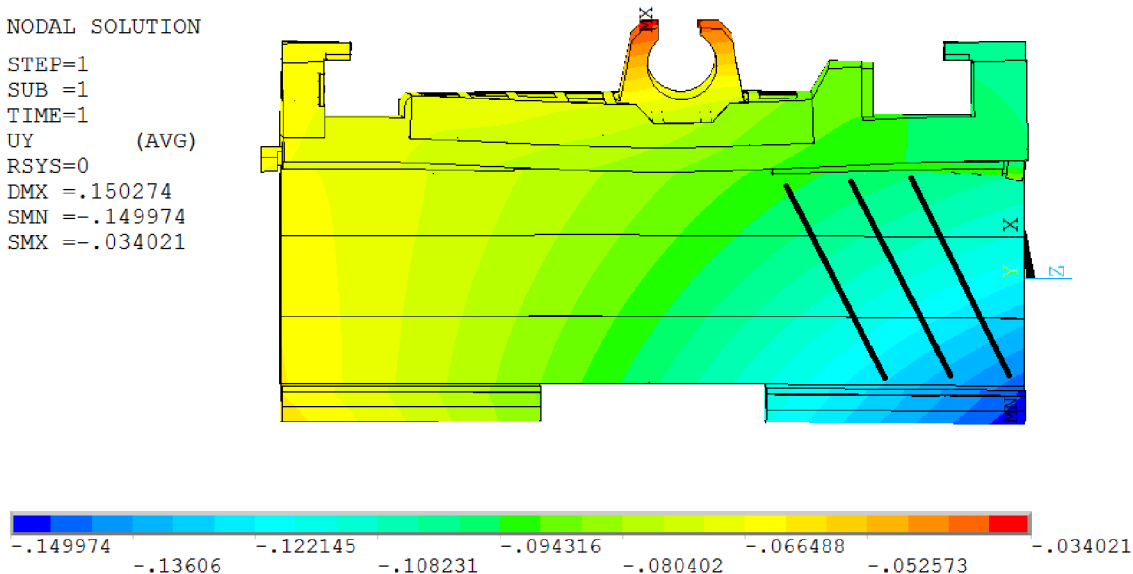
Žebrování ve spodní části saní je z pohledu geometrie saní prvek s největším vlivem. V bodě VŘETENÍK ve směru Y je v 2. pořadí a co do velikosti hodnoty regresního koeficientu velmi blízký hodnotě u žebrování v zadní část. Dále u bodu SANĚ1 ve směru Y dominantní vliv. Tedy pokud bychom chtěli skrze geometrii saní zlepšit posuvy ve svislém směru (směr Y), měli bychom věnovat pozornost právě žebrování, jak ve spodní části, tak i v zadní části saní.

Pro návrh zlepšení žebrování ve spodní části budeme vycházet ze stejného postupu jako u žebrování v zadní části. Žebra by měla mít směr gradientu. Na obr. 6.3 vidíme barevné zobrazení deformace ve svislém směru, osa Y. Rozhraní barev lze chápat jako vrstevnice. Cesta největšího spádu, tedy gradient, je přes kolmice na vrstevnice. Měli bychom žebra navrhnut tak, aby byla kolmá na vrstevnice. Oproti stávajícímu řešení, by měla být v šikmém směru a směřovat směrem k čelu vřeteníku. Na obr. 6.3 je tlustou černou čarou naznačen vhodný směr žebrování.

6.2 Statistické posouzení výsledných hodnot regresních koeficientů

Pro komplexní pohled vlivu jednotlivých prvků byl proveden výpočet základních statistických veličin regresních koeficientů. Pro každý prvek se vypočetl aritmetický

NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =1
 TIME=1
 UY (AVG)
 RSYS=0
 DMX =.150274
 SMN =-.149974
 SMX =-.034021



Obr. 6.3: Deformace saní ve směru osy X

průměr a směrodatná odchylna. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce 6.2 a jsou počítány z hodnot uvedených v tab. 5.10.

Aritmetický průměr

Hodnota aritmetického průměru nám říká celkovou sílu vlivu na deformaci celé sestavy. Popisuje vliv komplexně na všechny měřené body a směry, přes všechny prvky. U kluzné plochy, materiál GS Super Fluid, na vodorovném vedení vidíme, že nemá největší hodnotu síly vlivu, i když z citlivostní analýzy pro bod VŘETENÍK ve směru Y má největší hodnotu vlivu ze všech ostatních. Jako největší sílu vlivu mají obě žebrování. To se pojí s poznatkem, že obecně geometrie saní, má největší dopad na deformace, což je v souladu s logickým uvažováním. Zajímavým výsledkem síly vlivu je u přítlačných lišt v horní části saní. Jsou hned 4. v pořadí, ale se záporným regresním koeficientem.

Směrodatná odchylna

Popisuje proměnlivost vlivu. Jestliže směrodatná odchylna je větší než aritmetický průměr, tak síla vlivu toho prvku není stabilní pro celou sestavu, nýbrž pouze u některých směrech měřených bodů. Naopak čím menší je směrodatná odchylna od aritmetického průměru, tím je stabilnější vliv na deformaci celé sestavy, to znamená, že změna takového prvku ovlivní posuvy velmi podobnou měrou u všech měřených

²Názvy prvků jsou zkráceny kvůli úspoře místa. Jejich plné znění je v tab. 5.10

Prvek saní ²	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka
GS Super Fluid, na vodorovném vedení	0.001565 3.	0.003719
GS Super Fluid, na svislém vedení	0.000940 6.	0.001236
GS Super Fluid, na svislém vedení stojanu blíže	0.000984 5.	0.001426
GS Super Fluid, na svislém vedení stojanu vzdáleněji	0.000254 9.	0.000170
Přítlačné lišty dole	0.000136 10.	0.000159
Přítlačné lišty nahoře	-0.001302 4.	0.003192
Přítlačné lišty vzadu, směr X blíže	-0.000750 8.	0.001060
Přítlačné lišty vzadu, směr X, vzdáleněji	-0.000766 7.	0.001158
Žebra vzadu	0.001932 2.	0.002546
Žebra vespod	0.002041 1.	0.002551

Tab. 6.2: Statistické hodnoty regresních koeficientů

bodů a směrů. Příkladem jsou třeba přítlačné lišty v dolní části saní. Zde je směrodatná odchylka menší, než aritmetický průměr. Bohužel jejich síla vlivu je velice malá. U všech ostatních prvků je proměnlivost vlivu na posuvy u měřených bodů a směrů značná. Z toho nám plyne, že nelze obecně říci, že jedním parametrem ovlivní tuhost celé sestavy. Je nutné podrobné zkoumání měřených bodů a směrů.

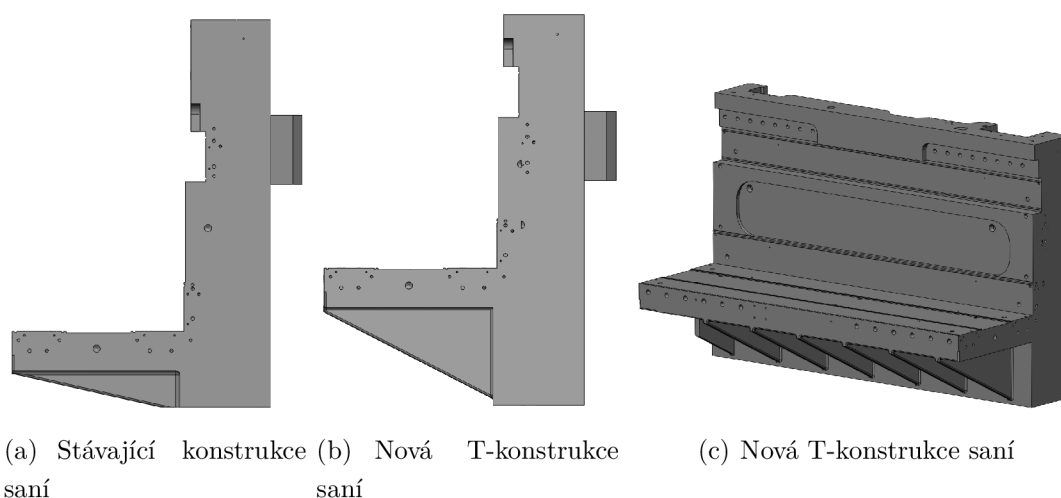
Je nutné zmínit, že citlivostní analýza nám poskytne možnost zahrnout společné vlivy. Například, kdybychom zvětšili tuhost u třech prvků najednou a zkoumali odezvu, tak citlivostní analýza toto zahrnuje díky spektru plánu měření viz tab. 5.9, kde se uplatňují všechny možné kombinace zvýšení tuhosti jednotlivých prvků. Proto se můžeme zaměřit na absolutní čísla regresních koeficientů a volit zlepšení podle jejich hodnoty. Výběr zlepšení a jejich hodnocení je popsán v následující kapitole.

7 IDEOVÉ NÁVRHY ZLEPŠENÍ

Na základě poznatků vlivu zkoumaných prvků saní, popsanych v kapitole 6, byly vyhotoveny tři ideové návrhy zlepšení deformace saní, případně vřeteníku. Tyto ideové návrhy budou zhodnoceny dle konstrukčního, technologického a ekonomického hodnocení metodou PATTERN.

7.1 T-konstrukce saní

Bylo ukázáno, že na deformaci jak saní a následně i vřeteníku má značný vliv žebrování. Tento fakt považuji za reprezentaci konstrukce saní jako tavové, neboť vliv žeber se projevuje ve třech z pěti směrů viz tab. 6.1. Dále i s použitím technického citu, se jeví jako výrazné zlepšení tuhosti zvětšení žeber ve spodní části saní. Tyto poznatky vedou k návrhu T-konstrukce. Nový možný design saní je zobrazen na obr. 7.1. Cílem je zvětšení spodních žeber, které by měli zlepšit celkovou tuhost.



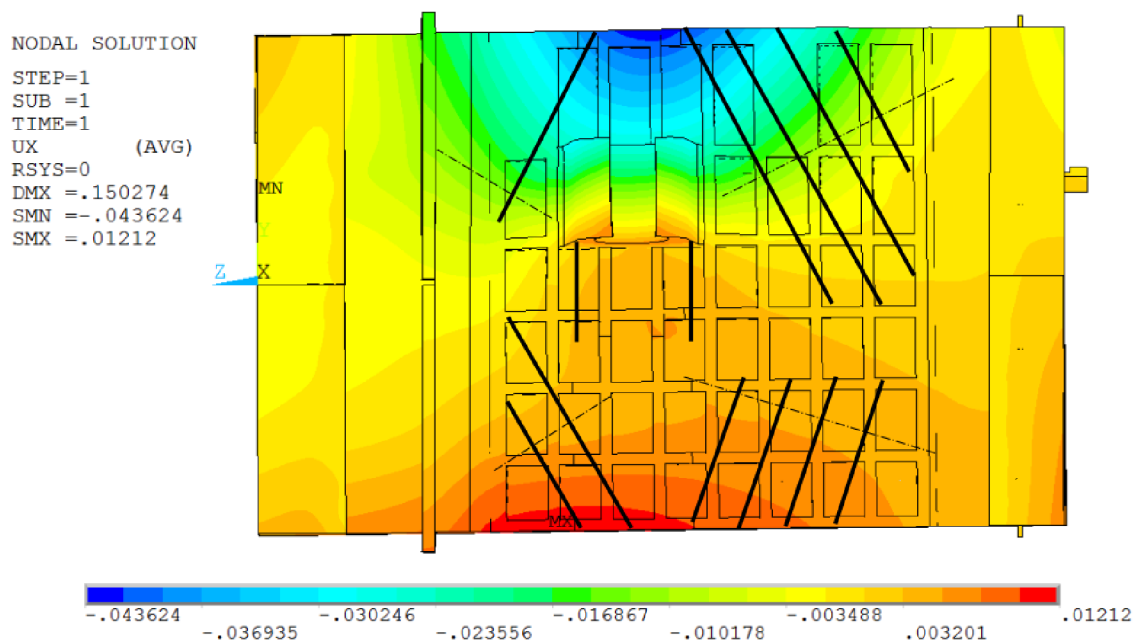
Obr. 7.1: Nová T-konstrukce saní a srovnání se stávající

7.2 Změna žebrování saní

Žebrování se ukazuje jako velmi zásadní prvek ovlivňující celkovou tuhost saní. Jeho změnou bychom měli být schopni zlepšit výrazně deformace hned ve třech souvislostech viz tab. 6.1 - směr Y u vřeteníku, směr Y u saní bod 1, a směr X u saní bod 2.

Změny které by vedli ke zlepšení se budou týkat tvaru a designu rozmístění žeber.

Materiálem zůstává šedá litina. Abychom konstrukčně zlepšili tuhost žeber, musíme se zaměřit na kvadratické průřezy ve směrech deformace saní. Na obr. 7.2 vidíme posuvy ve směru osy X, tedy otvírání saní, a naznačení možných směrů žeber (tlustě černě). barevné zobrazení ukazuje hodnoty posuvů. Snahou je, aby směry žeber byly shodné s gradienty posuvů. Jinak řečeno ve směru, kde dochází k nejrychleji rostoucím posuvům v závislosti polohy. Tím využijeme nejvíce potenciálu kvadratických průřezů žeber. Celkově by koncepce žeber měly být taková, aby se vytvářeli trojú-



Obr. 7.2: Naznačení konstrukce žeber dle gradientů posuvů X

helníkové kapsy. Případně zajímavá může být jistá modifikace včelího plástu, využít šestiúhelníkových tvarů, s jistými modifikacemi. V přírodě je této struktury hojně využíváno.

7.3 Materiál pro kluzné plochy

Materiálem používaným pro kluzné plochy je v současném stavu GS Super Fluid. V případě kluzné plochy na vodorovném vedení viz obr. 5.15(a) bylo spočítáno, že se jedná o prvek s největším vlivem, ze všech ostatních prvků saní na deformaci čela vřeteníku (viz tab. 6.1). Proto třetí ideový návrh se bude týkat volby kluzného materiálu.

GS Super Fluid se využívá kvůli svým třecím vlastnostem, pevnosti v tlaku, vysokou adhezí k povrchu, samonivelační funkcí a lze jej strojově obrábět. Je tedy

důležité, aby náhrada za tento materiál měla tyto vlastnosti také, nebo podobné. V zásadě se bude stále jednat o materiály na bázi epoxidů, obecně plastů. Jako příklad zde uvádím materiál s obchodním označením *DIAMANT Moglice* [15]. V datasheetu[16] k tomuto materiálu výrobce uvádí modul pružnosti dle DIN 53457 od 9 100 MPa až po 10 400 MPa (záleží na typu materiálu moglice). Z uvedených parametrů výrobce se tedy jedná o výrazně lepší hodnoty, až dvojnásobné, než v současné době využívaného materiálu GS Super Fluid.

Obecně možná cesta zvýšením tuhosti kluzného materiálu může být přimíchání kovového prášku, nebo vláken z moderních materiálů (skelná vlákna, uhlíková), apodobných materiálů do samonivelační hmoty. To ale může způsobit horší obrobiteľnosť.

7.4 Zhodnocení ideových návrhů metodou PATTERN

V problematice obráběcích strojů se často využívá při výběru optimální varianty multikriteriální metoda PATTERN (Planning Assistance Through Technical evaluation of Relevance Numbers). PATTERN Metoda vychází z metody SAW (Simple Additive weighting). Metoda poskytuje výběr optimální varianty na základě komplexního porovnání vybraných parametrů řešeného objektu. Ideové návrhy popsané v této kapitole budou srovnávány z technického hlediska, z ekonomického hlediska a z technicko-ekonomického hlediska [7] [8].

Algoritmus metody PATTERN:

- výběr porovnávacích parametrů
- definování váhy významnosti vybraných parametrů
- stanovení váhy významnosti vybraných parametrů
- výpočet indexů změn vybraných parametrů pro srovnávané prvky
- stanovení pořadí srovnávaných prvků

7.4.1 Technické hledisko

Výběr porovnávacích parametrů

Definovat porovnávací parametry je zcela závislé na zkušenostech a názoru hodnotitele. V tab. 7.1 uvádíme vybrané porovnávací parametry pro technické hledisko. Metoda PATTERN také umožňuje zahrnout tendenci změn každého parametru. Znamená to, že pro každý vybraný parametr lze definovat, za jakých podmínek bude

výsledek pro uživatele výhodnější. Například pro parametr ceny stroje, je předpoklad, že při srovnání bude výhodnější ten stroj, který má nižší cenu [7] [8]. Tendence změn pro každý parametr je v tab. 7.1 uvedena v posledním sloupci.

P1	technologická pracnost výroby	-	klesající
P2	časová náročnost výroby	-	klesající
P3	deformace vřeteníku	-	klesající
P4	časová náročnost vývoje	-	klesající

Tab. 7.1: Porovnávací parametry pro technické hledisko s tendencí změny

Párové porovnání parametrů

V párovém porovnání parametrů se porovnávají všechny parametry mezi sebou. Hodnotitel posoudí, který parametr má větší význam a to tak, že z řádku vybraný parametr srovnáváme postupně s jednotlivými parametry v každém sloupci. Ze dvou porovnávaných parametrů se vybere právě ten, který je z daného hlediska důležitější. Potom se provede součet jednotlivých parametrů v celé trojúhelníkové matici, tzn. kolikrát se daný parametr vyskytuje v matici [7] [8].

Párové porovnání parametrů s výsledným pořadím pro technické hledisko je uvedeno v tab. 7.2.

Párové porovnání parametrů z technického hlediska						
Parametr	P1	P2	P3	P4	Σ	Pořadí
P1	P1	P1	P3	P1	3	2.
P2		P2	P3	P4	2	3.
P3			P3	P3	4	1.
P4				P4	1	4.

Tab. 7.2: Párové porovnání parametrů pro technické hledisko

Stanovení váhy významnosti vybraných parametrů

V tomto kroku se nejprve číselně stanoví, jak dva parametry mají k sobě blízko a to tak, že:

1. blízko
2. středně
3. daleko

Postup výběru parametrů k porovnání je obdobný jako u párového porovnání. Z řádku vybraný parametr srovnáváme postupně s jednotlivými parametry v každém sloupci. Toto porovnání je v tab. 7.3. Sloupec $\Sigma (BHV_i)$ je součtem všech číselných

Kvantifikovaná porovnávací matice (váhy parametrů) - technické hledisko						
Parametr	P3	P1	P2	P4	$\Sigma (BHV_i)$	Pořadí (q_i)
P3	1	3	2	1	7	0,47
P1		1	1	2	4	0,27
P2			1	2	3	0,20
P4				1	1	0,07
SOUČET					15	1

Tab. 7.3: Stanovení váhy významnosti porovnávaných parametrů pro technické hledisko

hodnocení v jednotlivém řádku. Stanovení váhy významnosti se určuje dle vztahu [7]:

$$q_j = \frac{BHV_j}{\sum_{j=1}^m BHV_j} \quad (7.1)$$

kde: BHV_j - je bodová hodnota významnosti pro každý parametr
 j - j-tý parametr
 m - celkový počet parametrů

Sloupec Váha (q_i) udává hodnoty váhové významnosti pro každý parametr dle vztahu 7.1.

Výpočet indexů změn vybraných parametrů pro srovnávané prvky

Index změny je nutné stanovit pro konečné stanovení pořadí srovnávaných prvků. Index změny se stanovuje samostatně pro parametry s klesající a rostoucí tendencí.

Výpočet indexů změn pro parametry s klesající tendencí:

$$I_{jx} = \frac{H_{j,MAX}}{H_{jx}} \quad (7.2)$$

Výpočet indexů změn pro parametry s rostoucí tendencí:

$$I_{jx} = \frac{H_{jx}}{H_{j,MIN}} \quad (7.3)$$

kde: H_{jx} - je číselné hodnocení volené hodnotitelem, v tab. 7.4 zobrazeno v oranžové kolonce. Jeho hodnota se volí dle:

1 - velmi nízká, 2 - nízká, 3 - střední, 4 - vysoká

5 - velmi vysoká

s ohledem parametru na daný návrh.

$H_{j,MAX}$ - je největší hodnota H_{jx} v daném řádku parametru v oranžové kolonce v tab. 7.4

$H_{j,MIN}$ - je nejmenší hodnota H_{jx} v daném řádku parametru v oranžové kolonce v tab. 7.4

Výpočet vážených indexů I_{jxV} , vstupujících do stanovení pořadí srovnávaných prvků dle vztahu 7.4 a hodnoty jsou zobrazeny v zelené kolonce v tab. 7.4:

$$I_{jxV} = I_{jx} \cdot q_j \quad (7.4)$$

kde: q_j - je váhy významnosti dle vztahu. 7.1

Stanovení pořadí

Konečné pořadí se stanoví součtem všech vážených indexů I_{jxV} pro danou variantu, tedy v jednom sloupci, dle vztahu:

$$S_j = \sum_{j=1}^k I_{jxV} \quad (7.5)$$

Stanovení pořadí srovnávaných ideových návrhů z technického hlediska								
Parametr	Jednotka	Váha	T-konstrukce		Žebrování		Kluzné plochy	
P1	[-]	0,27	3	0,36	3	0,36	4	0,27
			1,33		1,33			
P2	[-]	0,20	2	0,50	2	0,50	5	0,20
			2,50		2,50			
P3	[mm]	0,47	3	0,62	4	0,47	4	0,47
			1,33		1,00			
P4	[-]	0,07	4	0,08	5	0,07	3	0,11
			1,25		1,00			
Celkem S _j		1	1,56		1,39		1,04	
Pořadí z technického hlediska			1.		2.		3.	

Tab. 7.4: Stanovení pořadí srovnávaných ideových návrhů z technického hlediska

7.4.2 Ekonomické hledisko

Postup uvedený pro hodnocení dle technického hlediska se aplikuje i pro hodnocení ekonomického hlediska. V tab. 7.5 uvádíme parametry pro ekonomické hledisko. Tendence změn pro každý parametr je v tab. 7.5 uvedena v posledním sloupci.

P1	cena	-	klesající
P2	časová náročnost změny	-	klesající
P3	náklady spojené se změnou	-	klesající

Tab. 7.5: Porovnávací parametry pro ekonomické hledisko s tendencí změny

Párové porovnání parametrů z ekonomického hlediska					
Parametr	P1	P2	P3	Σ	Pořadí
P1	P1	P1	P1	3	1.
P2		P2	P2	2	2.
P3			P3	1	3.

Tab. 7.6: Párové porovnání parametrů pro ekonomické hledisko

Kvantifikovaná porov. matice (váhy) - ekonomické hledisko					
Parametr	P1	P2	P3	$\Sigma (BHV_i)$	Pořadí (q_i)
P1	1	3	2	6	0,55
P2		1	3	4	0,36
P3			1	1	0,09
SOUČET				11	1

Tab. 7.7: Stanovení váhy významnosti porovnávaných parametrů pro ekonomické hledisko

Stanovení pořadí srovnávaných ideových návrhů z ekonomického hlediska								
Parametr	Jednotka	Váha	T-konstrukce		Žebrování		Kluzné plochy	
P1	[Kč]	0,55	4	0,55	3	0,73	2	1,09
			1,00		1,33		2,00	
P2	[-]	0,36	4	0,45	5	0,36	5	0,36
			1,25		1,00		1,00	
P3	[Kč]	0,09	2	0,18	3	0,12	4	0,09
			2,00		1,33		1,00	
Celkem Sj		1	1,18		1,21		1,55	
Pořadí z ekonomického hlediska			3.		2.		1.	

Tab. 7.8: Stanovení pořadí srovnávaných ideových návrhů z ekonomického hlediska

7.4.3 Technicko-ekonomické hledisko

V tomto odstavci zahrneme všechny parametry k hodnocení a vyhodnotíme optimální návrh komplexně. V tab. 7.9 uvádíme parametry pro technicko-ekonomické hledisko. Tendence změn pro každý parametr je v tab. 7.9 uvedena v posledním sloupci. Postup uvedený pro hodnocení dle technického hlediska se aplikuje i pro hodnocení technicko-ekonomické hledisko.

P1	technologická pracnost výroby	-	klesající
P2	časová náročnost výroby	-	klesající
P3	deformace vřeteníku	-	klesající
P4	časová náročnost vývoje	-	klesající
P5	cena	-	rostoucí
P6	časová náročnost změny	-	klesající
P7	náklady spojené se změnou	-	klesající

Tab. 7.9: Porovnávací parametry pro technicko-ekonomické hledisko s tendencí změny

Párové porovnání parametrů z technicko-ekonomického hlediska									
Parametr	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	Σ	Pořadí
P1	P1	P1	P3	P1	P5	P6	P7	3	5.
P2		P2	P3	P4	P5	P6	P7	1	7.
P3			P3	P3	P3	P3	P3	7	1.
P4				P4	P5	P6	P7	2	6.
P5					P5	P5	P5	6	2.
P6						P6	P6	5	3.
P7							P7	4	4.

Tab. 7.10: Párové porovnání parametrů pro technicko-ekonomické hledisko

Kvantifikovaná porovnávací matice (váhy parametrů) - technicko-ekonomické hledisko									
Parametr	P3	P5	P6	P7	P1	P4	P2	Σ (BHV _i)	Pořadí (q _i)
P3	1	3	2	2	3	1	2	14	0,29
P5		1	3	2	1	2	1	10	0,20
P6			1	3	2	1	2	9	0,18
P7				1	2	1	3	7	0,14
P1					1	2	2	5	0,10
P4						1	2	3	0,06
P2							1	1	0,02
SOUČET								49	1,00

Tab. 7.11: Stanovení váhy významnosti porovnávaných parametrů pro technicko-ekonomické hledisko

Stanovení pořadí srovnávaných ideových návrhů z technicko-ekonomického hlediska								
Parametr	Jednotka	Váha	T-konstrukce		Žebrování		Kluzné plochy	
P1	[-]	0,10	3	0,14	3	0,14	4	0,10
			1,33		1,33		1,00	
P2	[-]	0,02	2	0,05	2	0,05	5	0,02
			2,50		2,50		1,00	
P3	[mm]	0,29	3	0,38	4	0,29	4	0,29
			1,33		1,00		1,00	
P4	[-]	0,06	4	0,08	5	0,06	3	0,10
			1,25		1,00		1,67	
P5	[Kč]	0,20	4	0,20	3	0,27	2	0,41
			1,00		1,33		2,00	
P6	[-]	0,18	4	0,23	5	0,18	5	0,18
			1,25		1,00		1,00	
P7	[Kč]	0,14	2	0,29	3	0,19	4	0,14
			2,00		1,33		1,00	
Celkem Sj		1	1,36		1,18		1,24	
Pořadí z technického hlediska			3.		1.		2.	

Tab. 7.12: Stanovení pořadí srovnávaných ideových návrhů z technicko-ekonomického hlediska

7.4.4 Určení optimálního návrhu zlepšení deformace saní a vřeteníku

Tři ideové návrhy byly metodou PATTERN hodnoceny z technického hlediska, ekonomického hlediska a technicko-ekonomického hlediska. Optimální variantu určíme součtem pořadí v jednotlivých hlediskách viz tab. 7.13.

Hledisko	T-konstrukce	Žebrování	Kluzné plochy
Technické	1	2	3
Ekonomické	3	2	1
Technicko-ekonomické	3	1	2
Součet	7	5	6
Pořadí	3.	1.	2.

Tab. 7.13: Určení optimálního návrhu

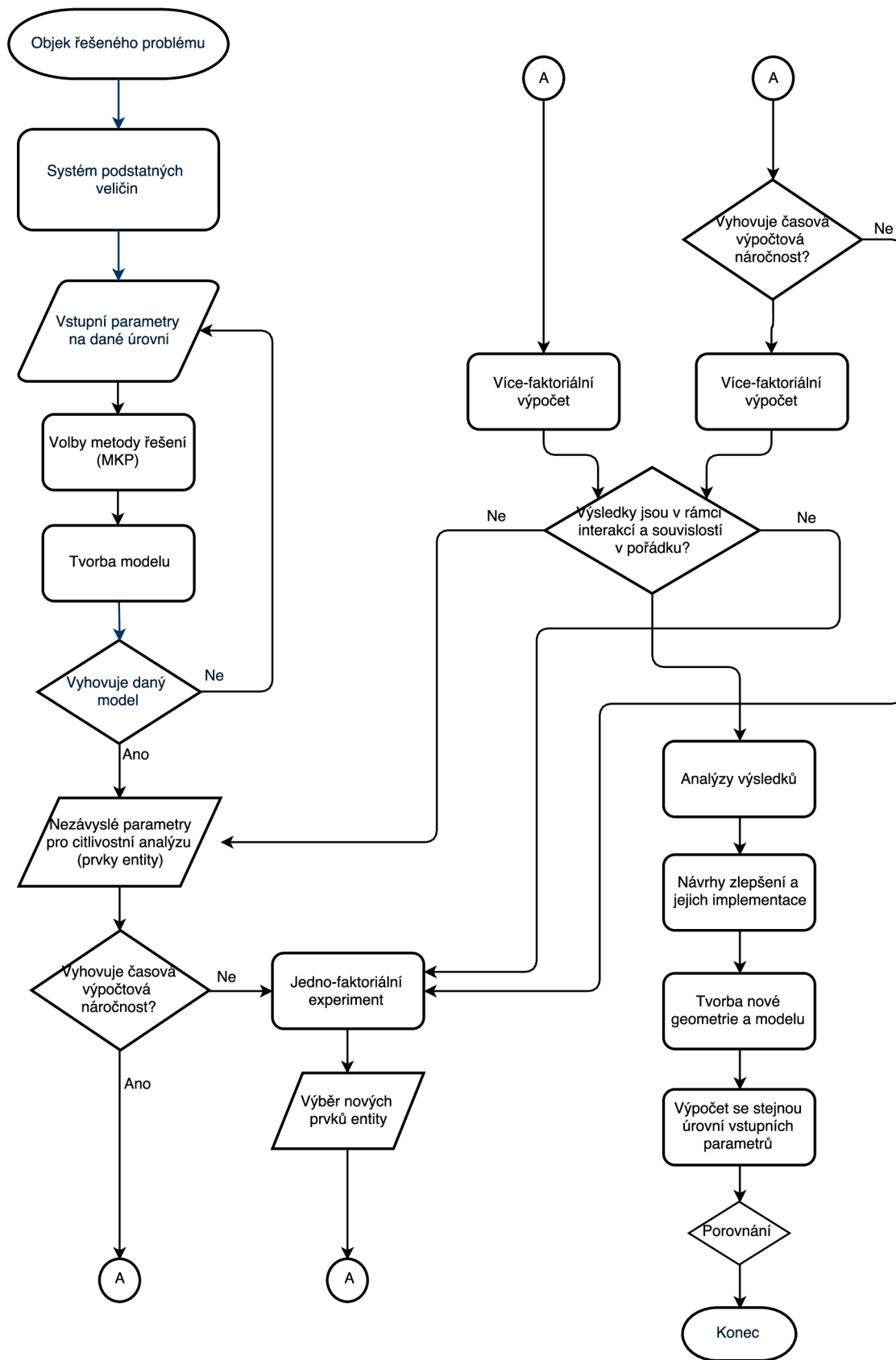
Výslednou optimální variantou pro zlepšení je *změna žebrování saní*.

8 STANOVENÍ METODIKY PRO JINÉ TYPY STROJŮ

Obecně nezle jednoduše přenášet výsledky jedné práce na druhý problém. V našem případě se jedná o výsledky citlivostní analýzy pro stroj *WFT 13 CNC R* a použít je pro jiný typ stroje není možné, protože každý stroj má jisté úpravy, jinou kinematiku, nebo se jedná koncepčně o úplně jiný stroj.

Abychom mohli řešit náš problém, bylo nutné zvolit cestu pomocí abstraktního modelování. Se zavedením několika zjednodušení jsme vytvořili model pro výpočtové modelování a následně data z dílčích výpočtů použili pro citlivostní analýzu. Tvorba modelu se bude pro každý stroj lišit, kvůli zmíněným odlišnostem. Systémový přístup použitý pro definování vstupních parametrů a jejich úrovně je nadoborový systém, tudíž je možné pomocí něj sestavit vstupy do výpočtu i pro jiný stroj. Model pak musí odpovídat použitým vstupům a zahrnout jejich úroveň. Postup u dílčích výpočtů a citlivostní analýzy bude stejný i pro další stroje.

Lze tedy říci, že je to právě ten postup tvorby výpočtového modelu, který se bude odlišovat u jiného stroje. Za metodiku pro jiné typy strojů, lze tedy považovat celý postup obsažený v této práci. Schématicky je postup zobrazen na vývojovém diagramu viz obr. 8.1.



Obr. 8.1: Vývojový diagram postupu

9 ZÁVĚR

Výsledkem práce je stanovení míry vlivu vybraných prvků na deformaci saní. Mezi zkoumané prvky byly vybrány kluzné plochy z materiálu GS Super Fluid, přítlačné lišty a žebrování saní. Vliv jednotlivých prvků byl pro dané zatížení a úroveň modelu vyhodnocen pomocí citlivostní analýzy s využitím plánovaného měření v regresní analýze.

Ze získaných výsledků z citlivostní analýzy byly vybrány tři prvky s největším vlivem a to kluzné plochy s materiálem GS Super Fluid na vodorovném vedení, dále žebrování saní v zadní části a celkově vliv konstrukce saní (nový návrh je T-konstrukce viz odst. 7.1). U těchto prvků se navrhla možná úprava vedoucí ke zlepšení deformací saní a následně se vybrala optimální varianta metodou PATTERN na základě technicko-ekonomického hlediska. Optimální variantou pro zlepšení deformací saní při daném zatížení je úprava zadního žebrování saní. Algoritmus řešení v této diplomové práci tvoří metodiku pro řešení obdobného problému u jiných typů strojů.

Jako pokračování v práci se nabízí vytvoření nového modelu na základě poznatků z citlivostní analýzy a výběru optimální varianty. Poté na základě výpočtů porovnat charakter deformace nové konstrukce se stávajícím řešením. Tyto kroky by měli proběhnout v úzké spolupráci s firmou Fermat.

Cíle práce byly splněny částečně, neboť v zadání práce je požadována také pevnostní optimalizace, která nebyla provedena. Toto vědomé nesplnění jednoho z cílů práce je odůvodněno tím, že při řešení této práce jasně vyplynulo, že podstatnější hledisko pro optimalizaci saní je hledisko deformační. Vyplyvá to i z problémové situace, kde firma Fermat na základě výsledků z měření kruhové interpolace pracuje na zvětšení tuhosti saní. Dalším důvodem je, že pevnostní analýzu je v našem případě nutné posuzovat z pohledu mezního stavu únavové pevnosti, pro který je nutná vyšší úroveň modelu a podrobné zkoumání zatížení. Pevnostní optimalizace svým rozsahem je sama o sobě tématem pro další diplomovou práci. Z problémové situace jasně plyne, že primární cíl je zlepšení deformací, tedy analýza tuhosti. Proto je řešení této práce věnováno hlavně zlepšení tuhosti.

Tvorbou této diplomové práce byly získány neocenitelné znalosti a zkušenosti při propojení mechaniky těles a statistiky a také při řešení problému pomocí systémového přístupu. Především se podařilo osvojit si problematiku citlivostních analýz a práci se softwarovým prostředím ANSYS APDL, což je pro kariéru výpočtového analytika velmi přínosné.

LITERATURA

- [1] MAREK, Jiří a kol. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, 2014, 684 s. ISBN 978-80-260-6780-1
- [2] JANÍČEK, Přemysl. *Systémová metodologie: brána do řešení problémů*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014. ISBN 978-80-7204-887-8.
- [3] ČERNOCH, Svatopluk. *Strojně technická příručka*. 12. přepr. vyd. Praha: SNTL, 1968. Řada strojírenské literatury.
- [4] KOČMAN, Karel. *Technologie obrábění*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0.
- [5] PÁZMAN, Andrej. *Riešené situácie z navrhovania experimentov*. Bratislava: Alfa, 1986. Edícia matematicko-fyzikálnej literatúry.
- [6] PETRUŠKA, Jindřich. *MKP v inženýrských výpočtech* [online]. Copyright © 2016 ÚMTMB, Brno. [cit. 04/2016]. Dostupné z URL: <<http://www.umt.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/RIV/MKP2011.pdf>>.
- [7] MERENUS, Ondřej. *Multifunkční obráběcí centrum pro rotační i nerotační obrobky* [online]. Brno, 2014 [cit. 05/2016]. Dostupné z URL: <https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?zp_id=72580>. Diplomová práce. VUT FSI BRNO. Vedoucí práce prof. Ing. Jiří Marek, Dr.
- [8] SKLENÁŘ, Jaroslav. *Náhrada velkého průměrového ložiska uložení desky stolu u svislého soustruhu* [online]. Brno, 2011 [cit. 05/2016]. Dostupné z URL: <https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?zp_id=33939>. Diplomová práce. VUT FSI BRNO. Vedoucí práce prof. Ing. Jiří MAREK, Dr.
- [9] MATHWORKS. *Linear Regression* [online]. Copyright © 1994-2016 The MathWorks, Inc., United States. [cit. 05/2016]. Dostupné z URL: <http://www.mathworks.com/help/matlab/data_analysis/linear-regression.html>.
- [10] ANSYS, Inc. *ANSYS Mechanical APDL Meshing User's Guide*. Release 15.0. Canonsburg, 2013. Dostupné z URL: <<http://www.ansys.com>>.
- [11] ANSYS, Inc. *ANSYS Mechanical APDL Element Reference*. Release 15.0. Canonsburg, 2013. Dostupné z URL: <<http://www.ansys.com>>.
- [12] ANSYS, Inc. *ANSYS Mechanical APDL Basic Analysis Guide*. Release 15.0. Canonsburg, 2013. Dostupné z URL: <<http://www.ansys.com>>.

- [13] Fermat s.r.o. Brno. *STOLOVÁ HORIZONTÁLNÍ VYVRTÁVAČKA - WFT 13 R CNC* [online]. Copyright © 2010 FERMAT Group, a.s. [cit. 04/2016]. Dostupné z URL: <<http://www.fermatmachinery.com/wft-13-r-cnc-w>>.
- [14] Dawex Chemical s.r.o. *Kluzné hmoty - GS Super Fluid (TLH 11) - technický list* [online]. Zlín, [cit. 04/2016]. Dostupné z URL: <<http://www.dawex.cz/userFiles/technicke-listy/kluzne-hmoty/gs-super-fluid.pdf>>.
- [15] *Devitt Machinery Company: Moglice Forms Micron-Exact ...* [online]. Aston, Pennsylvania, Copyright © 2016 [cit. 05/2016]. Dostupné z URL: <<http://www.moglice.com/moglice.html>>.
- [16] *Moglice diamant: Material data sheet* [online]. Aston, Pennsylvania, Copyright © 2016 [cit. 05/2016]. Dostupné z URL: <<http://www.moglice.com/assets/01-td-moglice-gb.pdf>>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

BHV_j	Bodová hodnota významnosti [-]
E	Modul pružnosti v tahu [MPa]
F	Působící síla [N]
F_{ekv}	Ekvivalentní síla [N]
F_c	Řezná síla [N]
I_{jx}	Index zmeny pro parametr [-]
k	Tuhost [$\frac{N}{m}$]
l	Délka prutu [mm]
$N(x)$	Tahová síla ve směru osi X [N]
o	Objemové zatížení [$\frac{N}{m^3}$]
p	Plošné zatížení [$\frac{N}{m^2}$]
P	Potenciál vnějšího zatížení [J]
P_m	Výkon motoru [W]
S	Průřez [mm]
S_j	Stanovené pořadí pro parametr [mm]
$u(x)$	Prodloužení ve směru osy X [mm]
v_c	Řezná rychlost [$\frac{m}{min}$]
W	Energie napjatosti tělesa [J]
x	posunutí ve směru osy X [m]
X	Matice nezávislých proměnných
Y	Sloupcový vektor závislých proměnných
β	Regresní koeficienty [-]
ϵ	Přetvoření [-]
γ	Zkos [-]

Π Celková potenciální energie [J]
 σ Napětí [MPa]
AR Mesh Metrics - Aspect Ratio
CAD Computer Aided Design
EQ Mesh Metrics - Element Quality
KŠ Kuličkový pohybový šroub
MCA Mesh Metrics - Maximum Corner Angel
MKP Metoda konečných prvků

SEZNAM PŘÍLOH

A CD-ROM

109

A CD-ROM

- Měření mechanických veličin
- Výpočty beta koeficientů
- Elektronická verze diplomové práce
- PATTERN výpočet
- Výpočet ekvivalentního zatížení
- Makro pro vytvoření abstraktního modelu
- Makro pro citlivostní analýzu