

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Stavba výrobních strojů a zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh hlavního pohonu soustružnického vřeteníku

Autor: **Bc. Stanislav STRNAD**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Zdeněk HUDEC, CSc.**

Akademický rok 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Stanislav STRNAD**

Osobní číslo: **S17N0025K**

Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Stavba výrobních strojů a zařízení**

Název tématu: **Návrh hlavního pohonu soustružnického vřeteníku**

Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Základní požadavky:

Návrh hlavního pohonu a uložení soustružnického vřeteníku.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova diplomové práce:

1. Rešerše, analýza konkurenčních produktů
2. Specifikace požadavků
3. Vypracování konstrukčního návrhu
4. Vypracování technické dokumentace
5. Komplexní zhodnocení

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah kvalifikační práce: **50-70 stran A4**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

HOSNEDL, S., KRÁTKÝ, J *Příručka strojního inženýra 1.* . Brno: Computer Press, 1999

HOSNEDL, S., KRÁTKÝ, J *Příručka strojního inženýra 2.* Brno: Computer Press, 1999

Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Zdeněk Hudec, CSc.**

Katedra konstruování strojů

Konzultant diplomové práce:

Ing. Zdeněk Liška

ŠKODA MACHINE TOOL

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2019**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Václava Hašová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 16. října 2018

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Strnad	Jméno Stanislav	
STUDIJNÍ OBOR	N2301 „Stavba výrobních strojů a zařízení“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Hudec, CSc.	Jméno Zdeněk	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KKS		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Návrh hlavního pohonu soustružnického vřeteníku		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2019
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	157	TEXTOVÁ ČÁST	88	GRAFICKÁ ČÁST	69
---------------	-----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce obsahuje konstrukční návrh hlavního pohonu soustruhu S-MT od firmy ŠKODA MACHINE TOOL. V úvodu práce je nejprve stanoveno zatěžovací spektrum. S využitím programu KISSsys je proveden kontrolní výpočet typizované převodovky hlavního pohonu. V další části práce je za využití programu KISSsoft proveden konstrukční návrh finálního převodu a návrh vřetene soustruhu včetně jeho uložení. V závěru práce je navržena skříň vřeteníku, jejíž tuhost je ověřena pomocí MKP softwaru.
KLÍČOVÁ SLOVA	Soustruh S-MT, hlavní pohon soustruhu, zatěžovací spektrum, tepelně stabilní otáčky, tuhost vřetene, tuhost uložení, MKP vřeteníku soustruhu

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Strnad	Name Stanislav		
FIELD OF STUDY	N2301 „ Design of Manufacturing Machines and Equipment“			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Hudec, CSc.	Name Zdeněk		
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Design of a main drive for a turning spindle			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2019
----------------	---------------------------	-------------------	-------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	157	TEXT PART	88	GRAPHICAL PART	69
----------------	-----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>This diploma thesis contains the design of the main drive of the lathe S-MT from ŠKODA MACHINE TOOL. In the introduction of this work is determined the load spectrum first. By using the KISSsys is created a check calculation of the standardized gearbox of the main drive. In the next part of this thesis is done the design of the final transmission and the design of the lathe spindle with its bearing by using the KISSsoft. At the end of this thesis is designed headstock cabinet, which stiffness is verified by FEM software.</p>
KEY WORDS	<p>Lathe S-MT, main drive of lathe, load spectrum, thermally stable rotation speed, spindle stiffness, bearing stiffness, FEM of lathe headstock</p>

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat lidem, kteří mi byli v průběhu práce nápomocni. Děkuji především za ochotu, trpělivost, užitečné rady a cenné připomínky. Jmenovitě je to vedoucí práce Doc. Ing. Zdeněk Hudec, CSc. a konzultant Ing. Petr Bernardin, Ph.D.. Dále bych chtěl poděkovat společnosti ŠKODA MACHINE TOOL a.s. za poskytnuté téma diplomové práce.

Obsah

1	ÚVOD.....	7
1.1	TĚŽKÉ OBRÁBĚCÍ STROJE	7
1.2	HISTORIE FIRMY ŠKODA	8
2	MULTIFUNKČNÍ STROJ TYPU S-MT	10
2.1	VLASTNOSTI MULTIFUNKČNÍHO STROJE S-MT	11
2.2	POPIS HLAVNÍCH KONSTRUKČNÍCH SKUPIN STROJE S-MT.....	13
2.2.1	<i>Vřeteník</i>	<i>13</i>
2.2.2	<i>Upnutí obrobku.....</i>	<i>13</i>
2.2.3	<i>Upnutí nástrojů, výměna nástrojů a příslušenství</i>	<i>14</i>
2.2.4	<i>Krytování stroje, hygieničnost procesu, třískové hospodářství</i>	<i>16</i>
2.3	KINEMATICKÁ STRUKTURA.....	17
2.4	TECHNOLOGICKÉ OPERACE PROVÁDĚNÉ NA STROJI S-MT	18
2.4.1	<i>Metoda soustružení na stroji S-MT.....</i>	<i>18</i>
2.4.2	<i>Metoda frézování na stroji S-MT</i>	<i>18</i>
2.4.3	<i>Metoda broušení na stroji S-MT</i>	<i>20</i>
2.4.4	<i>Vrtání děr na stroji S-MT.....</i>	<i>21</i>
2.4.5	<i>Doplňující a průběžné operace na stroji S-MT</i>	<i>21</i>
2.5	CHARAKTERISTIKA SOUČÁSTÍ OBRÁBĚNÝCH NA STROJI S-MT	22
3	POROVNÁNÍ S KONKURENCÍ.....	25
3.1	HEINRICH GEORG GMBH MASCHINENFABRIK	25
3.1.1	<i>Porovnání S-MT se strojem GEORG ultraturn</i>	<i>25</i>
3.2	WALDRICH SIEGEN GMBH & CO. KG	27
3.2.1	<i>Porovnání S-MT se strojem ProfiTurn M.....</i>	<i>27</i>
3.3	WEINGÄRTNER MASCHIENENBAU GMBH	29
3.3.1	<i>Porovnání S-MT se strojem MPMC</i>	<i>29</i>
3.4	NILES-SIMMONS INDUSTRIEANLAGEN GMBH	31
3.4.1	<i>Porovnání S-MT se strojem N-MC.....</i>	<i>31</i>
3.5	WFL MILLTURN TECHNOLOGIES GMBH & CO. KG	33
3.5.1	<i>Porovnání S-MT se strojem M200.....</i>	<i>33</i>
4	NÁVRH PŘEVODOVKY HLAVNÍHO POHONU.....	35
4.1	VÝPOČET VÝSTUPNÍCH PARAMETRŮ NA HLAVNÍM VŘETENÍ	35
4.1.1	<i>Schéma dvoustupňové převodovky</i>	<i>36</i>
4.1.2	<i>Schéma třístupňové převodovky.....</i>	<i>37</i>
4.1.3	<i>Úplné schéma hlavního pohonu</i>	<i>37</i>
4.2	STANOVENÍ ZATĚŽOVACÍHO SPEKTRA	38
4.2.1	<i>Základní vstupní parametry zatěžovacího spektra</i>	<i>38</i>
	Spektrum řezné síly	38
	Spektrum zatížení od tíhy obrobku	39
	Axiální zatížení vřetene od předepnutí na koníku	40
4.2.2	<i>Výstupní hodnoty zatěžovacího spektra</i>	<i>41</i>
4.3	VÝPOČET PŘEVODOVKY.....	43

4.3.1	Návrh a kontrola ozubených kol	44
	Ozubené soukolí 1-2	44
	Ozubené soukolí 3-4	45
4.3.2	Návrh a kontrola hřídelí a uložení	46
4.3.3	Souhmotí hřídele 1 a hřídele 2	46
4.3.4	Souhmotí hřídele 3	48
	Návrh a kontrola spojení kola 2 s hřídelí 3	50
4.3.5	Hřídel 4	50
	Drážkování hřídele 4 a hřídele 5	51
	Kontrola drážkování hřídele 4 a hřídele 1	52
	Kontrola drážkování hřídele 4 a hřídele 2	54
4.3.6	Souhmotí hřídele 5	55
	Výpočet spojení hřídele 5 a pastorku výstupní hřídele	56
4.3.7	Skříň převodovky	57
5	NÁVRH FINÁLNÍHO PŘEVODU	58
6	NÁVRH VŘETENE A JEHO ULOŽENÍ	58
6.1	STANOVENÍ VARIANTY ULOŽENÍ VŘETENE	59
6.1.1	Varianta uložení vřetene 1	59
6.1.2	Varianta uložení vřetene 2	59
6.1.3	Volba vhodné varianty uložení vřetene	60
6.2	NÁVRH VŘETENE A LOŽISEK	60
6.2.1	Základní rozměry vřetene	60
6.2.2	Maximální reakce v ložiskách	62
6.2.3	Výběr ložisek	63
6.2.4	Zhodnocení variant	64
6.3	PŘEDEPNUTÍ AXIÁLNÍCH LOŽISEK	66
6.4	VÝPOČET TUHOSTI ULOŽENÍ VŘETENE	68
6.4.1	Posunutí v místě hrotu	69
6.4.2	Výpočet tuhosti ve směru osy x a osy y	69
6.5	VÝPOČET TEPELNĚ STABILNÍCH OTÁČEK	70
6.6	KONTROLA VŘETENE A PERIFERÍ	72
6.6.1	Kontrola uložení vřetene	72
6.6.2	Kontrola finálního převodu	73
6.6.3	Kontrola vřetene	73
6.7	NÁVRH SPOJENÍ KOLA FINÁLNÍHO PŘEVODU A VŘETENE	74
7	MKP ANALÝZA NAVRŽENÉHO VŘETENÍKU	74
7.1	MATERIÁLY	74
7.2	DISKRETIZACE MODELU VŘETENÍKU	75
7.3	DEFINOVÁNÍ KONTAKTU	76
7.4	OKRAJOVÉ PODMÍNKY	76
7.5	OPTIMALIZACE SKŘÍŇĚ VŘETENÍKU	78
7.5.1	Koncepční varianta skříně	78
7.5.2	Modifikovaná varianta skříně vřeteníku	78
7.6	POSOUZENÍ VŘETENÍKU Z HLEDISKA PEVNOSTI	81

7.7	POSOUZENÍ VŘETENÍKU Z HLEDISKA TUHOSTI.....	82
8	MODEL SESTAVY VŘETENÍKU	83
9	ZÁVĚR.....	85

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1:	KARUSELOVÝ SOUSTRUH Z ROKU 1912 [12].....	8
OBRÁZEK 2:	SOUSTRUŽENÍ KLIKOVÉ HŘÍDELE VE DVACÁTÝCH LETECH [12].....	9
OBRÁZEK 3:	SOUSTRUH SR-5 [12].....	9
OBRÁZEK 4:	HORIZONTKA HCW 3000 [12]	10
OBRÁZEK 5:	POROVNÁNÍ ČASOVÉ NÁROČNOSTI JEDNOTLIVÝCH OPERACÍ U KONVEČNÍHO STROJE A U STROJE S-MT [12].....	11
OBRÁZEK 6:	MULTIFUNKČNÍ STROJ TYPU S-MT [12]	12
OBRÁZEK 7:	SCHÉMA HLAVNÍCH KONSTRUKČNÍCH PRVKŮ STROJE [12].....	13
OBRÁZEK 8:	OPĚRA S TLAKOVÝM PŘÍVODEM OLEJE [16]	14
OBRÁZEK 9:	ZLEVA: OPĚRA POLOZAVŘENÁ, OPĚRA UZAVŘENÁ, PODVALEK [3]	14
OBRÁZEK 10:	ROBOTICKÁ VÝMĚNA NÁSTROJŮ RTC [12]	14
OBRÁZEK 11:	PROSTOR S VÝMĚNNÝMI HLAVAMI [12]	15
OBRÁZEK 12:	PALETA S VÝMĚNNÝMI HLAVAMI [12].....	15
OBRÁZEK 13:	PŘÍVOD ŘEZNÉ KAPALINY [16].....	16
OBRÁZEK 14:	KINEMATICKÉ SCHÉMA POHYBOVÝCH OS STROJE	17
OBRÁZEK 15:	VÍCEOSÁ HLAVA [12]	17
OBRÁZEK 16:	METODA SOUSTRUŽENÍ [12]	18
OBRÁZEK 17:	ROTAČNÍ FRÉZOVÁNÍ KLIKOVÉ HŘÍDELE [12].....	19
OBRÁZEK 18:	FRÉZOVÁNÍ STROMEČKOVÝCH DRÁŽEK [12]	19
OBRÁZEK 19:	BROUŠENÍ ROTORU TURBÍNY [16]	20
OBRÁZEK 20:	90° VRTACÍ HLAVA [16]	21
OBRÁZEK 21:	ODMĚŘOVÁNÍ DOTYKOVÝMI ČIDLY [12].....	21
OBRÁZEK 22:	KINEMATIKA ROTAČNÍHO FRÉZOVÁNÍ KLIKOVÉ HŘÍDELE [19]	22
OBRÁZEK 23:	ROTOR PARNÍ TURBÍNY [12].....	23
OBRÁZEK 24:	OBRÁBĚNÍ ROTORU TURBOALTERNÁTORU [12]	24
OBRÁZEK 25:	PASTORKOVÁ HŘÍDEL S PŘÍMÝM OZUBENÍM [21]	24
OBRÁZEK 26:	GEORG ULTRATURN MC ROK 2015 [22]	25
OBRÁZEK 27:	NĚKTERÉ DETAILS STROJE MC [16].....	25
OBRÁZEK 28:	GORG ULTRATURN MC – DOOSAN ŠKODA POWER [16]	26
OBRÁZEK 29:	ULTRATURN M JEDNOLOŽOVÉ PROVEDENÍ [23].....	27
OBRÁZEK 30:	ULTRATURN M DVOULOŽOVÉ PROVEDENÍ [23].....	28
OBRÁZEK 31:	MPMC FIRMY WEINGÄRTNER [25]	29
OBRÁZEK 32:	TECHNOLOGIE A MOŽNÉ PRODUKTY STROJE MPMC [25].....	30
OBRÁZEK 33:	OBRÁBĚCÍ CENTRUM N60MC [24]	31
OBRÁZEK 34:	PROSTOROVÉ USPOŘÁDÁNÍ SOUSTRUŽNICKO – FRÉZOVACÍ HLAVY VŮČI OBROBKU [24]	31
OBRÁZEK 35:	SCHÉMA OBRÁBĚCÍHO CENTRA N-MC [24].....	32
OBRÁZEK 36:	OBRÁBĚCÍ CENTRUM M200 FIRMY WFL [26].....	33
OBRÁZEK 37:	VYVRTÁVÁNÍ OTVORŮ [26]	33
OBRÁZEK 38:	SOUSTRUŽNICKO – FRÉZOVACÍ NEVÝMĚNNÁ HLAVA [26].....	34
OBRÁZEK 39:	SCHÉMA DVOUSTUPŇOVÉ PŘEVODOVKY.....	36

OBRÁZEK 40: SCHÉMA TŘÍSTUPŇOVÉ PŘEVODOVKY	37
OBRÁZEK 41: SCHÉMA HLAVNÍHO POHONU SOUSTRUŽNICKÉHO VŘETENÍKU (MASTER-SLAVE)	37
OBRÁZEK 42: SLOŽKY ŘEZNÉ SÍLY (PRO NORMÁLNÍ SOUSTRUŽENÍ) [2].....	39
OBRÁZEK 43: HROT NA STRANĚ VŘETENÍKU [2].....	40
OBRÁZEK 44: SCHÉMA ZATÍŽENÍ VŘETENE A OTOČNÉHO HROTU [2].....	41
OBRÁZEK 45: SCHÉMA HLAVNÍHO POHONU V PROGRAMU KISSSOFT	43
OBRÁZEK 46: SESTAVA SOUHMOTÍ HŘÍDELE 1 A HŘÍDELE 2	46
OBRÁZEK 47: SKLON A POSUNUTÍ HŘÍDELE 1 A HŘÍDELE 2 V ROVINĚ X-Z [P4]	47
OBRÁZEK 48: SESTAVA SOUHMOTÍ HŘÍDELE 3	48
OBRÁZEK 49: SKLON A POSUNUTÍ HŘÍDELE 3 V ROVINĚ X-Z [P4].....	49
OBRÁZEK 50: SESTAVA HŘÍDELE 4	51
OBRÁZEK 51: SESTAVA HŘÍDELE 5	55
OBRÁZEK 52: SKLON A POSUNUTÍ HŘÍDELE 5 V ROVINĚ X-Z [P4].....	56
OBRÁZEK 53: SESTAVA PŘEVODOVKY	57
OBRÁZEK 54: PODÉLNÝ ŘEZ PŘEVODOVKOU	57
OBRÁZEK 55: VARIANTA 1 – UMÍSTĚNÍ FINÁLNÍHO PŘEVODU PŘED HLAVNÍM LOŽISKEM [P9]	61
OBRÁZEK 56: VARIANTA 2 - UMÍSTĚNÍ FINÁLNÍHO PŘEVODU MEZI RADIÁLNÍMI LOŽISKY [P10].....	61
OBRÁZEK 57: DIAGRAM PŘEDEPJATÉHO SPOJE	67
OBRÁZEK 58: PRŮBĚH POSUNUTÍ V PŘÍPADĚ ZATĚŽOVACÍHO STAVU 3 [P11]	68
OBRÁZEK 59: PROUD OLEJE DLE TŘECÍHO ZTRÁTOVÉHO VÝKONU LOŽISKA [2]	71
OBRÁZEK 60: SKLON VŘETENE V ROVINĚ X-Z [P11, P15].....	72
OBRÁZEK 61: PRŮBĚH REDUKOVANÉHO NAPĚTÍ [P11, P15]	73
OBRÁZEK 62: ZJEMNĚNÍ SÍTĚ PO HLAVOU ŠROUBU	75
OBRÁZEK 63: DISKRETIZACE MODELU.....	75
OBRÁZEK 64: KONTAKTNÍ PLOCHY VŘETENÍK – LOŽE.....	76
OBRÁZEK 65: PŘEDEPNUTÝ ŠROUBOVÝ SPOJ	77
OBRÁZEK 66: ZATÍŽENÍ V MÍSTĚ LOŽISEK	77
OBRÁZEK 67: CELKOVÉ POSUNUTÍ	78
OBRÁZEK 68: POSUNUTÍ VE STŘEDU AXIÁLNÍHO LOŽISKA VE SMĚRU OSY Z.....	79
OBRÁZEK 69: SKLON V MÍSTĚ ZADNÍHO ULOŽENÍ KONCE VŘETENE	79
OBRÁZEK 70: POSUNUTÍ VE STŘEDU HLAVNÍHO LOŽISKA VE SMĚRU OSY X	80
OBRÁZEK 71: POSUNUTÍ VE STŘEDU HLAVNÍHO LOŽISKA VE SMĚRU OSY Y	80
OBRÁZEK 72: REDUKOVANÉ NAPĚTÍ DLE HMM	81
OBRÁZEK 73: REDUKOVANÉ NAPĚTÍ V MÍSTĚ ŠROUBOVÉHO SPOJE DLE HMM	81
OBRÁZEK 74: SESTAVA VŘETENÍKU – POHLED 1.....	83
OBRÁZEK 75: SESTAVA VŘETENÍKU – POHLED 2.....	83
OBRÁZEK 76: SESTAVA VŘETENÍKU – POHLED 3.....	84
OBRÁZEK 77: SESTAVA VŘETENÍKU – POHLED 4.....	84

Seznam tabulek

TABULKA 1: SROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH ŘAD STROJE S-MT	12
TABULKA 2: SROVNÁVACÍ TABULKA NEJVYŠŠÍCH ŘAD S500MT / ULTRATURN MC.....	26
TABULKA 3: SROVNÁVACÍ TABULKA NEJVYŠŠÍCH ŘAD S500MT / PROFITURN M.....	28
TABULKA 4: SROVNÁVACÍ TABULKA NEJVYŠŠÍCH ŘAD S500MT / MPMC 2000	30
TABULKA 5: SROVNÁVACÍ TABULKA S200MT / N60MC.....	32
TABULKA 6: SROVNÁVACÍ TABULKA S200MT / M200	34
TABULKA 7: ZADANÉ PARAMETRY MOTORŮ	35
TABULKA 8: ZADANÉ PARAMETRY K PŘEVODOVKÁM.....	35
TABULKA 9: VÝSTUPNÍ PARAMETRY NA VŘETENU [P1]	35
TABULKA 10: PARAMETRY V JEDNOTLIVÝCH STUPNÍCH [P1].....	36
TABULKA 11: VSTUPNÍ PARAMETRY ZÁTĚŽOVÉHO SPEKTRA	38
TABULKA 12: SOUČINITEL ŘEZNÉ SÍLY A OTÁČKY OBROBKU	39
TABULKA 13: SOUČINITEL TÍHY OBROBKU [P2].....	39
TABULKA 14: ZÁTĚŽOVACÍ SPEKTRUM [P2]	42
TABULKA 15: ZÁTĚŽOVACÍ SPEKTRUM POMĚRNÝCH HODNOT [P2]	42
TABULKA 16: PARAMETRY SOUKOLÍ 1-2 [P3, P4]	44
TABULKA 17: PARAMETRY SOUKOLÍ 3-4 [P3, P4]	45
TABULKA 18: PARAMETRY HŘÍDELE 1 A HŘÍDELE 2 [P3, P4]	47
TABULKA 19: PARAMETRY LOŽISEK PRO HŘÍDEL 1 A HŘÍDEL 2 [P3, P4]	48
TABULKA 20: PARAMETRY HŘÍDELE 3 [P3, P4]	48
TABULKA 21: PARAMETRY LOŽISEK PRO HŘÍDEL 3 [P3, P4]	49
TABULKA 22: NÁVRH SPOJENÍ KOLA 3 S HŘÍDELÍ 3 [P5]	50
TABULKA 23: PARAMETRY HŘÍDELE 4 [P3, P4]	51
TABULKA 24: DRÁŽKOVÁNÍ HŘÍDELE 4 A HŘÍDELE 5 [P5].....	52
TABULKA 25: DRÁŽKOVÁNÍ HŘÍDELE 4 A HŘÍDELE 1 [P5].....	53
TABULKA 26: DRÁŽKOVÁNÍ HŘÍDELE 4 A HŘÍDELE 2 [P5].....	54
TABULKA 27: PARAMETRY HŘÍDELE 5 [P4].....	55
TABULKA 28: PARAMETRY LOŽISEK PRO HŘÍDEL 5	56
TABULKA 29: SPOJENÍ KOLA 5 A HŘÍDELE 5 [P7]	56
TABULKA 30: NÁVRH FINÁLNÍHO PŘEVODU [P8]	58
TABULKA 31: VARIANTY LOŽISEK PRO ULOŽENÍ VŘETENE	59
TABULKA 32: ZÁKLADNÍ ROZMĚRY VŘETENE.....	62
TABULKA 33: POŽADOVANÁ STATICKÁ ÚNOSNOST LOŽISEK	63
TABULKA 34: STANOVENÁ LOŽISKA ULOŽENÍ VŘETENE [27]	64
TABULKA 35: VÁHA KRITÉRIÍ.....	64
TABULKA 36: HODNOCENÍ VARIANT [P9, P10].....	65
TABULKA 37: ZATÍŽENÍ AXIÁLNÍCH LOŽISEK BEZ PŘEDEPNUTÍ [P11]	66
TABULKA 38: PŘEDEPÍNACÍ SÍLA AXIÁLNÍCH LOŽISEK [P12]	67
TABULKA 39: POSUNUTÍ V MÍSTĚ HROTU [P11]	69
TABULKA 40: TUHOST VLASTNÍHO VŘETENE [P13]	69
TABULKA 41: TUHOST ULOŽENÍ [P13].....	69
TABULKA 42: CELKOVÁ TUHOST [P13]	69
TABULKA 43: MAXIMÁLNÍ TEPLOTNĚ STABILNÍ OTÁČKY [P15].....	70

TABULKA 44: KONTROLA ULOŽENÍ VŘETENE [P11, P15].....	72
TABULKA 45: KONTROLA FINÁLNÍHO PŘEVODU [P8]	73
TABULKA 46: KONTROLA VŘETENE [P11, P15].....	73
TABULKA 47: SPOJENÍ KOLA FINÁLNÍHO PŘEVODU A VŘETENE [P14]	74
TABULKA 48: ZÁMĚNA OS SOUŘADNÉHO SYSTÉMU	74
TABULKA 49: MATERIÁLY ČÁSTÍ VŘETENÍKU [P19].....	75
TABULKA 50: PARAMETR ŠROUBU [28]	76
TABULKA 51: TUHOST VŘETENÍKU V ULOŽENÍ VŘETENE	82

Použité zkratky

CAD	Počítačem podpořený návrh
CNC	Číslicové řízení pomocí počítače
NC	Číslicové řízení
ČSN	Česká technická norma
RO	Rychlořezná ocel
VBD	Vrtáky s vyměnitelnými břitovými destičkami
HRC	Zkouška tvrdosti podle Rockwella
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
MKP	Metoda konečných prvků
SMT	Firma ŠKODA MACHINE TOOL
DS	Firma Dörries Scharmann
RTC	Robotická výměna nástrojů
SK	Slinutý karbid

1 Úvod

Konvekční metody třískového obrábění jsou dnes stále velmi významné a jako každá technologie, tak i technologie třískového obrábění podléhá výraznému vývoji. Klasické technologie obrábění z 19. a 20. století přestávají v dnešní době vyhovovat z hlediska technologických, ekonomických a v neposlední řadě i ekologických důvodů. Moderní doba si žádá progresivní a více produktivní metody. Tento trend je ovlivněn vyšší užitnou hodnotou výrobků, snižováním nákladů na výrobu, snižováním výsledné ceny výrobků a zároveň vyššími požadavky na jakost a spolehlivost výrobků. Na základě těchto požadavků jsou do konstrukce výrobních strojů zaváděny různé inovace a vylepšení. Současným trendem na trhu s obráběcími stroji je menší podíl jednoprofesních obráběcích strojů, které jsou nahrazovány víceúčelovými stroji, jakými jsou například soustružnická centra, frézovací centra nebo jiné multifunkční stroje. Dále převládá oproti manuálně řízeným strojům výraznější podíl CNC obráběcích strojů se sofistikovaným řídicím systémem. Tyto stroje mohou být navíc vybaveny automatickou výměnou nástrojů, automatickou výměnou obrobků, ale i moderními odměřovacími a kontrolními systémy. Tímto směrem se vyvíjí oblast malých, středních, ale rovněž i oblast těžkých obráběcích strojů určených pro obrábění velmi rozměrných, hmotných a tvarově složitých součástí.

1.1 Těžké obráběcí stroje

Těžké obráběcí stroje jsou výrobní stroje určené pro obrábění rozměrných a hmotných dílů. Výroba rozměrných a hmotných dílů je dnes požadována v různých odvětvích průmyslu. Významnými průmyslovými odvětvími jsou například energetický, letecký, těžební, námořní anebo nukleární průmysl. Těžké obráběcí stroje jsou často velice unikátní a svými vlastnostmi velice specifické stroje. Konstrukce těžkých obráběcích strojů má proto svá specifika. Vlastní rozměry strojů jsou úměrně velké obráběným dílům. Velikost a hmotnost jednotlivých částí stroje vyžaduje specifický přístup k vlastní konstrukci stroje. Těžké obráběcí stroje jsou z velké části vyráběny na zakázku. Při konstrukci takto rozměrných strojů je nezbytné respektovat možnosti manipulace, dopravy, vyrobiteľnosti a smontovatelnosti. Omezující parametry jsou především vlastní hmotnost a rozměry jednotlivých částí stroje. Snižování hmotnosti částí stroje je často z konstrukčního pohledu protichůdné z hlediska dosažení požadované tuhosti stroje.

Pro optimalizaci využití materiálu je v dnešní době využívána metoda konečných prvků. Aby bylo možné s částmi stroje manipulovat, navrhují se části stroje jako dělené na vícero částí a po dopravě k zákazníkovi jsou posléze smontovány. Kromě toho je pro většinu takto rozměrných strojů nutné připravit vlastní základ, na kterém bude stroj ustaven. Z těchto požadavků vyplývá, že složitost realizace a celková cena pořízení takového stroje bude nemalá. Proto jsou těžké obráběcí stroje konstruovány s ohledem na delší dobu užívání. Předpokládaná doba užívání je u takto nákladných strojů často i v desítkách let. Náklady na výrobu rozměrných výrobků, a tedy i celková cena produktů jsou velmi vysoké, často v miliónech

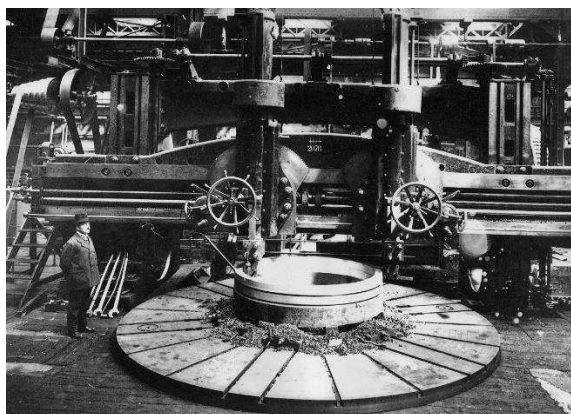
korun. Proto jsou kladeny vysoké požadavky na spolehlivost a přesnost strojů. Na výrobní přesnost mají nepříznivý vliv deformace způsobené vlastní tíhou rozměrných částí stroje a tíhou obrobku. Hmotnost obrobku činí často desítky tun. Z hlediska konstrukce je snahou deformace co nejvíce eliminovat dostatečnou tuhostí částí stroje. Dalším faktorem ovlivňující přesnost stroje je teplotní deformace způsobená velkým odpadním teplem od hlavního pohonu nebo od nahromaděných horkých třísek. Výkon hlavního pohonu se pohybuje u nejvýkonnějších strojů řádově ve stovkách kilowatt. Hromadění horkých třísek je možné omezit například odvodem třísek pomocí gravitace, dopravníků nebo splachování mimo pracovní prostor stroje. Pro dosažení dlouhé životnosti při zachování požadované přesnosti jsou u těžkých obráběcích strojů často použita hydrostatická vedení. V neposlední řadě je významnou oblastí i bezpečnost práce, ergonomie a design. Mezi přední zahraniční výrobce těžkých obráběcích strojů patří například firmy WEINGÄRTNER, GEORG, WOHLBERG, WALDRICHSIEGEN anebo firma BOST.

Jedním z předních výrobců moderních těžkých obráběcích strojů na světě je plzeňská firma ŠKODA MACHINE TOOL a.s.. V diplomové práci se budu zabývat návrhem hlavního pohonu soustružnického vřeteníku u multifunkčního stroje S-MT, který vyrábí a dodává již zmíněná plzeňská firma ŠKODA MACHINE TOOL a.s. (dále jen ŠMT). Jedná se o nově nabízený, moderní a velmi specifický obráběcí stroj umožňující tzv. kompletní obrábění. Zadavatelem tématu diplomové práce je rovněž firma ŠMT.

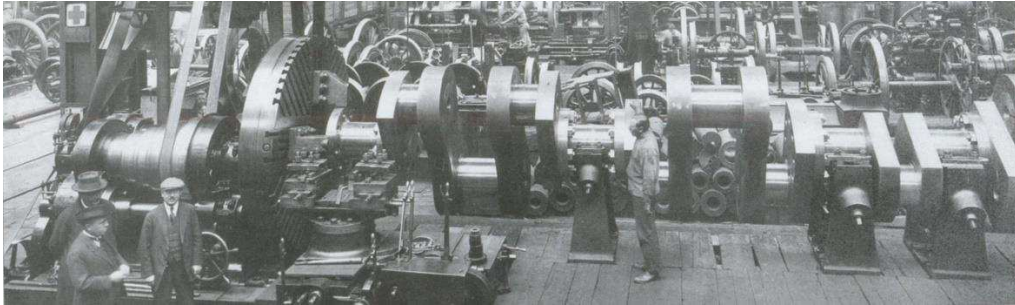
1.2 Historie firmy ŠKODA

Historie firmy Škoda se datuje již k roku 1859, kdy hrabě Arnošt Valdštejn založil v Plzni pobočku své slévárny a strojírny. V roce 1869 továrnu odkoupil zdatný strojírenský odborník a výborný podnikatel inženýr Emil Škoda. V osmdesátých letech byly Škodovy závody velmi moderní ocelárnou, která byla schopná dodávat odlitky o hmotnosti desítek tun. [14]

V roce 1899 se stala z podniku akciová společnost. Před první světovou válkou byly Škodovy závody největší zbrojovkou Rakouska-Uherska. V roce 1911 Škodovy závody zahájily výrobu vlastních obráběcích strojů. Již v této době se výroba orientovala na výrobu obráběcích strojů pro obrábění rozměrných a hmotných strojních součástí. Po skončení první světové války a založení Československa roku 1918 byl podnik přeorientován ze zbrojního průmyslu na mnohooborový koncern. [13] Roku 1920 byla zahájena výroba soustruhů pro obrobek klikových hřídelí. [12]



Obrázek 1: Karuselový soustruh z roku 1912 [12]



Obrázek 2: Soustružení klikové hřídele ve dvacátých letech [12]

V letech 2. světové války byla výroba pod vlivem nacistů vojensky orientována. Významným pokrokem bylo zavedení elektropohonů ke všem strojům. [12] Koncem 2. světové války však byla továrna z velké části zničena bombardováním spojeneckými vojsky. [14]

Po válce byl podnik zestátněn a výroba se rozdělila. V Plzni byla výroba zaměřena na těžké a dopravní strojírenství. V roce 1958 zaznamenala velký úspěch v Plzni vyráběná horizontální vyvrtávačka ŠKODA WD 200, která získala ocenění na EXPO v Bruselu. Tyto stroje byly výjimečné svojí přesností a efektivností výroby. Proto se také tyto stroje vyráběly až do roku 1974 a celkový počet vyrobených kusů činil 1200 kusů. [12] V polovině sedmdesátých let byla vyvinuta první horizontka s CNC ovládním. Od roku 1980 se CNC ovládním strojů stalo běžnou součástí produkce. [12]

V roce 1990 byl tehdy státní podnik převeden na akciovou společnost ŠKODA a.s. Výroba obráběcích strojů v závodě Obráběcí stroje Škoda byla roku 1993 ovlivněna německou firmou Dörries Scharmann (dále jako DS). Závod Obráběcí stroje Škoda a německá firma DS se sloučily a byl zaveden společný název ŠKODA MACHINE TOOL s.r.o. Na základě vzájemné dohody byly v Plzni vyráběny těžké horizontky typu Heavycut. Kromě těžkých horizontek byl významným krokem vývoj prvních dvouosých kontinuálně řízených hlav pro pětiosé obrábění. V roce 1996 německá firma zbankrotovala a Škoda a.s. převzala majoritní podíl. Rok 1999 je významným milníkem z hlediska vývoje a následné výroby těžkých soustruhů typu SR. Tyto soustruhy jsou určeny pro obrábění rozměrných rotačních strojních součástí, jakými jsou například klikové hřídele a turbínové rotory. Stroje disponují NC řízením a dále je možné stroje dovybavit přídatnými zařízeními pro specifické



Obrázek 3: Soustruh SR-5 [12]

operace jako je broušení, frézování a vyvrtávání. V roce 2000 se produktové portfolio rozšířilo o těžké horizontky typu HCW a FCW. Stroje FCW jsou vysoce přesné a spolehlivé stroje s lineárním valivým vedením a přímým odměřováním výsuvu pinoly s kompenzací teplotní dilatace. Pro větší flexibilitu a možnosti stroje je možné stroje vybavit pětiosou hlavou UFK 600. Oproti tomu stroje HCW jsou vhodné pro obrábění vysokými výkony. Stroje HCW jsou proto vybaveny hydrostatickým vedením a velmi robustní konstrukcí. [12]

V roce 2007 se firma ALTA a.s. stává spoluvlastníkem ŠMT. Firma ALTA a.s. je významná firma dodávající obráběcí stroje a jiná technologická zařízení pro strojírenství, hutnictví, energetiku, těžební průmysl a průmysl stavebních hmot. [15]

V roce 2009 se rodina horizontálních vyvrtávaček rozšiřuje o stroje HCW 2000-4000. Jedná se o horizontky s vysokootáčkovým vřetenem a s možností velkých výsuvů pinoly při zachování vysoké přesnosti. V roce 2016 firma prodala největší horizontku v historii firmy Škoda. [12]

V roce 2018 firma ŠMT přichází na trh s novým multifunkčním horizontálním soustruhem typu S-MT.

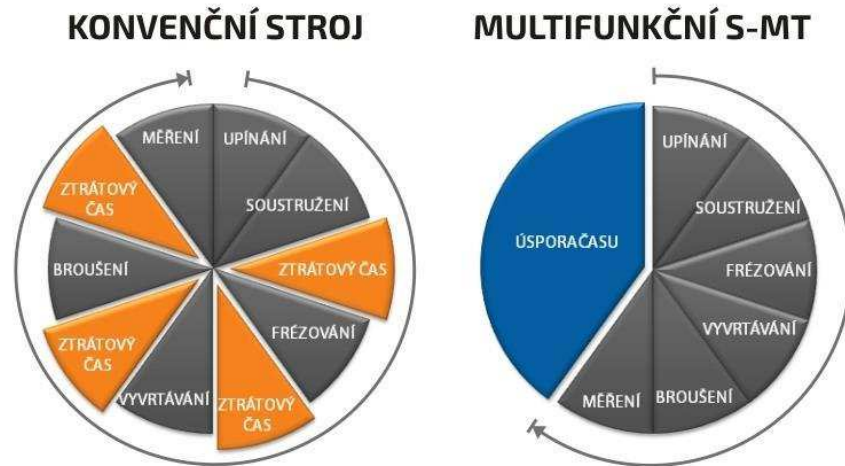
2 Multifunkční stroj typu S-MT

Firma ŠMT rozšířila svoje portfolio výrobků v roce 2018 o nový multifunkční stroj S-MT a tím reaguje na poptávku firem, které se zabývají výrobou tvarově specifických a rozměrných rotačních součástí. Jedná se především o výrobu rotorů turbín, klikových hřídelí a hřídelí s ozubením. Do této doby firma ŠMT nabízela soustruhy typu SR1 až SR5, které je možné dovybavit širokou škálou příslušenství. Díky této modulární konstrukci je možné na soustruzích typu SR obrábět rozměrné součásti do hmotnosti až 350 tun, s průměrem součástí do 6 000 mm a s délkou součástí až 30 000 mm.



Obrázek 4: Horizontka HCW 3000 [12]

Oproti tomu multifunkční stroj S-MT je stroj nové koncepce umožňující tzv. kompletní obrábění neboli obrábění na jedno upnutí, čímž se výrazným způsobem zvýšila produktivita výroby a efektivnost obráběcího procesu. Obrábění na jedno upnutí současně příznivě ovlivní celkovou přesnost výroby. K těmto faktům přispěla celá řada konstrukčních a technologických inovací, které budou popsány v následujících odstavcích.



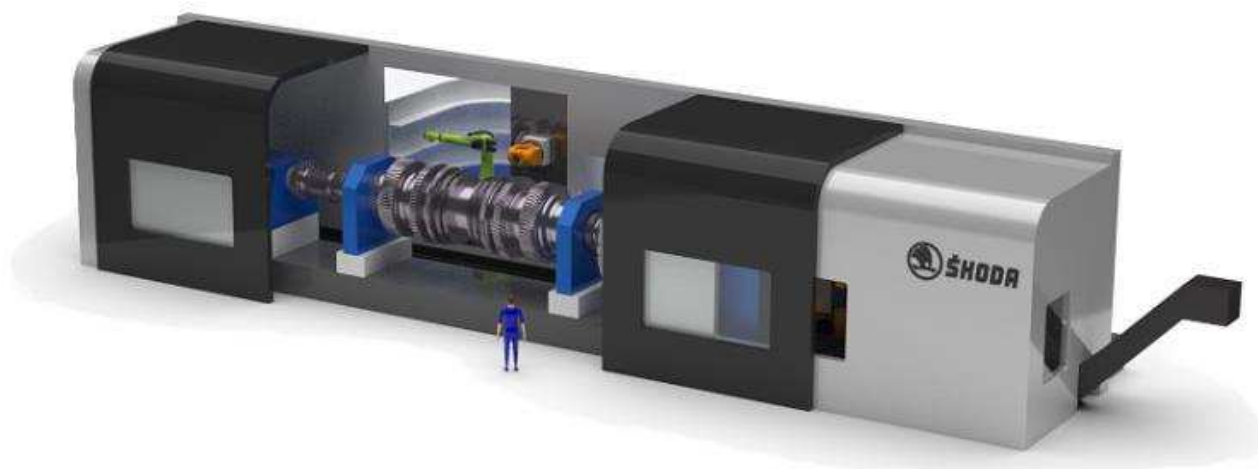
Obrázek 5: Porovnání časové náročnosti jednotlivých operací u konvenčního stroje a u stroje S-MT [12]

2.1 Vlastnosti multifunkčního stroje S-MT

Multifunkční stroj S-MT umožňuje vykonávat několik rozdílných technologických operací na jednom stroji. V první řadě se jedná o soustružnické a frézovací operace. Kromě operace soustružení a frézování stroj dále umožňuje vrtací operace s možností hlubokého vrtání. Další operací, kterou lze provádět za pomoci zvláštního příslušenství, je operace broušení. Klíčovou vlastností stroje S-MT je, že všechny tyto technologické operace je možné provádět ve zcela automatizovaných a po sobě jdoucích operacích. Proto, aby bylo možné provádět celou řadu odlišných technologických operací, je nutné zajistit automatizovanou výměnu nástrojů a dalšího příslušenství. Tato funkce představuje charakteristický požadavek na automatický chod stroje a zkracování vedlejších časů. Číslicově řízené je polohování nástroje i polohování obrobku.

Kromě technologických inovací je stroj konstruován i s ohledem na bezpečnost a hygieničnost pracovního procesu. Za tímto účelem je i takto rozměrný stroj vybaven úplným zakrytím pracovního prostoru, ze kterého se odsávají řezné a chladicí média.

Aktuálně ŠMT předpokládá, že bude stroj S-MT nabízen ve čtyřech řadách. Každá řada bude omezena především rozměrem a hmotností obrobku. Příslušná řada je také charakteristická maximálním možným výkonem stroje. V tomto případě je samostatně uvažován výkon pro soustružení a výkon pro frézování. Nejvyšší řada umožňuje obrábět velký obrobek o hmotnosti až 250 tun, do průměru 5 000 mm a o maximální délce 15 000 mm. V tabulce níže jsou uvedeny parametry jednotlivých řad stroje S-MT.

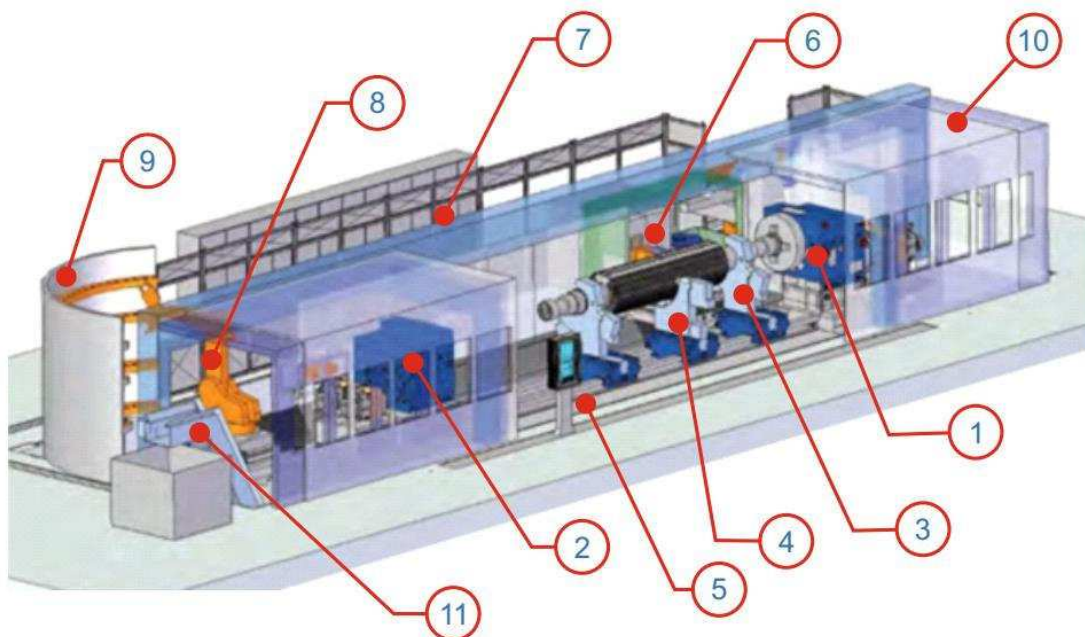


Obrázek 6: Multifunkční stroj typu S-MT [12]

Parametr		S 150 MT	S 200 MT	S 320 MT	S 500 MT
Max. hmotnost obrobku	kg	32 000	70 000	160 000	250 000
Max. oběžný průměr	mm	1500	2000	3200	5000
Max. délka obrobku	mm	4 000 – 10 000	4 000 - 10 000	5 000 - 15 000	5 000 – 15 000
Soustružnická část					
Max. otáčky	1/min	700	400	300	200
Max. výkon	kW	71	95	190	190
Max. moment	kNm	50 - 85	85 - 140	140 - 250	250
Frézovací část					
Max. otáčky	1/min	3 500	3 500	3 000	3 000
Max. výkon	kW	64	64	81	81
Max. moment	Nm	4 500	4 500	4 500	4 500
Průřez pinoly	mm	480 x 480	480 x 480	600 x 600	600 x 600
Výsuv pinoly	mm	1 200	1 500	2 000	2 500
Upínání nástrojů		ISO 50	ISO 50	ISO 50	ISO 50
		CAPTO C8	CAPTO C8	CAPTO C10	CAPTO C10
Posuvové rychlosti	mm/min	20 000	20 000	20 000	20 000
Chlazení osou 3 MPa, 25 l/min		ano	ano	ano	ano
Chlazení vnější 0,5 MPa, 40 l/min		ano	ano	ano	ano
Automatické upínání hlav		ano	ano	ano	ano
ATC		ano	ano	ano	ano

Tabulka 1: Srovnání jednotlivých řad stroje S-MT

2.2 Popis hlavních konstrukčních skupin stroje S-MT



Obrázek 7: Schéma hlavních konstrukčních prvků stroje [12]

2.2.1 Vřeteník

Vřeteník stroje (obrázek 7, pozice 1 případně i pozice 2) je standardně skříňového charakteru. Jedná se velmi robustný a žebrovaný odlitek. Konstrukce je řešena s ohledem na zajištění dostatečné statické i dynamické tuhosti. Ve vřeteníku je uloženo hlavní pracovní vřeteno spolu se dvěma převodovkami v kinematickém zapojení MASTER – SLAVE za účelem vymezení provozních vůlí. Každá převodovka je samostatně poháněna vlastním elektromotorem. Pro možnost získání informace o poloze vřetene, respektive o poloze (natočení) obrobku je součástí vřeteníku mechanismus pro odečítání natočení vřetene. Přesnějším popisu samotného uložení vřetene a pohonu vřetene bude věnována kapitola konstrukčního návrhu hlavního pohonu.

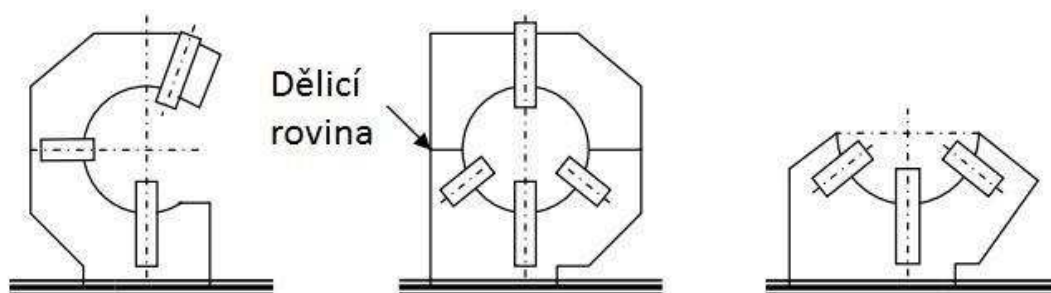
2.2.2 Upnutí obrobku

Velmi důležitou oblastí stroje je upnutí obrobku. Způsob upnutí musí zajistit správnou a stálou polohu obrobku, která se nebude v procesu vlivem vlastní tíhy, odstředivých a rezných sil měnit. U stroje S-MT je obrobek upnut pomocí lící desky s čelistmi. Lící deska je navíc doplněna o středový hrot. Hroty obrobku zajišťují vystředění obrobku a čelisti lící desky zajišťují uchycení a přenos kroutícího momentu přenášeného z vřetena na obrobek. Stroj může být vybaven jedním, ale i dvěma vřeteníky anebo jedním vřeteníkem a koníkem. U dlouhých obrobků je nutné eliminovat průhyb obrobku vlivem vlastní tíhy.

Na velkých soustružích se při obrábění hmotných a dlouhých součástí za tímto účelem užívají k podepření obrobku podvalky a opěry (obrázek 7, pozice 3 a 4). Jedná se o zařízení, která podepírají obrobek a omezují tím průhyb součásti, čímž zachycují značnou část tíhy obrobku. Opěry jsou jednak uzavřené s dělicí rovinou, nebo polozavřené ve tvaru písmene C. Provedení opěr může



Obrázek 8: Opěra s tlakovým přívodem oleje [16]

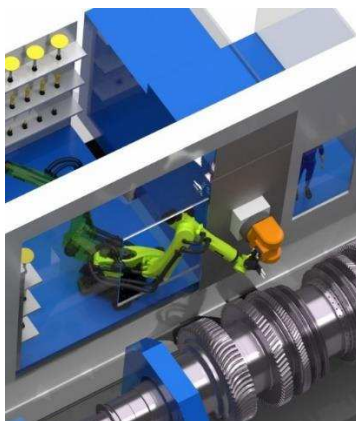


Obrázek 9: Zleva: opěra polozavřená, opěra uzavřená, podvalek [3]

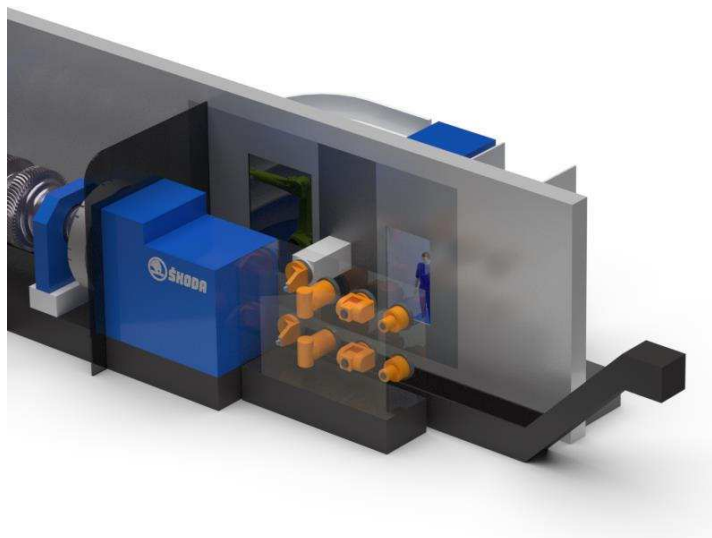
být valivé, hydrodynamické či hydrostatické. Kromě opěr se využívá k podepření obrobku velkého průměru tzv. podvalků (obrázek 7, pozice 4). U stroje S-MT jsou opěry hydrostatické. Mezi kontaktní plochy obrobku opěry je přiveden tlakový přívod oleje a tím je vytvořena olejová vrstva. Přebytečný přeteklý olej je z podpěry následně odčerpáván. Opěry a podvalky se pohybují ve směru podélné osy stroje.

2.2.3 Upnutí nástrojů, výměna nástrojů a příslušenství

V úvodní kapitole 2.1 byl uveden přehled možných technologických operací, které lze na multifunkčním stroji S-MT provádět. Předpokladem univerzálnosti stroje a vysokého stupně automatizace je automatická výměna nástrojů a dalšího příslušenství.



Obrázek 10: Robotická výměna nástrojů RTC [12]



Obrázek 11: Prostor s výměnnými hlavami [12]

Automatická výměna nástrojů významně zkracuje vedlejší časy, jinak potřebné k výměně a seřízení nástroje. Upínání nástrojů je ve standardu CAPTO C8 a u větších strojů CAPTO C10. Kromě toho může být také zavedena detekce poškozeného nástroje. Tím je výrazně ovlivněna výsledná produktivita stroje. Za tímto účelem je stroj vybaven robotickou výměnou nástrojů RTC a automatickou výměnou hlav tzv. pick-up systémem.

Stroj disponuje vlastním zásobníkem nástrojů a zvláštní paletou vyvrtávacích, frézovacích a jiných hlav.

Výhoda zásobníku spočívá v možnosti uložení velkého množství nástrojů. Veškeré nástroje jsou dle konkrétní technologické operace zcela automaticky upínány do příslušné hlavy. Manipulaci s nástrojem obstarává stacionární robot podle naprogramovaných algoritmů. Výměník je ve standardním provedení součástí frézovací věže, se kterou se i pohybuje. Vlastní výměnu nástroje provede robotická ruka. Z předem nadefinované polohy nástroje v zásobníku nástrojů (obrázek 7, pozice 9) je robotem (obrázek 7, pozice 8) z pozice nástroj vyjmut a usazen do příslušné hlavy, kde je automaticky upnut (obrázek 10). Tento způsob výměny nástrojů je velmi efektivní. Nevýhodou je jen větší požadavek na zastavěný prostor pro zásobník nástrojů a robota.

Výměna hlavy probíhá také zcela automaticky. Frézovací věž přejede do prostoru se zvláštní paletou hlav (obrázek 7, pozice 10), kde z nadefinované pozice vyjme příslušnou hlavu. Hlava je posléze automaticky upnuta na konci výsuvné pinoly, která je součástí vřeteníku. Vřeteník s výsuvnou pinolou je pohyblivě uložen na pohyblivé frézovací věži (obrázek 7, pozice 6). Výsuvná pinola je čtvercového průřezu a na konci pinoly se nachází celá řada přípojek a rozhraní pro připojení elektrotechniky, hydrauliky, pneumatiky a přívodu řezné



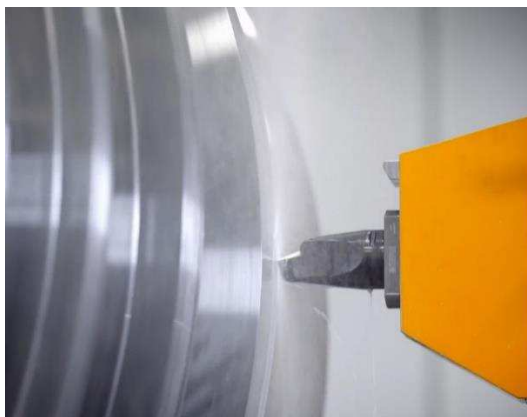
Obrázek 12: Paleta s výměnnými hlavami [12]

kapaliny. Frézovací věž se pohybuje po hydrostatickém vedení ve vyhrazeném prostoru (obrázek 7, pozice 7). Paleta s alternativními hlavami je zobrazena na obrázku 11 a obrázku 12. Pohyb stojanu je rovnoběžný s podélnou osou obrobku. Po stojanu se ve vertikální ose pohybuje vřeteník s výsuvnou pinolou. Výsuv pinoly posléze představuje třetí pohybovou osu nástroje. Kromě těchto tří os je možné stroj dovybavit víceosou hlavou, která zvyšuje počet pohyblivých os nástroje.

2.2.4 Krytování stroje, hygieničnost procesu, třískové hospodářství

Nestandardním provedením v oblasti velkých obráběcích strojů je vlastní krytování stroje a jeho pracovního prostoru. Kompletní krytování u takto velkých strojů je často velmi problematické a také nákladné. Není tak standardem, že by velké obráběcí stroje byly kompletně zakrytovány. Multifunkční stroj S-MT od ŠMT je kompletním zakrytáváním stroje vybaven. Zakrytáváním je zvýšena hygieničnost a bezpečnost procesu. Dále je zabráněno odlétávání kovových třísek a také je snížena celková hlučnost stroje. Kromě snížení hlučnosti je možné realizovat odsávání a odvod chladicí mlhy z pracovního prostoru.

U strojů pracujících v automatickém režimu musí být zajištěn automatický odvod třísek z pracovního prostoru stroje. Třísky vzniklé v rezném procesu jsou odváděny pomocí dopravníků do vlastních kontejnerů (obrázek 7, pozice 11). Hromadění třísek by v opačném případě mělo vliv na bezpečnost práce. Nahromaděné horké třísky z rezného procesu také ovlivňují akumulaci tepla v okolí částí obráběcího stroje. Tím by mohla být ovlivněna teplotní stabilita stroje.

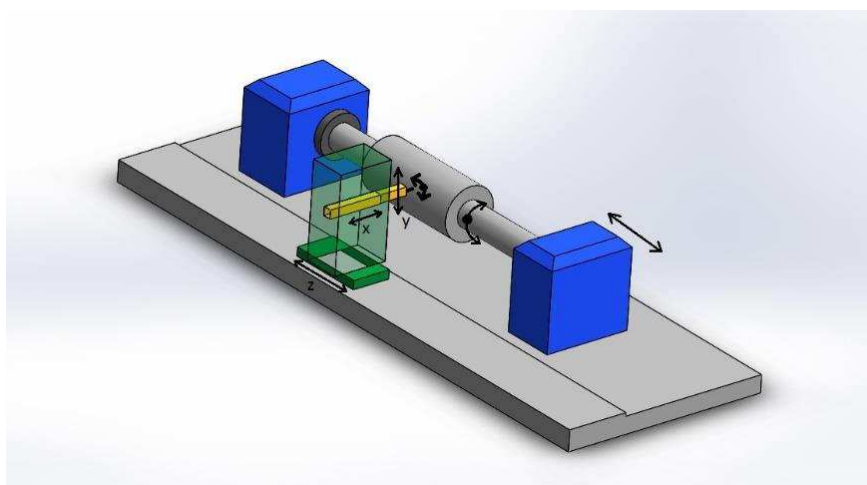


Obrázek 13: Přívod řezné kapaliny [16]

Řezné kapaliny jsou v případě operace soustružení, frézování, broušení a vrtání efektivně přiváděny vnitřkem nástrojem nebo vnějším ostřikem přímo do místa řezu (obrázek 13). Přívodem chladicí kapaliny je jednak odváděno vzniklé teplo, dále má řezná kapalina i mazací účinek a tím je snížen třecí odpor mezi nástrojem a obrobkem. Řezná kapalina také napomáhá odvodu třísek jejich splachováním a celkově zlepšuje jakost obrobené plochy.

2.3 Kinematická struktura

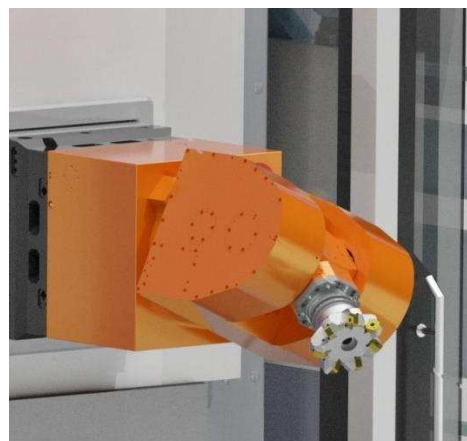
Obrábění materiálů konvenčními metodami je založeno na vzájemných pohybech obrobku a nástroje. Pohyby nástroje a obrobku je možné popsat kinematickými schémata obrábění. Kinematické schéma popisuje pohyb nástroje ve vztahu k obráběné ploše. Výsledné obrobené plochy jsou utvořeny křivkami odpovídající vzájemnému pohybu obrobku a nástroje. Kinematika obráběcího multifukčního stroje S-MT umožňuje víceosé obrábění obrobku. Aby bylo víceosé obrábění realizovatelné, musí stroj disponovat kombinací lineárních a rotačních os. Hlavní pohon vřeteně zajišťuje rotační pohyb obrobku. Pohon soustružnické části je tvořen dvěma elektromotory Siemens PH8 v zapojení MASTER-SLAVE. Základní parametry soustružnické části stroje jsou maximální výkon, maximální otáčky a maximální mo-



Obrázek 14: Kinematické schéma pohybových os stroje

ment. Kromě spojitého rotačního pohybu umožňuje pohon soustružnické části stroje přesné polohování obrobku vůči nástroji. Změna rozteče mezi hroty je řešena posuvem koníku (nebo 2. vřeteníku) po hydrostatickém vedení ve směru podélné osy obrobku.

Vlastní nástroj vykonává tři základní lineární pohyby ve směru třech navzájem kolmých os. První lineární osou je pohyb ve směru podélné osy obrobku (*osa z*), druhá osa umožňuje pohyb ve svislém směru (*osa y*) a třetí osa je řešena výsuvem pinoly, tedy příčně k podélné ose obrobku (*osa x*). V případě použití vrtacích či frézovacích hlav vykonává upnutý nástroj v hlavě pohyb rotační. Pro operace vrtání či frézování mohou být použité i víceosé hlavy, které rozšiřují pohyb nástroje o další rotační osy. Rotační pohyb nástroje obstarává samostatná frézovací část stroje s vlastním pohonem vřeteně o maximálním výkonu, maximálních otáčkách a s maximálním momentem.



Obrázek 15: Víceosá hlava [12]

2.4 Technologické operace prováděné na stroji S-MT

2.4.1 Metoda soustružení na stroji S-MT

Technologie soustružení je využívána především k obrobení rotační ploch. Obráběné plochy mohou být válcové, kuželové, tvarové a rovinné plochy při obrábění čelních ploch. Kromě toho stroj umožňuje také řezat závity. Možnosti technologie soustružení jsou na stroji S-MT v podstatě shodné jako u menších hrotových soustruhů s NC řízenými osami. Nástrojem je jednobřítý soustružnický nůž upnutý v příslušné hlavě (obrázek 16). Kinematika pohybů je shodná s klasickým hrotovým soustruhem. Řezná kapalina je přiváděna středem nástroje do místa řezu (obrázek 13). Základní pohyb je spojitý rotační a vykonává ho upnutý obrobek. Vedlejší pohyby – posuv a přísuv vykonává nástroj. Řezná rychlost je rovna obvodové rychlosti v místě dotyku břitu s nástrojem. Programové NC řízení stroje umožňuje obrábět složité tvarové plochy. Metoda soustružení má své uplatnění a výhody, ovšem oproti metodě rotačního frézování je méně produktivní.

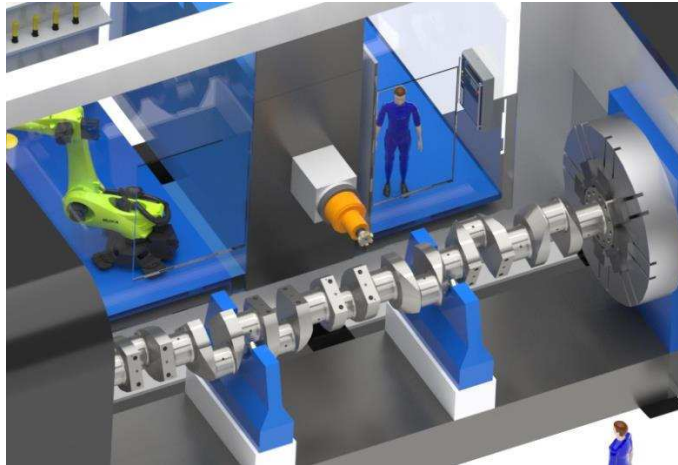


Obrázek 16: Metoda soustružení [12]

2.4.2 Metoda frézování na stroji S-MT

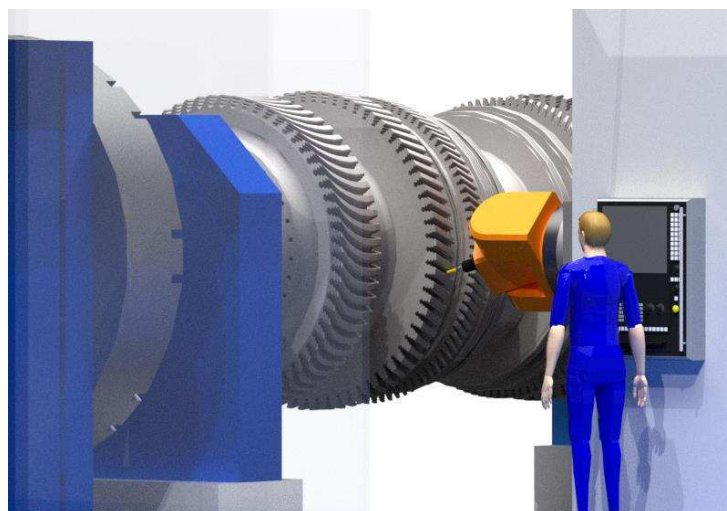
Další metodou obrábění, kterou multifunkční stroj S-MT nabízí, je metoda frézování. Metoda frézování je vysoce produktivní metoda. Materiál obrobku je odebírán vícebřítým nástrojem neboli frézou, upnutou ve frézovací hlavě. Pohon zajišťuje frézovací část stroje. Široké možnosti stroje nabízí celou řadu způsobů frézování. Osa rotace nástroje je vůči obráběné ploše konstantní, ale může být rovnoběžná, různoběžná či mimoběžná. Poloha nástroje je však proměnná a pohybuje se v požadovaných souřadnicích vůči obrobku. Konstruktivní řešení NC polohování vřetene umožňuje vřeteno vůči nástroji přesně polohovat. Polohování obrobku umožňuje frézování tvarově složitých součástí. Nástroj je dále možné upnout do víceosé hlavy (obrázek 15). Víceosé frézování je využito například u hřídele s ozubením nebo v případě frézování speciálních stromečkových drážek na rotorech turbín (obrázek 18).

Specifickou metodou frézování na stroji tohoto typu je tzv. rotační frézování. Při rotačním frézování se obrobek kontinuálně otáčí. Rotační frézování se hodí pro úběr velkých objemů materiálů. Číslicově řízené osy umožňují rotačně frézovat součásti tvarově složité a součásti nesymetrické s excentrickým těžištěm – například klikové hřídele. Rotační frézování je vhodné pro hrubovací operace obrábění vstupních polotovárů – obvykle výkovků, u kterých dochází k přerušovanému řezu. K úběru třísky dochází na základě složeného pohybu nástroje a obrobku. Fréza se otáčí vlastními otáčkami a tyto otáčky udávají řeznou rychlost břitů nástroje. Obrobek koná rotační pohyb, který představuje posuv a udává tak posuvovou



Obrázek 17: Rotační frézování klikové hřídele [12]

rychlost. Frézování je standardně ortogonální a nástrojem je tedy čelní fréza. Rotačně frézovat lze rovněž i válcovou frézou. V případě rotačního frézování má obrobená plocha charakteristický tvar mnohostěnu. Jakost povrchu a velikost vzniklých plošek je závislá na vzájemných kinematických poměrech pohybů a poloze frézy, která může být centrická nebo excentrická vůči ose rotujícího obrobku. Vlastnosti obrobené plochy závisí také na průměru obráběné plochy, hloubce řezu a druhu frézy.



Obrázek 18: Frézování stromečkových drážek [12]

2.4.3 Metoda broušení na stroji S-MT

Metoda broušení je většinou používána v případě dokončovacích operací. Broušením lze docílit malé drsnosti a vysoké geometrické a tvarové přesnosti. Broušení na stroji S-MT je možné za použití speciálního příslušenství (obrázek 19). Nástrojem je mnohabřitý nástroj s nedefinovanou geometrií neboli brusný kotouč. Břit nástroje tvoří brusná zrna s nepravidelnou geometrií. Broušení je charakteristické velkou řeznou rychlostí v řádech desítek až stovek metrů za sekundu. Při broušení vznikají malé průřezy třísek a zároveň je vyvíjeno velké množství tepla. Proto je nutné zajistit dostatečný přívod řezné kapaliny. Řezná kapalina je přiváděna vnějším ostřikem místa řezu (obrázek 19). Důsledkem vzniku velkého tepla je chladicí kapalina odpařována a je nutné zajistit její odsávání, kterým je multifunkční stroj S-MT vybaven. Mezi možné metody broušení na stroji S-MT patří především axiální broušení vnějších rotačních ploch a radiální (zapichovací broušení). Při axiálním broušení se upnutý obrobek otáčí a nástroj koná vlastní rotační pohyb. Radiální přísuv a posuv ve směru podélné osy obrobku koná nástroj. Mimo axiálního a radiálního broušení je využíváno i tvarové broušení závitů, ozubených kol a jinak tvarově složitých součástí – například broušení čepů klikové hřídele.



Obrázek 19: Broušení rotoru turbíny [16]

2.4.4 Vrtání děr na stroji S-MT

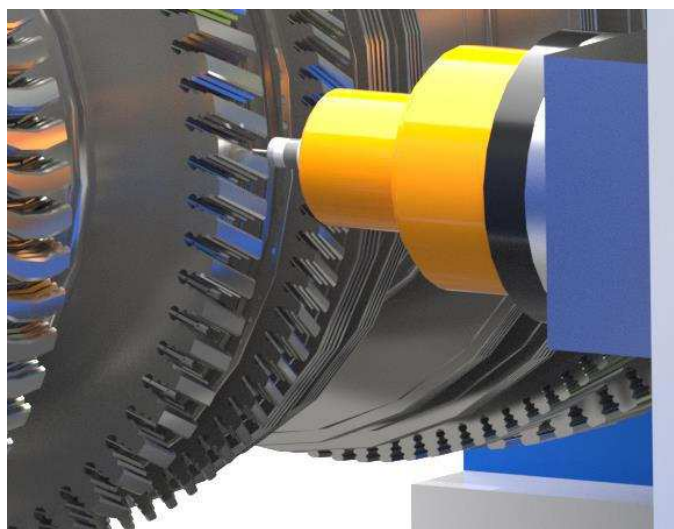
Výroba vnitřních rotačních ploch válcového nebo kuželového tvaru (zahlobení) je realizována metodou vrtání. Podle hloubky vrtaného otvoru dělíme vrtání na vrtání krátkých děr a vrtání hlubokých děr. Podle toho je použit i konkrétní druh nástroje. Nástrojem jsou různé druhy vrtáků. Pro vrtání děr malých průměrů se používají šroubovitě vrtáky z RO nebo ze SK. Pro vrtání děr větších průměrů nebo s požadavkem na vyšší přesnost a jakost povrchu vrtané díry jsou používány vrtáky VBD. Pro vrtání hlubokých děr jsou použity speciální vrtáky, které mají dobrý odvod třísek a zajištěn přívod řezné kapaliny do místa řezu. Pro vrtání krátkých děr je přívod řezné kapaliny řešen ostřikem nebo přívodem kanálky ve středu nástroje. Nástroje jsou upínány do vrtací hlavy (obrázek 20).



Obrázek 20: 90° vrtací hlava [16]

2.4.5 Doplnující a průběžné operace na stroji S-MT

V průběhu obrábění je možné provádět automatizované kontrolní měření. Stroj S-MT je vybaven automatizovaným odměřovacím systémem. Samotné odměřování je realizováno po-



Obrázek 21: Odměřování dotykovými čidly [12]

moci dotykových snímačů (obrázek 21). Tento způsob odměřování umožňuje rychlou a spolehlivou průběžnou kontrolu. Automatizovaným odměřováním jsou zkráceny vedlejší časy a tím je zvýšena výsledná produktivita stroje.

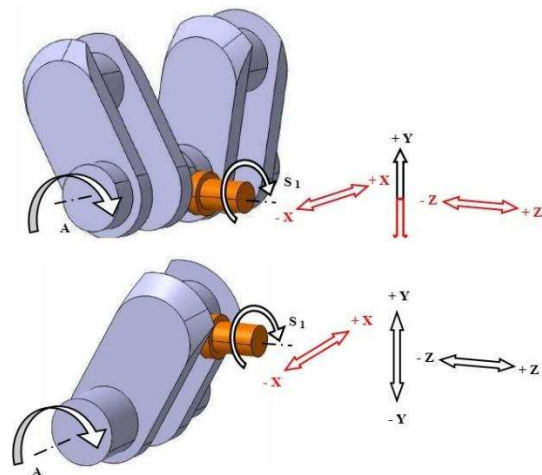
2.5 Charakteristika součástí obráběných na stroji S-MT

Jak již bylo uvedeno, na multifunkčním stroji S-MT je možné obrábět rozměrné a hmotné rotační součásti. S ohledem na rozměry a hmotnost součásti je zvolena příslušná řada stroje. Omezujícím parametrem je především hmotnost obrobku, délka a průměr součásti. V současné době je na stroji S-MT možné obrobek o maximální délce 15 000 mm, o hmotnosti do 250 tun a průměru obrobku do 5000 mm.

Běžnou součástí, kterou lze na stroji obrobek, je dlouhá hřídel s odstupňovanými čepý. Příkladem takových dlouhých rotačních součástí jsou například válce pro papírenský průmysl. Ovšem možnosti multifunkčního stroje S-MT nabízí mnohem širší využití.

Technologicky náročnější součástí, kterou je možné obrábět, je velká kliková hřídel. Kliková hřídel se skládá z kratších válcových ploch – čepů v nejedné ose. Čepý v ose hřídele se nazývají čepý osové a čepý přesazené se nazývají ojnicní čepý. Vzájemně jsou tyto čepý spojeny ramenem. Na koncích klikové hřídele jsou obvykle příruby s dírami. Proti ojnicnímu čepý se může nacházet protizávaží. Klikovou hřídel je možné vyrobek jako dělenou z jednotlivých částí, které jsou posléze vzájemně spojeny lisováním nebo svařením. Po složení hřídele následuje obrobení. Složitější a náročnější je výroba velké klikové hřídele z jednoho kusu. Klikové hřídele bylo možné obrábět doposavad na soustružích typu SR od ŠMT. Pro obrábění ojnicních čepů bylo nutné soustruhy SR dovybavit speciálním rotačním příslušenstvím (Möll-aparát). Moderní konstrukce stroje S-MT s NC řízením pohybových os stroje umožňuje obrobení za jistých okolností klikové hřídele také.

Mezi metody obrábění velkých klikových hřídelí na stroji S-MT patří metoda soustružení, metoda rotačního frézování a metoda víceosého frézování. Metodou soustružení a rotačního frézování jsou obráběny ojnicní a osové čepý. Víceosým frézováním mohou být obráběny boky ramen, protizávaží a případná jejich sražení. Kotoučovou frézou je možné obrábět osové i ojnicní čepý. Metoda soustružení je oproti rotačnímu frézování méně produktivní metodou. Soustružením je možné dosáhnout vysoké přesnosti a jakosti povrchu. Pro hrubovací operace velkých hřídelí je vhodná metoda rotačního frézování. Dosažení vysoké jakosti povrchu při rotačním frézování se odvíjí od druhu nástroje, kvalité nástroje a poloze nástroje. Pomocí metody vrtání jsou vytvořeny mazací kanály a díry přírub. Pro dosažení vysoké tvarové přesnosti a jakosti povrchu čepů je možné pomocí příslušenství využít i metodu broušení. Obrábění tvarově složitých ploch klikové

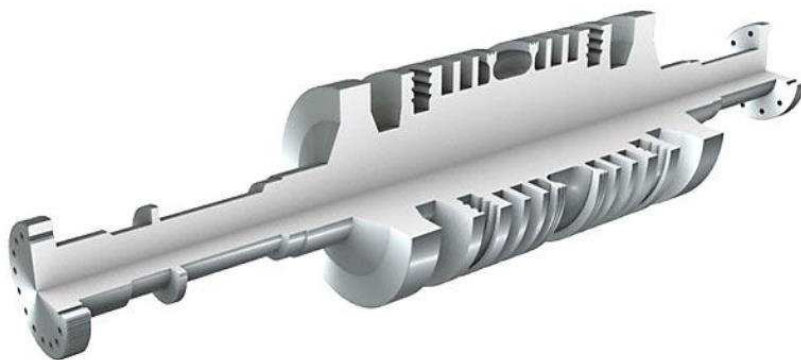


Obrázek 22: Kinematika rotačního frézování klikové hřídele [19]

hřídele je možné díky přesnému NC polohováním nástroje. Pohyb nástroje je řízen ve směru tří os x,y,z (obrázek 14). Pro názornost je kinematika rotačního frézování klikové hřídele znázorněna na obrázku 22. Soustružení a rotační frézování klikové hřídele je zobrazeno na obrázku 16 a 17.

Další charakteristické součásti, které je možné obrábět, jsou rotory turbín. Turbíny jsou tepelné stroje, přeměňující kinetickou, tepelnou a tlakovou energii tekutiny na energii mechanickou. Podle využití mohou turbíny nacházet uplatnění například v letectví jako letecké motory nebo jako pohony vrtulníků, velkých lodí a ponorek. Významné využití je především v energetickém průmyslu, kde parní turbíny pohánějí elektrické generátory.

Rotor turbíny je tvarově složitá hřídel. Kromě válcových rotačních ploch jsou na rotoru hřídele různé tvarové drážky, které zpravidla slouží k uchycení lopatek. Na obrázku 23 je vyobrazen rotor parní turbíny s typickými drážkami. Na obrázku 18 a 21 jsou vidět stromečkové drážky rotoru. Obrobení tvarových drážek rotoru je technologicky i časově náročné. Tvarově složitě drážky rotoru se vyhotovují obvykle víceosým frézováním. Drážky tvarově jednodušší je možné obrobit soustružením. Zhotovení stromečkových drážek klade vysoké požadavky na přesnost výroby. Důležité je přesné polohování obrobku i vedení nástroje. Možnost víceosého frézování na stroji S-MT umožňují efektivní a přesnou výrobu



Obrázek 23: Rotor parní turbíny [12]

těchto drážek. Frézování drážek frézou upnutou ve víceosé hlavě je zobrazeno na obrázku 18. Kromě metody frézování a soustružení je při výrobě rotorů turbín významně využita i metoda vrtání. Na obrobku turbíny je často velké množství děr, které je potřeba obrobit. Vrtáním se vytvářejí například díry pro kolíky, pomocí kterých jsou při montáži zajištěny lopatky, dále se vrtají otvory mazacích kanálů, díry přírub, vyvažovací otvory a jiné. V rámci dokončovací operace při výrobě turbín je aplikována i metoda broušení (obrázek 19).

Pro energetický průmysl je možné na stroji S-MT obrábět také rotory turboalternátorů. Asynchronní turboalternátory slouží v elektrárnách k přeměně mechanické energie dodané obyčejně parní turbínou na energii elektrickou. Rotory asynchronních turboalternátorů jsou dlouhé hřídele mající po obvodu řadu podélných drážek. V drážkách je následně umístěno budící vinutí rotoru. Při výrobě rotoru turboalternátoru je kladen důraz na přesnost výroby. Základní tvar hřídele je obroben soustružením nebo rotačním frézováním. Podélné drážky rotoru jsou obrobena frézováním. Pro efektivní výrobu drážek se používá kotoučová fréza.



Obrázek 24: Obrábění rotoru turboalternátoru [12]

Dalšími rozměrnými a tvarově náročnými součástmi jsou velké pastorkové hřídele. I tento typ součásti je možné na stroji S-MT vyrábět. Velké pastorkové hřídele jsou charakteristické tím, že součástí hřídele je určitý typ ozubení. Výroba těchto součástí je možná za předpokladu víceosého obrábění s NC řízením. Víceosé polohování nástroje spolu s přesným polohováním obrobku umožňuje obrábět hřídele s přímým ozubením, šikmým ozubením nebo i zakřiveným ozubením. Oblasti dodávek velkých pastorkových hřídelí jsou například těžební průmysl, všeobecné strojírenství – součásti velkých strojů, pohony ve válcovnách, pohony v cementárnách a další.



Obrázek 25: Pastorková hřídel s přímým ozubením [21]

3 Porovnání s konkurencí

3.1 Heinrich Georg GmbH Maschinenfabrik

Německá firma založená ve čtyřicátých letech 20. století Heinrichem Georgem má s produkcí výrobních strojů bohaté zkušenosti. Hlavní sídlo firmy je v německém městě Kreuztal. Firma Georg se v minulosti rozšířila o výrobní divize sídlící také ve Velké Británii, Spojených státech a Číně. Kromě obráběcích strojů najdeme v nabídce firmy stroje pro tváření a dělení materiálu.



Srovnatelným produktem ke stroji S-MT od ŠMT umožňující obrobení na jedno upnutí je typ GEORG Ultratum MC. V roce 2015 firma představila první verzi tohoto obráběcího centra. V této době byla firma první a jedinou firmou, která nabízela obráběcí centrum tohoto typu a nastavila tak standard v oblasti těžkých obráběcích strojů. V roce 2017 firma dodala celkem 3 kusy těchto strojů. Dva kusy najdeme v Německu, jeden kus firma dodala do Ruska a třetí stroj ultratum 3500 MC je dodán v březnu 2017 firmě Doosan Škoda Power v Plzni. Pro zajímavost bych uvedl, že ve firmě Doosan Škoda Power je stroj primárně určen k obrábění velkých rotorů turbín. Firma uvádí, že vlivem zkrácení časové náročnosti na operace soustružení o 30 % a zkrácení operace frézování a vrtání o 50 % včetně zkrácení vedlejších výrobních časů je celková doba zkrácena o 50 %, tedy přibližně o 500 hodin na jednom rotoru turbíny. Pořizovací cena stroje činila přibližně 180 mil. korun a návratnost se předpokládá do 5 let [22].



Obrázek 26: GEORG ultratum MC rok 2015 [22]

3.1.1 Porovnání S-MT se strojem GEORG ultratum

Koncepce stroje ultratum MC je velmi obdobná stroji S-MT. Oba dva stroje jsou v oblasti použití velmi univerzální. Na stroji GEORG ultratum je rovněž možné obrábět rotory turbín, zalomené hřídele, rotory turboalternátorů, hřídele převodovek a jiné. Kinematická struktura je se strojem od ŠMT také shodná. Stroj MC je vybaven frézovací věží s výsuvným smykadlem. Výměna nástrojů a výměna hlav je automatická. Konstruktivní řešení vřeteníku, lože a koníku vychází z předchozích



Obrázek 27: Některé detaily stroje MC [16]

osvědčených a nabízených řad strojů ultratrurn. Nově vyvinutá je speciální frézovací věž, kterou je stroj vybaven. Dále je stroj vybaven vlastním dvoubodovým odměřovacím systémem pro kontrolní měření obrobku. Pro dlouhé obrobky je stroj vybaven hydrostatickými podpěrami. Lineární vedení všech tří os stroje je hydrostatické, čímž je zajištěna vysoká přesnost a tuhost stroje. Výrobce vybavil stroj kompletním zakrytím tak, jako tomu je u stroje S-MT.



Obrázek 28: GORG ultratrurn MC – DOOSAN Škoda Power [16]

Parametr	S-MT S500MT	Ultratrurn MC
Hmotnost obrobku	250 t	250 t
Oběžný průměr	5000 mm	4000 mm
Délka obrobku	15 000 mm	25 000 mm
Výkon frézování	81 kW	94 kW
Max. moment frézování	4 500 Nm	7 000 Nm
Max. otáčky frézování	3000 ot./min	7 000 ot./min
Automatická výměna nástrojů	Ano	Ano

Tabulka 2: Srovnávací tabulka nejvyšších řad S500MT / ultratrurn MC

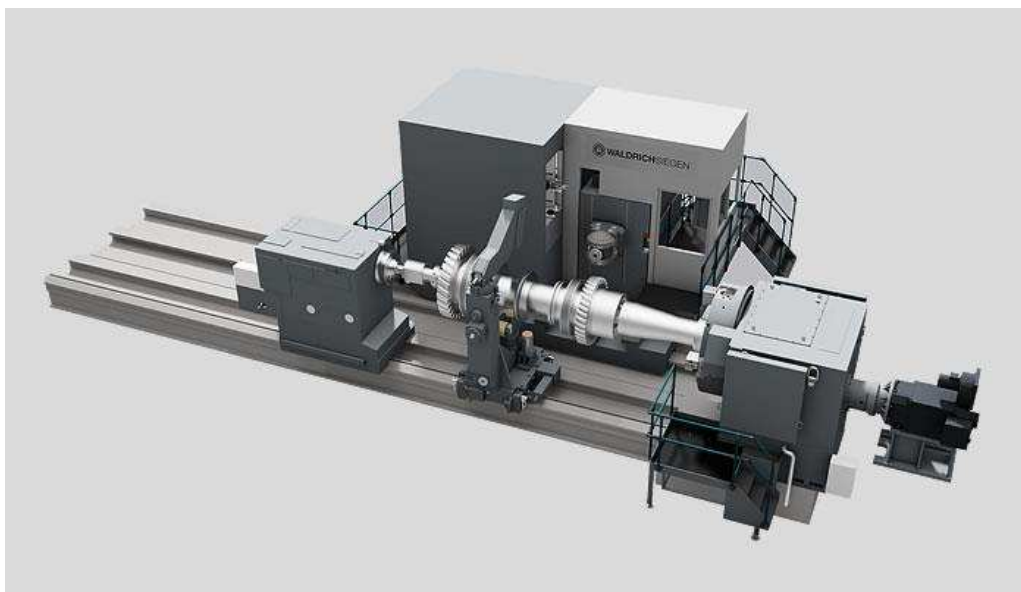
3.2 Waldrich Siegen GmbH & Co. KG

**WALDRICH SIEGEN**

Německá firma se sídlem v Burbachu působí na trhu výrobních strojů již více než 175 let.

Firma se zabývá vývojem a výrobou těžkých obráběcích strojů. V současné době má firma odloučené výrobní závody v USA, Číně a Indii. V mnoha zemích najdeme také obchodní zastoupení. V České republice má firma Waldrich Siegen pobočku v Hradci Králové. Firma nabízí stroje pro soustružení, frézování, broušení a stroje pro texturování. V nabídce firmy je možné nalézt například výkonné horizontální soustruhy ProfiTurn H o hmotnosti obrobku až 500 t s oběžným průměrem do 7 metrů a s délkou obrobku až 30 m. Další řadou těžkých horizontálních soustruhů jsou modifikované soustruhy ProfiTurn H. V tomto případě se jedná se o soustružnicko – frézovací centrum. Stroj je vybaven integrovanou frézovací hlavou. Stroj nepodporuje brousící a vrtací operace tak, jako je tomu u stroje S-MT.

Firma reaguje na poptávky trhu po strojích umožňující obrobení na jedno upnutí. Proto je nově nabízen produkt ProfiTurn M, který umožňuje komplexní obrábění s podporou frézování, broušení a vrtání.

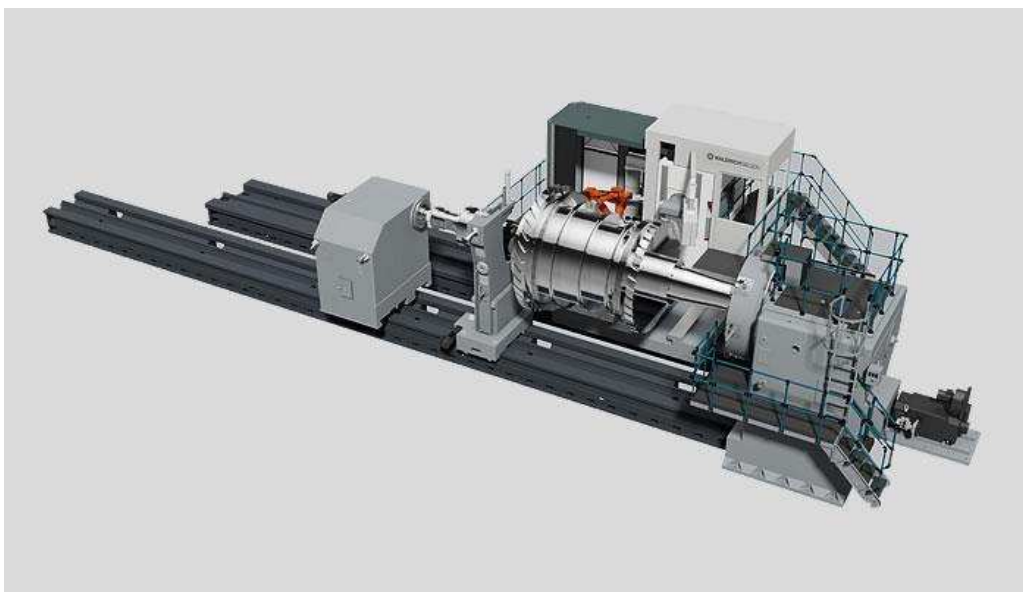


Obrázek 29: UltraTurn M jednoložové provedení [23]

3.2.1 Porovnání S-MT se strojem ProfiTurn M

Stroj je nabízen jako jednoložový nebo dvouložový. Menší řada strojů má jedno sloučené lože, po kterém se pohybuje koník a frézovací věž. Stroje nejvyšší řady mají dvě lože navzájem od sebe oddělené. Vedení stroje je hydrostatické. Většina komponent je modulární stavby a stroj lze přizpůsobit požadavkům zákazníka. Kinematika stroje je obdobná stroji S-MT a MC. Stroj je vybaven frézovací věží s podporou výměnných hlav Masterhead. Výměnné hlavy rozšiřují technologické možnosti stroje a umožňují upnout celou řadu nástrojů a provádět různé operace obrábění. Stroj je možné vybavit automatickou výměnou nástrojů

a hlav. Pohon hlavního vřetene je řešen jako Master-Slave. Kromě vysokého výkonu hlavního pohonu výrobce uvádí velmi vysokou přesnost polohování obrobku. Stroj je dále možné dovybavit hydrostatickými C opěrami nebo valivými opěrami a také vlastním měřením obrobku a nástroje. Stroj UltraTurn M není oproti stroji S-MT a MC vybaven krytováním. Z hlediska koncepce a výbavy je stroj srovnatelný s předchozími stroji. Modulární stavba umožňuje stroj nakonfigurovat podle potřeb zákazníka. Otázkou zůstává jen výsledná cena tohoto stroje.



Obrázek 30: UltraTurn M dvouložové provedení [23]

Parametr	S-MT S500MT	ProfiTurn M
Hmotnost obrobku	250 t	250 t
Oběžný průměr	5000 mm	4200 mm
Délka obrobku	15 000 mm	25 000 mm
Výkon soustružnické části	190 kW	310 kW
Výkon frézování	81 kW	80 kW
Max. moment frézování	4 500 Nm	7 000 Nm
Automatická výměna nástrojů	Ano	Ano

Tabulka 3: Srovnávací tabulka nejvyšších řad S500MT / ProfiTurn M

3.3 Weingärtner Maschinenbau GmbH



Rakouská firma založená v roce 1966 se sídlem ve městě Kirchham má s výrobou výrobních strojů více než 50-ti letou tradici. V portfoliu produktů nalezneme především řadu speciálních obráběcích center pro výrobu pohybových šroubů, vstřikovacích šroubů pro vstřikovací stroje, extrudérů a šnekových kompresorů. V nabídce firmy je také dokončovací broušící stroj rotačních součástí a kontrolní 3D měřicí stroj. Obráběcí centra jsou nabízena ve speciálních provedeních VARIO, PICK UP, PICK UP CLASSIC a MPMC. Poslední zmíněný typ MPMC je obráběcí centrum umožňující obrobení na jedno upnutí.

3.3.1 Porovnání S-MT se strojem MPMC

Stroj MPMC je vyvíjen a nabízen od roku 2007. V současné době je nabízen v šesti řadách. Na nejnižší řadě mpmc 600 je možné obrobek do hmotnosti 8 tun s maximální délkou 7000 mm a průměrem do 820 mm. Nejvyšší řada mpmc 2000 umožňuje obrobek do hmotnosti až 80 tun s maximální délkou 15000 mm a průměrem do 2050 mm. Stroje MPMC jsou ve srovnání s řadou strojů S-MT vhodné pro obrábění menších součástí. Předností strojů mpmc je, že nabízí řadu pokročilých technologií obrábění, díky kterým je možné obrábět tvarově specifické součásti, jako jsou například šrouby kompresorů, podvozkové nohy dopravních letadel, vstřikovací šrouby vstřikovacích strojů a jiné. Kromě těchto speciálních součástí lze obrábět klikové hřídele, rotory turbín i rotory turboalternátorů. Stroj je standardně vybaven automatickou výměnou nástrojů a příslušenství (pick up systém), je vybaven odměřovacím systémem a také kompletním zakrytím stroje.



Obrázek 31: MPMC firmy WEINGÄRTNER [25]



Obrázek 32: Technologie a možné produkty stroje mpmc [25]

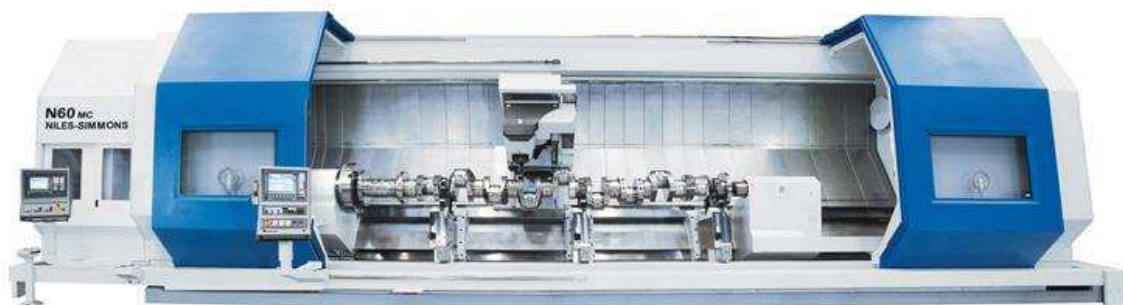
Parametr	S-MT S500MT	MPMC 2000
Hmotnost obrobku	250 t	80 t
Oběžný průměr	5000 mm	2050 mm
Délka obrobku	15 000 mm	15 000 mm
Výkon soustružnické části	190 kW	198 kW
Max. moment na vřetenu	250 kNm	131,5 kNm
Výkon frézování	81 kW	70 kW
Max. moment frézování	4 500 Nm	7 000 Nm
Max. otáčky frézování	3000 ot./min	3000 ot./min
Automatická výměna nástrojů	Ano	Ano

Tabulka 4: Srovnávací tabulka nejvyšších řad S500MT / MPMC 2000

3.4 Niles-Simmons Industrieanlagen GmbH



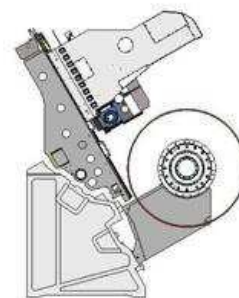
Počátky firmy NILES se datují již k roku 1833. Společnost NILES-SIMMONS Industrieanlagen GmbH byla založena až v roce 1992 a patří do skupiny NSH Group. Ve firmě NILES-SIMMONS v německém Chemnitzu jsou vyvíjeny a vyráběny CNC obráběcí stroje pro nejširší použití. V nabídce lze naléznout například soustružnická centra typu N, frézovací centra pro obrábění nástrojů a forem typu HPM, pětiosá obráběcí centra Nmill, speciální obráběcí stroje pro automobilový průmysl a také obráběcí centra typu MC pro kompletní obrábění větších součástí.



Obrázek 33: Obráběcí centrum N60MC [24]

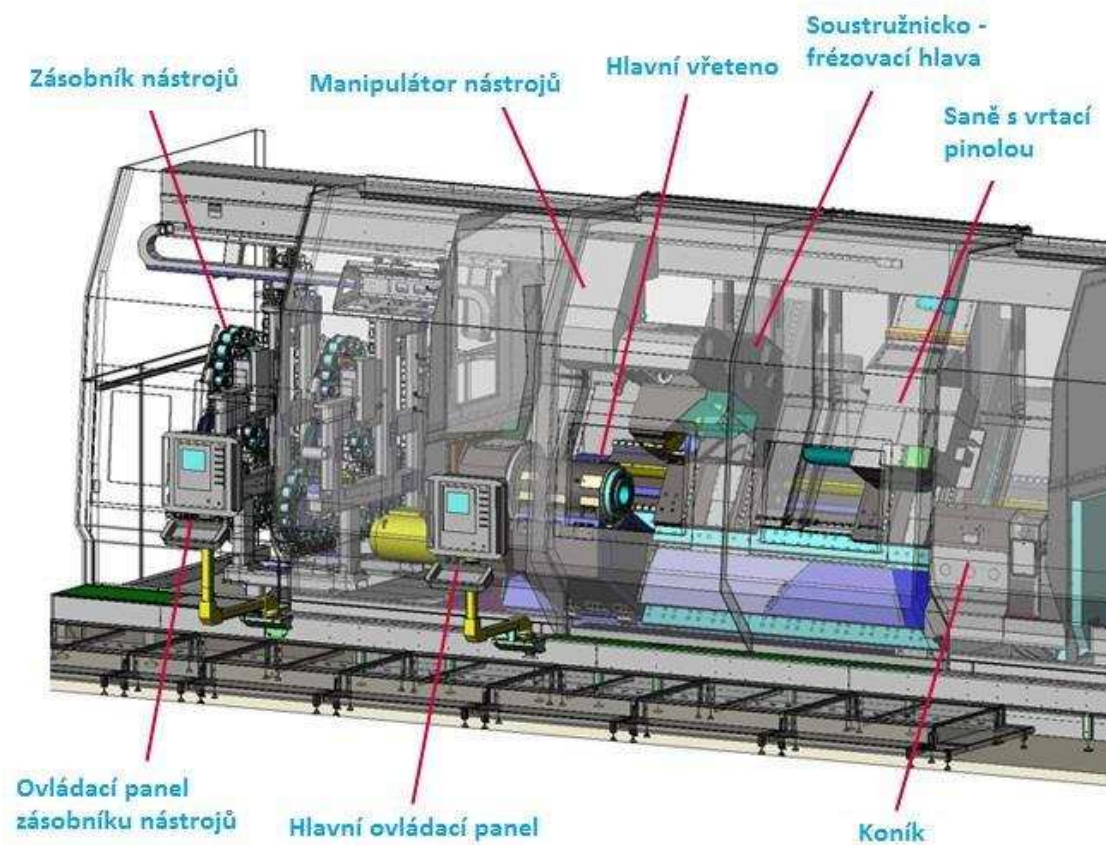
3.4.1 Porovnání S-MT se strojem N-MC

Obráběcí centrum od firmy NILES je nabízeno v pěti řadách. Jedná se o menší sofistikovaná obráběcí centra umožňující obrábění tvarově složitých součástí. Stroj může být vybaven více nezávislými speciálními soustružnicko – frézovacími hlavami. Stroj je vybaven robotickou výměnou nástrojů, kde jsou vlastní nástroje umístěné v řetězovém zásobníku. Na stroji je možné provádět operace soustružení, vrtání, hluboké vrtání, broušení, řezání závitů, vnitřní soustružení a jiné. Dále je stroj vybaven řízenými lunetami,



Obrázek 34: Prostorové uspořádání soustružnicko – frézovací hlavy vůči obrobku [24]

které mohou v pracovním prostoru stroje s obrobkem manipulovat. Stroj může být vybaven také dvěma vřeteníky nebo vřeteníkem a koníkem. Další možností je stroj dovybavit samostatným vrtacím vozíkem pro osové vrtání nebo vnitřní soustružení. Pro obrábění velkých klikových hřídel s velkým zdvihem ojnicního čepu je stroj možné vybavit hlubokoponornou frézovací hlavou s vysokým výkonem až 73 kW. Na stroji se mohou obrábět například klikové hřídele, díly pro letecký průmysl, hřídele, pastorkové hřídele, hřídele převodovek a jiné tvarově náročné součásti.



Obrázek 35: Schéma obráběcího centra N-MC [24]

Parametr	S-MT S200MT	N60MC
Hmotnost obrobku	70 t	-
Oběžný průměr	2000 mm	1500 mm
Délka obrobku	10 000 mm	7 500 mm
Výkon soustružnické části	95 kW	115 kW
Max. moment na vřetenu	140 kNm	130 kNm
Výkon frézování	64 kW	80 kW
Max. moment frézování	4 500 Nm	800 Nm
Max. otáčky frézování	3500 ot./min	3000 ot./min
Automatická výměna nástrojů	Ano	Ano

Tabulka 5: Srovnávací tabulka S200MT / N60MC

3.5 WFL Millturn Technologies GmbH & Co. KG



Firma WFL je rakouská firma založená roku 1993 zabývající se stroji umožňujícími obrobení na jedno upnutí. Hlavní sídlo firmy je ve městě Linz. Výrobní závody má firma kromě Evropy také v USA, Brazílii, Číně a Rusku. Obchodní zastoupení je v podstatě po celém světě. Hlavním produktem je řada obráběcích center, která je nabízena v devíti velikostních řadách Millturn. Již dva roky nabízená nejvyšší řada M200 umožňuje obrobit největší a nejhmotnější součásti ze strojů nabízených firmou WFL.



Obrázek 36: Obráběcí centrum M200 firmy WFL [26]

3.5.1 Porovnání S-MT se strojem M200

Obráběcí centrum firmy WFL je nabízeno ve vícero řadách a provedení. Na nejnižších řadách typu M30 je možné obrobit nejmenší obrobky o délce 2000 mm a o průměru 520 mm. Od roku 2015 firma nabízí nejvyšší řadu M200. Stroj není vybaven výměnnými hlavami. Nástroje jsou automaticky měněny a upínány do soustružnicko – frézovací – vrtačí a vyvrtávací hlavy. Stroj umožňuje provádět například operace vyvrtávání nebo vnitřního soustružení. Stroj je určen pro obrábění středně velkých rotačních součástí bez větších omezení. Výhodou stroje je i kompletní zakrytí a dobrá přístupnost k pracovnímu prostoru stroje. Srovnatelnou řadou z hlediska velikosti obrobku je řada S200MT od ŠMT.



Obrázek 37: Vyvrtávání otvorů [26]



Obrázek 38: Soustružnicko – frézovací nevýměnná hlava [26]

Parametr	S-MT S200MT	M200
Hmotnost obrobku	70 t	60 t
Oběžný průměr	2000 mm	2000 mm
Délka obrobku	10 000 mm	14 000 mm
Výkon soustružnické části	95 kW	180 kW
Max. moment na vřetenu	140 kNm	87 kNm
Výkon frézování	64 kW	80 kW
Max. moment frézování	4 500 Nm	1800 Nm
Max. otáčky frézování	3500 ot./min	3500 ot./min
Automatická výměna nástrojů	Ano	Ano

Tabulka 6: Srovnávací tabulka S200MT / M200

4 Návrh převodovky hlavního pohonu

Konstrukční návrh hlavního pohonu bude proveden pro první řadu stroje S150MT. Pro tuto řadu bude nejprve v úvodu stanoveno zatěžovací spektrum vřetene. Poté bude proveden kontrolní výpočet převodovky s vlastním návrhem skříně převodovky.

4.1 Výpočet výstupních parametrů na hlavním vřetení

Jedním z požadavků zadavatele tématu diplomové práce je výpočet výstupních parametrů na vřetení soustružnického vřeteníku pro každou ze čtyř řad nabízeného stroje S-MT. Vstupní informací jsou typy motorů Siemens a informace k převodovkám pro každou řadu stroje.

Řada	Typ motoru	Jmenovitý výkon [kW]	Jmenovité otáčky [ot./min]	Max. otáčky [ot./min]
S150MT	1PH8224-XXBXX	38	500	4500
S200MT	1PH8226-XXBXX	48	500	4500
S320MT	1PH8226-XXCXX	92	1000	4500
S500MT	1PH8226-XXCXX	92	1000	4500

Tabulka 7: Zadané parametry motorů

Řada	Počet stupňů	i12	i34	i56	irs
S150MT	2	2,242	3,909	-	6,458
S200MT	2	2,242	3,909	-	9,048
S320MT	3	3,121	3,097	1	15
S500MT	3	3,121	3,097	1	15

Tabulka 8: Zadané parametry k převodovkám

Výpočet výstupních parametrů byl proveden v programu Mathcad. Z důvodu větší obsáhlosti je uveden v příloze [P1].

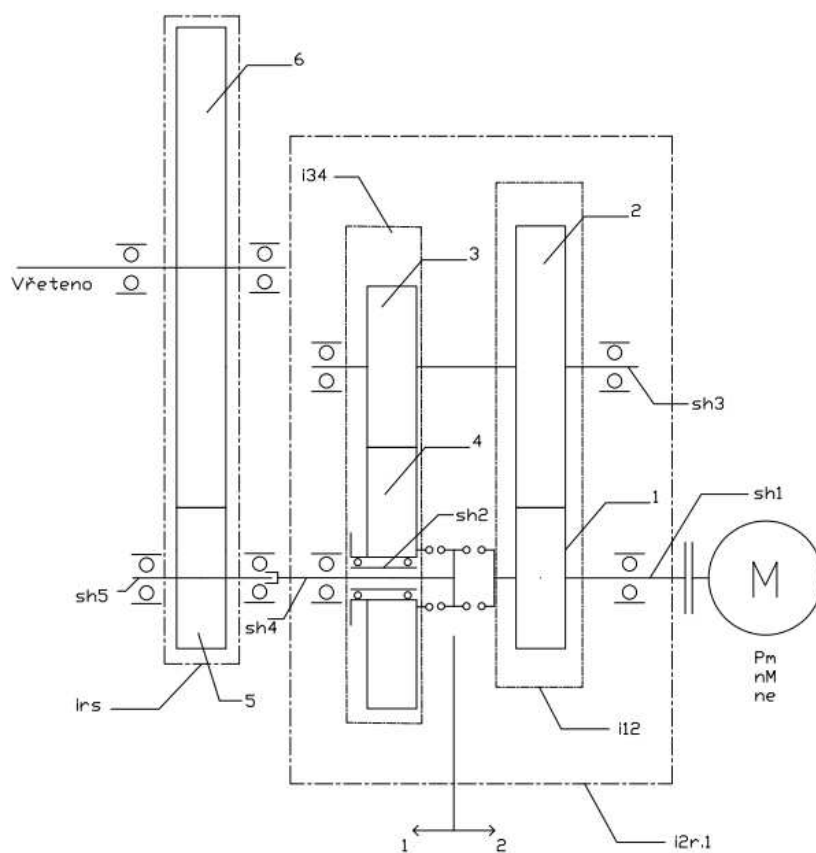
[P1] příloha č. 1 – Mathcad, Výpočet výstupních parametrů			
Řada	Max. výkon [kW]	Max. otáčky [ot./min]	Max. moment [kNm]
S150MT	71,5	697	77,3
S200MT	90,4	497	136,8
S320MT	173,1	300	239,7
S500MT	173,1	300	239,7

Tabulka 9: Výstupní parametry na vřetenu [P1]

[P1] příloha č. 1 – Mathcad, Výpočet výstupních parametrů											
Řada	Jmenovité otáčky jednotlivých stupňů [ot./min]			Max. otáčky jednotlivých stupňů [ot./min]			Max. moment jednotlivých stupňů [kNm]			Mezistupňový pokles	
	1. st.	2. st.	3. st.	1. st.	2. st.	3. st.	1. st.	2. st.	3. st.	1. – 2. st.	2. – 3. st.
S150MT	8.8	77.4	-	79.5	696.8	-	77.32	8.82	-	0.974	-
S200MT	6.3	55.3	-	56.7	497.3	-	136.84	15.61	-	0.974	-
S320MT	6.9	21.4	66.7	31	96.1	300	239.77	77.42	24.81	0.688	0.694
S500MT	6.9	21.4	66.7	31	96.1	300	239.77	77.42	24.81	0.688	0.694

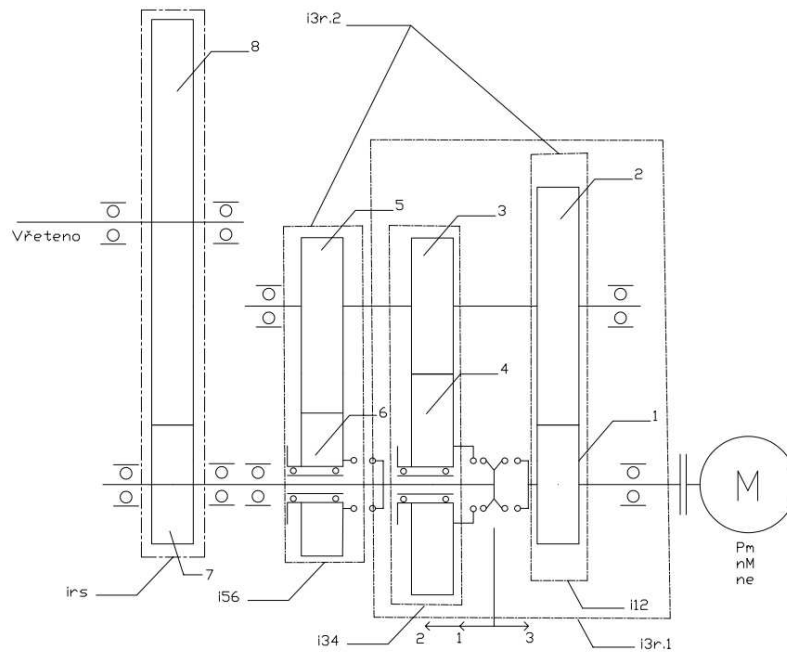
Tabulka 10: Parametry v jednotlivých stupních [P1]

4.1.1 Schéma dvoustupňové převodovky



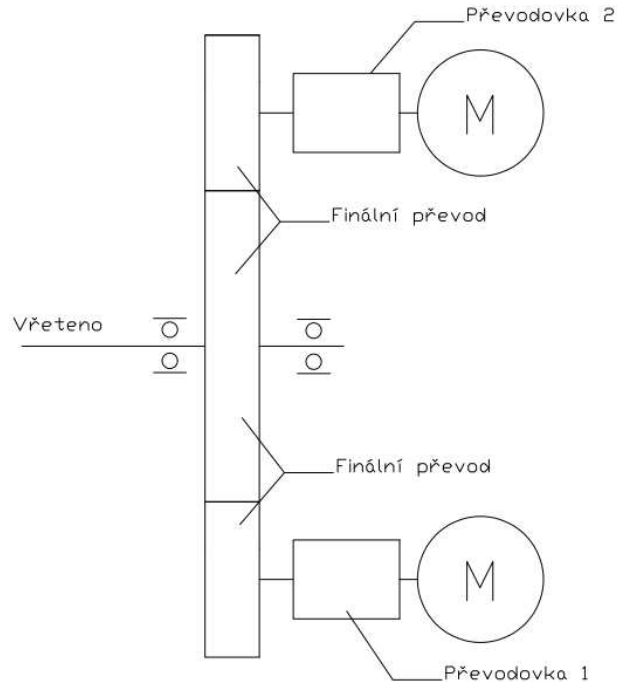
Obrázek 39: Schéma dvoustupňové převodovky

4.1.2 Schéma třístupňové převodovky



Obrázek 40: Schéma třístupňové převodovky

4.1.3 Úplné schéma hlavního pohonu



Obrázek 41: Schéma hlavního pohonu soustružnického vřeteníku (MASTER-SLAVE)

4.2 Stanovení zatěžovacího spektra

Obráběcí stroj není v provozu vystaven pouze jednomu zátěžnému stavu. Zátěžných stavů je obvykle celá řada. Jednotlivé zátěžné stavy mohou být popsány řadou charakteristických parametrů. Souhrn možných zátěžných stavů pak představuje zatěžovací spektrum. Každý zátěžný stav je charakteristický prováděnou technologickou operací, rozdílným spektrem složek řezné síly, rozdílnými otáčkami obrobku, smyslem rotace obrobku a vlastní tíhou obrobku. Zatěžovací spektrum se stanovuje především z důvodu optimálního dimenzování částí převodovky, finálního převodu, vřetene a jeho uložení. Pokud bychom uvažovali, že stroj bude pro předpokládanou celkovou dobu chodu pracovat při maximálně možném výkonu a maximálním zatížení, došlo by ke značnému předdimenzování. Toto předdimenzování zapříčiní obecně větší rozměry, větší hmotnost a také větší výrobní náklady.

4.2.1 Základní vstupní parametry zatěžovacího spektra

Parametr	Hodnota	Stanovení hodnoty	
P	Celkový výkon motorů hl. pohonu	71,5 kW	viz. tabulka 9
F_{QM}	Maximální tíha obrobku	-320 kN	požadovaná hodnota S150MT
M_L	Max. omezný moment	77,3 kNm	viz. tabulka 9, výpočet příloha 1 [P1]
n_L	Otáčky vřetene při omezném momentu	8,31 ot./min	$n_L = \frac{P \cdot n_1}{2 \cdot \pi \cdot M_L}$
n_M	Max. otáčky vřetene	697 ot./min	viz. tabulka 9, výpočet příloha 1 [P1]
F_M	Max. tečná složka řezné síly	70 kN	$F_M = \frac{P}{v_c}$
T_1	Doba běhu s nástrojem v řezu	14 000 hod	$T_1 = \tau_{1c} \cdot T_c$
T_2	Doba běhu naprázdno	26 000 hod	$T_2 = T_c - T_1$
T_c	Celková doba běhu	40 000 hod	$T_c = T_1 + T_2$

Tabulka 11: Vstupní parametry zatěžovacího spektra

Spektrum řezné síly

Pro každou uvažovanou technologickou operaci se stanoví tři složky řezné síly. Zobrazení složek sil je na obrázku 42. Dále jsou stanoveny pro příslušnou operaci otáčky, při kterých je uvažovaná operace prováděna.

- Tečná složka síly se určí na základě stanoveného součinitele řezné síly k_F (tabulka 11) a maximální tečné složky síly pro příslušnou technologickou operaci.

$$F_i = k_{Fi} \cdot F_M$$

- Radiální složka řezné síly

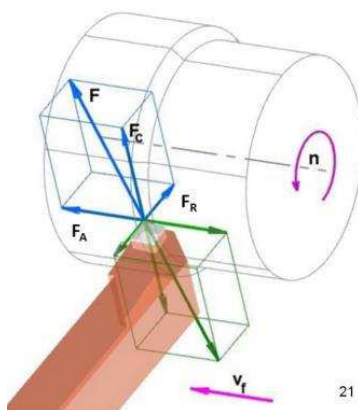
$$F_{Ri} = 0.6 \cdot F_i$$

- Axiální složka řezné síly

$$F_{Ai} = F_{Ri}$$

Operace	Součinitel řezné síly k_f	Směr rotace obrobku	Otáčky obrobku
1. hrubování	1	Normální	n_L
Zapichování	-0,5	Opačný	$-n_L$
Dokončování při F_{QM}	0	Normální	$0,2 \cdot n_L$
Dokončování při n_M			n_M
2. hrubování	0	Normální	$\delta_V \cdot n_L$
Letmé soustružení	0,25	Normální	$\frac{n_L}{k_f}$

Tabulka 12: Součinitel řezné síly a otáčky obrobku



Obrázek 42: Složky řezné síly (pro normální soustružení) [2]

Spektrum zatížení od tíhy obrobku

Hmotnost obrobku se v posloupnosti technologických operací mění. Obecně je hmotnost obrobku vlivem odebíraného materiálu s každou následnou operací nižší. Pro výpočet zatížení včetně od tíhy obrobku je sestaveno spektrum tíhy obrobku.

$$F_{QDi} = \frac{F_{QM}}{2} \cdot k_Q$$

Operace	Součinitel stavu tíhy k_Q
Obrábění při letném uložení	0,1
Dokončování při n_M	0,2
2. hrubování – nástroj v řezu	0,3
2. hrubování – bez obrábění	
1. hrubování – nástroj v řezu	0,4
1. hrubování – bez obrábění	
Zapichování – nástroj v řezu	1
Zapichování – bez obrábění	
Dokončování při F_{QM}	

Tabulka 13: Součinitel tíhy obrobku [P2]

Axiální zatížení vřetene od předeprnutí na koníku

Pro každý zátěžný stav (1-9) je stanovena upínací síla koníka. Upínací síla se stanovuje pro tři možné situace:

- 1) soustružení ke koníku

$$F_{hK} = F_V \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + 0,3 \cdot F_i \quad , \text{ kde } F_V = \sqrt{\left(F_{QDi} + \frac{F_i}{2}\right)^2 + 0,09 \cdot (F_i)^2}$$

- 2) soustružení ke vřeteníku

$$F_{hV} = F_V \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \quad , \text{ kde } F_V = \sqrt{(F_{QDi} + F_i)^2 + 0,36 \cdot (F_i)^2}$$

- 3) bez nástroje v řezu (běh naprázdno)

$$F_{hD} = |F_{QDi}| \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$$

Pro operaci zapichování je nutné uvažovat zatížení ve směru přísuvu nástroje.

$$F_{hZ} = F_V \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \quad , \text{ kde } F_V = \sqrt{(F_{QDi} + F_i)^2 + 0,36 \cdot (F_i)^2}$$

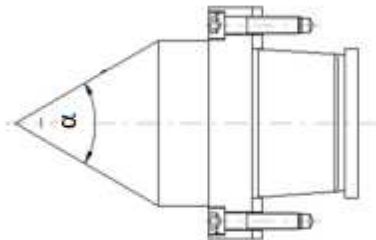
Bezpečná upínací síla koníka poté představuje maximální hodnotu ze tří (u operace zapichování ze čtyř) stavů.

$$F_{aK} = \max(F_{hK}, F_{hV}, F_{hD})$$

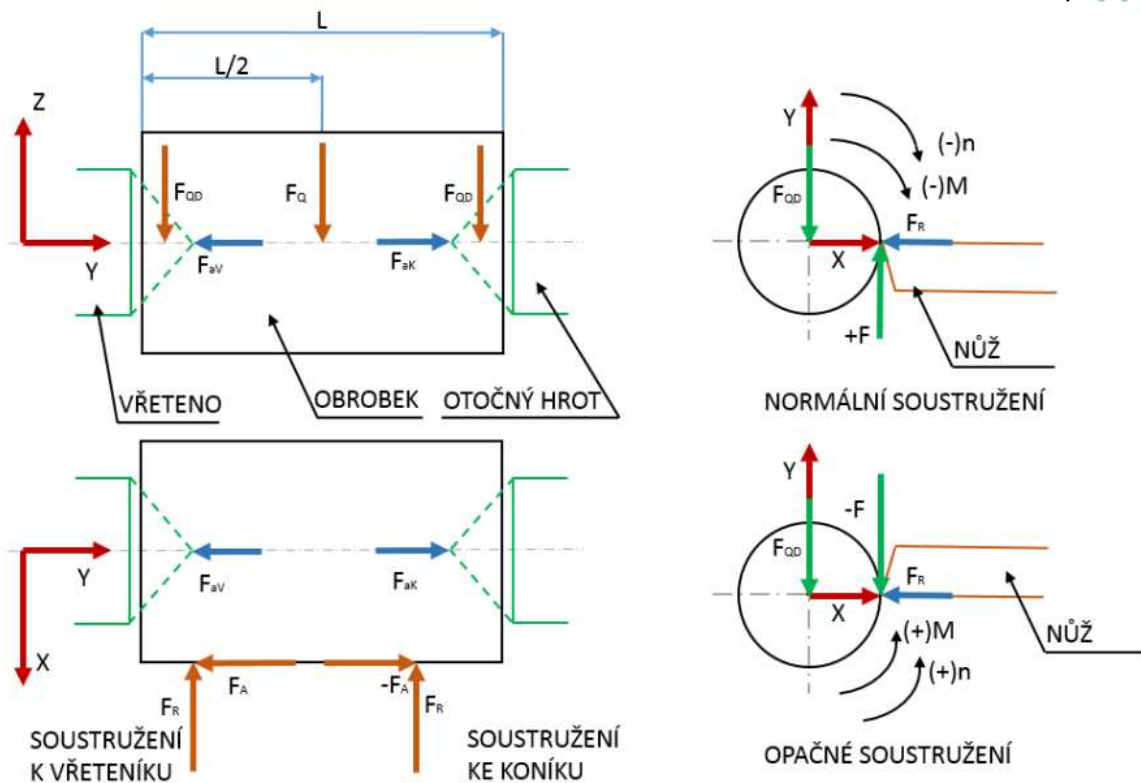
$$F_{aK} = \max(F_{hK}, F_{hV}, F_{hD}, F_{hZ})$$

Maximální hodnota potřebná k předeprnutí na hrotu koníka pro příslušný zátěžný stav představuje spolu s axiální složkou řezné síly F_y axiální zatížení vřetene F_{aV} .

$$F_{aV} = (-F_{aK0}) + F_y$$



Obrázek 43: Hrot na straně vřeteníku [2]



Obrázek 44: Schéma zatížení vřetene a otočného hrotu [2]

4.2.2 Výstupní hodnoty zatěžovacího spektra

Spektrum centrických sil je popsáno třemi složkami sil. Radiální složka F_x je určena z radiální složky řezné síly. Radiální složka F_z je dána kombinací tíhy obrobku a tečné složky řezné síly. Axiální složka síly je dána, jak již bylo zmíněno, axiální složkou řezné síly a hodnotou upínací síly.

Hnací moment věnce od pastorku $M_{10.9}$ je určen pro každý zátěžný stav dle příslušného koeficientu řezné síly k_f . Hodnoty koeficientů řezné síly jsou určeny v tabulce 12.

Spektrum otáček n_s je určeno pro každý zátěžný stav podle tabulky 12.

Celková doba běhu T_C je dána součtem doby, kdy je nástroj v řezu T_1 , a doby běhu naprázdno T_2 . Složka T_1 a složka T_2 je v určitém poměru přiřazena pro každý zátěžný stav a je tak stanovena předpokládaná doba běhu T_V pro každý zátěžný stav.

Poměrná doba q je poté určena:

$$q_i = \frac{T_{vi}}{T_C}$$

[P2] Příloha 2 – Mathcad, Výpočet spektra zatížení							
Stav	SPEKTRUM						
	centrických sil			momentů	otáček	doby běhu	poměrné doby běhu
	Radiální F_x [kN]	Radiální F_z [kN]	Axiální F_{av} [kN]	$M_{10.9}$ [kNm]	n_8 [min ⁻¹]	T_v [hod]	q_T [-]
1	-42	6	-106	77,3	8,3	2800	0,07
2	0	-64	-64	0	8,3	5200	0,13
3	-21	-195	-196,128	-38,65	-8,3	1400	0,035
4	0	-160	-196,128	0	-8,3	2600	0,065
5	0	-160	-160	0	139,4	10000	0,25
6	0	-32	-64	0	697	4000	0,1
7	-4,8	-40	-52,8	8,834	66,5	4200	0,105
8	0	-48	-48	0	66,5	7800	0,195
9	-10,5	1,5	10,5	19,325	33,2	2000	0,05

Tabulka 14: Zatěžovací spektrum [P2]

Pro potřeby výpočtového programu KISSsoft jsou stanoveny poměrné hodnoty spektra momentů a otáček.

$$q_{M_{10.9}} = \frac{M_{10.9i}}{M_{10.9}}$$

$$q_{n8} = \frac{n_{8i}}{n_8}$$

Při stavu 5 a 6 je zařazen 2. rychlostní stupeň. Pro 5. a 6. zatěžovací stav platí:

$$q_{n8} = \frac{n_{8i}}{n_8 \cdot i_2}$$

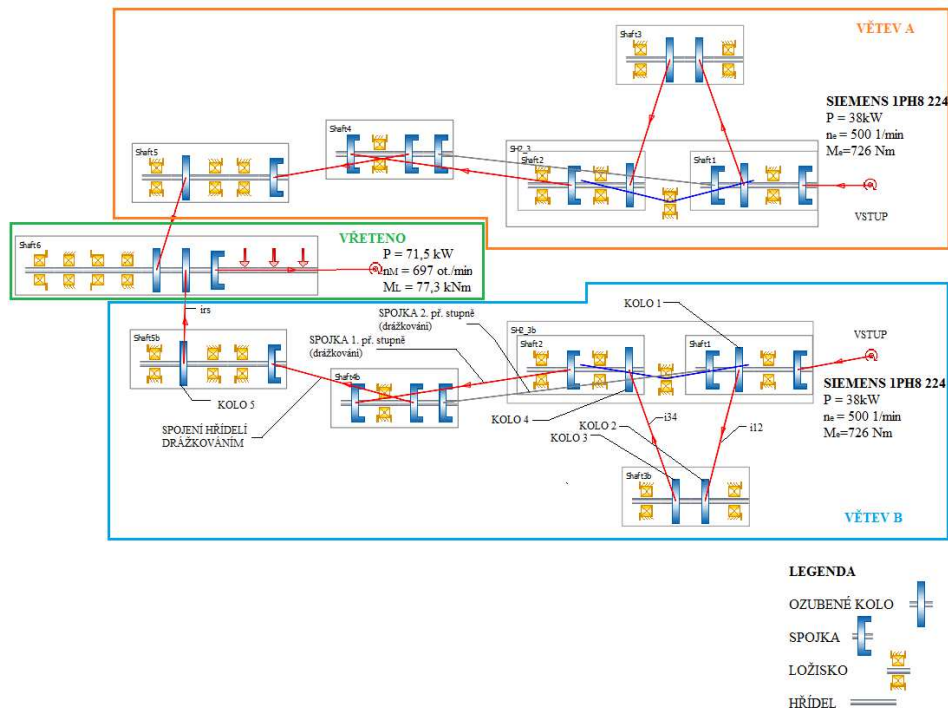
[P2] Příloha 2 – Mathcad, Výpočet spektra zatížení			
Stav	SPEKTRUM poměrných hodnot		
	momentů	otáček	poměrné doby běhu
	$q_{M_{10.9}}$ [kNm]	q_{n8} [min ⁻¹]	q_T [-]
1	1	1	0,07
2	0	1	0,13
3	-0,5	-1	0,035
4	0	-1	0,065
5	0	2,6	0,25
6	0	12,99	0,1
7	0,114	8	0,105
8	0	8	0,195
9	0,25	4	0,05

Tabulka 15: Zatěžovací spektrum poměrných hodnot [P2]

Úplný výpočet zatěžovacího spektra byl proveden v programu doc. Zdeňka Hudce, CSc. a je uveden v příloze č. 2 [P2].

4.3 Výpočet převodovky

Výpočet a optimalizace převodovky hlavního pohonu je provedena dle typizovaného programu v softwaru KISSsys. Schéma úplného hlavního pohonu je uvedeno na obrázku 45. Hlavní pohon je řešen jako MASTER – SLAVE a je tvořen dvěma větvemi A a B, kde každá větev představuje jednu dvoustupňovou převodovku. Obě převodovky jsou totožné a společně zabírají do věnce vřetene. Pohon převodovky zajišťuje asynchronní třífázový motor typu SIEMENS IPH8 224.



Obrázek 45: Schéma hlavního pohonu v programu KISSsoft

Vstupem jsou parametry hnacího elektromotoru, tedy výkon, jmenovité otáčky nebo výkon a jmenovitý moment. Tyto parametry jsou přiřazeny na vstupní prvek – spojku. Parametry elektromotoru jsou uvedeny v tabulce 7. Dále je definován výstupní člen. Výstupním členem je v tomto případě vlastní vřeteno. Po stanovení a zadání převodových poměrů převodů je možné ověřit výstupní (požadované) parametry na vřeteno s vypočtenými parametry uvedenými v tabulce 9.

Dále je definováno spektrum zatížení. Výpočet spektra zatížení je uveden v příloze č. 2 [P2]. Spektrum zatížení je definováno pro devět zátěžných stavů. Ke každému zátěžnému stavu jsou uvedeny axiální a dvě radiální složky sil působící na hrot vřetene, dále se pro každý stav stanoví poměrné otáčky, poměrný moment, poměrná doba běhu a příslušný převodový stupeň.

Aby ve výpočtu byly uvažovány oba převodové stupně a jejich vliv, nadefinuje se tabulka řazení převodových stupňů, ve které se pro každý stupeň určí aktivní nebo neaktivní prvky převodovky.

4.3.1 Návrh a kontrola ozubených kol

Výpočet je proveden v programu KISSsys [P4]. Výstupní hodnoty výpočtu jsou uvedeny v protokolu [P3] příloha č.3, „Results.csv“.

Ozubené soukolí 1-2

[P3] Příloha č. 3, „Results.csv“				
[P4] Příloha č. 4, KISSsys „s150mt.ks“				
Parametr			Kolo 1	Kolo 2
Materiál [P19]			17CrNiMo6	17CrNiMo6
Počet zubů	z	-	33	74
Převodový poměr	i_{12}	-	2,242	
Modul	m	mm	3,5	3,5
Úhel záběru	α	°	20	20
Úhel sklonu	β	°	22	22
Průměr roztečné kružnice	d	mm	124,571	279,340
Průměr hlavové kružnice	d_a	mm	131,441	290,4229
Průměr patní kružnice	d_f	mm	115,821	274,809
Korekce	x	mm	0	0,603
Osová vzdálenost	a	mm	204	
Šířka kola	b	mm	50	50
Kontrolní výpočet				
Výkon	P	kW	38,013	
Otáčky	n	min ⁻¹	500	223
Moment	M	Nm	726	1628
Bezpečnost na ohyb	SF	-	3,714	3,706
Bezpečnost na ohyb	SH	-	2,155	2,299
Nejméně příznivý zatěžovací stav	Zatěžovací stav 1			

Tabulka 16: Parametry soukolí 1-2 [P3, P4]

Ozubené soukolí 3-4

[P3] Příloha č. 3, „Results.csv“				
[P4] Příloha č. 4, KISSsys „s150mt.ks“				
Parametr			Kolo 3	Kolo 4
Materiál [P19]			17CrNiMo6	17CrNiMo6
Počet zubů	z	-	22	86
Převodový poměr	i_{12}	-	3,909	
Modul	m	mm	3,5	3,5
Úhel záběru	α	°	20	20
Úhel sklonu	β	°	22	22
Průměr roztečné kružnice	d	mm	83,047	324,639
Průměr hlavové kružnice	d_a	mm	90,362	331,639
Průměr patní kružnice	d_f	mm	74,612	315,889
Korekce	x	mm	0,045	0
Osová vzdálenost	a	mm	204	
Šířka kola	b	mm	90	90
Kontrolní výpočet				
Výkon	P	kW	37,253	
Otáčky	n	min ⁻¹	223	57
Moment	M	Nm	1595,4	6236,7
Bezpečnost na ohyb	SF	-	2,262	2,215
Bezpečnost na ohyb	SH	-	1,534	1,718
Nejméně příznivý zatěžovací stav	Zatěžovací stav 1			

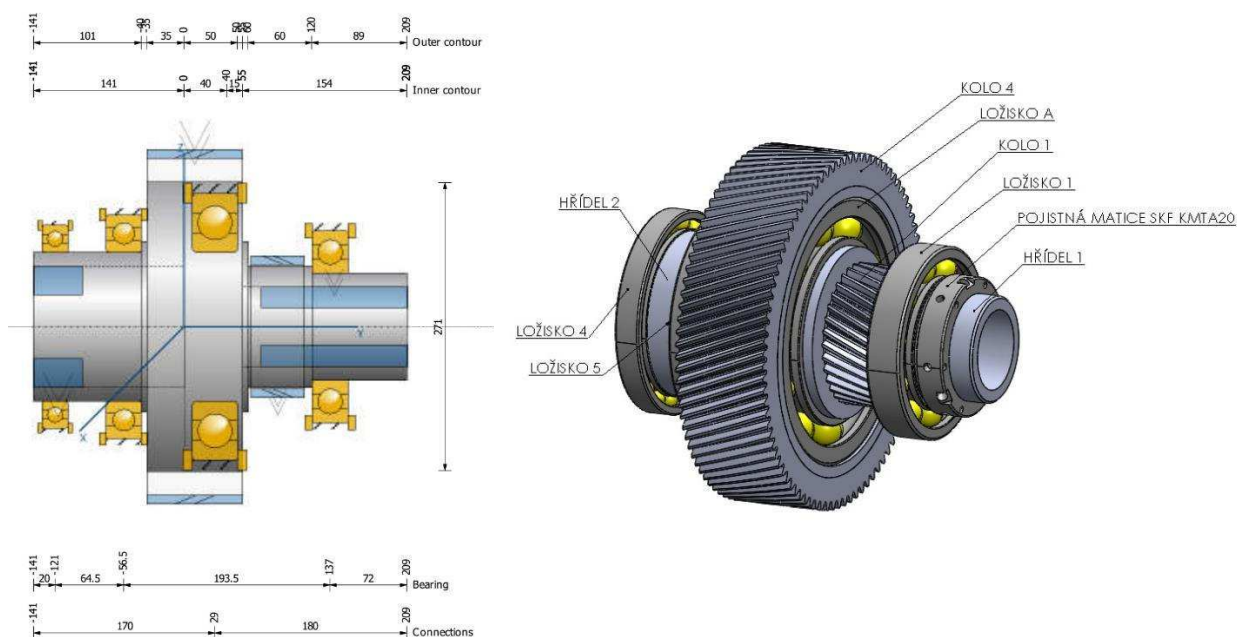
Tabulka 17: Parametry soukolí 3-4 [P3, P4]

4.3.2 Návrh a kontrola hřídelí a uložení

Výpočet hřídelí a uložení je proveden v programu KISSsys. Výstupní hodnoty výpočtu jsou uvedeny v protokolu přílohy č.3 [P3]. Z hlediska kontrolního výpočtu jsou posuzovány hodnoty maximálního posunutí v záběru ozubených kol, sklon hřídele v místě ozubeného kola a sklon hřídele v místě uložení. Dovolené hodnoty maximálního posunutí a sklonu hřídele jsou uvedeny v příloze č. 6 [P6]. Hřídel je kontrolována také z hlediska pevnosti tak, že je stanoveno a porovnáno maximální redukované napětí vůči mezi kluzu dle materiálu hřídele.

4.3.3 Souhmotí hřídele 1 a hřídele 2

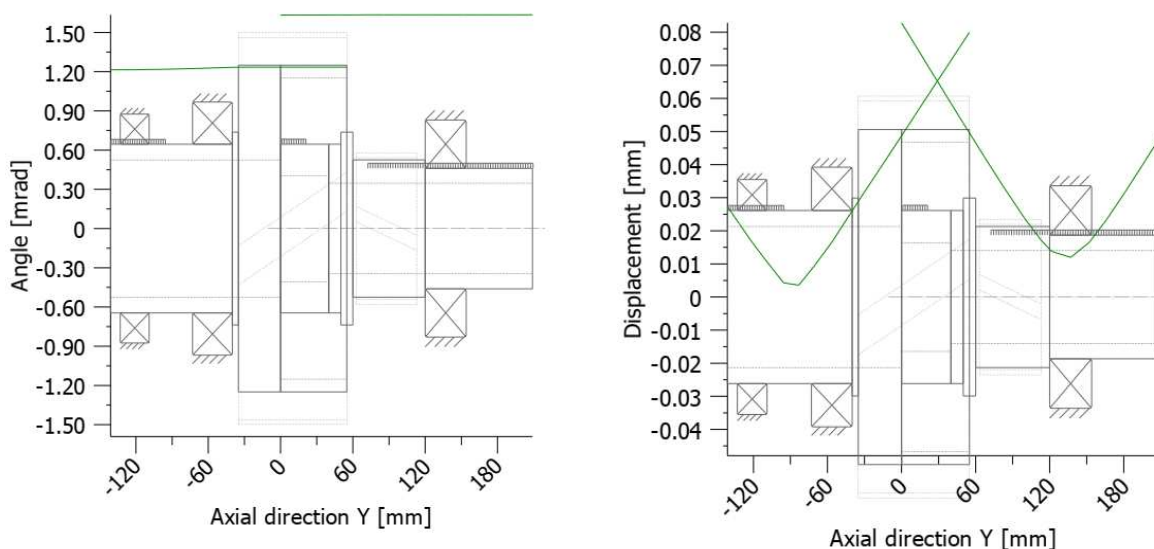
Vstupní hřídel 1 a hřídel 2 jsou vzájemně spojeny rotačním uložením pomocí jednořadého kuličkového ložiska (LOŽISKO A). Hřídel 1 je uložena v jednořadém kuličkovém ložisku (LOŽISKO 1). Hřídel 2 je uložena ve dvou jednořadých kuličkových ložiskách (LOŽISKO 4 a 5). Obě hřídele mají průchozí středový otvor. Ve středové díře hřídele 1 je vytvořena drážka pro těsné pero s rozměry dle výrobce elektromotoru. Průměr hřídele elektromotoru 1PH8 224 má rozměr 75m6. V hřídeli 2 je vytvořeno evolventní drážkování, které představuje spojení hřídele 2 a hřídele 4 v případě zařazeného 2. rychlostního stupně.



Obrázek 46: Sestava souhmotí hřídele 1 a hřídele 2

[P3] Příloha č. 3, „Results.csv“				
[P4] Příloha č. 4, KISSsys „s150mt.ks“				
Parametr			Hřídel 1	Hřídel 2
Materiál dle ČSN [P19]			12 050	12 050
Mez kluzu	Re	MPa	370	370
Kontrolní výpočet				
Maximální redukované napětí	σ_{red}	MPa	23,2	52,5
Součinitel bezpečnosti proti mezi kluzu	s_k	-	15,95	7,04
Posunutí hřídele v místě záběru kola 1	u_{k1}	mm	0,032	
Posunutí hřídele v místě záběru kola 4	u_{k2}	mm	0,055	
Sklon v místě kola 1	φ_{k1}	mrad	1,6	
Sklon v místě kola 4	φ_{k4}	mrad	1,2	
Hodnocení	VYHOVUJE			

Tabulka 18: Parametry hřídele 1 a hřídele 2 [P3, P4]



Obrázek 47: Sklon a posunutí hřídele 1 a hřídele 2 v rovině x-z [P4]

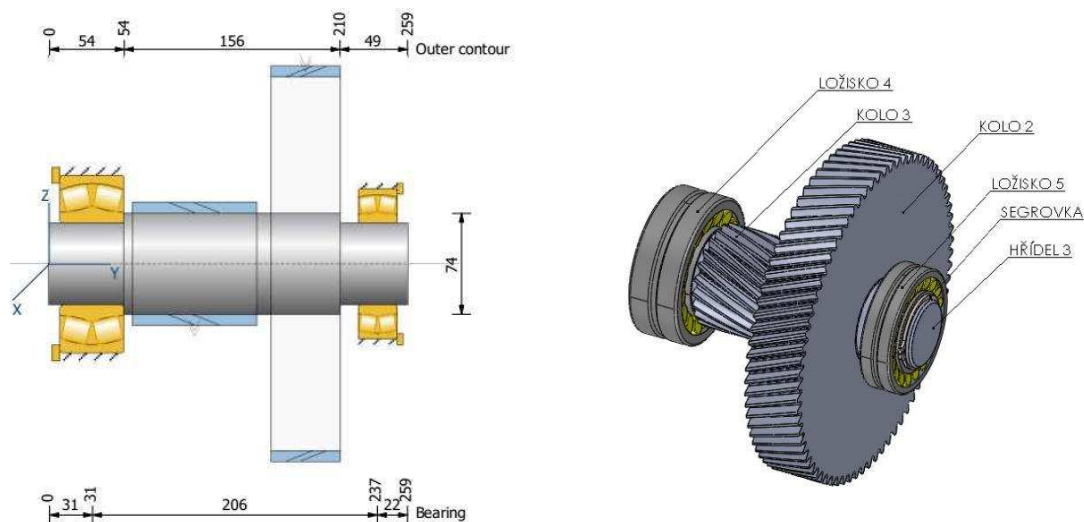
[P3] Příloha č. 3, „Results.csv“						
[P4] Příloha č. 4, KISSsys „s150mt.ks“						
Parametr			LOŽISKO 1	LOŽISKO A	LOŽISKO 4	LOŽISKO 5
Typ			SKF 6220	SKF 6228	SKF 61928	SKF 6028
Vnitřní průměr	d	mm	100	140	140	140
Vnější průměr	D	mm	180	250	190	210
Šířka	B	mm	34	42	24	33
Kontrolní výpočet						
Trvanlivost	L_h	hod	199718	68846	68656	59377

Součinitel statické bezpečnosti	s_0	-	6,377	9,39	3,30	2,60
Součinitel bezpečnosti k trvanlivosti	s_{Lh}	-	4,99	1,72	2,14	1,48
Sklon v místě ložiska	φ_l	mrاد	0,17	0,13	0,12	0,12
Hodnocení	VYHOVUJÍ					

Tabulka 19: Parametry ložisek pro hřídel 1 a hřídel 2 [P3, P4]

4.3.4 Souhmotí hřídele 3

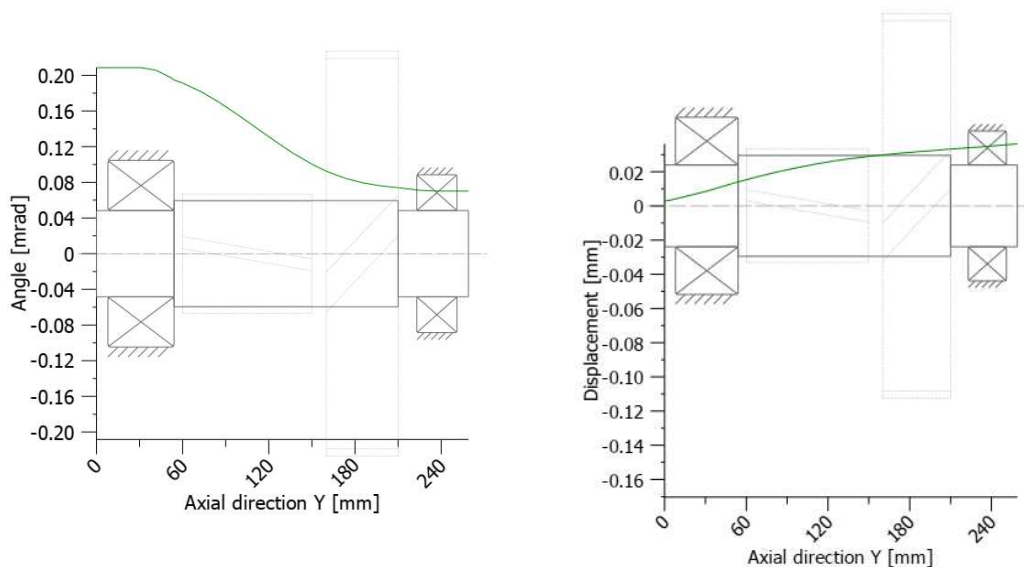
Předlohová hřídel 3 je uložena ve dvou dvouřadých soudečkových ložiscích. Ozubené kolo 3 je spojeno s hřídelí pomocí drážkování a ozubené kolo 4 tvoří součást hřídele.



Obrázek 48: Sestava souhmotí hřídele 3

[P3] Příloha č. 3, „Results.csv“			
[P4] Příloha č. 4, KISSsys „s150mt.ks“			
Parametr			Hřídel 3
Materiál dle ČSN [P19]			12 050
Mez kluzu	Re	MPa	370
Kontrolní výpočet			
Maximální redukované napětí	σ_{red}	MPa	52
Součinitel bezpečnosti proti mezi kluzu	s_k	-	7,12
Posunutí hřídele v místě záběru kola 2	u_{k2}	mm	0,032
Posunutí hřídele v místě záběru kola 3	u_{k3}	mm	0,022
Sklon v místě kola 2	φ_{k2}	mrاد	0,08
Sklon v místě kola 3	φ_{k3}	mrاد	0,14
Hodnocení	VYHOVUJE		

Tabulka 20: Parametry hřídele 3 [P3, P4]



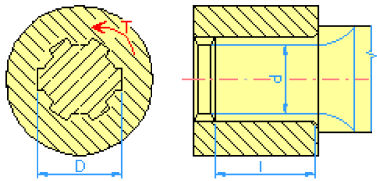
Obrázek 49: Sklon a posunutí hřídele 3 v rovině x-z [P4]

[P3] Příloha č. 3, „Results.csv“				
[P4] Příloha č. 4, KISSsys „s150mt.ks“				
Parametr			LOŽISKO 4	LOŽISKO 5
Typ			SKF 22313 E/VA405	SKF 22212 EK
Vnitřní průměr	d	mm	60	60
Vnější průměr	D	mm	130	110
Šířka	B	mm	46	28
Kontrolní výpočet				
Trvanlivost	L_h	hod	113 675	105 930
Součinitel statické bezpečnosti	s_0	-	5,236	4,491
Součinitel bezpečnosti k trvanlivosti	s_{Lh}	-	2,84	2,65
Sklon v místě ložiska	φ_l	mrad	2,1	0,7
Hodnocení	VYHOVUJÍ			

Tabulka 21: Parametry ložisek pro hřídel 3 [P3, P4]

Návrh a kontrola spojení kola 2 s hřídelí 3

Spojení kola 2 a hřídele 3 je rozebíratelné z důvodu smontovatelnosti. Spojení je realizováno rovnobokým drážkováním dle ČSN 01 4942. Axiální zajištění polohy je řešeno přes vymezovací kroužek, ložisko a segrův kroužek. Výpočet je proveden v programu Inventor a výstupní protokol je uveden v příloze č. 5 [P5].

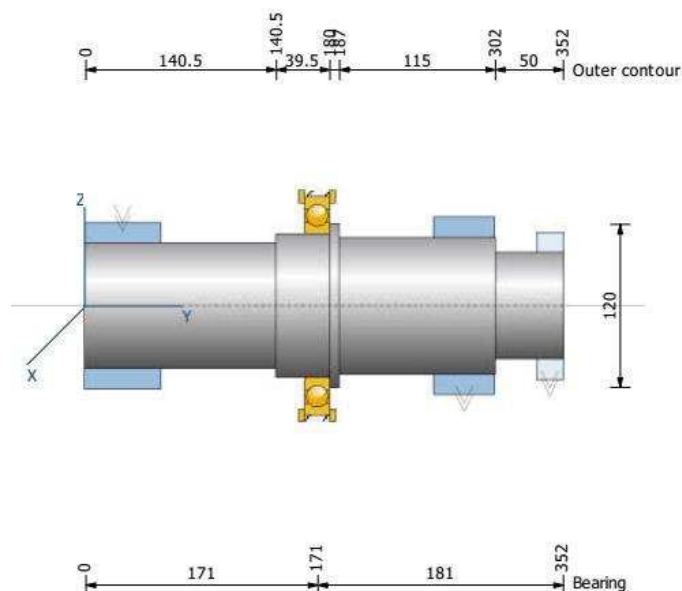
[P5] Příloha č. 5, Výstupní protokol Inventor			
Parametry			
Typ		 <p>ČSN 01 4942 těžká řada</p>	
Vnitřní průměr	d	mm	62
Vnější průměr	D	mm	72
Výška	h	mm	10
Šířka	b	mm	6
Počet drážek	n_K	-	16
Délka drážky	L	mm	50
Moment	T	Nm	1628
Kontrola			
			Hřídel 3
Materiál dle ČSN 12 050 [P19]	Re	MPa	370
Stykový tlak mezi boky drážek	p	MPa	20,249
Součinitel bezpečnosti	S_{pd}	-	6,420

Tabulka 22: Návrh spojení kola 3 s hřídelí 3 [P5]

4.3.5 Hřídel 4

Přesuvná hřídel spojuje výstupní hřídel 5 s hřídelí 2 v případě zařazeného 1. převodového stupně. Při zařazeném 2. převodovém stupni je hřídel 4 spojena s hřídelí 1. Spojení hřídele 4 s hřídelemi 1 a 2 je řešeno pomocí evolventního drážkování dle DIN 5480. Trvalé spojení hřídele 4 a hřídele 5 je řešeno rovnobokým drážkováním dle ČSN ISO 14. Délka spojení hřídele 4 a hřídele 5 je proměnná v závislosti na zařazeném převodovém stupni.

Na hřídeli je umístěno jednořadé kuličkové ložisko. Toto ložisko netvoří uložení hřídele, nýbrž slouží k rotačnímu spojení hřídele a páky pro řazení převodových stupňů. Vlastní hřídel je uložena z jedné strany v hřídeli 5 a z druhé strany v hřídeli 1 nebo v hřídeli 2 podle zařazeného převodového stupně.



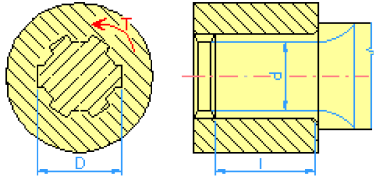
Obrázek 50: Sestava hřídele 4

[P3] Příloha č. 3, „Results.csv“			
[P4] Příloha č. 4, KISSsys „s150mt.ks“			
Parametr			Hřídel 4
Materiál dle ČSN 12 050 [P19]			12 050
Mez kluzu	Re	MPa	370
Dovolené napětí ve smyku	τ_D	MPa	148
Kontrolní výpočet			
Maximální smykové napětí	τ_k	MPa	51,58
Součinitel bezpečnosti	S_k	-	2,87
Maximální natočení hřídele (osa y)	φ_{max}	mrad	2,3

Tabulka 23: Parametry hřídele 4 [P3, P4]

Drážkování hřídele 4 a hřídele 5

Drážkování přesuvné hřídele 4 a výstupní hřídele 5 je tvořeno rovnobokým drážkováním. Aktivní společná délka drážek je závislá na zařazeném převodovém stupni. Kontrolní výpočet je proveden pro oba převodové stupně. Spoj je kontrolován na kontaktní tlak v bocích zubů. Profil drážek je normalizovaný, a tudíž není nutno kontrolovat napětí v ohybu ani smykové napětí v profilu drážky. Výpočet je proveden v programu Inventor a výstupní protokol je uveden v příloze č. 5 [P5].

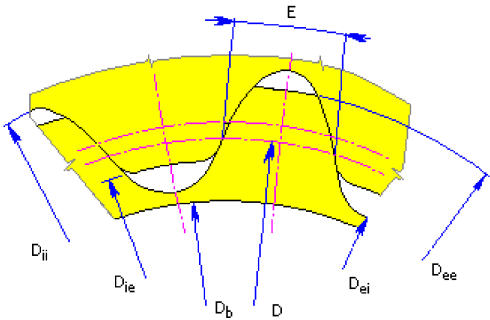
[P5] Příloha č. 5, Výstupní protokol Inventor				
Parametry				
Typ		 <p>ČSN ISO 14:1986 lehká řada</p>		
Vnitřní průměr	d_1	mm	92	
Vnější průměr	d_2	mm	98	
Výška	h	mm	5	
Šířka	b	mm	14	
Počet drážek	n_K	-	10	
Délka 1. převod. stupeň	l_1	mm	56	
Délka 2. převod. stupeň	l_2	mm	123	
Moment 1. převod. stupně	M_1	Nm	725	
Moment 2. převod. stupně	M_2	Nm	6112	
Kontrola				
			Hřídel 4	Hřídel 5
Materiál dle ČSN 12 050 [P19]	R_e	MPa	370	
Stykový tlak mezi boky drážek v případě 1. převod. stupně	p_1	MPa	18,17	
Součinitel bezpečnosti (1. převod. stupeň)	S_{pd1}	-	7,154	
Stykový tlak mezi boky drážek v případě 2. převod. stupně	p_2	MPa	69,742	
Součinitel bezpečnosti (2. převod. stupeň)	S_{pd2}	-	1,864	

Tabulka 24: Drážkování hřídele 4 a hřídele 5 [P5]

Kontrola drážkování hřídele 4 a hřídele 1

Spojení hřídele 4 a hřídele 1 evolventním drážkováním je zatíženo v případě zařazeného druhého převodového stupně. Navržené drážkování je kontrolováno z hlediska stykového

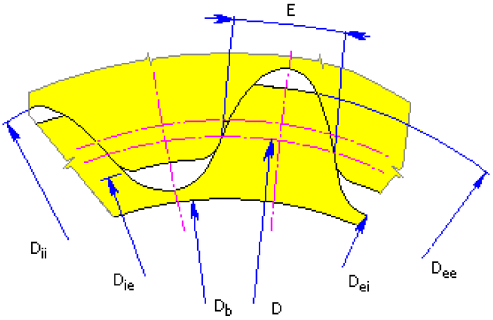
tlaku v ploše boku zubů a z hlediska namáhání zubů v ohybu. Výpočet je proveden v programu Inventor a výstupní protokol je uveden v příloze č. 5 [P5].

[P5] Příloha č. 5, Výstupní protokol Inventor			
Parametry			
Typ		 <p>ISO 4156</p>	
Modul	m_n	mm	2,5
Úhel záběru	α	°	30
Vnitřní průměr hřídel 4	D_{ei}	mm	77,661
Vnitřní průměr hřídel 1	D_{ii}	mm	87,339
Vnější průměr hřídel 4	D_{ee}	mm	85
Vnější průměr hřídel 1	D_{ie}	mm	80,520
Roztečná kružnice hřídel 4	D_4	mm	82,5
Roztečná kružnice hřídel 1	D_1	mm	82,5
Šířka	b	mm	20
Počet zubů	n_Z	-	33
Kontrola			
Materiál dle ČSN 12 050 [P19]	R_e	MPa	370
Dovolené napětí v ohybu	σ_{D0}	MPa	246
Dovolené napětí v tlaku	p_D	MPa	130
Stykový tlak mezi boky zubů	p_c	MPa	24,209
Součinitel bezpečnosti - stykový tlak	s_p	-	5,37
Napětí v ohybu	σ_o	MPa	29,317
Součinitel bezpečnosti – ohyb	s_o	-	8,391

Tabulka 25: Drážkování hřídele 4 a hřídele 1 [P5]

Kontrola drážkování hřídele 4 a hřídele 2

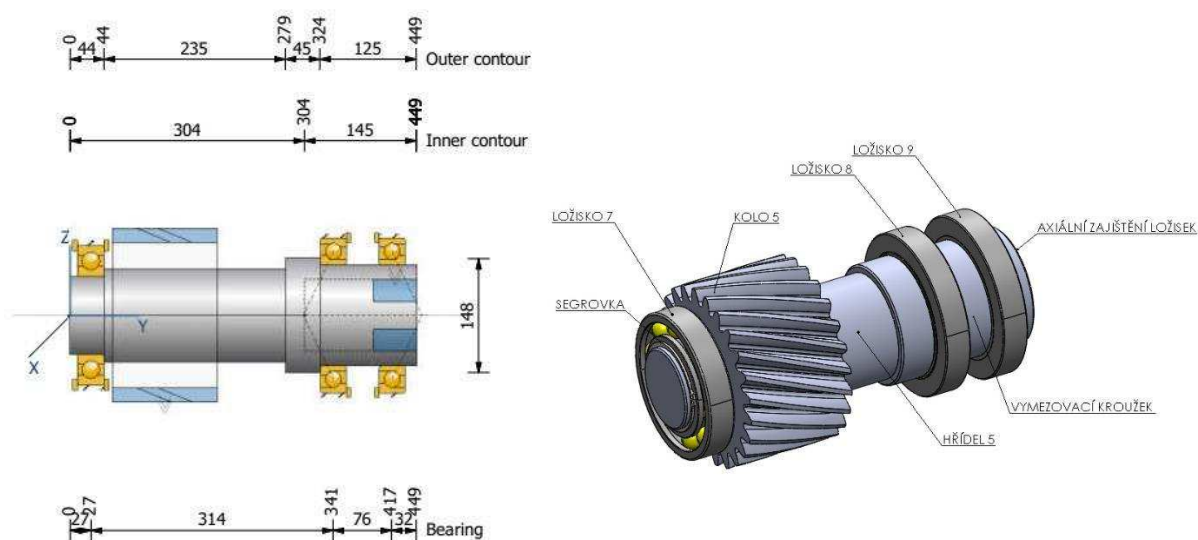
Spojení hřídele 4 a hřídele 2 je také tvořeno evolventním drážkováním a je zatíženo v případě zařazeného prvního převodového stupně. Navržené drážkování je opět kontrolováno z hlediska stykového tlaku v ploše boku zubů a z hlediska namáhání zubů v ohybu. Výpočet je proveden v programu Inventor a výstupní protokol je uveden v příloze č. 5 [P5].

[P5] Příloha č. 5, Výstupní protokol Inventor			
Parametry			
Typ	 <p style="text-align: center;">DIN 5480</p>		
Modul	m_n	mm	2,5
Úhel záběru	α	°	30
Vnitřní průměr hřídel 4	D_{ei}	mm	102,646
Vnitřní průměr hřídel 2	D_{ii}	mm	105,479
Vnější průměr hřídel 4	D_{ee}	mm	110
Vnější průměr hřídel 2	D_{ie}	mm	112,354
Roztečná kružnice hřídel 4	D_4	mm	107,500
Roztečná kružnice hřídel 2	D_1	mm	107,500
Šířka	b	mm	45
Počet zubů	n_Z	-	42
Kontrola			
Materiál dle ČSN 12 050 [P19]	R_e	MPa	370
Dovolené napětí v ohybu	σ_{Do}	MPa	246
Dovolené napětí v tlaku	p_D	MPa	198
Stykový tlak mezi boky zubů	p_c	MPa	54,843
Součinitel bezpečnosti - stykový tlak	s_p	-	2,370
Napětí v ohybu	σ_o	MPa	66,414
Součinitel bezpečnosti – ohyb	s_o	-	3,704

Tabulka 26: Drážkování hřídele 4 a hřídele 2 [P5]

4.3.6 Souhmotí hřídele 5

Výstupní hřídel 5 je uložena ve dvou proti sobě umístěných jednořadých kuličkových ložiscích s kosoúhlým stykem a v jednom jednořadém kuličkovém ložisku na konci hřídele. Na konci hřídele je nalisován pastorek, který zabírá do věnce vřetena.



Obrázek 51: Sestava hřídele 5

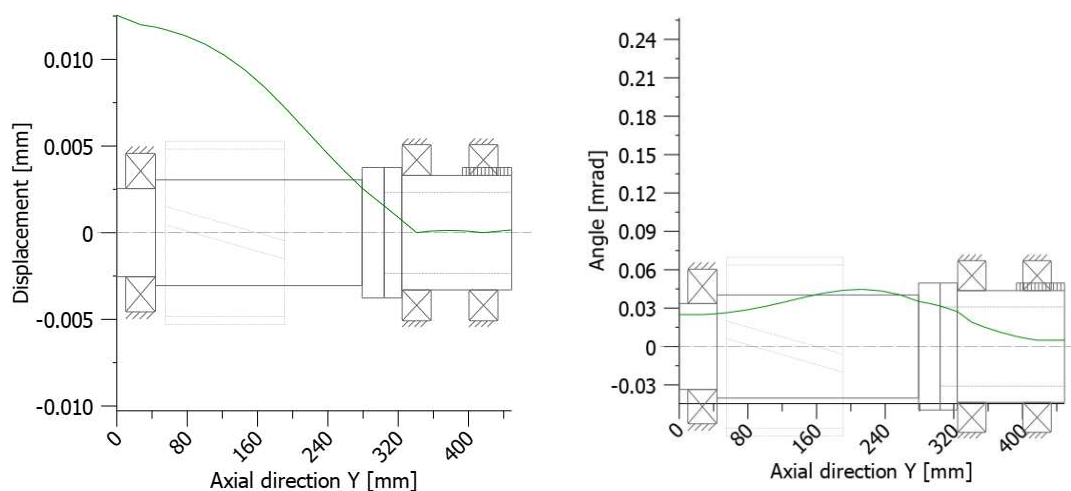
[P3] Příloha č. 3, „Results.csv“			
[P4] Příloha č. 4, KISSsys „s150mt.ks“			
Parametr			Hřídel 5
Materiál dle ČSN 12 050 [P19]			12 050
Mez kluzu	Re	MPa	370
Kontrolní výpočet			
Maximální redukované napětí	σ_{red}	MPa	53,74
Součinitel bezpečnosti proti mezi kluzu	S_k	-	6,89
Posunutí hřídele v místě záběru kola 5	u_{k5}	mm	0,010
Sklon v místě kola 5	φ_{k5}	mrad	0,04
Hodnocení	VYHOVUJE		

Tabulka 27: Parametry hřídele 5 [P4]

Parametr			LOŽISKO 7	LOŽISKO 8	LOŽISKO 9
			7	8	9
Typ			SKF 6220	SKF 7026 ACD/HCP4	SKF 7026 ACD/HCP4
Vnitřní průměr	d	mm	100	130	130
Vnější průměr	D	mm	180	200	200
Šířka	B	mm	34	33	33
Kontrolní výpočet					

Trvanlivost	L_h	hod	149885	101 601	915 168
Součinitel statické bezpečnosti	s_0	-	2,826	3,45	13,65
Součinitel bezpečnosti k trvanlivosti	s_{Lh}	-	3,75	2,54	22,879
Sklon v místě ložiska	φ_l	mrad	0,02	0,01	0,005
Hodnocení	VYHOVUJÍ				

Tabulka 28: Parametry ložisek pro hřídel 5



Obrázek 52: Sklon a posunutí hřídele 5 v rovině x-z [P4]

Výpočet spojení hřídele 5 a pastorku výstupní hřídele

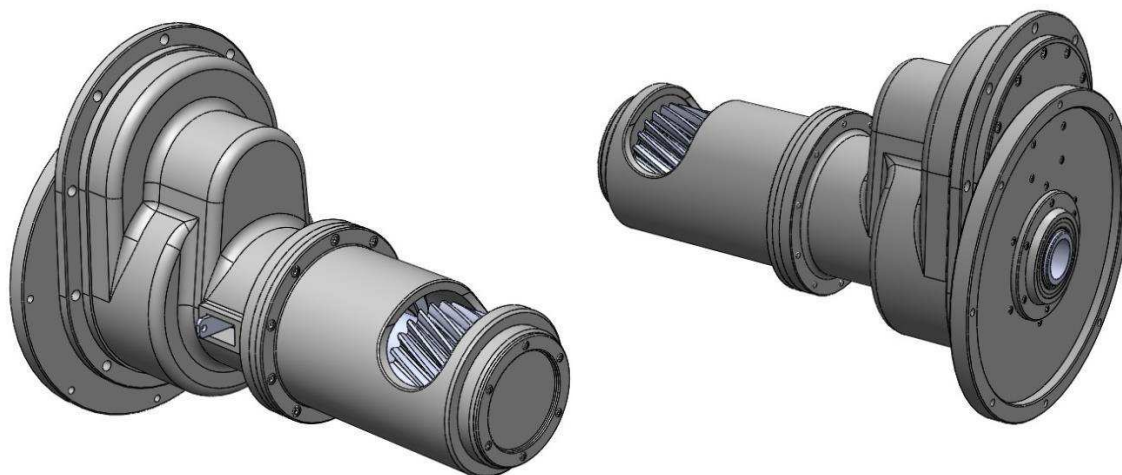
Spojení kola 5 s hřídelí 5 je realizováno nalisovaným spojem. Výpočet uložení hřídele a kola je uveden v příloze 3.

[P7] Příloha č. 7, Nalisovaný spoj převodovka				
Parametr			Hřídel 5	Náboj
Materiál dle ČSN [P19]			12 050	18CrNiMo7-6
Mez kluzu	Re	MPa	370	640
Kontrolní výpočet				
Vypočtené uložení			s5	H7
Maximální redukované napětí v náboji	σ_{red}	MPa	-	227,769
Součinitel bezpečnosti proti mezi kluzu	s_k	-	-	2,81
Teplota ohřátí – montáž	t	°C	20	167

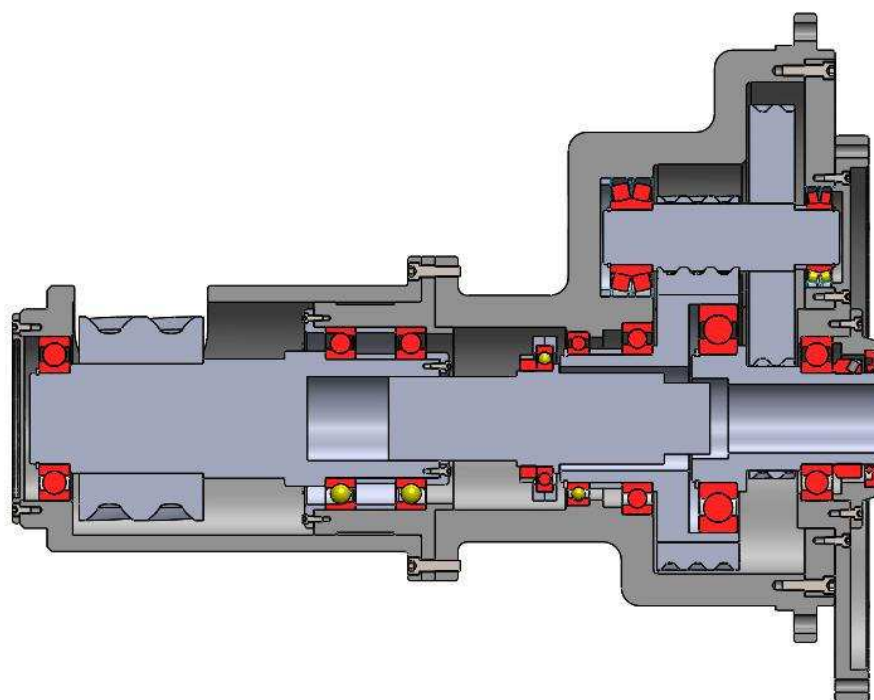
Tabulka 29: Spojení kola 5 a hřídele 5 [P7]

4.3.7 Skříň převodovky

Vlastní skříň převodovky se skládá ze tří částí. Ze zadní strany je skříň uzavřena víkem, na kterém je uchycena příruba pro spojení převodovky s motorem 1PH8224. Uložení převodovky ve vřeteníku je oboustranné. Na vstupní straně je převodovka uchycena pomocí příruby a na výstupní straně je podepřena na kruhovém osazení.



Obrázek 53: Sestava převodovky



Obrázek 54: Podélný řez převodovkou

5 Návrh finálního převodu

Finální převod je realizován válcovým soukolím se šikmými zuby. Skládá se z pastorku převodovky, který zabírá do věnce umístěného na vřetení.

Návrh finálního převodu byl proveden v programu Kisssoft. Program k finálnímu převodu je uvedena v příloze č. 8 [P8].

[P8] Příloha č. 8, KISSsoft „finalni_prevod.Z12“				
Parametr			Pastorek	Věnc
Materiál [P19]			17CrNiMo6	17CrNiMo6
Počet zubů	z	-	24	155
Převodový poměr	i_{12}	-	6,458	
Modul	m	mm	8	
Úhel záběru	α	°	20	20
Úhel sklonu	β	°	22	22
Průměr roztečné kružnice	d	mm	207,079	1337,383
Průměr hlavové kružnice	d_a	mm	223,015	1358,921
Průměr patní kružnice	d_f	mm	187,079	1322,985
Korekce	x	mm	0	0,3501
Osová vzdálenost	a	mm	775	
Šířka kola	b	mm	136	136
Kontrolní výpočet				
Výkon	P	kW	33,641	
Otáčky	n	min^{-1}	53,7	8,3
Moment	M	Nm	5984,5	38650
Bezpečnost na ohyb	SF	-	4,137	4,148
Bezpečnost na ohyb	SH	-	1,942	2,155

Tabulka 30: Návrh finálního převodu [P8]

6 Návrh vřetene a jeho uložení

Vřeteno soustruhu unáší obrobek, který koná otáčivý pohyb. Na výrobní přesnost soustruhu mají vlastnosti vřetene a jeho uložení významný vliv. Z toho důvodu jsou na vřeteno a na uložení vřetene kladeny určité požadavky. Prvním požadavkem je vysoká přesnost uložení vřetene. Přesnost uložení vřetene je ovlivněna radiálním a axiálním házením ložisek. Dalším požadavkem je dostatečná tuhost vřetene a tuhost radiálního a axiálního uložení. V případě nízké tuhosti dochází pod vlivem zatížení k výrazným deformacím a tím je ovlivněna výrobní přesnost stroje. Dále je kladen požadavek z hlediska dynamické stability. Při malé dynamické stabilitě dochází ke vzniku chvění a vibrací, které ovlivňují přesnost a jakost obrá-

běné plochy. Kromě ovlivnění přesnosti dochází také ke vzniku hluku a dynamického namáhání dalších částí stroje, které mohou vést až k jejich poškození. Uložení vřetene by mělo také vykazovat vysokou účinnost a s tím související vznik tepla, který by měl být co nejmenší. Odpadní teplo ovlivňuje teplotní stabilitu stroje, a tedy i přesnost stroje včetně životnosti komponent. V neposlední řadě je kladen důraz na požadovanou životnost a celkovou spolehlivost.

6.1 Stanovení varianty uložení vřetene

Vřeteno je uloženo v sestavě radiálních a axiálních ložisek tak, aby byly zachyceny radiální a axiální síly působící na vřeteno. Existují různé typy axiálních a radiálních ložisek, které jsou odlišné svými vlastnostmi. S ohledem na typ stroje, přesnost stroje, rozměry a hmotnost obrobku jsou stanoveny požadavky, na základě kterých je zvolen typ uložení vřetene.

Typ		Zatížení	Únosnost a tuhost	Otáčky	Přesnost
Valivá ložiska	Válečkové dvouřadé ložisko (NNU)	radiální	vysoká	střední	velmi vysoká
	Válečkové dvouřadé ložisko (NN)	radiální	vysoká	střední	vysoká
	Kuželíkové ložisko	radiálně – axiální	vysoká	střední	vysoká
	Kuličkové ložisko s kosouhlým stykem	radiálně – axiální	malá	vysoké	velmi vysoká
	Jednořadé kuličkové ložisko axiální	axiální jednosměrné	střední	vysoké	vysoká
	Dvouřadé kuličkové ložisko axiální	axiální obousměrné	střední	vysoké	vysoká
	Jednořadé válečkové ložisko axiální	axiální jednosměrné	vysoká	střední	vysoká
	Dvouřadé válečkové ložisko axiální	axiální obousměrné	vysoká	střední	vysoká
Hydrostatická – radiální		radiální	velmi vysoká	střední	nejvyšší
Hydrostatická – axiální		axiální	velmi vysoká	střední	nejvyšší

Tabulka 31: Varianty ložisek pro uložení vřetene

6.1.1 Varianta uložení vřetene 1

Pro těžký soustruh je vhodnou variantou uložení tvořené sestavou valivých ložisek, kde přední i zadní ložisko tvoří radiální dvouřadá válečková ložiska. Axiální uložení je možné zajistit dvěma válečkovými jednosměrnými axiálními ložisky nebo jedním válečkovým axiálním obousměrným ložiskem.

6.1.2 Varianta uložení vřetene 2

Druhou možností je uložení vřetene, kde hlavní ložisko je hydrostatické a zadní ložisko je dvouřadé válečkové. Axiální ložiska jsou totožná s variantou 1.

6.1.3 Volba vhodné varianty uložení vřetene

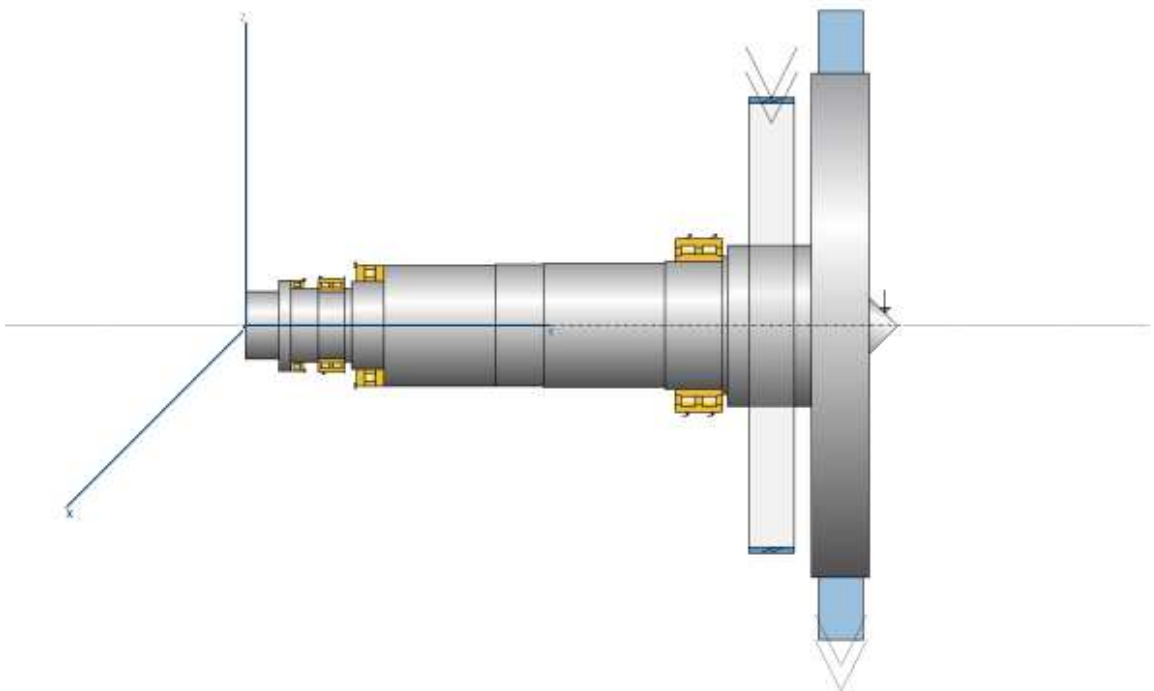
Obě typové varianty splňují požadavky z hlediska vysoké únosnosti, tuhosti uložení a přesnosti chodu vřetene. Varianta 2 je méně vhodná z důvodu složitějšího konstrukčního provedení a zároveň z důvodu vyšší ceny. Vzhledem k tomu, že je stroj nabízen ve více řadách, je vhodné přihlídnout také k unifikaci a dědičnosti konstrukce. Proto je zvolena varianta 1 jako nejvhodnější varianta uložení vřetene.

6.2 Návrh vřetene a ložisek

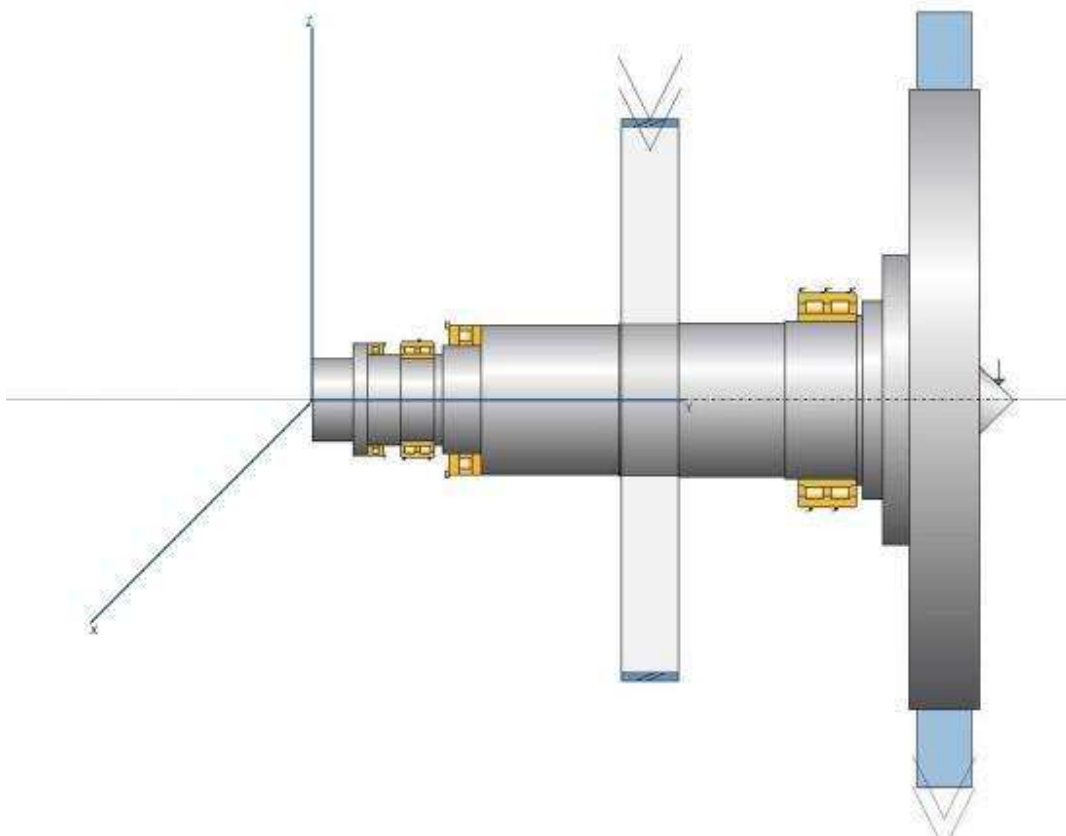
6.2.1 Základní rozměry vřetene

Nejprve je stanovena vzdálenost L mezi ložisky, která se odvíjí od předpokládaných rozměrů skříně vřeteníku. Délka převislé části a na straně hrotu se odvíjí od předpokládaných rozměrů upínací desky nebo rozměrů finálního převodu. Tyto rozměry posléze určují charakteristický poměr uložení vřetene λ . Tento parametr má nepřímo úměrný vliv na přesnost chodu vřetene. Stanoví se poměrem délky vřetene mezi ložisky L a délkou převislého konce vřetene a na straně hrotu. Poměr uložení vřetene a házení ložisek na obou koncích vřetene ovlivňují celkové házení vřetene v místě hrotu. Dále je důležité zmínit míru vlivu házení předního a zadního ložiska na házení konce vřetene. Přední radiální ložisko, nazývané také jako hlavní, má na házení konce vřetene poměrně větší vliv než zadní radiální ložisko.

Vřeteno bude navrženo ve dvou variantách. První varianta uvažuje umístění finálního převodu před hlavním ložiskem. Ve druhé variantě je umístění finálního převodu přibližně v polovině vzdálenosti mezi radiálními ložisky. Obě varianty jsou vyobrazeny na obrázku 55 a obrázku 56.



Obrázek 55: Varianta 1 – umístění finálního převodu před hlavním ložiskem [P9]



Obrázek 56: Varianta 2 - umístění finálního převodu mezi radiálními ložisky [P10]

Parametr	Značení	Varianta 1	Varianta 2
Vzdálenost mezi ložisky	L [mm]	990	990
Délka převislého konce	a [mm]	587	450
Poměr uložení vřetene	$\lambda = \frac{L}{a}$ [-]	1,69	2,2

Tabulka 32: Základní rozměry vřetene

Poměr uložení vřetene je stanoven jako poměr délky L (vzdálenost mezi předním a zadním ložiskem) a délkou a (délka převislého konce vřetene na straně hrotu).

6.2.2 Maximální reakce v ložiskách

Maximální hodnota radiální síly F_{vM} se určí jako výslednice z maximálních složek radiální síly a složky obvodové síly stanovené ve spektru zatížení konce hrotu (viz. tabulka 14, str. 42). Maximální hodnota radiální síly je v případě stavu 3.

$$F_{vM} = \sqrt{F_{x(3)}^2 + F_{z(3)}^2} = \sqrt{195^2 + 196,128^2} = 277 \text{ kN}$$

Maximální hodnota axiální síly působící zprava F_{avP} je stanovena jako maximum z axiálních sil ze spektra zatížení, působící na vřeteno zprava (tabulka 14, str. 42).

$$F_{avP} = 196 \text{ kN}$$

Maximální hodnota axiální síly působící zleva F_{avL} je stanovena jako maximum z axiálních sil ze spektra zatížení, působící na vřeteno zleva (tabulka 14, str. 42).

$$F_{avL} = 10,5 \text{ kN}$$

Ze znalosti maximálních sil ve směru radiálním a ve směru axiálním se stanoví reakce v ložisku A, ložisku B a axiální reakce ve směru zleva a zprava.

Reakce v hlavním ložisku A – varianta 1:

$$F_A = F_{vM} * \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) = 277 * \left(1 + \frac{1}{1,69}\right) = 441 \text{ kN}$$

Reakce v hlavním ložisku A – varianta 2:

$$F_A = F_{vM} * \left(1 + \frac{1}{\lambda}\right) = 277 * \left(1 + \frac{1}{2,2}\right) = 402 \text{ kN}$$

Reakce v ložisku B – varianta 1:

$$F_B = F_{vM} * \frac{1}{\lambda} = 277 * \frac{1}{1,69} = 164 \text{ kN}$$

Reakce v ložisku B – varianta 2:

$$F_B = F_{vM} * \frac{1}{\lambda} = 277 * \frac{1}{2,2} = 125 \text{ kN}$$

Axiální reakce zprava:

$$F_{aP} = F_{aVP} = 196 \text{ kN}$$

Axiální reakce zleva:

$$F_{aL} = F_{aVL} = 10,5 \text{ kN}$$

6.2.3 Výběr ložisek

Ložiska jsou předběžně navržena s ohledem na statické zatížení a maximální otáčky vřetene uvedené v tabulce 33. Vhodná ložiska jsou následně vybrána z katalogu výrobce ložisek SKF [27].

Uvažovaná statická bezpečnost ložiska:

$$S_0 = \frac{C_0}{F_{A0}} = 5$$

Kde je:

C_0 ... statická únosnost ložiska

F_{A0} ... předběžné ekvivalentní statické zatížení ložiska

S_0 ... statická bezpečnost uložení vřetene

	Značení	Varianta 1	Varianta 2
Statická únosnost ložiska A	C_{0A}	2205 kN	2010 kN
Statická únosnost ložiska B	C_{0B}	820 kN	625 kN
Axiální statická únosnost zprava	C_{0aP}	980 kN	
Axiální statická únosnost zleva	C_{0aL}	52,5 kN	
Maximální otáčky vřetene	n_M	697 ot./min	

Tabulka 33: Požadovaná statická únosnost ložisek

Pozice	Typ	Rozměry	Únosnost	Otáčky
Přední hlavní ložisko A	SKF NNU 4976 BK/SPW33	d = 380 mm D = 520 mm B = 140 mm	C = 1450 kN C ₀ = 3600 kN	n _b = 1300 ot./min n _g = 1500 ot./min
Zadní radiální ložisko B	SKF NN 3056 K/SPW33	d = 280 mm D = 420 mm B = 106 mm	C = 1080 kN C ₀ = 2080 kN	n _b = 1900 ot./min n _g = 2200 ot./min
Axiální ložisko pravé	SKF 81252 M	d = 260 mm D = 360 mm H = 79 mm	C = 1140 kN C ₀ = 5300 kN	n _b = 380 ot./min n _g = 750 ot./min
Axiální ložisko levé	SKF 81144 M	d = 220 mm D = 270 mm H = 37 mm	C = 335 kN C ₀ = 1700 kN	n _b = 670 ot./min n _g = 1300 ot./min

Tabulka 34: Stanovená ložiska uložení vřetene [27]

6.2.4 Zhodnocení variant

Pro navržené varianty jsou stanoveny hodnotící kritéria. Pro jednotlivá kritéria jsou přiřazeny váhy důležitosti pomocí párového porovnání (tabulka 35). Z výpočtu obou variant v programu Kisssoft jsou získány hodnoty posuzovaných parametrů a tyto parametry jsou pro příslušnou variantu poté ohodnoceny (tabulka 36).

Kritérium	K1: Reakce v uložení vřetene	K2: Posunutí od zatížení v místě hrotu vřetene	K3: Sklon vřetene v ložisku	K4: Průhyb vřetene v místě finálního převodu zprava	K5: Sklon vřetene v místě finálního převodu	K6: Natočení vřetene od krutu v místě upínací desky	K7: Redukované napětí ve vřetení	K8: Poloha převodovky ve vřeteníku	K9: Poloha hlavního pohonu	Počet preferencí	Váha kritéria
K1 Reakce v uložení vřetene		K2	K3	K4	K5	K6	K1	K8	K9	1	2
K2: Posunutí od zatížení v místě hrotu vřetene			K2	K2	K2	K2	K2	K2	K2	8	8
K3: Sklon vřetene v ložisku				K4	K5	K3	K3	K3	K3	5	5
K4: Průhyb vřetene v místě finálního převodu					K5	K4	K4	K4	K4	6	6
K5: Sklon vřetene v místě finálního převodu						K5	K5	K5	K5	7	7
K6: Natočení vřetene od krutu v místě upínací desky							K6	K6	K9	4	4
K7: Redukované napětí ve vřetení								K8	K9	0	1
K8: Poloha převodovky ve vřeteníku									K9	2	3
K9: Poloha hlavního pohonu										4	4

Tabulka 35: Váha kritérií

Příloha č.9 [P9], vřetno_varianta1.W10									
Příloha č.10 [P10], vřetno_varianta2.W10									
Kritérium		Hodnota			Váha	Varianta 1		Varianta 2	
			Varianta 1	Varianta 2					
Reakce v uložení vřetene	Hlavní ložisko - pro zatěžovací stav 3	F_R [kN]	298,081	273,020	2	3	6b	4	8b
	Zadní radiální ložisko - pro zatěžovací stav 3	F_R [kN]	72,692	-54,471		3	6b	4	8b
	Axiální ložisko zprava - pro zatěžovací stav 4	R_y [kN]	196,128	196,128		3	6b	3	6b
	Axiální ložisko zleva - pro zatěžovací stav 9	R_y [kN]	-24,436	-28,891		3	6b	3	6b
Posunutí od zatížení v místě hrotu vřetene - pro zatěžovací stav 3	Posunutí ve směru osy x	u_x [mm]	-0,086	-0,039	8	3	24b	4	32b
	Posunutí ve směru osy y	u_y [mm]	-0,035	-0,033		3	24b	3	24b
	Posunutí ve směru osy z	u_z [mm]	-0,469	-0,376		2	16b	3	24b
Sklon vřetene v radiálním ložisku - pro zatěžovací stav 3	Hlavní ložisko	φ_x [mrad]	-0,438	-0,408	5	3	15b	3	15b
		φ_z [mrad]	0,077	0,026		3	15b	3	15b
	Zadní ložisko	φ_x [mrad]	-0,095	-0,149		3	15b	3	15b
		φ_z [mrad]	0,021	0,019		3	15b	3	15b
Průhyb vřetene v místě finálního převodu - pro zatěžovací stav 3	Pastorek 1	u_1 [mm]	0,091	0,005	6	3	18b	4	24b
	Pastorek 2	u_2 [mm]	0,181	0,030		3	18b	4	24b
Sklon vřetene v místě finálního převodu - pro zatěžovací stav 3	Pastorek 1	φ_1 [mrad]	-0,174	-0,113	7	3	21b	4	28b
	Pastorek 2	φ_2 [mrad]	-0,320	-0,142		3	21b	4	28b
Natočení vřetene od krutu v místě upínací desky - pro zatěžovací stav 1		φ_y [mrad]	0,021	0,259	4	4	16b	2	8b
Redukované napětí ve vřetení		σ_{red} [MPa]	189,74	200,58	1	3	3b	3	3b
Poloha převodovky ve vřeteníku		-	Uchycená vně vřeteníku	Uchycená na zadní straně	3	0	0b	3	9b
Poloha hlavního pohonu		-	Vně vřeteníku	Mimo vřeteník	4	0	0b	3	12b
Celkem							245b		296b

Tabulka 36: Hodnocení variant [P9, P10]

Pozn.: Hodnocení jednotlivých kritérií pro příslušnou variantu dle VDI 2225:

Vyhovuje velmi dobře (ideálně) 4 b, Vyhovuje dobře 3 b, Vyhovuje uspokojivě 2 b, Vyhovuje postačujícím způsobem 1 b, Vyhovuje nepostačujícím způsobem 0 b

Na základě hodnocení vychází nejlépe varianta 2. U varianty 1 vychází vlivem větších reakcí nižší trvanlivost hlavního ložiska, která nespĺňuje požadavek 40 000 hodin. Bylo by nutné uvažovat jiné hlavní ložisko. Dále je varianta 1 méně vhodná z hlediska posunutí v místě

hrotu vřetene, sklonu vřetene v radiálních ložiscích, průhybu a sklonu v místě finálního převodu. Varianta 1 naopak vykazuje oproti variantě 2 vyšší torzní tuhost. Dále je nutné zohlednit i možnou montáž navržené převodovky. V případě varianty 1 by byla převodovka umístěna uvnitř vřeteníku. Montáž převodovky by byla velmi obtížná nebo téměř nemožná. Významný vliv má i umístění elektromotoru. Elektromotor je výhodnější umístit vně vřeteníku. Umístěním motoru mimo vřeteník je zajištěn lepší odvod tepla a tím je zajištěna vyšší teplotní stabilita vřeteníku.

Pro další výpočtový návrh bude dále uvažována varianta 2.

6.3 Předepnutí axiálních ložisek

Axiální válečková ložiska na vřeteni je pro jejich funkci nutné předepnout silou, která se odvíjí od jejich zatížení. Při nedostatečném předepnutí by docházelo vlivem zatížení vždy k odlehčení nezatíženého ložiska a toto odlehčení by následně zapříčinilo poškození ložiska.

Postup stanovení předepínací síly je následující. Pro uvažované ložisko se stanoví minimální předepínací síla s ohledem na maximální provozní otáčky, statickou únosnost ložiska a součinitele minimálního zatížení dle katalogu výrobce. Dále se stanoví zatížení ložisek. Zatížení ložisek je vypočteno v programu Kisssoft. Při výpočtu jsou uvažovány všechny působící axiální síly. Jedná se o centrické a axiální síly působící v místě hrotu stanovené v rámci zatěžovacího spektra a axiální síly od finálního převodu. Pro nejméně příznivý stav je stanovena maximální síla zprava a maximální síla zleva. Maximální axiální síly a příslušná posunutí jsou pro každé ložisko patrné z tabulky 37.

Příloha č.11 [P11], vřeteno.W10				
Umístění	Typ	Zatěžovací stav	Hodnota zatížení F_y [kN]	Posunutí Δ [mm]
Axiální ložisko pravé	SKF 81252 M	4	- 196,128	0,023
Axiální ložisko levé	SKF 81244 M	9	28,367	0,003

Tabulka 37: Zatížení axiálních ložisek bez předepnutí [P11]

Z uvedených hodnot zatížení a posunutí v tabulce 37 se stanoví tuhost obou ložisek:

$$k_{L,P} = \frac{|F_{y(3,9)}|}{\Delta_{(3,9)}} \left[\frac{kN}{mm} \right]$$

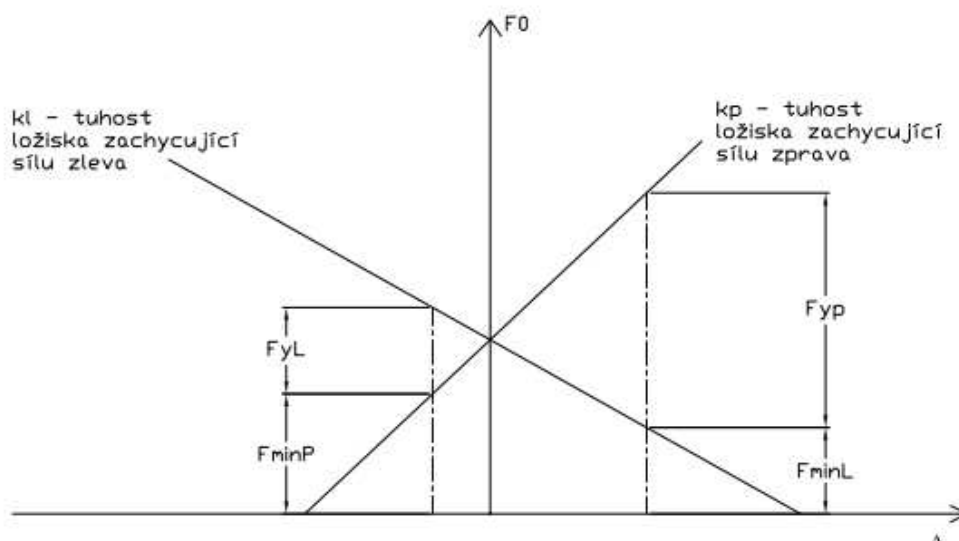
Kde je:

$F_{y(3,9)}$... maximální zatížení ložiska [kN]

$\Delta_{(3,9)}$... posunutí [mm]

k_p ... tuhost pravého ložiska [kN/mm]

k_l ... tuhost levého ložiska [kN/mm]



Obrázek 57: Diagram předepjatého spoje

Předepínací síla pro ložisko zachycující sílu zprava (ložisko SKF 81252 M):

$$F_{0P} = F_{y9} \cdot \frac{k_P}{k_P + k_L} + F_{minP}$$

Předepínací síla pro ložisko zachycující sílu zleva (ložisko SKF 81244 M):

$$F_{0L} = F_{y3} \cdot \frac{k_L}{k_P + k_L} + F_{minL}$$

Společná předepínací síla pro obě ložiska je stanovena jako maximální hodnota ze síly F_{0L} a F_{0P} .

$$F_0 = \max(F_{0P}, F_{0L})$$

Kde je:

F_{minP} ... minimální předepínací síla ložiska zachycující sílu zprava [kN]

F_{minL} ... minimální předepínací síla ložiska zachycující sílu zleva [kN]

F_0 ... předepínací síla [kN]

Příloha č.12 [P12], Předepnutí axiálních ložisek			
Umístění	Typ	Minimální hodnota předepnutí $F_{min(P,L)}$ [kN]	Předepínací síla $F_{0(P,L)}$ [kN]
Axiální ložisko pravé	SKF 81252 M	3,742	17,193
Axiální ložisko levé	SKF 81244 M	2,111	105,238

Tabulka 38: Předepínací síla axiálních ložisek [P12]

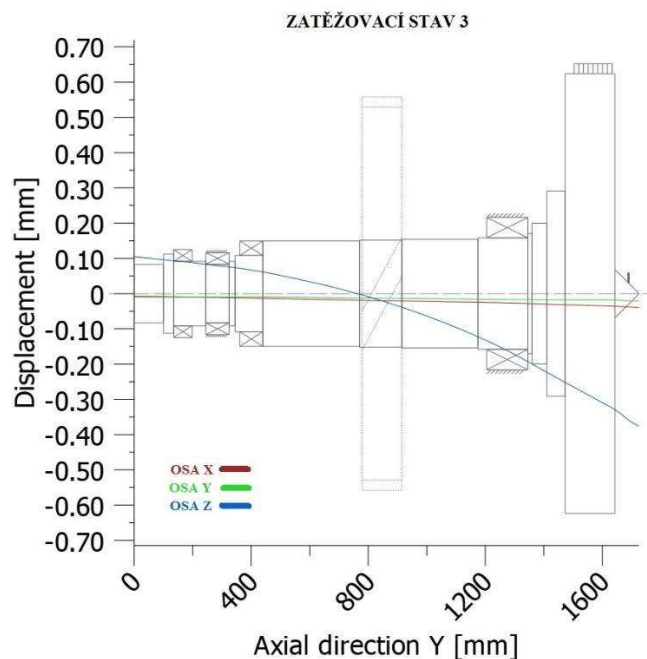
Společná předepínací síla pro ložiska činí 105,238 kN. Touto silou jsou předepnuta obě ložiska a smysl předpětí v programu KISSsoft je pro dané ložisko opačný, oproti smyslu zatížení ložiska. Tato síla posléze ovlivní trvanlivost ložisek a je tak zahrnuta ve vlastním výpočtu. Úplný výpočet předepnutí axiálních ložisek je uveden v příloze č.12 [P12].

6.4 Výpočet tuhosti uložení vřetene

Tuhost samotného vřetene je dána jako poměr působící síly a posunutí ve směru uvažované osy na konci hrotu vřetene. Spektrum sil působících na vřeteno bylo stanoveno již v zatěžovacím spektru (tabulka 14, str.42). Posunutí a sklon vřetene je stanoven ve výpočtovém programu Kisssoft (příloha č.11 [P11]) pro zatěžovací stav s maximálními hodnotami centrických sil. Průběhy posunutí jsou vyobrazeny v obrázku 58. Výpočet tuhosti vřetene je proveden pro zatěžovací stav 3 a to ve směru osy x . Dále je proveden výpočet tuhosti ve směru osy y a to pro stejný zatěžovací stav, jako v případě osy x . Z uvedeného vyplývá, že směr x je příčný směr na osu rotace obrobku a směr y je kolineární s osou rotace vřetene.

Kromě výpočtu tuhosti vlastního vřetene, je vypočítána také tuhost ložisek. Tuhost ložisek je dána poměrem reakční síly v ložisku a deformací ložiska. Deformaci ložiska ovlivňují rozměrové parametry ložiska (rozměry valivých prvků) a velikost reakcí, které ložisko zachytává.

Výsledná tuhost vřetene je ovlivněna tuhostí samotného vřetene a tuhostí uložení vřetene.



Obrázek 58: Průběh posunutí v případě zatěžovacího stavu 3 [P11]

Kromě toho je z hlediska úplné tuhosti nutno uvažovat tuhost těch částí, ve kterých je vřeteno uloženo.

6.4.1 Posunutí v místě hrotu

Příloha č.11 [P11], vřeteno.W10	
Posunutí vřetene v místě hrotu (Zatěžovací stav 3)	
Směr posunutí	Posunutí [mm]
Osa x	- 0,039
Osa y	- 0,021
Osa z	-0,377

Tabulka 39: Posunutí v místě hrotu [P11]

6.4.2 Výpočet tuhosti ve směru osy x a osy y

Výpočet tuhosti je proveden v programu Mathcad a je uveden v příloze č. 13 [P13].

Příloha č.13 [P13], Výpočet tuhosti vřetene a uložení		
Vřeteno		
Zatěžovací stav	Směr zatížení	Tuhost [kN/mm]
3	Osa x	538,462
3	Osa y	9339

Tabulka 40: Tuhost vlastního vřetene [P13]

Příloha č.13 [P13], Výpočet tuhosti vřetene a uložení					
Uložení					
Ložisko	Umístění	Směr zatížení	Zátěžný stav	Deformace Δ [mm]	Tuhost [kN/mm]
SKF NNU4976 BK/SPW33	Hlavní ložisko	Osa x	3	-0,004	11 510
SKF NNU4940 BK/SPW33	Zadní radiální ložisko	Osa x	3	-0,001	7 387
SKF 81252 M	Axiální ložisko zachycující sílu zprava	Osa y	4	-0,072	3 371

Tabulka 41: Tuhost uložení [P13]

Příloha č.13 [P13], Výpočet tuhosti vřetene a uložení		
Celková tuhost		
Zatěžovací stav	Směr zatížení	Celková tuhost [kN/mm]
3	Osa x	473,361
3	Osa y	2 109

Tabulka 42: Celková tuhost [P13]

6.5 Výpočet tepelně stabilních otáček

Výpočet tepelně stabilních otáček je proveden v programu Kisssoft. Výstupní protokol je vložen do přílohy č.16 [P16]. Tepelně stabilní otáčky jsou otáčky, při kterých již dále nedochází k nárůstu teploty ložisek nad určitou hodnotu. Tyto otáčky je při uvažovaném zatížení možné využívat po neomezenou dlouho dobu. Při výpočtu tepelně stabilních otáček je uvažován stav zatížení s maximálními otáčkami. Jedná se o zatěžovací stav 6 (tabulka 14, str.42) a maximální otáčky pro tento stav jsou 697 ot./min.

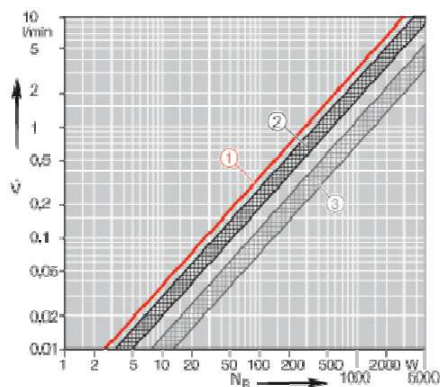
<u>Results :</u>		
Shaft 'Vretno', Rolling bearing 'hlavni_lozisko'		
Reference speed	1554.55	[1/min]
Thermally safe operating speed	774.24	[1/min]
Shaft 'Vretno', Rolling bearing 'zadni_lozisko'		
Reference speed	3011.41	[1/min]
Thermally safe operating speed	1676.28	[1/min]
Shaft 'Vretno', Rolling bearing 'axialni_zprava'		
Reference speed	1364.86	[1/min]
Thermally safe operating speed	249.91	[1/min]
Shaft 'Vretno', Rolling bearing 'axialni_zleva'		
Reference speed	1532.58	[1/min]
Thermally safe operating speed	376.04	[1/min]

Tabulka 43: Maximální teplotně stabilní otáčky [P15]

Porovnáním výsledků maximálních teplotně stabilních otáček s maximálními otáčkami zatěžovacího stavu 6 je zřejmé, že obě radiální ložiska z tohoto hlediska vyhovují. V případě obou axiálních ložisek tento požadavek splněn není. Maximální otáčky je proto možné využívat pouze po omezenou dobu.

Za účelem zvýšení maximálních teplotně stabilních otáček je možné provést následující opatření.

První možností je zvýšení průtoku oleje axiálními ložisky. Vhodný průtok oleje se stanoví z vypočteného ztrátového výkonu ložiska [P11] dle diagramu na obrázku 59.



Obrázek 59: Proud oleje dle třecího ztrátového výkonu ložiska [2]

Ztrátový výkon axiálního ložiska zachycující sílu zprava činí 1,751 kW. Tomu odpovídá průtok oleje přibližně 4 l/min. Ztrátový výkon axiálního ložiska zachycující sílu zprava činní 1,252 kW. Tomu odpovídá průtok oleje přibližně 3,5 l/min.

Po úpravě proudu oleje došlo ke zvýšení maximálních teplotně stabilních otáček. Pro axiální ložisko zachycující sílu zprava činí maximální otáčky po úpravě mazání 309,89 ot./min. V případě axiálního ložiska zachycující sílu zleva činí maximální otáčky po úpravě mazání 482,67 ot./min.

Dalším možným opatřením pro zvýšení maximálních teplotně stabilních otáček je snížit zatížení axiálních ložisek. Snížení zatížení axiálních ložisek je možné provést snížením předepínací síly. Obě ložiska budou předepnuta na minimální předepínací sílu většího axiálního ložiska zachycující sílu zprava. Proto, aby nedošlo k odlečení malého axiálního ložiska, bude opěrná strana malého axiálního ložiska vybavena pružinami předepnutými na příslušnou minimální předepínací sílu ložiska.

Po této úpravě se otáčky velkého axiálního ložiska dále zvýšily na 459,84 ot./min a otáčky menšího axiálního ložiska na 987,79 ot./min [P16]. Z uvedeného vyplývá, že i po navržených úpravách velké axiální ložisko zachycující sílu zprava požadavek nesplňuje. Vlivem těchto úprav se však prodloužila doba, po kterou je možné požadované maximální otáčky využívat.

Vlivem snížení předepnutí axiálních ložisek došlo ke zvýšení trvanlivosti axiálních ložisek. Nižší hodnota předepínací síly má však negativní dopad na tuhost uložení vřetene ve směru osy y .

6.6 Kontrola vřetene a periferií

Výpočtové hodnoty byly stanoveny v programu Kisssoft. Soubor výpočtu vřetene v programu Kisssoft je uveden v příloze č. 11 [P11].

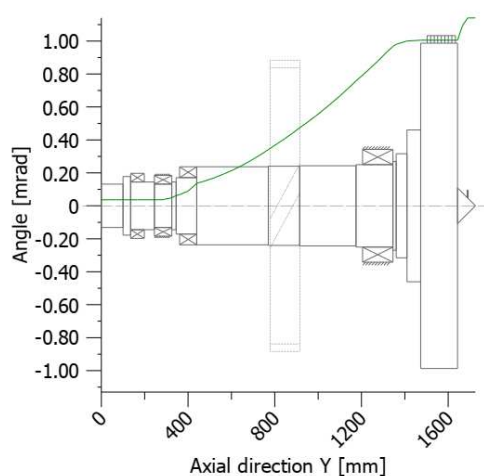
6.6.1 Kontrola uložení vřetene

Součinitel dynamické bezpečnosti: $s_d = \frac{T_L}{T_C} [-]$

Součinitel statické bezpečnosti: $s_0 = \frac{F_R}{C_0} [-]$

Příloha č.11 [P11], vřeteno.W10 Příloha č.15 [P15], protokol KISSsoft						
		Hlavní ložisko NNU 4976 BK/SPW33	Zadní radiální ložisko NNU 4940 BK/SPW33	Axiální ložisko SKF 81252 M	Axiální ložisko SKF 81244 M	Požadavek
Trvanlivost ložiska [P11]	T_L [hod]	43 037	647 599	122 374	>1e6	T_C 40 000 [hod]
Součinitel dynamické bezpečnosti	$s_d [-]$	1,08	16,19	3,06	>25	1
Součinitel statické bezpečnosti	$s_0 [-]$	13,28	20,8	22,46	33,84	5
Sklon vřetene v ložisku [P11]	[mrad]	0,86	0,09	0,09	0,04	1e-3 [rad]
Zhodnocení		VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE	

Tabulka 44: Kontrola uložení vřetene [P11, P15]



Obrázek 60: Sklon vřetene v rovině x-z [P11, P15]

6.6.2 Kontrola finálního převodu

Příloha č.8 [P8], finalni_prevod.Z12					
		Pastorek 1	Pastorek 2	Věvec vřetene	Požadavek
Namáhání zubů na ohyb	S_{ohyb} [-]	4,137		4,148	1,7
Stykový tlak v bocích zubů	S_{tlak} [-]	1,942		2,155	1,2
Průhyb vřetene	[mm]	0,037	0,038	-	0,04 [mm]
Sklon vřetene	[mrad]	-0,126	-0,126	-	1e-3 [rad]
Zhodnocení		VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE	

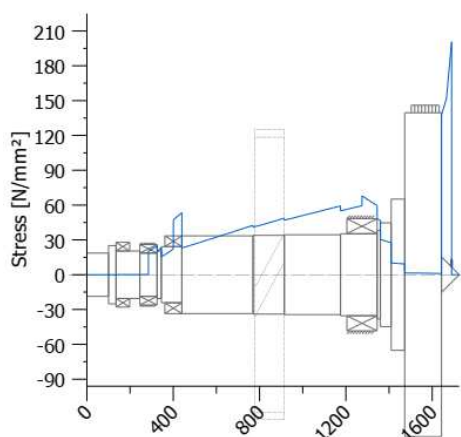
Tabulka 45: Kontrola finálního převodu [P8]

6.6.3 Kontrola vřetene

Vlastní vřeteno je kontrolováno z hlediska redukovaného napětí na hrotu a na těle vřetene.

Příloha č.11 [P11], vřeteno.W10			Příloha č.15 [P15], protkolol KISSsoft	
		Vřeteno	Hrot vřetene	
Materiál dle ČSN [P19]		12 050	15 142	
Mez kluzu	R_m [MPa]	370	500	
Redukované napětí [PŘÍLOHA XX]	σ_{Red} [MPa]	68,25	200,64	
Součinitel bezpečnosti proti mezi kluzu	$s = \frac{R_m}{\sigma_{Red}}$ [-]	5,49	2,49	
Zhodnocení		VYHOVUJE	VYHOVUJE	

Tabulka 46: Kontrola vřetene [P11, P15]



Obrázek 61: Průběh redukovaného napětí [P11, P15]

6.7 Návrh spojení kola finálního převodu a vřetene

Spojení kola finálního převodu s vlastním vřetenem je realizováno nalisovaným spojem. Výpočet uložení hřídele a kola je uveden v příloze č.14 [P14].

[P14] Příloha č. 14, Nalisovaný spoj vřeteno				
Parametr			Vřeteno	Náboj ozubeného kola
Materiál dle ČSN [P19]			12 050	18CrNiMo7-6
Mez kluzu	Re	MPa	370	640
Kontrolní výpočet				
Vypočtené uložení			s5	H7
Maximální redukované napětí v náboji	σ_{red}	MPa	-	52,079
Součinitel bezpečnosti proti mezi kluzu	S_k	-	-	3,438
Teplota ohřátí – montáž	t	°C	20	103

Tabulka 47: Spojení kola finálního převodu a vřetene [P14]

7 MKP analýza navrženého vřeteníku

Analýza navrženého vřeteníku bude provedena za účelem ověření tuhosti a pevnosti vřeteníku.

Posouzení pevnosti vřeteníku bude vycházet z rozložení redukovaného napětí. V kritických místech bude stanoven součinitel bezpečnosti k mezi kluzu uvažovaného materiálu.

Tuhost vřeteníku bude posouzena na základě znalosti okrajových podmínek, kterými jsou stanovené reakce v uložení vřetene a z MKP analýzy získaných hodnot posunutí středů ložisek. Z těchto hodnot bude stanovena tuhost ve směru tří souřadnicových os. Ve výpočtu MKP jsou oproti programu Kisssoft pozměněny osy souřadného systému.

Kisssoft	MKP
osa x	osa x
osa y	- osa z
osa z	osa y

Tabulka 48: Záměna os souřadného systému

7.1 Materiály

Skříň vřeteníku je koncipovaná jako odlitek. Uvažovaný materiál vřeteníku je ocel na odlitky dle ČSN 42 2630. Materiál pouzdra a klemy předního a zadního ložiska jsou z uhlíkové oceli dle ČSN 12 050.

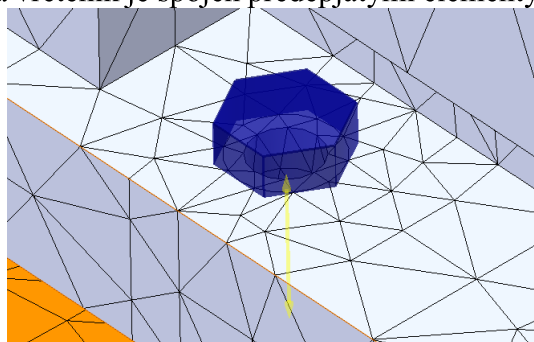
Díl	Vřeteník	Klema předního ložiska	Klema zadního ložiska	Pouzdro
Značení dle ČSN [P19]	42 2630	12 050	12 050	12 050
Mez pevnosti v tahu [MPa]	380	750	750	750
Mez kluzu [MPa]	200	565	565	565
Modul pružnosti [GPa]	210	210	210	210
Poissonovo číslo	0,26	0,28	0,28	0,28
Hustota [kg/m ³]	7250	7800	7800	7800

Tabulka 49: Materiály částí vřeteníku [P19]

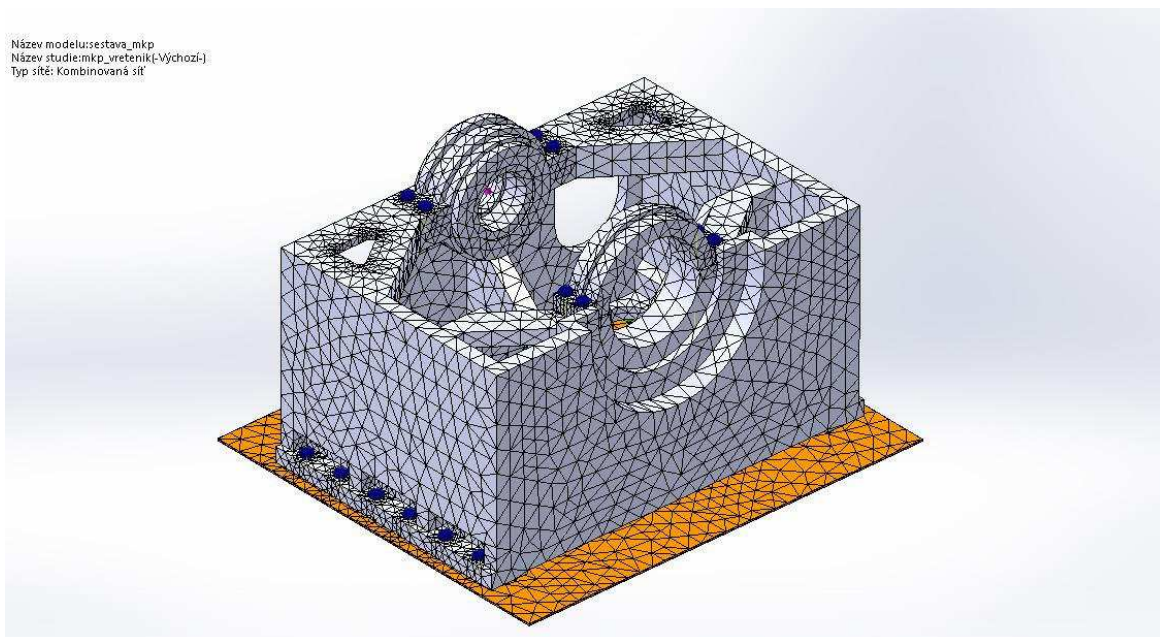
7.2 Diskretizace modelu vřeteníku

Model vřeteníku je diskretizován tetraedry o velikosti 95 mm. V místech uchycení šroubů a uložení vřetene je síť zjemněna. Lože vřeteníku a vřeteník je spojen předepjatými elementy, přičemž lože je uvažováno jako absolutně tuhé a je tak nedeformovatelné.

Spojení předepjatými elementy v případě spojení vřeteník – lože a vřeteník – klemy uložení jsou provedené pomocí rigidů pod hlavou šroubů a s dříky šroubů pomocí beamu s definovaným předepnutím, která jsou spojena s ložem.



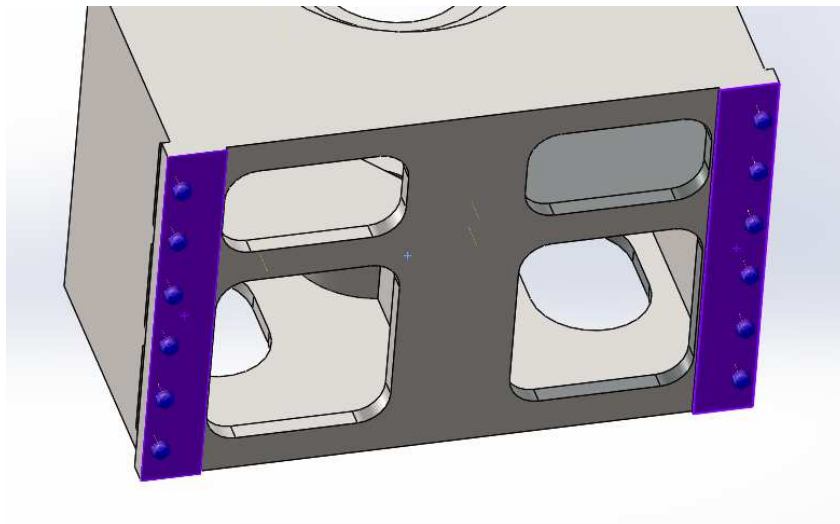
Obrázek 62: Zjemnění sítě po hlavou šroubu



Obrázek 63: Diskretizace modelu

7.3 Definování kontaktu

Nejprve je definován kontakt mezi vřeteníkem a ložem. Jedná se o kontakt „plocha – plocha“ s uvažováním tření a bez možného průniku. Uvažovaný součinitel tření je 0,15. Dále jsou definovány kontakty mezi vřeteníkem a klemou ložisek včetně pouzdra ložisek zadního uložení. I zde se jedná o kontakt „plocha – plocha“ s určeným součinitelem tření.



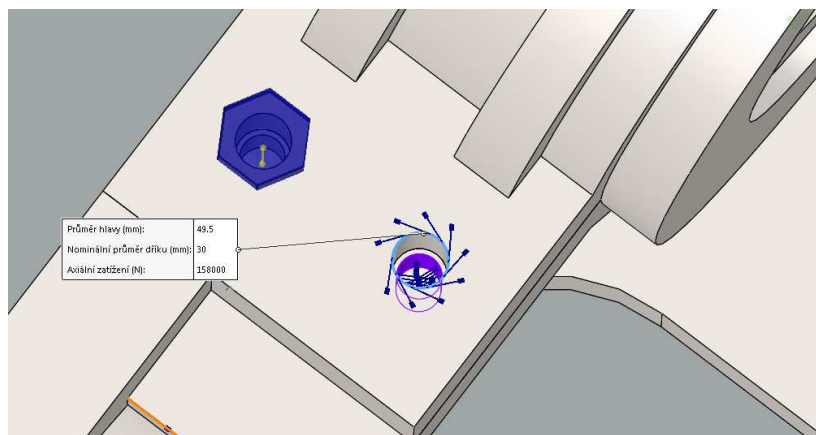
Obrázek 64: Kontaktní plochy vřeteník – lože

7.4 Okrajové podmínky

Zamezení všech posuvů a rotací je definováno na ploše lože. Z hlediska statických okrajových podmínek byly definovány síly předepnutí ve šroubových spojích. Předepnutí šroubu je stanoveno dle katalogu výrobce BRIOL.

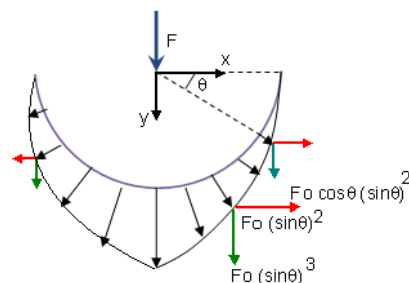
Rozměr šroubu	M30
Třída pevnosti	5.8
Utahovací moment [Nm]	924
Osová síla [kN]	158
Rozteč závitu [mm]	3,5

Tabulka 50: Parametr šroubu [28]



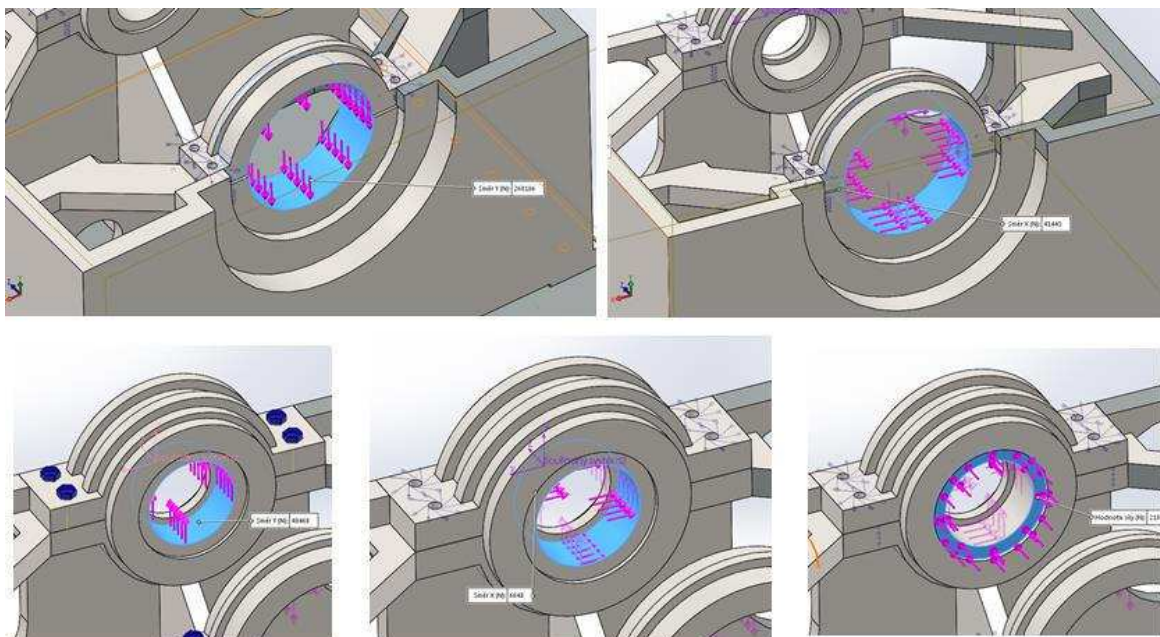
Obrázek 65: Předepnutý šroubový spoj

Dále bylo definované zatížení v místech uložení ložisek. V uložení předního ložiska jsou uvažovány dvě radiální složky reakcí od zatížení. V uložení zadního ložiska jsou také uvažovány dvě radiální složky reakcí a jedna axiální složka reakce. Nejvyšší zatížení je v případě zatěžovacího stavu 3. Všechny složky reakcí pro tento stav byly již stanoveny ve výpočtu v programu Kisssoft. Radiální zatížení je definováno ke středu ložiska a vlastní rozložení zatížení od síly je v uložení ložiska parabolické.



U parabolického rozložení je zatížení přenášeno do všech uzlů po obvodu jako $F_0(1-x^2)$, takže dochází k redukci na $F_0 \sin^2 \theta$. Hodnota F_0 se zakládá na požadavku rovnováhy síly [30].

$$F = \sum_{i=0}^n (F_0)_i \sin^3 \theta$$

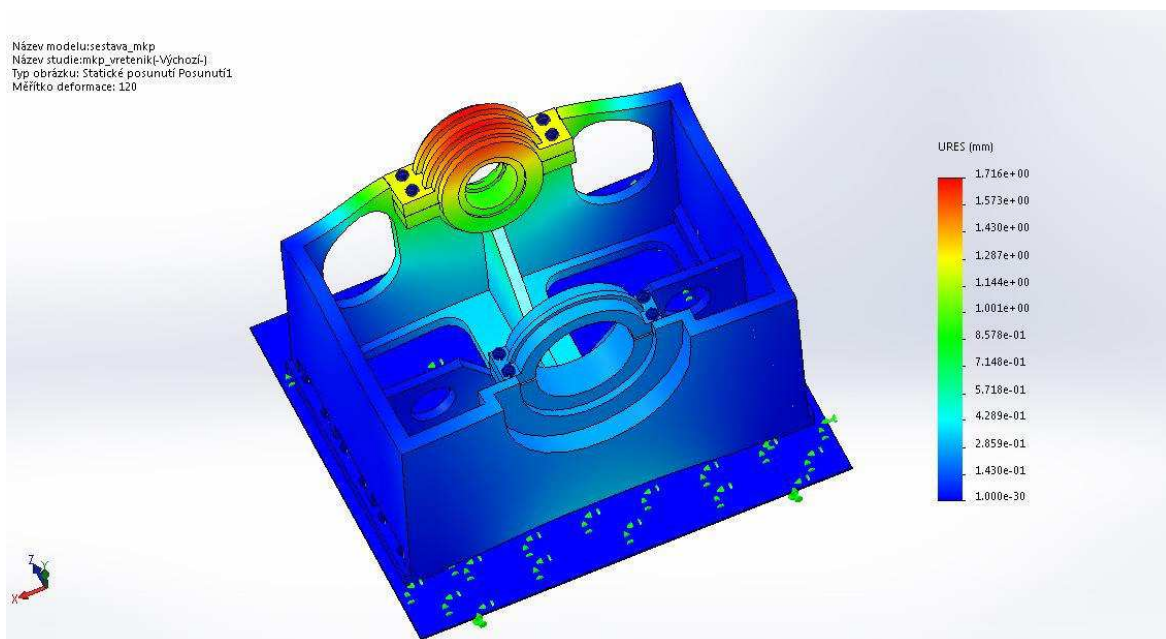


Obrázek 66: Zatížení v místě ložisek

7.5 Optimalizace skříně vřeteníku

Nejprve je proveden hrubý výpočet koncepční verze skříně vřeteníku za účelem zjištění maximálních posunutí. Vyšetřovaným místem je místo axiálního a radiálního uložení na konci vřetene. Zde je nutné ověřit především posunutí ve směru podélné osy vřetene a sklon v místě uložení radiálních a axiálních válečkových ložisek. Druhým posuzovaným místem je pozice hlavního ložiska. Zde je důležité posunutí ve směru *osy x* a *osy y*. Posunutí ve směru těchto os má významný vliv na pracovní přesnost stroje. Skříň vřeteníku bude optimalizovaná tak, aby se zvýšila tuhost a zmenšilo se posunutí především v těchto dvou významných místech skříně.

7.5.1 Koncepční varianta skříně



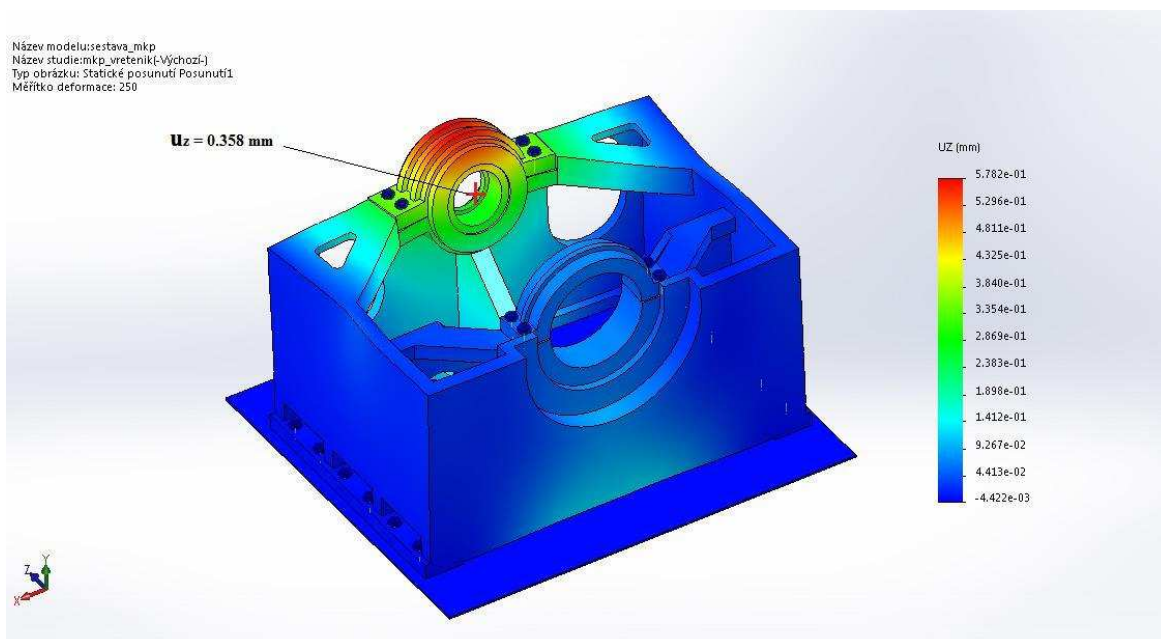
Obrázek 67: Celkové posunutí

Na obrázku 67 je vyobrazeno celkové posunutí. V místě zadního uložení vřetene je posunutí v řádech milimetrů. Při analýze posunutí pouze ve směru *osy z* je hodnota posunutí v místě zadního radiálního ložiska 1,127 mm a sklon činí $0,1^\circ$. V místě uložení je hodnota sklonu i posunutí v tomto případě velmi vysoká. Maximální dovolená hodnota sklonu pro axiální válečková ložiska je $0,07^\circ$. V místě hlavního ložiska je posunutí ve směru *osy x* -0,027 mm a ve směru *osy y* -0,058 mm. Z obrázku je možné i posoudit, jakým způsobem se skříň vřeteníku deformuje. Na tomto základě budou navrženy úpravy za účelem zvýšení tuhosti skříně.

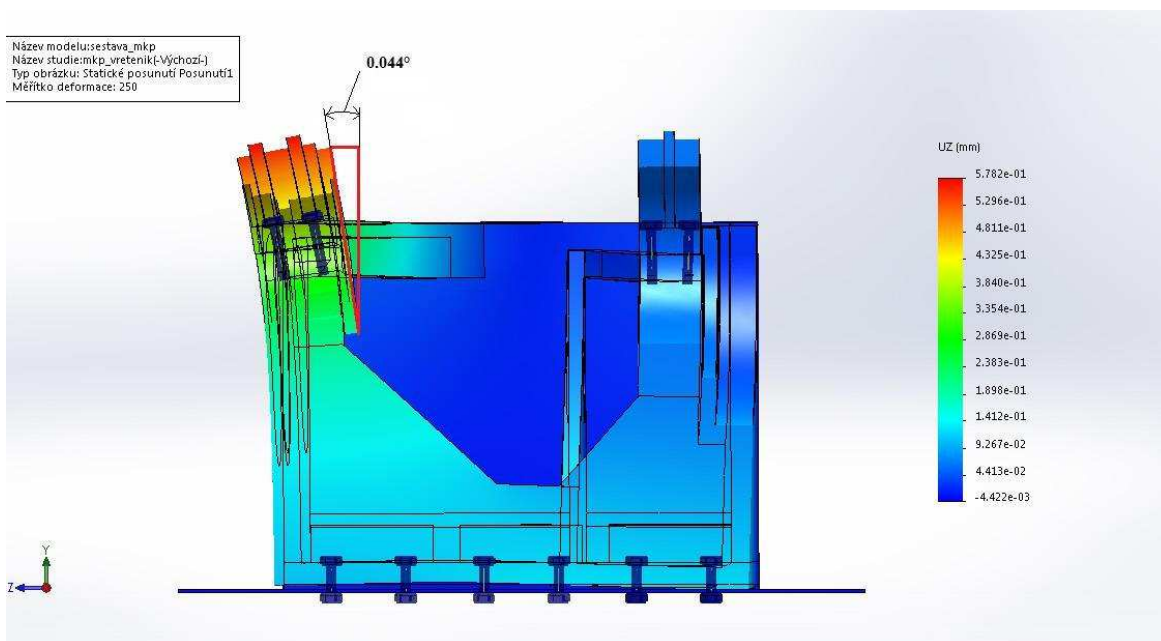
7.5.2 Modifikovaná varianta skříně vřeteníku

V této variantě skříně vřeteníku byla přidána rohová vyztužení a zároveň bylo zesíleno středové žebro. Tyto úpravy zajistily menší deformace zadní stěny skříně vřeteníku. V místě zadního uložení vřetene je nyní posunutí ve směru *osy z* 0,358 mm. Sklon v místě zadního uložení vřetene činí $0,044^\circ$.

V místě hlavního ložiska se hodnota posunutí snížila ve směru osy x na $-0,019$ mm a ve směru osy y na $-0,058$ mm.

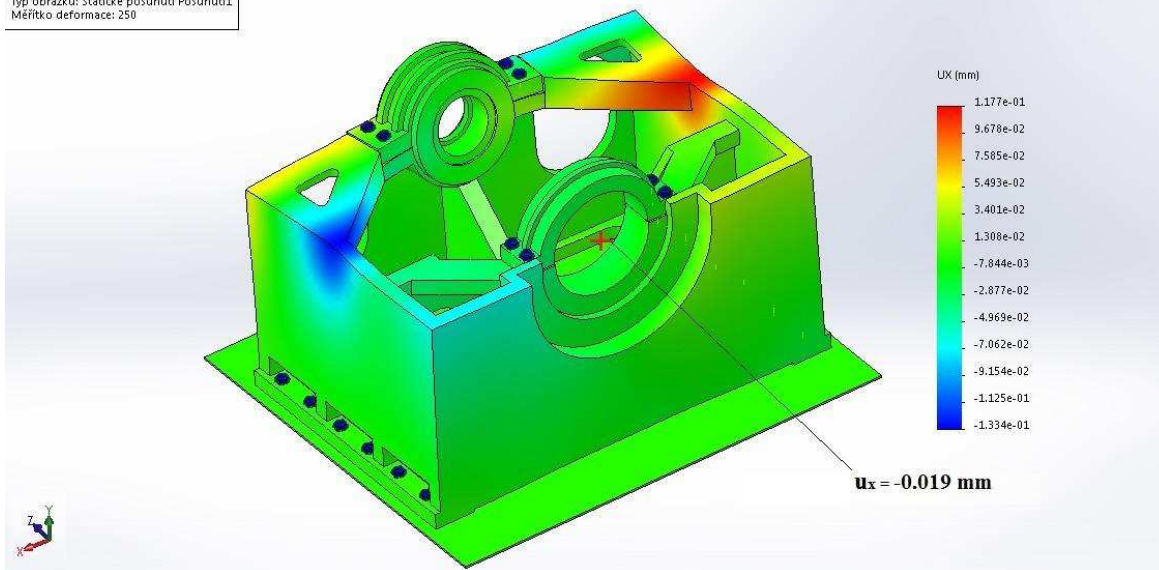


Obrázek 68: Posunutí ve středu axiálního ložiska ve směru osy z



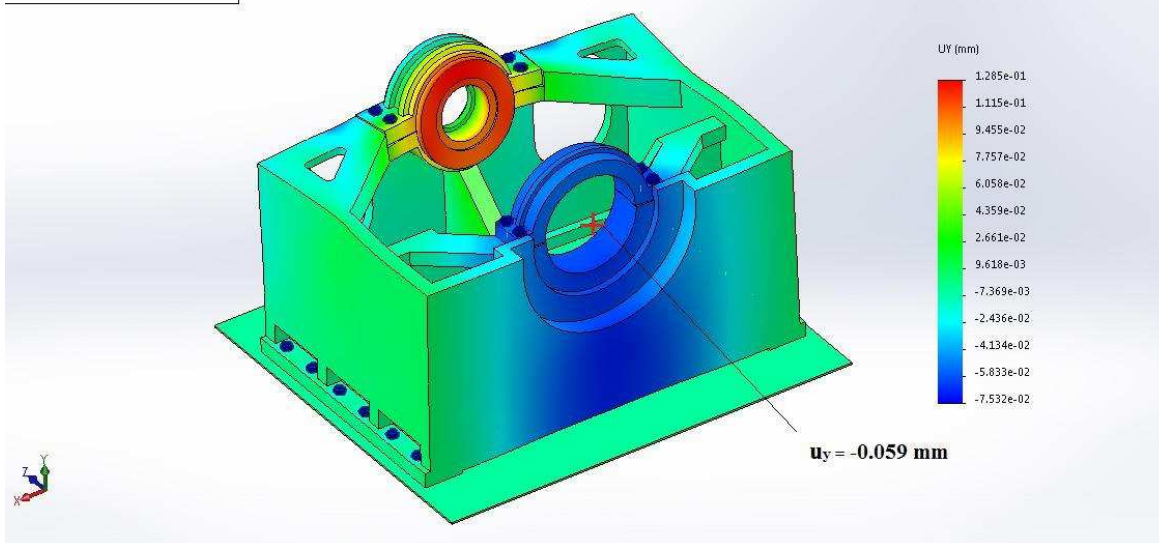
Obrázek 69: Sklon v místě zadního uložení konce vřetene

Název modelu: sestava_mkp
Název studie: mkp_vretnik(Výchozí)
Typ obrázku: Statické posunutí Posunutí1
Měřítko deformace: 250



Obrázek 70: Posunutí ve středu hlavního ložiska ve směru osy x

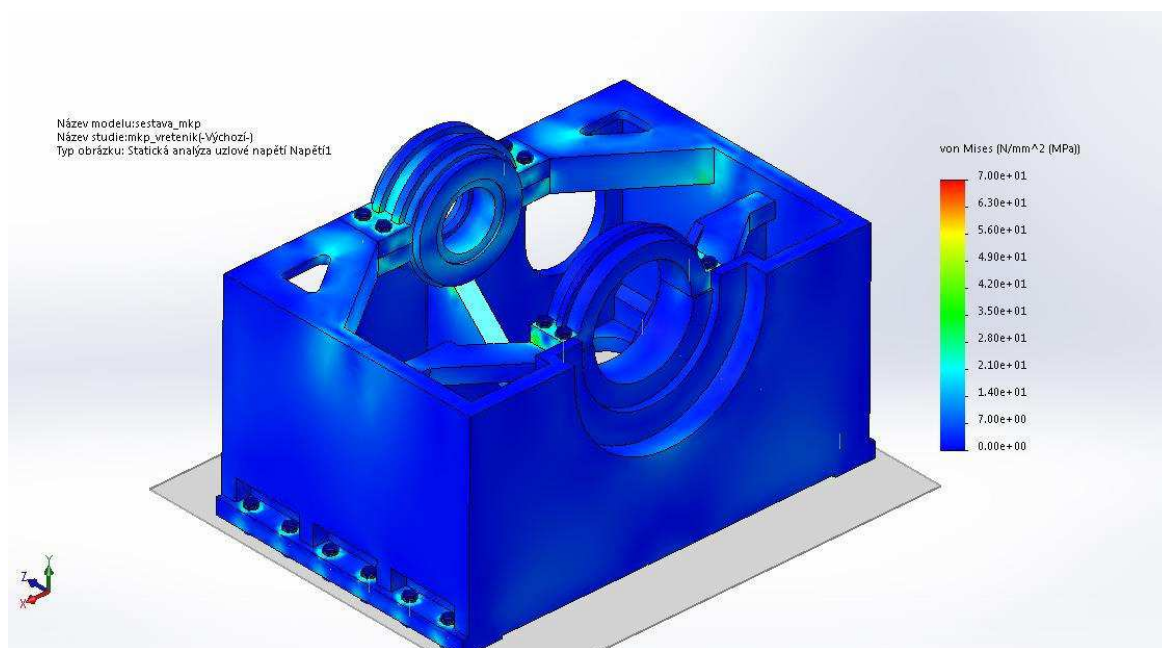
Název modelu: sestava_mkp
Název studie: mkp_vretnik(Výchozí)
Typ obrázku: Statické posunutí Posunutí1
Měřítko deformace: 250



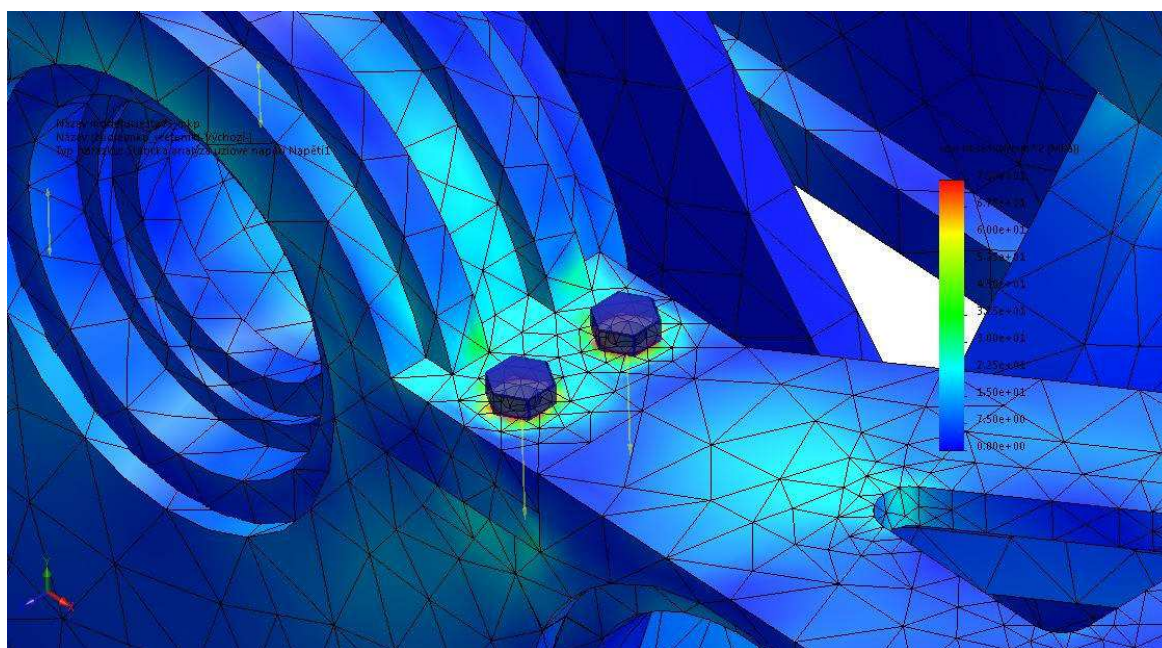
Obrázek 71: Posunutí ve středu hlavního ložiska ve směru osy y

7.6 Posouzení vřeteníku z hlediska pevnosti

Na obrázku je zobrazeno rozložení redukovaného napětí. Redukované napětí bylo stanoveno dle hypotézy HMM. Nejvyšší hodnota napětí byla zjištěna v okolí šroubových spojů zadní klemy ložisek, kde hodnota napětí dosahuje v průměru 63 MPa. Bezpečnost vůči mezi kluzu je v tomto místě: $k = \frac{Re}{\sigma_{red}} = \frac{565}{63} \approx 9$. V okolí šroubových spojů uchycení skříně vřeteníku k loži je průměrná hodnota napětí 55 MPa. Bezpečnost vůči mezi kluzu je v tomto místě: $k = \frac{Re}{\sigma_{red}} = \frac{200}{55} \approx 3,63$.



Obrázek 72: Redukované napětí dle HMM



Obrázek 73: Redukované napětí v místě šroubového spoje dle HMM

7.7 Posouzení vřeteníku z hlediska tuhosti

Na základě vyšetření posuvů ve středu předního a zadního uložení a na základě znalosti zatěžující síly je možné stanovit tuhost vřeteníku ve směru všech tří souřadnicových os.

Tuhost je definována jako:

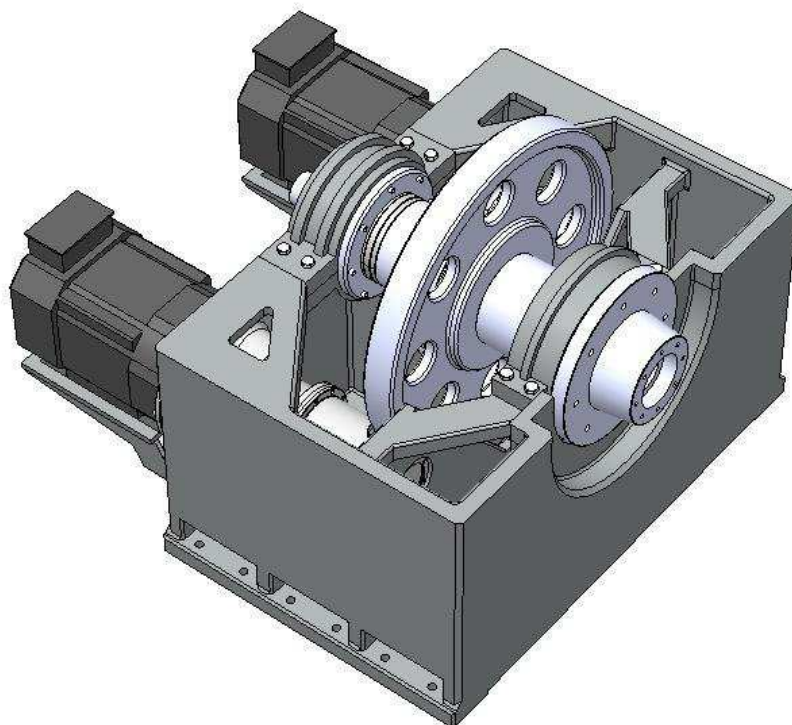
$$k_i = \frac{F_i}{u_i},$$

kde F_i je zatěžující síla a u_i je posuv a index i značí směr ve zvoleném souřadném systému.

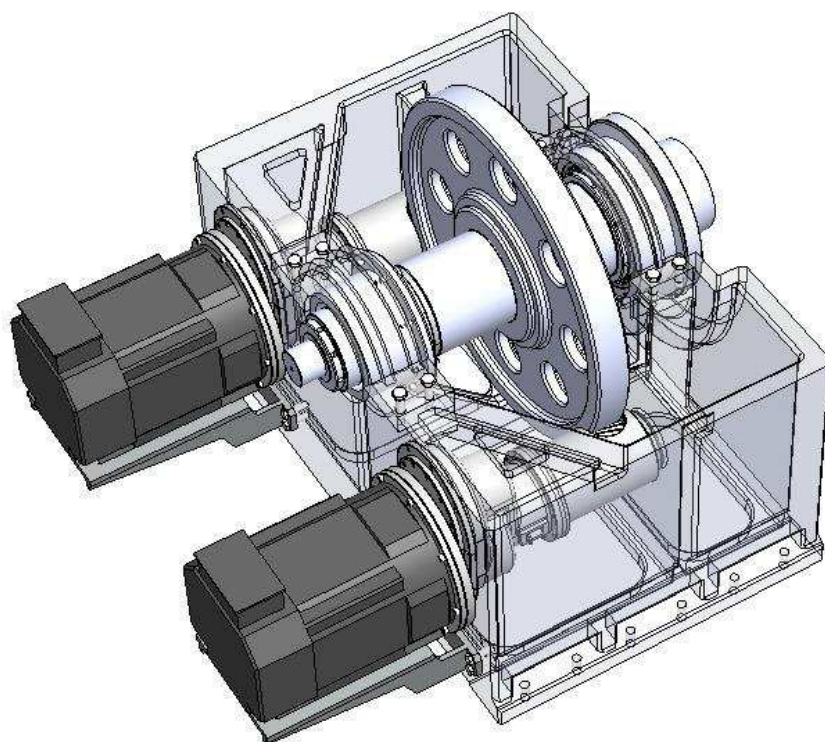
Umístění	Přední uložení vřetene	Zadní uložení vřetene
Zatížení ve směru osy x	- 41 443 N	- 6 648 N
Posunutí ve směru osy x	- 0.019 mm	- 0.006 mm
Tuhost ve směru osy x	2 181 kN/mm	1 108 kN/mm
Zatížení ve směru osy y	- 268 106 N	49 468 N
Posunutí ve směru osy y	- 0.059 mm	0.035 mm
Tuhost ve směru osy y	4 544 kN/mm	1 413 kN/mm
Zatížení ve směru osy z	-	218 428 N
Posunutí ve směru osy z	-	0.358 mm
Tuhost ve směru osy z	-	610 kN/mm
Sklon v místě uložení	-	0,044°

Tabulka 51: Tuhost vřeteníku v uložení vřetene

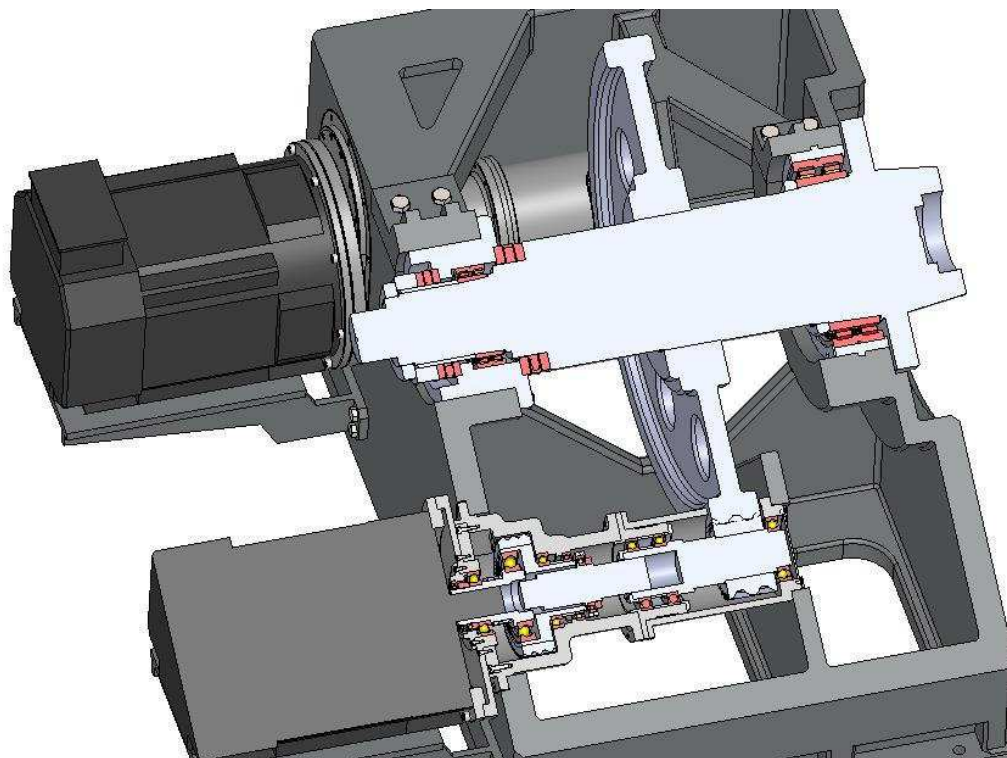
8 Model sestavy vřeteníku



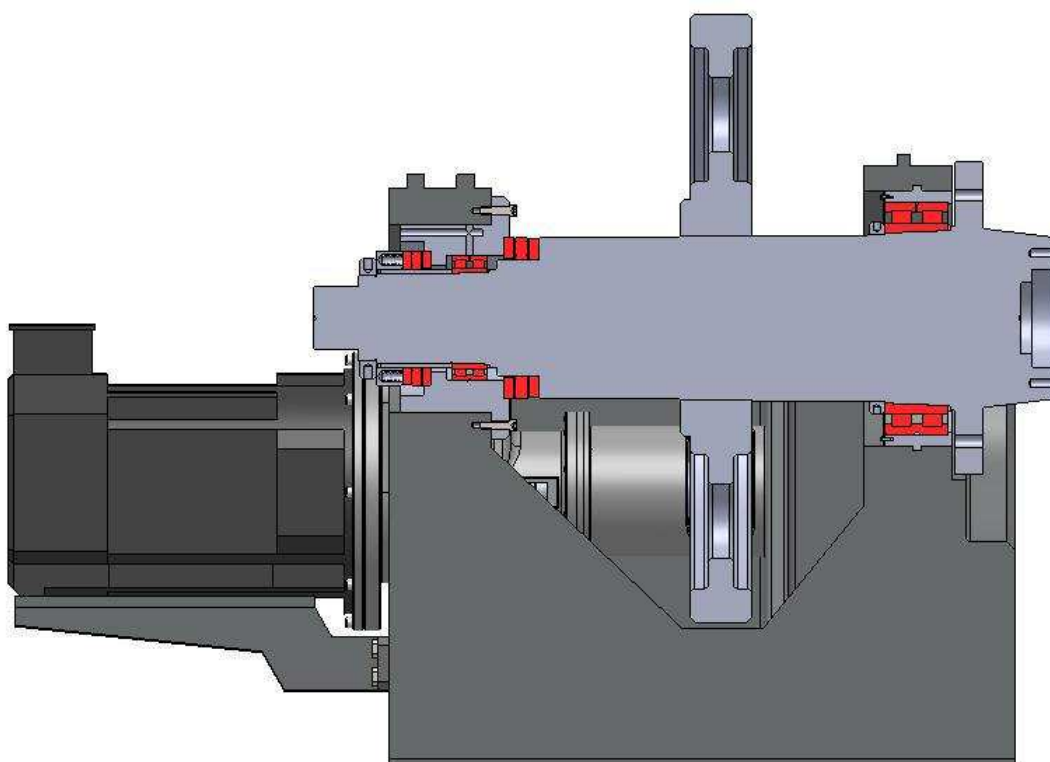
Obrázek 74: Sestava vřeteníku – pohled 1



Obrázek 75: Sestava vřeteníku – pohled 2



Obrázek 76: Sestava vřeteníku – pohled 3



Obrázek 77: Sestava vřeteníku – pohled 4

9 Závěr

Obsahem diplomové práce bylo navrhnout konstrukční řešení hlavního pohonu soustružnického vřeteníku nejnižší řady multifunkčního stroje S-MT od firmy ŠKODA MACHINE TOOL a.s.. V úvodu práce je nejprve představena firma ŠKODA MACHINE TOOL a.s., která je zadavatelem tématu diplomové práce. V úvodní teoretické části se práce zabývá také popisem konstrukčních celků, vlastností a technologických možností multifunkčního stroje S-MT. V závěru úvodní části práce je porovnání stroje S-MT s konkurenčními produkty předních světových výrobců těžkých obráběcích strojů.

V praktické části práce se přistoupilo k vlastnímu konstrukčnímu návrhu hlavního pohonu soustružnické části stroje nejnižší řady S150MT. Prvním krokem byla optimalizace a kontrolní výpočet navržené dvoustupňové převodovky hlavního pohonu v programu KISSsys. Za účelem možné optimalizace převodovky bylo nejprve nutné stanovit zatěžovací spektrum. Zatěžovací spektrum se stanovilo na základě výpočtového programu doc. Ing. Zdeňka Hudece, CSc.. Optimalizace a kontrola převodovky spočívala především v kontrole ozubení, kontrole tuhosti a pevnosti hřídelí převodovky. Optimalizováno bylo rovněž valivé uložení hřídelí. V programu SolidWorks byla navržená převodovka kompletně vymodelována. Pomocí programu KISSsoft byl následně navržen finální převod. V programu KISSsoft bylo rovněž navrženo vřeteno a jeho uložení. Provedení vřetene bylo navrženo ve dvou variantách. První varianta uvažovala o umístění ozubeného kola finálního převodu před hlavním ložiskem a druhá varianta uvažovala o umístění finálního převodu přibližně ve středu vřetene. V programu KISSsoft byly obě varianty analyzovány a na základě stanovených kritérií byla vybrána nejvhodnější varianta provedení. Na základě stanoveného zatěžovacího spektra bylo navrženo v programu KISSsoft vlastní uložení vřetene. V programu Mathcad se stanovilo potřebné předepnutí axiálních ložisek. V rámci kontrolního výpočtu konstrukčního návrhu byla ověřena tuhost vřetene a tuhost uložení vřetene. Dále byly vypočteny tepelně stabilní otáčky, které v prvotním výpočtu vycházely velmi nízké. Z toho důvodu byla navržena příslušná opatření, vedoucí ke zvýšení tepelně stabilních otáček. Závěr práce obsahuje návrh vlastního vřeteníku a výpočet tuhosti vřeteníku s využitím MKP analýzy.

Při řešení diplomové práce byla využita celá řada softwarových nástrojů. Návrh a optimalizace převodovky byly provedeny v programu KISSsys, který umožňuje efektivně navrhovat a optimalizovat sestavy převodových mechanismů. Druhým využitým nástrojem je program KISSsoft, ve kterém byl navrženo finální převod, vřeteno a uložení vřetene. Program KISSsoft je velice efektivní nástroj umožňující návrh a kontrolu různých strojních částí. Uživatelsky ovšem není příliš přívětivý. Technické výpočty byly převážně provedeny v programu Mathcad. Mathcad je nástroj umožňující rychlý přepočítání veličin provedených za účelem optimalizace konstrukce. Problematická je však v programu formální úprava dokumentu, a proto byly všechny výpočty vloženy do příloh diplomové práce. Pro návrh spojení drážko-

váním byl využit program Inventor a modely převodovky, vřeteníku a vřetene byly vytvořeny v CAD programu SolidWorks. Analýza MKP byla provedena v rozšiřujícím modulu programu SolidWorks Simulation. Využití softwarové podpory výrazným způsobem z kvalitnilo řešení zadaného úkolu.

V rámci řešení diplomové práce jsem se snažil plně využít poznatků a znalostí získaných v průběhu mého studia na Fakultě strojní ZČU v Plzni. U zvoleného tématu diplomové práce bylo již v počátku zřejmé, že se jedná o velmi obsáhlé a náročné téma. Obsah řešení diplomové práce je proto zacílen především na zásadní otázky při návrhu hlavního pohonu soustružnického vřeteníku. Tímto se v rámci omezeného rozsahu diplomové práce podařilo splnit zadané požadavky.

Použité zdroje

- [1] HUDEC, Zdeněk. *Hlavní pohon - příklady* [online]. Plzeň: ZČU v Plzni, 2013.
- [2] HUDEC, Zdeněk. *Uložení vřetene - příklady* [online]. Plzeň: ZČU v Plzni, 2013.
- [3] LAŠOVÁ, Václava. *Základy stavby obráběcích strojů*. Plzeň: ZČU, 2012.
- [4] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM Publishing, 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [5] MAREK, Jiří a Petr BLECHA. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Vyd. 2., přeprac. a rozš. Praha: MM Publishing, 2010. MM speciál. ISBN 978-80-254-7980-3.
- [6] HYNEK, Martin a kolektiv. *Výpočtová zpráva: vřeteník MKP* [online]. Plzeň: ZČU v Plzni, 2013.
- [7] LAŠOVÁ, Václava. *Metoda konečných prvků ve výpočtech obráběcích strojů*. V Plzni: Západočeská univerzita, 2011. ISBN 978-80-261-0008-9.
- [8] HOSNEDL, Stanislav a kolektiv. *Obecné strojí částí 1* [online]. 2. vydání. Plzeň: ZČU v Plzni, 2015. ISBN 978-80-261-0261-8.
- [9] LEINVEBER, Jan, Jaroslav ŘASA a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky*. 3., dopl. vyd., dot. Praha: Scientia, 1999. ISBN 80-718-3164-6.
- [10] ŘEHOŘ, Jan. *Přednášky MTC*. Plzeň, 2017. ZČU.
- [11] VYŠATA, Jiří. *Přednášky STO*. Plzeň, 2011. ZČU.
- [12] ŠKODA MACHINE TOOL A.S. [online]. 2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://skodamt.com/cs/>
- [13] ŠKODA [online]. 2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.skoda.cz/historie/>
- [14] *Wikipedia: Škoda (podnik)* [online]. 2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%A0koda_\(podnik\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%A0koda_(podnik))
- [15] ALTA [online]. 2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.alta.cz/o-spolecnosti/historie/historicke-milniky/>
- [16] *YOUTUBE: GEORG ultraturn MC* [online]. 2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=F9Q4jt1Pvx0>
- [17] *MM Průmyslové spektrum: Kinematika obrábění* [online]. 2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kinematika-obrabeni.html>
- [18] *PILSEN STEEL: Reference* [online]. 2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kinematika-obrabeni.html>
- [19] HOLUB, Tomáš. *Progresivní metody obrábění na těžkých obráběcích NC strojích* [online]. ZČU v Plzni, 2013 [cit. 2019-05-10]. Diplomová práce. ZČU. Vedoucí práce Doc. Ing. Řehoř, Ph.D.
- [20] *Sandvik Coromant: Řešení pro zapichování* [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/industrysolutions/condensing_power/pages/grooving-solutions.aspx
- [21] *MKV Ozubená kola s.r.o.* [online]. 2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://www.mkv.cz/data/prilohy/ofirme.pdf>
- [22] *MM Průmyslové spektrum: Kompletní obrábění rotorů turbín velkých hmotností* [online]. 2017 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kompletni-obrabeni-rotoru-turbin-velkych-hmotnosti.html>
- [23] *WALDRICHSIEGEN: ProfiTurn M* [online]. 2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.waldrichsiegen.de/index.php?id=336>

- [24] *NILES - SIMMONS* [online]. 2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://niles-simmons.de/de/baukastensystem-c-baureihe.html>
- [25] *WEINGÄRTNER: multi product machining center - mpmc* [online]. 2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.weingartner.com/de/maschinen/mpmc/ueberblick/>
- [26] *WFL: MILLTURN* [online]. 2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.wfl.at/maschinen/millturn>
- [27] *SKF* [online]. 2019 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.skf.com/cz/index.html>
- [28] *BRIOL spojovací materiály* [online]. 2019 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.briol.cz/technicke-informace/utahovaci-momenty-sroubu>
- [29] *KISSsoft AG: Instructions for KISSsoft* [online]. 2019 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: https://www.kisssoft.ch/english/downloads/instructions_kisssoft.php
- [30] *SOLIDWORKS: Help Solidworks* [online]. 2019 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: http://help.solidworks.com/2018/Czech/SolidWorks/sldworks/c_introduction_toplevel_topic.htm?id=aae459ab1e994cf1bafa2bad0864af28#Pg0

Seznam příloh

- [P1] Příloha č. 1 (vevázaná): Program Mathcad, Výpočet výstupních parametrů na vřetení
- [P2] Příloha č. 2 (vevázaná): Program Mathcad, Výpočet spektra zatížení
- [P3] Příloha č. 3 (vevázaná): Výstupní soubor „Results.csv“
- [P4] Příloha č. 4 (CD): Program KISSsys „s150mt.ks“
- [P5] Příloha č. 5 (vevázaná): Výstupní protokol Inventor, Výpočet drážkování
- [P6] Příloha č. 6 (vevázaná): Dovolené hodnoty posunutí a sklonu hřídele
- [P7] Příloha č. 7 (vevázaná): Program Mathcad, Výpočet nalisovaného spoje – převodovka
- [P8] Příloha č. 8 (CD): Program KISSsoft „finalni_prevod.Z12
- [P9] Příloha č. 9 (CD): Program KISSsoft „vreteno_varianta1.W10“
- [P10] Příloha č. 10 (CD): Program KISSsoft „vreteno_varianta2.W10“
- [P11] Příloha č. 11 (CD): Program KISSsoft „vreteno.W10“
- [P12] Příloha č. 12 (vevázaná): Program Mathcad, Výpočet předeprnutí axiálních ložisek
- [P13] Příloha č. 13 (vevázaná): Program Mathcad, Výpočet tuhosti vřetene a uložení
- [P14] Příloha č. 14 (vevázaná): Program Mathcad, Výpočet nalisovaného spoje – vřeteno
- [P15] Příloha č. 15 (vevázaná): Protokol programu KISSsoft, vřeteno a uložení vřetene
- [P16] Příloha č. 16 (vevázaná): Protokol programu KISSsoft, výpočet tepelně stabilních otáček
- [P17] Příloha č. 17 (volná): Výrobní výkres vřetene: KKS-DP-D001
- [P18] Příloha č. 18 (volná): Sestava vřeteníku: KKS-DP-S001
- [P19] Příloha č. 19 (vevázaná): Technické listy materiálů

PŘÍLOHA č. 1

Výpočet výstupních parametrů na vřetení

Řada S150MT

Motor Siemens 1PH8224 - XXBXX

Dvoustupňová převodovka

Výkon motoru: $P := 38 \text{ kW}$

Počet stupňů: $n := 2$

Jmenovité otáčky: $n_e := 500 \frac{1}{\text{min}}$

Převodový poměr mezi koly 1-2: $i_{12} := 2.242$

Maximální otáčky: $n_{max} := 4500 \frac{1}{\text{min}}$

Převodový poměr mezi koly 3-4: $i_{34} := 3.909$

Převodový poměr finálního převodu: $i_{rs} := 6.458$

Účinnost páru ozubených kol: $\eta := 0.98$

Výpočet celkového převodového poměru 2. stupně:

$$i_2 := i_{rs} = 6.458$$

Výpočet převodového poměru 1. stupně převodovky:

$$i_{2r.1} := i_{12} \cdot i_{34} = 8.764$$

Výpočet celkového převodového poměru 1. stupně:

$$i_1 := i_{2r.1} \cdot i_{rs} = 56.598$$

Výpočet celkové účinnosti převodovky:

$$\eta_c := \eta \cdot \eta \cdot \eta = 0.941$$

Jmenovitý moment motoru:

$$M_e := \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n_e} = 725.747 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Výstupní výkon na vřetení:

$$P_{out} := 2 \cdot P \cdot \eta_c = 71.531 \text{ kW}$$

Jmenovité otáčky jednotlivých stupňů

$$n_{se1} := \frac{n_e}{i_1} = 8.834 \frac{1}{\text{min}}$$

$$n_{se2} := \frac{n_e}{i_2} = 77.423 \frac{1}{\text{min}}$$

Maximální otáčky jednotlivých stupňů

$$n_{sM1} := \frac{n_{max}}{i_1} = 79.508 \frac{1}{\text{min}}$$

$$n_{sM2} := \frac{n_{max}}{i_2} = 696.81 \frac{1}{\text{min}}$$

Maximální momenty v jednotlivých stupních

$$M_{e1} := 2 \cdot M_e \cdot \eta_c \cdot i_1 = 77.32 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{e2} := 2 \cdot M_e \cdot \eta_c \cdot i_2 = 8.822 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pokles výkonu mezi 1. a 2. stupněm

$$a_{21} := \frac{n_{se2}}{n_{sM1}} = 0.974 < \text{než } 1.26 \text{ stanovený normou - VYHOVUJE (překrytí)}$$

Řada S200MT

Motor Siemens 1PH8226 - XXBXX

Dvoustupňová převodovka

Výkon motoru: $P := 48 \text{ kW}$

Počet stupňů: $n := 2$

Jmenovité otáčky: $n_e := 500 \frac{1}{\text{min}}$

Převodový poměr mezi koly 1-2: $i_{12} := 2.242$

Maximální otáčky: $n_{max} := 4500 \frac{1}{\text{min}}$

Převodový poměr mezi koly 3-4: $i_{34} := 3.909$

Převodový poměr finálního převodu: $i_{rs} := 9.048$

Účinnost páru ozubených kol: $\eta := 0.98$

Výpočet celkového převodového poměru 2. stupně:

$$i_2 := i_{rs} = 9.048$$

Výpočet převodového poměru 1. stupně převodovky:

$$i_{2r.1} := i_{12} \cdot i_{34} = 8.764$$

Výpočet celkového převodového poměru 1. stupně:

$$i_1 := i_{2r.1} \cdot i_{rs} = 79.296$$

Výpočet celkové účinnosti převodovky:

$$\eta_c := \eta \cdot \eta \cdot \eta = 0.941$$

Jmenovitý moment motoru:

$$M_e := \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n_e} = 916.732 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Výstupní výkon na vřetení:

$$P_{out} := 2 \cdot P \cdot \eta_c = 90.354 \text{ kW}$$

Jmenovité otáčky jednotlivých stupňů

$$n_{se1} := \frac{n_e}{i_1} = 6.305 \frac{1}{\text{min}}$$

$$n_{se2} := \frac{n_e}{i_2} = 55.261 \frac{1}{\text{min}}$$

Maximální otáčky jednotlivých stupňů

$$n_{sM1} := \frac{n_{max}}{i_1} = 56.749 \frac{1}{\text{min}}$$

$$n_{sM2} := \frac{n_{max}}{i_2} = 497.347 \frac{1}{\text{min}}$$

Maximální momenty v jednotlivých stupních

$$M_{e1} := 2 \cdot M_e \cdot \eta_c \cdot i_1 = 136.837 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad M_{e2} := 2 \cdot M_e \cdot \eta_c \cdot i_2 = 15.614 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pokles výkonu mezi 1. a 2. stupněm

$$a_{21} := \frac{n_{se2}}{n_{sM1}} = 0.974 < \text{než } 1.26 \text{ stanovený normou - } \underline{\text{VYHOVUJE (překrytí)}}$$

Řada S320MT

Motor Siemens 1PH8226 - XXCXX

Třístupňová převodovka

Výkon motoru: $P := 92 \text{ kW}$

Počet stupňů: $n := 3$

Jmenovité otáčky: $n_e := 1000 \frac{1}{\text{min}}$

Převodový poměr mezi koly 1-2: $i_{12} := 3.121$

Maximální otáčky: $n_{max} := 4500 \frac{1}{\text{min}}$

Převodový poměr mezi koly 3-4: $i_{34} := 3.097$

Převodový poměr mezi koly 5-6: $i_{56} := 1$

Převodový poměr finálního převodu: $i_{rs} := 15$

Účinnost páru ozubených kol: $\eta := 0.98$

Výpočet celkového převodového poměru 3. stupně:

$$i_3 := i_{rs} = 15$$

Výpočet převodového poměru 2. stupně převodovky:

$$i_{3r.2} := i_{12} \cdot i_{56} = 3.121$$

Výpočet celkového převodového poměru 2. stupně:

$$i_2 := i_{3r.2} \cdot i_{rs} = 46.815$$

Výpočet převodového poměru 1. stupně převodovky:

$$i_{3r.1} := i_{12} \cdot i_{34} = 9.666$$

Výpočet celkového převodového poměru 1. stupně:

$$i_1 := i_{3r.1} \cdot i_{rs} = 144.986$$

Výpočet celkové účinnosti převodovky:

$$\eta_c := \eta \cdot \eta \cdot \eta = 0.941$$

Jmenovitý moment motoru:

$$M_e := \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n_e} = 878.535 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Výstupní výkon na vřetení:

$$P_{out} := 2 \cdot P \cdot \eta_c = 173.179 \text{ kW}$$

Jmenovité otáčky jednotlivých stupňů

$$n_{se1} := \frac{n_e}{i_1} = 6.897 \frac{1}{\text{min}} \quad n_{se2} := \frac{n_e}{i_2} = 21.361 \frac{1}{\text{min}} \quad n_{se3} := \frac{n_e}{i_3} = 66.667 \frac{1}{\text{min}}$$

Maximální otáčky jednotlivých stupňů

$$n_{sM1} := \frac{n_{max}}{i_1} = 31.037 \frac{1}{\text{min}} \quad n_{sM2} := \frac{n_{max}}{i_2} = 96.123 \frac{1}{\text{min}} \quad n_{sM3} := \frac{n_{max}}{i_3} = 300 \frac{1}{\text{min}}$$

Maximální momenty v jednotlivých stupních

$$M_{e1} := 2 \cdot M_e \cdot \eta_c \cdot i_1 = 239.769 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad M_{e2} := 2 \cdot M_e \cdot \eta_c \cdot i_2 = 77.42 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{e3} := 2 \cdot M_e \cdot \eta_c \cdot i_3 = 24.806 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pokles výkonu mezi 1. a 2. stupněm

$$a_{21} := \frac{n_{se2}}{n_{sM1}} = 0.688 < \text{než } 1.26 \text{ stanovený normou - VYHOVUE (překrytí)}$$

Pokles výkonu mezi 2. a 3. stupněm

$$a_{32} := \frac{n_{se3}}{n_{sM2}} = 0.694 < \text{než } 1.26 \text{ stanovený normou - VYHOVUE (překrytí)}$$

Řada S500MT

Motor Siemens 1PH8226 - XXCXX

Třístupňová převodovka

Výkon motoru: $P := 92 \text{ kW}$

Počet stupňů: $n := 3$

Jmenovité otáčky: $n_e := 1000 \frac{1}{\text{min}}$

Převodový poměr mezi koly 1-2: $i_{12} := 3.121$

Maximální otáčky: $n_{max} := 4500 \frac{1}{\text{min}}$

Převodový poměr mezi koly 3-4: $i_{34} := 3.097$

Převodový poměr mezi koly 5-6: $i_{56} := 1$

Převodový poměr finálního převodu: $i_{rs} := 15$

Účinnost páru ozubených kol: $\eta := 0.98$

Výpočet celkového převodového poměru 3. stupně:

$$i_3 := i_{rs} = 15$$

Výpočet převodového poměru 2. stupně převodovky:

$$i_{3r.2} := i_{12} \cdot i_{56} = 3.121$$

Výpočet celkového převodového poměru 2. stupně:

$$i_2 := i_{3r.2} \cdot i_{rs} = 46.815$$

Výpočet převodového poměru 1. stupně převodovky:

$$i_{3r.1} := i_{12} \cdot i_{34} = 9.666$$

Výpočet celkového převodového poměru 1. stupně:

$$i_1 := i_{3r.1} \cdot i_{rs} = 144.986$$

Výpočet celkové účinnosti převodovky:

$$\eta_c := \eta \cdot \eta \cdot \eta = 0.941$$

Jmenovitý moment motoru: $M_e := \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n_e} = 878.535 \text{ N} \cdot \text{m}$

Výstupní výkon na vřetení: $P_{out} := 2 \cdot P \cdot \eta_c = 173.179 \text{ kW}$

Jmenovité otáčky jednotlivých stupňů

$$n_{se1} := \frac{n_e}{i_1} = 6.897 \frac{1}{\text{min}} \quad n_{se2} := \frac{n_e}{i_2} = 21.361 \frac{1}{\text{min}} \quad n_{se3} := \frac{n_e}{i_3} = 66.667 \frac{1}{\text{min}}$$

Maximální otáčky jednotlivých stupňů

$$n_{sM1} := \frac{n_{max}}{i_1} = 31.037 \frac{1}{\text{min}} \quad n_{sM2} := \frac{n_{max}}{i_2} = 96.123 \frac{1}{\text{min}} \quad n_{sM3} := \frac{n_{max}}{i_3} = 300 \frac{1}{\text{min}}$$

Maximální momenty v jednotlivých stupních

$$M_{e1} := 2 \cdot M_e \cdot \eta_c \cdot i_1 = 239.769 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad M_{e2} := 2 \cdot M_e \cdot \eta_c \cdot i_2 = 77.42 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{e3} := 2 \cdot M_e \cdot \eta_c \cdot i_3 = 24.806 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Pokles výkonu mezi 1. a 2. stupněm

$$a_{21} := \frac{n_{se2}}{n_{sM1}} = 0.688 < \text{než } 1.26 \text{ stanovený normou - } \underline{\text{VYHOVUE (překrytí)}}$$

Pokles výkonu mezi 2. a 3. stupněm

$$a_{32} := \frac{n_{se3}}{n_{sM2}} = 0.694 < \text{než } 1.26 \text{ stanovený normou - } \underline{\text{VYHOVUE (překrytí)}}$$

PŘÍLOHA č. 2
Výpočet spektra zatížení

KKS/KVS, KOS

Zatěžovací stavy vřeteníku a koníku soustruhu

Zdeněk Hudec

$$Nm := N \cdot m$$

$$kNm := 10^3 \cdot N \cdot m$$

1 Základní parametry

VSTUP

$$F_M := 70 \cdot kN$$

...max. obv. složka řezné síly

$$F_{QM} := -320 \cdot kN$$

...max. tíha obrobku

$$P := 71.5 \cdot kW$$

...výkon motoru

$$\eta_I := 0.941$$

...účinnost 1. st.

$$M_L := 77.3 \cdot kNm$$

...omezný moment vřetene

$$n_L := \frac{P \cdot \eta_I}{2 \cdot \pi \cdot M_L} = 8.312 \frac{1}{min}$$

...otáčky příslušné omeznému momentu

$$n_M := 697 \cdot \frac{1}{min}$$

... max.otáčky vřetene

$$T_c := 40000 \cdot hr$$

...celkova doba běhu

$$\tau_{Ic} := 0.35$$

...poměr T1/Tc, T1...doba běhu při obrábění

$$T_1 := \tau_{Ic} \cdot T_c = (1.4 \cdot 10^4) \cdot hr$$

...doba běhu při obrábění

$$T_2 := T_c - T_1 = (2.6 \cdot 10^4) \cdot hr$$

...doba běhu bez obrábění

$$D_{FM} := \frac{2 \cdot M_L}{F_M} = (2.209 \cdot 10^3) \cdot mm$$

...max. obráběný průměr při max. řezné síle FM
(orientační údaj)

$$D := 1500 \cdot mm$$

...oběžný průměr nad suportem - porovnání s DFM

$$k_Q := \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.2 \\ 0.3 \\ 0.4 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots \text{součinitel stavu tíhy obrobku}$$

$$F_{QD} := k_Q \cdot F_{QM} \cdot 0.5 = \begin{bmatrix} -1.6 \cdot 10^4 \\ -3.2 \cdot 10^4 \\ -4.8 \cdot 10^4 \\ -6.4 \cdot 10^4 \\ -1.6 \cdot 10^5 \end{bmatrix} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \quad \dots \text{vektor tíhy}$$

3 Spektrum řezné síly, momentu, otáček, výkonu

3.1 Řezná síla

$$k_F := \begin{bmatrix} 1 \\ -0.5 \\ 0 \\ 0 \\ 0.25 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \dots 1. \text{ hrubování} \\ \dots \text{zapichování - opačný smysl} \\ \dots \text{dokončování} \\ \dots 2. \text{ hrubování} \\ \dots \text{letmé soustružení} \end{array} \quad \dots \text{součinitele stavu řezné síly}$$

$$q := \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 8 \cdot \text{kN} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dots 2. \text{ hrubování}$$

$$i := 1 \dots 5$$

$$F_i := k_{F_i} \cdot F_M + q_i \quad F^T = [70 \quad -35 \quad 0 \quad 8 \quad 17.5] \text{ kN} \quad \dots \text{vektor řezné síly}$$

$$F_{R_i} := 0.6 \cdot |F_i| \quad F_R^T = [42 \quad 21 \quad 0 \quad 4.8 \quad 10.5] \text{ kN} \quad \dots \text{vektor rad. složky řezné síly}$$

$$F_{A_i} := F_{R_i} \quad F_A^T = [42 \quad 21 \quad 0 \quad 4.8 \quad 10.5] \text{ kN} \quad \dots \text{vektor ax. složky řezné síly}$$

3.2 Moment, otáčky, výkon na hnacím členu (ozubeném věnci)

1. hrubování - normální smysl soustružení

$$M_1 := M_L \qquad M_1 = 77.3 \text{ kNm}$$

$$n_1 := n_L \qquad n_1 = 8.312 \frac{1}{\text{min}}$$

$$P_1 := |M_1| \cdot 2 \cdot \pi \cdot |n_1| \qquad P_1 = 67.282 \text{ kW}$$

Zapichování - opačný smysl soustružení

$$M_2 := -0.5 \cdot M_L \qquad M_2 = -38.65 \text{ kNm}$$

$$n_2 := -n_L \qquad n_2 = -8.312 \frac{1}{\text{min}}$$

$$P_2 := |M_2| \cdot 2 \cdot \pi \cdot |n_2| \qquad P_2 = 33.641 \text{ kW}$$

Dokončování - normální smysl soustružení

$$F_3 = 0 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \qquad M_3 := 0 \qquad P_3 := 0$$

$$n_{3_1} := 0.2 \cdot n_M \qquad n_{3_1} = 139.4 \frac{1}{\text{min}}$$

$$F_3 = 0 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \qquad M_3 := 0 \qquad P_3 := 0$$

$$n_{3_2} := n_M \qquad n_{3_2} = 697 \frac{1}{\text{min}}$$

2. hrubování - normální smysl soustružení

$$F_4 = (8 \cdot 10^3) \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \quad \dots \text{obvodová složka řezné síly}$$

$$M_4 := \frac{F_4}{F_M} \cdot M_L \qquad M_4 = (8.834 \cdot 10^3) \text{ Nm} \quad \dots \text{pro shodný průměr 1. a 2. obrábění}$$

$$\delta_v := 8 \quad \dots \text{pro poměr řezných rychlostí 2. a 1. hrubování } v_{c4}/v_{c1}$$

$$n_4 := \delta_v \cdot n_L \qquad n_4 = 66.493 \frac{1}{\text{min}}$$

$$P_4 := |M_4| \cdot 2 \cdot \pi \cdot |n_4| \qquad P_4 = 61.515 \text{ kW}$$

Letmé soustružení - normální smysl soustružení

$$F_s = (1.75 \cdot 10^4) \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \quad \dots \text{obvodová složka řezné síly}$$

$$M_s := k_{F_s} \cdot M_L \quad M_s = (1.933 \cdot 10^4) \text{ Nm}$$

$$n_s := \frac{n_L}{k_{F_s}} \quad n_s = 33.247 \frac{1}{\text{min}}$$

$$P_s := |M_s| \cdot 2 \cdot \pi \cdot |n_s| \quad P_s = 67.282 \text{ kW}$$

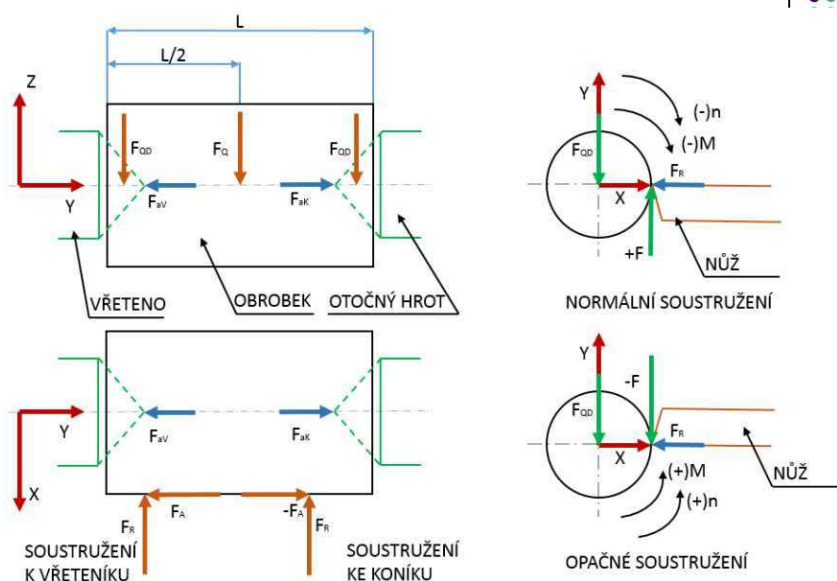
$$v_{c5} := \pi \cdot D_{FM} \cdot |n_s| \quad v_{c5} = 230.679 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

Moment, otáčky, výkon pro jednotlivé technologické operace

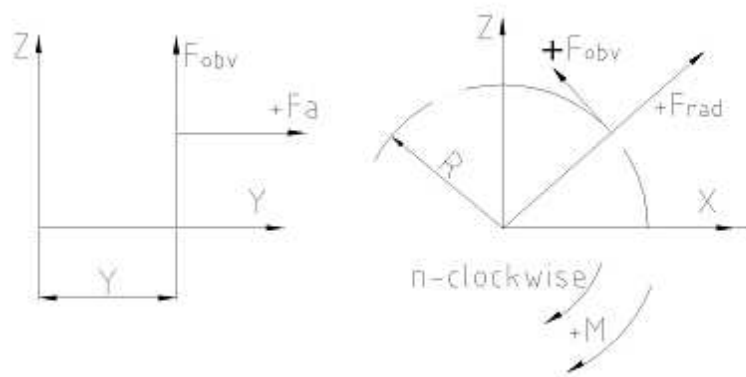
$i := 1 \dots 6$

$$M_{10.9} := \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_3 \\ M_4 \\ M_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 77.3 \\ -38.65 \\ 0 \\ 0 \\ 8.834 \\ 19.325 \end{bmatrix} \text{ kN} \cdot \text{m} \quad n_s := \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_{3_1} \\ n_{3_2} \\ n_4 \\ n_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8.312 \\ -8.312 \\ 139.4 \\ 697 \\ 66.493 \\ 33.247 \end{bmatrix} \frac{1}{\text{min}} \quad P_{10.9} := \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ 0 \\ 0 \\ P_4 \\ P_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 67.282 \\ 33.641 \\ 0 \\ 0 \\ 61.515 \\ 67.282 \end{bmatrix} \text{ kW}$$

4 Zatěžovací stavy sil působících na uložení vřetene - pravoúhlá soustava souřadnic (pravotočivá)



Obr. 1 - Pravoúhlé souřadnice pravotočivé soustavy programu Kisssoft



Obr. 2 - Cylindrické (polární) souřadnice soustavy programu KiSSsoft

4.1 Směr Z (kombinace tíhy a řezné síly)

$i := 1 .. 9$

Jednotlivé stavy jsou určeny kombinací tíhy obrobku a řezné síly

$F_{z_1} := F_{QD_4} + F_1$	...1. stav	... 1. hrub.- při obrábění
$F_{z_2} := F_{QD_4}$	...2. stav	... 1. hrub.- bez obrábění
$F_{z_3} := F_{QD_5} + F_2$	...3. stav	...zapichování - při obrábění
$F_{z_4} := F_{QD_5}$	...4. stav	...zapichování - bez obrábění
$F_{z_5} := F_{QD_5}$	...5. stav	...dokoncování při FQM
$F_{z_6} := F_{QD_2}$	...6. stav	...dokoncování při nM
$F_{z_7} := F_{QD_3} + F_4$	...7. stav	... 2. hrub.- při obrábění
$F_{z_8} := F_{QD_3}$	...8. stav	... 2. hrub.- bez obrábění
$F_{z_9} := F_{QD_1} + F_5$	...9. stav	...obrábení při letném uložení

$$F_z^T = [6 \quad -64 \quad -195 \quad -160 \quad -160 \quad -32 \quad -40 \quad -48 \quad 1.5] \text{ kN}$$

4.2 Směr X (radiální složka řezné síly)

$$F_x := \begin{bmatrix} (-F_R)_1 \\ (-F_R)_3 \\ (-F_R)_2 \\ (-F_R)_3 \\ (-F_R)_3 \\ (-F_R)_3 \\ (-F_R)_4 \\ (-F_R)_3 \\ -F_{R5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -42 \\ 0 \\ -21 \\ 0 \\ 0 \\ -4.8 \\ 0 \\ -10.5 \end{bmatrix} \text{ kN}$$

... 1. hrub.- bez obrábění
 ... 1. hrub.- při obrábění
 ...zapichovani - při obrábění
 ...zapichovani - bez obrábění
 ...dokoncovani při FQM
 ...dokoncovani při nM
 ... 2. hrub.- při obrábění
 ... 2. hrub.- bez obrábění
 ...obrabení při letném uložení

4.3 Směr Y (axiální složka řezné síly)

$$F_y := \begin{bmatrix} (-F_R)_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ (-F_R)_4 \\ 0 \\ F_{R5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -42 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -4.8 \\ 0 \\ 10.5 \end{bmatrix} \text{ kN}$$

... 1. hrub.- při obrábění
 ... 1. hrub.- bez obrábění
 ...zapichovani - při obrábění
 ...zapichovani - bez obrábění
 ...dokoncovani při FQM
 ...dokoncovani při nM
 ... 2. hrub.- při obrábění
 ... 2. hrub.- bez obrábění
 ...obrabení při letném uložení

4.4 Výslednice v rovině XZ

$$F_{v_i} := \sqrt{(F_{z_i})^2 + (F_{x_i})^2}$$

$$F_v^T = [42.426 \ 64 \ 196.128 \ 160 \ 160 \ 32 \ 40.287 \ 48 \ 10.607] \text{ kN}$$

4.5 Bezpečné ax. předpětí na hrotu koniku pro jednotlivé zatěžovací stavy

$$\alpha := 90 \cdot \text{deg}$$

...vrcholový úhel hrotu

$$i := 1 \dots 8$$

VSTUP

Zjednodušený výpočet

$$F_{av} := \frac{2}{3} \cdot F_M = 46.667 \text{ kN}$$

4.5.1 Bezpečné ax. předpětí pro 1.-2. stav:

Soustružení ke koníku

$$F_{hK} := \left(\sqrt{\left(F_{QD_4} + \frac{F_1}{2} \right)^2 + 0.09 \cdot (F_1)^2} \right) \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) + 0.3 \cdot F_1 = 56.805 \text{ kN}$$

Soustružení k vřeteníku

$$F_{hV} := \left(\sqrt{(F_{QD_4} + F_1)^2 + 0.36 \cdot (F_1)^2} \right) \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 42.426 \text{ kN}$$

Bez obrábění

$$F_{hD} := |F_{QD_4}| \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 64 \text{ kN}$$

$$F_{aK1,2} := \max(F_{hK}, F_{hV}, F_{hD}) = 64 \text{ kN} \quad \dots \text{bezpečné ax. předpětí na hrotu koníka 1-2}$$

4.5.2 Bezpečné ax. předpětí pro 3.-4. stav:

Zapichování

$$F_{hZ} := \left(\sqrt{(F_{QD_5} + F_2)^2 + 0.36 \cdot (F_2)^2} \right) \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = 196.128 \text{ kN}$$

Soustružení ke koníku

$$F_{hK} := \left(\sqrt{\left(F_{QD_5} + \frac{F_1}{2} \right)^2 + 0.09 \cdot (F_5)^2} \right) \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) + 0.3 \cdot F_5 = 130.36 \text{ kN}$$

Soustružení k vřeteníku

$$F_{hV} := \left(\sqrt{\left(F_{QD_5} + F_1 \right)^2 + 0.36 \cdot \left(F_1 \right)^2} \right) \cdot \tan \left(\frac{\alpha}{2} \right) = 99.318 \text{ kN}$$

Bez obrábění

$$F_{hD} := \left| F_{QD_5} \right| \cdot \tan \left(\frac{\alpha}{2} \right) = 160 \text{ kN}$$

$$F_{aK3.4} := \max \left(F_{hK}, F_{hV}, F_{hD}, F_{hZ} \right) = 196.128 \text{ kN} \quad \dots \text{bezpečné ax. předpětí na hrotu koníka 3-4}$$

4.5.3 Bezpečné ax. předpětí pro 5. stav:

$$F_{aK5} := F_{hD} = 160 \text{ kN} \quad \dots \text{bezpečné ax. předpětí na hrotu koníka 5}$$

4.5.4 Bezpečné ax. předpětí pro 6. stav:

Bez obrábění

$$F_{hD} := \left| F_{QD_4} \right| \cdot \tan \left(\frac{\alpha}{2} \right)$$

$$F_{aK6} := F_{hD} = 64 \text{ kN} \quad \dots \text{bezpečné ax. předpětí na hrotu koníka 6}$$

4.5.5 Bezpečné ax. předpětí pro 7.-8. stav:

Soustružení ke koníku

$$F_{hK} := \left(\sqrt{\left(\left(F_{QD_3} + \frac{F_4}{2} \right)^2 + 0.09 \cdot \left(F_4 \right)^2} \right)} \right) \cdot \tan \left(\frac{\alpha}{2} \right) + 0.3 \cdot F_4 = 46.465 \text{ kN}$$

Soustružení k vřeteníku

$$F_{hV} := \left(\sqrt{\left(F_{QD_3} + F_4 \right)^2 + 0.36 \cdot \left(F_4 \right)^2} \right) \cdot \tan \left(\frac{\alpha}{2} \right) = 40.287 \text{ kN}$$

Bez obrábění

$$F_{hD} := \left| F_{QD_3} \right| \cdot \tan \left(\frac{\alpha}{2} \right) = 48 \text{ kN}$$

$$F_{aK7.8} := \max(F_{hK}, F_{hV}, F_{hD}) = 48 \text{ kN}$$

...bezpečné ax. predpětí na hrotu konika 7-8

4.6 Axiální síla působící na koník - bezpečné ax. předpětí na hrotu koniku - přiřazení k jednotlivým stavům

$$F_{aK0} := \begin{bmatrix} F_{aK1.2} \\ F_{aK1.2} \\ F_{aK3.4} \\ F_{aK3.4} \\ F_{aK5} \\ F_{aK6} \\ F_{aK7.8} \\ F_{aK7.8} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$F_{aK0}^T = [64 \ 64 \ 196.1 \ 196.1 \ 160 \ 64 \ 48 \ 48 \ 0] \text{ kN}$$

4.7 Axiální síla působící na vřeteník

$$F_{aV} := (-F_{aK0}) + F_y$$

$$F_y^T = [-42 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -4.8 \ 0 \ 10.5] \text{ kN} \quad \dots \text{ax. složka řezné síly}$$

$$F_{aV}^T = [-106 \ -64 \ -196.1 \ -196.1 \ -160 \ -64 \ -52.8 \ -48 \ 10.5] \text{ kN}$$

5 Zatěžovací stavy

5.1 Točivý moment a otáčky

$i := 1 \dots 9$

Točivý moment

Otáčky

$$M_{10.9} := \begin{bmatrix} M_1 \\ 0 \\ M_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ M_4 \\ 0 \\ M_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 77.3 \\ 0 \\ -38.65 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 8.834 \\ 0 \\ 19.325 \end{bmatrix} \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$n_8 := \begin{bmatrix} n_1 \\ n_1 \\ n_2 \\ n_2 \\ n_{3_1} \\ n_{3_2} \\ n_4 \\ n_4 \\ n_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8.312 \\ 8.312 \\ -8.312 \\ -8.312 \\ 139.4 \\ 66.493 \\ 66.493 \\ 33.247 \end{bmatrix} \frac{1}{\text{min}}$$

Výkon

$$P_i := |M_{10.9_i}| \cdot 2 \cdot \pi \cdot |n_{8_i}|$$

$$P = \begin{bmatrix} 67.282 \\ 0 \\ 33.641 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 61.515 \\ 0 \\ 67.282 \end{bmatrix} \text{ kW}$$

$$M_{26.28} := -M_{10.9}$$

$$M_{10.9}^T = [77.3 \ 0 \ -38.65 \ 0 \ 0 \ 0 \ 8.834 \ 0 \ 19.325] \text{ kNm}$$

$$n_8^T = [8.3 \ 8.3 \ -8.3 \ -8.3 \ 139.4 \ 697 \ 66.5 \ 66.5 \ 33.2] \frac{1}{\text{min}}$$

$$P^T = [67.282 \ 0 \ 33.641 \ 0 \ 0 \ 0 \ 61.515 \ 0 \ 67.282] \text{ kW}$$

5.2 Doba běhu

$$T_c := 40000 \cdot \text{hr} \quad \dots \text{celková doba běhu stroje}$$

VSTUP

$$\tau_{1c} = 0.35 \quad \dots \text{poměr } T_1/T_c, T_1 \dots \text{doba běhu při obrábění}$$

$$T_1 = (1.4 \cdot 10^4) \text{ hr} \quad \dots \text{doba běhu při obrábění}$$

$$T_2 = (2.6 \cdot 10^4) \text{ hr} \quad \dots \text{doba běhu bez obrábění}$$

$$T_{V1-8} := \begin{bmatrix} 0.2 \cdot T_1 \\ 0.2 \cdot T_2 \\ 0.1 \cdot T_1 \\ 0.1 \cdot T_2 \\ 0.25 \cdot T_c \\ 0.1 \cdot T_c \\ 0.3 \cdot T_1 \\ 0.3 \cdot T_2 \end{bmatrix}$$

$$ST_V := \sum_{i=1}^8 T_{V1-8_i} = (3.8 \cdot 10^4) \text{ hr} \quad T_{V_9} := T_c - ST_V = (2 \cdot 10^3) \text{ hr}$$

$$T_V := \begin{bmatrix} 0.2 \cdot T_1 \\ 0.2 \cdot T_2 \\ 0.1 \cdot T_1 \\ 0.1 \cdot T_2 \\ 0.25 \cdot T_c \\ 0.1 \cdot T_c \\ 0.3 \cdot T_1 \\ 0.3 \cdot T_2 \\ T_{V_9} \end{bmatrix}$$

... 1. hrub.- při obrábění
 ... 1. hrub.- bez obrábění
 ...zapichování - při obrábění
 ...zapichování - bez obrábění
 ...dokončování při FQM
 ...dokončování při nM
 ... 2. hrub.- při obrábění
 ... 2. hrub.- bez obrábění
 ...obrábění při letném uložení

$$T_V = \begin{bmatrix} 2.8 \cdot 10^3 \\ 5.2 \cdot 10^3 \\ 1.4 \cdot 10^3 \\ 2.6 \cdot 10^3 \\ 1 \cdot 10^4 \\ 4 \cdot 10^3 \\ 4.2 \cdot 10^3 \\ 7.8 \cdot 10^3 \\ 2 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \text{ hr}$$

$$q_{T_i} := \frac{T_{V_i}}{T_c} \quad q_T = \begin{bmatrix} 0.07 \\ 0.13 \\ 0.035 \\ 0.065 \\ 0.25 \\ 0.1 \\ 0.105 \\ 0.195 \\ 0.05 \end{bmatrix} \quad \sum_{i=1}^9 T_{V_i} = (4 \cdot 10^4) \text{ hr} \quad \dots \text{kontrola}$$

$$\sum_{i=1}^9 q_{T_i} = 1 \quad \dots \text{kontrola}$$

6 Vstupní údaje do programů KISSsoft

6.1 Souhrn

Zat. stavy:

$i =$	1	... 1. hrub.- při obrábění
	2	... 1. hrub.- bez obrábění
	3	...zapichování - při obrábění
	4	...zapichování - bez obrábění
	5	...dokončování při FQM
	6	...dokončování při nM
	7	... 2. hrub.- při obrábění
	8	... 2. hrub.- bez obrábění
	9	...obrábění při letném uložení

Spektrum centrických sil:

$$F_x^T = [-42 \ 0 \ -21 \ 0 \ 0 \ 0 \ -4.8 \ 0 \ -10.5] \text{ kN}$$

$$F_z^T = [6 \ -64 \ -195 \ -160 \ -160 \ -32 \ -40 \ -48 \ 1.5] \text{ kN}$$

$$F_{av}^T = [-106 \ -64 \ -196.128 \ -196.128 \ -160 \ -64 \ -52.8 \ -48 \ 10.5] \text{ kN}$$

Pozn.:Znaménko FaV volit umístění soustavy souřadnic na vřetenu

Spektrum momentu (výkonu), otáček a doby běhu - hodnoty:

$$M_{10,9}^T = [77.3 \ 0 \ -38.65 \ 0 \ 0 \ 0 \ 8.834 \ 0 \ 19.325] \text{ kNm}$$

$$n_8^T = [8.3 \ 8.3 \ -8.3 \ -8.3 \ 139.4 \ 697 \ 66.5 \ 66.5 \ 33.2] \frac{1}{\text{min}}$$

$$P^T = [67.282 \ 0 \ 33.641 \ 0 \ 0 \ 0 \ 61.515 \ 0 \ 67.282] \text{ kW}$$

$$T_V^T = [2.8 \cdot 10^3 \ 5.2 \cdot 10^3 \ 1.4 \cdot 10^3 \ 2.6 \cdot 10^3 \ 1 \cdot 10^4 \ 4 \cdot 10^3 \ 4.2 \cdot 10^3 \ 7.8 \cdot 10^3 \ 2 \cdot 10^3] \text{ hr}$$

$$q_T^T = [0.07 \ 0.13 \ 0.035 \ 0.065 \ 0.25 \ 0.1 \ 0.105 \ 0.195 \ 0.05]$$

Jmenovité hodnoty momentu a otáček vybrané ze spektra a celková doba běhu :

$$M_{10.9_1} = 77.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

...jmenovitý moment spektra

$$n_{8_1} = 8.312 \frac{1}{\text{min}}$$

...jmenovité otáčky spektra:

clockwise - counterclockwise

...smysl otáčení hnacího pastorku

$$T_c = (4 \cdot 10^4) \text{ hr}$$

...celková doba běhu

Spektrum momentu, otáček a doby běhu - poměrné hodnoty:

$$q_{M10.9_i} := \frac{M_{10.9_i}}{M_{10.9_1}} \quad q_{M10.9}^T = [1 \ 0 \ -0.5 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.114 \ 0 \ 0.25] \quad \dots\text{spektrum momentů}$$

$$q_{n8_i} := \frac{n_{8_i}}{n_{8_1}} \quad q_{n8}^T = [1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 16.772 \ 83.858 \ 8 \ 8 \ 4] \quad \dots\text{spektrum otáček}$$

$$q_T^T = [0.07 \ 0.13 \ 0.035 \ 0.065 \ 0.25 \ 0.1 \ 0.105 \ 0.195 \ 0.05] \quad \dots\text{spektrum poměrné doby běhu}$$

Pozn.: opačný smysl otáček vzhledem k jmenovitým se ve spektru označuje záporným znaménkem

PŘÍLOHA č. 3
Výstupní soubor programu KISSsys
Kontrolní výpočet převodovky „Results.csv“

MAIN RESULT FILE

Results according to load spectrum calculation

Note:

- 9999,99 (safety factors) : no load condition
- 1,0e+06 (lifetimes for gear, shaft and bearing) : infinite lifetime
- 0 (safety factors for gears) : condition with n1=0 and T1=0
- 1 (safety factors and lifetimes for all element) : calculation error

Frequency in fraction, Total Frequency = 1

Gear results (pairs):

_O_GearPair_const1,GearPair_const1_												calc			
	SF1	SH1	SF2	SH2	SSint	SB	LF1	LH1	LF2	LH2	Frequency	Torque	[Nr Speed	[1/n_O,SH2_3,;Hours	
Bin 1		3,716	2,155	3,706	2,299	4,485	10,159	0	0	0	0	0,07	726	500	1050
Bin 2	191,739	13,107	191,223	13,805	5,793	453,158	0	0	0	0	0,13	0,726	500	1950	
Bin 3		5,808	2,82	5,792	3,007	4,877	16,123	0	0	0	0,035	-363	-500	525	
Bin 4	187,905	13,542	187,399	14,444	5,793	444,192	0	0	0	0	0,065	0,726	-500	975	
Bin 5	9999,99	9999,99	9999,99	9999,99	9999,99	9999,99	1000000	1000000	1000000	1000000	0,25	0	1300	3750	
Bin 6	9999,99	9999,99	9999,99	9999,99	9999,99	9999,99	1000000	1000000	1000000	1000000	0,1	0	6495	1500	
Bin 7	15,921	4,496	15,878	4,496	5,207	26,947	0	0	0	0	0,105	82,764	4000	1575	
Bin 8	191,739	13,853	191,223	13,853	5,764	270,481	0	0	0	0	0,195	0,726	4000	2925	
Bin 9		8,828	3,262	8,804	3,316	4,924	17,177	0	0	0	0,05	181,5	2000	750	
Total results		3,714	2,155	3,706	2,299	4,485	10,159	1000000	1000000	1000000	1000000				

_O_GearPair_const1b,GearPair_const1												b_calc			
	SF1	SH1	SF2	SH2	SSint	SB	LF1	LH1	LF2	LH2	Frequency	Torque	[Nr Speed	[1/n_O,SH2_3bHours	
Bin 1		3,716	2,155	3,706	2,299	4,485	10,159	0	0	0	0	0,07	726	500	1050
Bin 2	191,739	13,107	191,223	13,805	5,793	453,158	0	0	0	0	0,13	0,726	500	1950	
Bin 3		5,808	2,82	5,792	3,007	4,877	16,123	0	0	0	0,035	-363	-500	525	
Bin 4	187,905	13,542	187,399	14,444	5,793	444,192	0	0	0	0	0,065	0,726	-500	975	
Bin 5	9999,99	9999,99	9999,99	9999,99	9999,99	9999,99	1000000	1000000	1000000	1000000	0,25	0	1300	3750	
Bin 6	9999,99	9999,99	9999,99	9999,99	9999,99	9999,99	1000000	1000000	1000000	1000000	0,1	0	6495	1500	
Bin 7	15,921	4,496	15,878	4,496	5,207	26,947	0	0	0	0	0,105	82,764	4000	1575	
Bin 8	191,739	13,853	191,223	13,853	5,764	270,481	0	0	0	0	0,195	0,726	4000	2925	
Bin 9		8,828	3,262	8,804	3,316	4,924	17,177	0	0	0	0,05	181,5	2000	750	
Total results		3,714	2,155	3,706	2,299	4,485	10,159	1000000	1000000	1000000	1000000				

_O_GearPair_const2,GearPair_const2_												calc			
	SF1	SH1	SF2	SH2	SSint	SB	LF1	LH1	LF2	LH2	Frequency	Torque	[Nr Speed	[1/n_O,Shaft3,;Hours	
Bin 1		2,261	1,534	2,214	1,718	3,915	4,799	0	0	0	0	0,07	-1595,44	-222,973	1050
Bin 2	72,074	7,542	70,566	8,445	5,734	161,066	0	0	0	0	0,13	-1,59544	-222,973	1950	
Bin 3		3,826	2,108	4,001	2,36	4,518	8,787	0	0	0	0,035	797,72	222,973	525	
Bin 4	69,664	7,854	68,206	8,795	5,731	155,668	0	0	0	0	0,065	-1,66122	222,973	975	
Bin 5	9999,99	9999,99	9999,99	9999,99	9999,99	9999,99	1000000	1000000	1000000	1000000	0,25	0	222,973	3750	
Bin 6	9999,99	9999,99	9999,99	9999,99	9999,99	9999,99	1000000	1000000	1000000	1000000	0,1	0	222,973	1500	
Bin 7	10,359	3,035	10,142	3,07	4,925	14,459	0	0	0	0	0,105	-181,88	-1783,78	1575	
Bin 8	65,149	7,162	63,786	7,162	5,649	86,262	0	0	0	0	0,195	-1,59544	-1783,78	2925	
Bin 9		5,735	2,27	5,615	2,529	4,565	9,251	0	0	0	0,05	-398,86	-891,892	750	
Total results		2,262	1,534	2,215	1,718	3,915	4,799	1000000	1000000	1000000	1000000				

_O_GearPair_const2b,GearPair_const2												b_calc			
	SF1	SH1	SF2	SH2	SSint	SB	LF1	LH1	LF2	LH2	Frequency	Torque	[Nr Speed	[1/n_O,Shaft3bHours	
Bin 1		2,261	1,534	2,214	1,718	3,915	4,799	0	0	0	0	0,07	-1595,44	-222,973	1050
Bin 2	72,074	7,542	70,566	8,445	5,734	161,066	0	0	0	0	0,13	-1,59544	-222,973	1950	
Bin 3		3,826	2,108	4,001	2,36	4,518	8,787	0	0	0	0,035	797,72	222,973	525	
Bin 4	69,664	7,854	68,206	8,795	5,731	155,668	0	0	0	0	0,065	-1,66122	222,973	975	
Bin 5	9999,99	9999,99	9999,99	9999,99	9999,99	9999,99	1000000	1000000	1000000	1000000	0,25	0	222,973	3750	
Bin 6	9999,99	9999,99	9999,99	9999,99	9999,99	9999,99	1000000	1000000	1000000	1000000	0,1	0	222,973	1500	
Bin 7	10,359	3,035	10,142	3,07	4,925	14,459	0	0	0	0	0,105	-181,88	-1783,78	1575	
Bin 8	65,149	7,162	63,786	7,162	5,649	86,262	0	0	0	0	0,195	-1,59544	-1783,78	2925	
Bin 9		5,735	2,27	5,615	2,529	4,565	9,251	0	0	0	0,05	-398,86	-891,892	750	
Total results		2,262	1,534	2,215	1,718	3,915	4,799	1000000	1000000	1000000	1000000				

_O_GearPair_const3,GearPair_const3_												calc			
	SF1	SH1	SF2	SH2	SSint	SB	LF1	LH1	LF2	LH2	Frequency	Torque	[Nr Speed	[1/n_O,Shaft5,;Hours	
Bin 1		4,738	2,795	5,858	3,233	4,696	9,541	0	0	0	0	0,07	6111,986	57,0396	1050
Bin 2	208,075	15,616	234,931	18,065	5,797	375,347	0	0	0	0	0,13	6,111986	57,0396	1950	
Bin 3		8,099	3,714	10,399	4,297	5,061	15,739	0	0	0	0,035	-3055,99	-57,0396	525	
Bin 4	197,322	16,053	246,608	18,57	5,795	356,097	0	0	0	0	0,065	6,626406	-57,0396	975	
Bin 5	1710,295	40,699	1651,806	40,975	5,826	1373,889	0	0	0	0	0,25	0,726	1300	3750	
Bin 6	1710,295	42,517	1651,806	42,517	5,821	931,468	0	0	0	0	0,1	0,726	6495	1500	
Bin 7	18,991	4,65	18,342	5,325	5,273	23,019	0	0	0	0	0,105	696,7664	456,3168	1575	
Bin 8	203,154	13,639	196,206	15,092	5,768	218,468	0	0	0	0	0,195	6,111986	456,3168	2925	
Bin 9		10,718	3,86	11,361	4,44	5,043	15,308	0	0	0	0,05	1527,996	228,1584	750	
Total results		4,739	2,794	5,857	3,226	4,696	9,541	1000000	1000000	1000000	1000000				

_O_GearPair_const3b,GearPair_const3												b_calc			
	SF1	SH1	SF2	SH2	SSint	SB	LF1	LH1	LF2	LH2	Frequency	Torque	[Nr Speed	[1/n_O,Shaft5bHours	
Bin 1		4,738	2,795	5,858	3,233	4,696	9,541	0	0	0	0	0,07	6111,986	57,0396	1050
Bin 2	208,075	15,616	234,931	18,065	5,797	375,347	0	0	0	0	0,13	6,111986	57,0396	1950	
Bin 3		8,099	3,714	10,399	4,297	5,061	15,739	0	0	0	0,035	-3055,99	-57,0396	525	
Bin 4	197,322	16,053	246,608	18,57	5,795	356,097	0	0	0	0	0,065	6,626406	-57,0396	975	
Bin 5	1710,295	40,699	1651,806	40,975	5,826	1373,889	0	0	0	0	0,25	0,726	1300	3750	
Bin 6	1710,295	42,517	1651,806	42,517	5,821	931,468	0	0	0	0	0,1	0,726	6495	1500	
Bin 7	18,991	4,65	18,342	5,325	5,273	23,019	0	0	0	0	0,105	696,7664	456,3168	1575	
Bin 8	203,154	13,639	196,206	15,092	5,768	218,468	0	0	0	0	0,195	6,111986	456,3168	2925	
Bin 9		10,718	3,86	11,361	4,44	5,043	15,308	0	0	0	0,05	1527,996	228,1584	750	
Total results		4,739	2,794	5,857	3,226	4,696	9,541	1000000	1000000	1000000	1000000				

These bearing results are calculated using shaft calculation module

_O_SH2_3,Shaft1,RollerBearing1						
	Lifetime	Static Safety	Fx	Fy	Fz	
Bin 1	17443	6,377	11999	6730,3	8289,6	
Bin 2	1000000	9999,99	9,3	2,2	-0,6	
Bin 3	1000000	61,544	-986,4	-1278,6	1066,9	
Bin 4	1000000	9970,286	9,3	2	-0,4	
Bin 5	1000000	9999,99	0	0	0	
Bin 6	1000000	9999,99	0	0	0	
Bin 7	1000000	78,615	1162	473,1	221,9	
Bin 8	1000000	9999,99	9,3	2,5	-0,6	
Bin 9	438759	32,451	2693,8	1179,4	978,3	

Total results 199718 6,377

	Lifetime	Static Safety	Fx	Fy	Fz
_O_SH2_3,Shaft2,RollerBearing4					
Bin 1	6589	3,297	-13956,1	11428,2	-16796,7
Bin 2	1000000	1401,185	-23,4	10,5	-45,7
Bin 3	57567	6,484	5783,2	-3383,4	9479,7
Bin 4	1000000	1288,23	-25,2	11,4	-49,9
Bin 5	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 6	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 7	100477	16,1	-2208,1	1361,4	-3889
Bin 8	1000000	1405,787	-23,4	10,3	-45,6
Bin 9	32281	8,692	-4361,5	3027,1	-7042,2
Total results	68656	3,297			

	Lifetime	Static Safety	Fx	Fy	Fz
_O_SH2_3,Shaft2,RollerBearing5					
Bin 1	5475	2,609	5989,6	1762	40955,3
Bin 2	1000000	1335,561	18,2	7,3	78,8
Bin 3	48348	5,46	10262,1	-5297,4	-16911,9
Bin 4	1000000	1224,19	19,4	7,9	86,1
Bin 5	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 6	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 7	106335	14,365	1505,8	436,1	7366,1
Bin 8	1000000	1339,365	18,2	7,1	78,6
Bin 9	31147	7,486	2675,9	773,6	14176
Total results	59377	2,609			

	Lifetime	Static Safety	Fx	Fy	Fz
_O_SH2_3b,Shaft1,RollerBearing1					
Bin 1	17640	6,391	13155,5	6702,9	-6217,4
Bin 2	1000000	9975,444	4,2	2	-8,3
Bin 3	1000000	61,491	428,3	-1279,7	1389,7
Bin 4	1000000	9929,531	4,4	1,8	-8,3
Bin 5	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 6	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 7	1000000	78,542	778,2	469	-892,4
Bin 8	1000000	9979,446	4,2	2,4	-8,3
Bin 9	443283	32,422	2199,1	1171,6	-1841,8
Total results	201572	6,391			

	Lifetime	Static Safety	Fx	Fy	Fz
_O_SH2_3b,Shaft2,RollerBearing4					
Bin 1	6522	3,283	-21604	11422,4	3768,8
Bin 2	1000000	1404,402	-51,2	10,4	-2,7
Bin 3	57559	6,501	11071	-3410,5	-299,2
Bin 4	1000000	1289,981	-55,7	11,2	-3,2
Bin 5	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 6	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 7	100995	16,149	-4458,3	1349,7	-24,7
Bin 8	1000000	1409,109	-51	10,2	-2,6
Bin 9	32362	8,703	-8268,9	3005	256,2
Total results	68190	3,283			

	Lifetime	Static Safety	Fx	Fy	Fz
_O_SH2_3b,Shaft2,RollerBearing5					
Bin 1	5529	2,606	38565,7	1795,2	15180,4
Bin 2	1000000	1337,882	77,2	7,5	23,7
Bin 3	47743	5,471	-9482,7	-5270,5	-17315,2
Bin 4	1000000	1225,261	84,1	8,1	26,3
Bin 5	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 6	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 7	106338	14,405	7113,4	452	2368,6
Bin 8	1000000	1341,817	76,9	7,3	23,6
Bin 9	31466	7,494	13599,2	803,5	4768,5
Total results	59843	2,606			

	Lifetime	Static Safety	Fx	Fy	Fz
_O_Shaft3,RollerBearing4					
Bin 1	9090	5,236	-4029,3	-20138,5	-27437,5
Bin 2	1000000	5235,839	-4	-20,1	-27,4
Bin 3	1000000	30,136	-7438,7	0	8260,7
Bin 4	1000000	5028,545	-4,2	-21	-28,6
Bin 5	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 6	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 7	1000000	45,929	-459,3	-2295,8	-3127,9
Bin 8	1000000	5235,839	-4	-20,1	-27,4
Bin 9	230892	20,944	-1007,3	-5034,4	-6859,7
Total results	113675	5,236			

	Lifetime	Static Safety	Fx	Fy	Fz
_O_Shaft3,RollerBearing5					
Bin 1	1000000	27,219	317,4	0	-5980
Bin 2	1000000	9999,99	0,3	0	-6
Bin 3	4130	4,491	-7959,5	10069,4	-1513,7
Bin 4	1000000	9999,99	0,3	0	-6,2
Bin 5	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 6	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 7	1000000	238,754	36,2	0	-681,8
Bin 8	1000000	9999,99	0,3	0	-6
Bin 9	1000000	108,901	79,3	0	-1494,7
Total results	105930	4,491			

	Lifetime	Static Safety	Fx	Fy	Fz
_O_Shaft3b,RollerBearing4					
Bin 1	9091	5,236	-25776	-20137,7	-10229,1
Bin 2	1000000	5235,886	-25,8	-20,1	-10,2
Bin 3	1000000	30,136	3434,7	0	10572,5
Bin 4	1000000	5029,703	-26,8	-21	-10,7
Bin 5	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 6	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 7	1000000	45,929	-2938,5	-2295,8	-1166,1
Bin 8	1000000	5235,886	-25,8	-20,1	-10,2
Bin 9	230892	20,944	-6444,3	-5034,4	-2557,5
Total results	113685	5,236			

_O_Shaft3b,RollerBearing5	Lifetime	Static Safety	Fx	Fy	Fz
Bin 1	1000000	27,219	-5020,3	0	-3264,9
Bin 2	1000000	9999,99	-5	0	-3,3
Bin 3	4130	4,491	-5290,6	10069,4	6136,3
Bin 4	1000000	9999,99	-5,2	0	-3,4
Bin 5	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 6	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 7	1000000	238,754	-572,3	0	-372,2
Bin 8	1000000	9999,99	-5	0	-3,3
Bin 9	1000000	108,902	-1254,8	0	-816
Total results	105930	4,491			

_O_Shaft4,RollerBearing6	Lifetime	Static Safety	Fx	Fy	Fz
Bin 1	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 2	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 3	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 4	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 5	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 6	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 7	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 8	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 9	1000000	9999,99	0	0	0
Total results	1000000	9999,99			

_O_Shaft4b,RollerBearing6	Lifetime	Static Safety	Fx	Fy	Fz
Bin 1	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 2	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 3	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 4	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 5	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 6	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 7	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 8	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 9	1000000	9999,99	0	0	0
Total results	1000000	9999,99			

_O_Shaft5,RollerBearing7	Lifetime	Static Safety	Fx	Fy	Fz
Bin 1	16791	2,826	19855,2	5202,6	-26246,4
Bin 2	1000000	9999,99	0	-3,1	0
Bin 3	28547	4,888	1412,3	-12518,4	18972,2
Bin 4	1000000	9999,99	0	-3,3	0
Bin 5	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 6	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 7	1000000	43,999	1275,1	0	-1685,7
Bin 8	1000000	9999,99	0	-3,1	0
Bin 9	115784	13,595	4130,5	4070,3	-5453,2
Total results	149885	2,826			

_O_Shaft5,RollerBearing8	Lifetime	Static Safety	Fx	Fy	Fz
Bin 1	9783	3,453	38816,8	24954,2	-19496,2
Bin 2	1000000	1133,361	94,3	76,1	-92,9
Bin 3	97201	7,424	-6582,7	11606,8	19102,8
Bin 4	1000000	1045,377	102,3	82,5	-100,7
Bin 5	1000000	9541,43	11,2	9	-11
Bin 6	1000000	9541,43	11,2	9	-11
Bin 7	125447	16,166	7185,4	5331	-5871,1
Bin 8	1000000	1133,361	94,3	76,1	-92,9
Bin 9	66689	10,394	12031,4	4866,3	-7969,6
Total results	101601	3,453			

_O_Shaft5,RollerBearing9	Lifetime	Static Safety	Fx	Fy	Fz
Bin 1	604573	13,653	-8739,6	-6310,7	6658
Bin 2	1000000	2151,671	-44,4	-49	53,8
Bin 3	427289	18,785	729,8	-11009,2	-6682,7
Bin 4	1000000	1984,634	-48,1	-53,1	58,3
Bin 5	1000000	9999,99	-5,3	-6,1	6,4
Bin 6	1000000	9999,99	-5,3	-6,1	6,4
Bin 7	1000000	36,074	-2768,9	-2608,2	3102,1
Bin 8	1000000	2151,671	-44,4	-49	53,8
Bin 9	1000000	28,933	-3679,4	-2978,2	3652,4
Total results	915168	13,653			

_O_Shaft5b,RollerBearing7	Lifetime	Static Safety	Fx	Fy	Fz
Bin 1	16871	2,83	-12803,4	5170,6	-30261,1
Bin 2	1000000	9999,99	0	-3,1	0
Bin 3	28514	4,895	17117,2	-12541,9	8243,4
Bin 4	1000000	9999,99	0	-3,4	0
Bin 5	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 6	1000000	9999,99	0	0	0
Bin 7	1000000	44,276	-818,5	0	-1934,4
Bin 8	1000000	9999,99	0	-3,1	0
Bin 9	116352	13,633	-2654,4	4065,4	-6284,2
Total results	150348	2,83			

_O_Shaft5b,RollerBearing8	Lifetime	Static Safety	Fx	Fy	Fz
Bin 1	9770	3,452	2518,6	24964,7	-43382,9
Bin 2	1000000	1137,055	-33,1	75,8	-127,7
Bin 3	97043	7,42	13263	11613,1	15257,3
Bin 4	1000000	1048,784	-35,9	82,2	-138,4
Bin 5	1000000	9572,529	-3,9	9	-15,2
Bin 6	1000000	9572,529	-3,9	9	-15,2
Bin 7	125182	16,154	-1497,5	5334,7	-9164
Bin 8	1000000	1137,055	-33,1	75,8	-127,7
Bin 9	66578	10,388	-891,7	4865,1	-14412
Total results	101471	3,452			

_O_Shaft5b,RollerBearing9	Lifetime	Static Safety	Fx	Fy	Fz
Bin 1	610818	13,7	1402,7	-6289,1	10859
Bin 2	1000000	2164,953	24,3	-48,7	64,9
Bin 3	429513	18,82	-5413,9	-10992	-3958,8
Bin 4	1000000	1996,884	26,3	-52,8	70,4
Bin 5	1000000	9999,99	2,9	-6	7,7

Bin 6	1000000	9999,99	2,9	-6	7,7
Bin 7	1000000	36,127	1303,9	-2611,9	3942
Bin 8	1000000	2164,953	24,3	-48,7	64,9
Bin 9	1000000	28,993	1325,9	-2971,9	5000,8
Total results	916516	13,7			

_O_Shaft6,RollerBearing10		Lifetime	Static Safety	Fx	Fy	Fz
Bin 1	1000000	9999,99		0	0	0
Bin 2	1000000	9999,99		0	0	0
Bin 3	1000000	9999,99		0	0	0
Bin 4	1000000	9999,99		0	0	0
Bin 5	1000000	9999,99		0	0	0
Bin 6	1000000	9999,99		0	0	0
Bin 7	1000000	9999,99		0	0	0
Bin 8	1000000	9999,99		0	0	0
Bin 9	1000000	160,013		0	22185,7	0
Total results	1000000	160,013				

_O_Shaft6,RollerBearing11		Lifetime	Static Safety	Fx	Fy	Fz
Bin 1	1000000	21,13		-126131	0	-103680
Bin 2	1000000	39,758		-69,3	0	-86775,1
Bin 3	1000000	16,293		-38861,9	0	-208147
Bin 4	1000000	15,914		-78,2	0	-216785
Bin 5	76391	15,923		-8,2	0	-216672
Bin 6	1000000	79,594		-8,2	0	-43345
Bin 7	1000000	50,41		-14394,7	0	-66907,4
Bin 8	1000000	52,988		-69,3	0	-65109,2
Bin 9	1000000	84,537		-31526,4	0	-25915
Total results	248594	15,914				

_O_Shaft6,RollerBearing12		Lifetime	Static Safety	Fx	Fy	Fz
Bin 1	1000000	40,013		43896,8	0	9838,4
Bin 2	1000000	79,38		29	0	22675,8
Bin 3	1000000	28,522		-2254,4	0	63068,6
Bin 4	1000000	31,761		32,8	0	56672,8
Bin 5	485241	31,768		3,4	0	56660,7
Bin 6	1000000	158,824		3,4	0	11333,3
Bin 7	1000000	110,329		5008,4	0	15527,1
Bin 8	1000000	105,821		29	0	17009,8
Bin 9	1000000	160,093		10971,3	0	2458,6
Total results	790384	28,522				

_O_Shaft6,RollerBearing13		Lifetime	Static Safety	Fx	Fy	Fz
Bin 1	1000000	74,256		0	-59254,2	0
Bin 2	1000000	68,8		0	-63953,2	0
Bin 3	172083	20,046		0	-219501	0
Bin 4	250677	22,44		0	-196075	0
Bin 5	21664	27,501		0	-159994	0
Bin 6	91970	68,756		0	-63994,4	0
Bin 7	1000000	92,689		0	-47470,7	0
Bin 8	1000000	91,756		0	-47953,2	0
Bin 9	1000000	9999,99		0	0	0
Total results	73315	20,046				

_O_SH2_3,ConnectionRollerBearing1		Lifetime	Static Safety	Fx	Fy	Fz
Bin 1	5368	9,387		-2018,4	-2022,2	-15852,3
Bin 2	1000000	9999,99		0,7	2,5	-7
Bin 3	366756	29,126		207	-1075	5145,9
Bin 4	1000000	9999,99		0,7	2,7	-7,2
Bin 5	1000000	9999,99		0	0	0
Bin 6	1000000	9999,99		0	0	0
Bin 7	648137	138,336		-24,2	63,4	-1084
Bin 8	1000000	9999,99		0,7	2,2	-7
Bin 9	102662	52,16		-198,6	-2,4	-2868,9
Total results	68846	9,387				

_O_SH2_3b,ConnectionRollerBearing1		Lifetime	Static Safety	Fx	Fy	Fz
Bin 1	5364	9,392		-14714,7	-1994,7	-6207,4
Bin 2	1000000	9999,99		-5,7	2,7	-4,1
Bin 3	366516	29,121		4562,2	-1074,6	2391,4
Bin 4	1000000	9999,99		-5,9	2,9	-4,1
Bin 5	1000000	9999,99		0	0	0
Bin 6	1000000	9999,99		0	0	0
Bin 7	629446	137,59		-956	67,6	-524
Bin 8	1000000	9999,99		-5,8	2,3	-4,1
Bin 9	101404	52,063		-2588,8	5,5	-1264,4
Total results	68749	9,392				

PŘÍLOHA č. 5
Výstupní protokol programu Inventor
Výpočet drážkování

Rovnoboké drážkování – spojení kola 2 s hřídelí 3

Zatížení

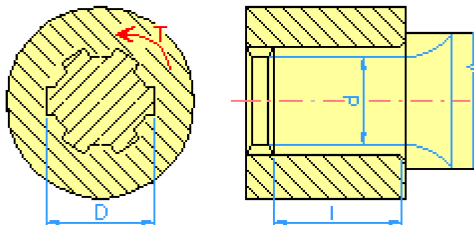
Výkon	P	38,013 kW
Otáčky	n	222,971 rpm
Krouticí moment	T	1628,000 N m

Rozměry

Vnější průměr hřídele	D	72,000 mm
Vnitřní průměr dutého hřídele	d _i	0,000 mm

Drážka hřídele

Počet drážek	N	16,000 ul
Vnitřní průměr hřídele	d	62,000 mm
Vnější průměr hřídele	D	72,000 mm
Šířka zubu	b	6,000 mm
Zkosení	s	0,500 mm
Poloměr	R	0,100 mm



Vlastnosti spoje

Součinitel rozložení zatížení	K _m	0,750 ul
Součinitel styku boků zubů	K _s	1,000 ul
Požadovaná bezpečnost	S _v	1,000 ul

Materiál

Hřídel

Materiál		C45
Mez pevnosti v tahu	S _t	500 MPa
Dovolený tlak	p _z	130,000 MPa
Dovolené smykové napětí	τ _z	200,000 MPa

Střed kola

Materiál		17CrNiMo6
Mez pevnosti v tahu	S _t	861 MPa
Dovolený tlak	p _z	246,000 MPa
Dovolené smykové napětí	τ _z	344,000 MPa

Výsledky

Pevnostní kontrola		Kladný
Minimální průměr hřídele	d _{min}	34,610 mm
Minimální délka drážkování	l _{min}	7,788 mm

Deformace boků drážek

Vypočtený tlak	p _c	20,249 MPa
Bezpečnost	S	6,420 ul

Krut hřídele

Vypočtené smykové napětí	τ _c	34,790 MPa
Bezpečnost	S	5,749 ul

Rovnoboké drážkování – spojení hřídele 4 a hřídele 5

1. převodový stupeň

Zatížení

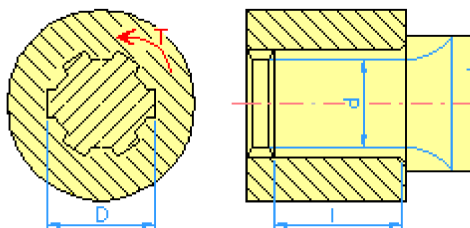
Výkon	P	38,013 kW
Otáčky	n	500,686 rpm
Krouticí moment	T	725,000 N m

Rozměry

Vnější průměr hřídele	D	98,000 mm
Vnitřní průměr dutého hřídele	d _i	0,000 mm

Drážka hřídele

Počet drážek	N	10,000 ul
Vnitřní průměr hřídele	d	92,000 mm
Vnější průměr hřídele	D	98,000 mm
Šířka zubu	b	14,000 mm
Zkosení	s	0,500 mm
Poloměr	R	0,100 mm



Vlastnosti spoje

Součinitel rozložení zatížení	K _m	0,750 ul
Součinitel styku boků zubů	K _s	1,000 ul
Požadovaná bezpečnost	S _v	1,000 ul

Materiál

Hřídel

Materiál		C45
Mez pevnosti v tahu	S ₀	500 MPa
Dovolený tlak	p ₀	130,000 MPa
Dovolené smykové napětí	τ ₀	200,000 MPa

Střed kola

Materiál		C45
Mez pevnosti v tahu	S ₀	500 MPa
Dovolený tlak	p ₀	130,000 MPa
Dovolené smykové napětí	τ ₀	200,000 MPa

Deformace boků drážek

Vypočtený tlak	p _c	18,170 MPa
Bezpečnost	S	7,154 ul

Krut hřídele

Vypočtené smykové napětí	τ _c	4,742 MPa
Bezpečnost	S	42,178 ul

2. převodový stupeň

Zatížení

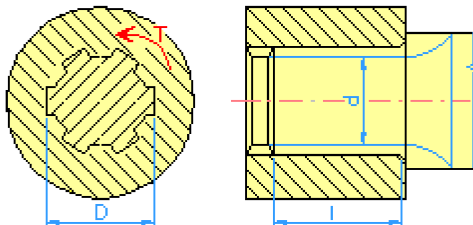
Výkon	P	38,013 kW
Otáčky	n	59,391 rpm
Krouticí moment	T	6112,000 N m

Rozměry

Vnější průměr hřídele	D	98,000 mm
Vnitřní průměr dutého hřídele	d _i	0,000 mm

Drážka hřídele

Počet drážek	N	10,000 ul
Vnitřní průměr hřídele	d	92,000 mm
Vnější průměr hřídele	D	98,000 mm
Šířka zubu	b	14,000 mm
Zkosení	s	0,500 mm
Poloměr	R	0,100 mm



Vlastnosti spoje

Součinitel rozložení zatížení	K _m	0,750 ul
Součinitel styku boků zubů	K _s	1,000 ul
Požadovaná bezpečnost	S _v	1,000 ul

Materiál

Hřídel

Materiál		C45
Mez pevnosti v tahu	S _t	500 MPa
Dovolený tlak	p _a	130,000 MPa
Dovolené smykové napětí	τ _a	200,000 MPa

Střed kola

Materiál		C45
Mez pevnosti v tahu	S _t	500 MPa
Dovolený tlak	p _a	130,000 MPa
Dovolené smykové napětí	τ _a	200,000 MPa

Deformace boků drážek

Vypočtený tlak	p _c	69,742 MPa
Bezpečnost	S	1,864 ul

Krut hřídele

Vypočtené smykové napětí	τ _c	39,975 MPa
Bezpečnost	S	5,003 ul

Evolventní spojení s drážkou - 2. převodový stupeň (spojení hřídele 1 a hřídele 4)

Zatížení

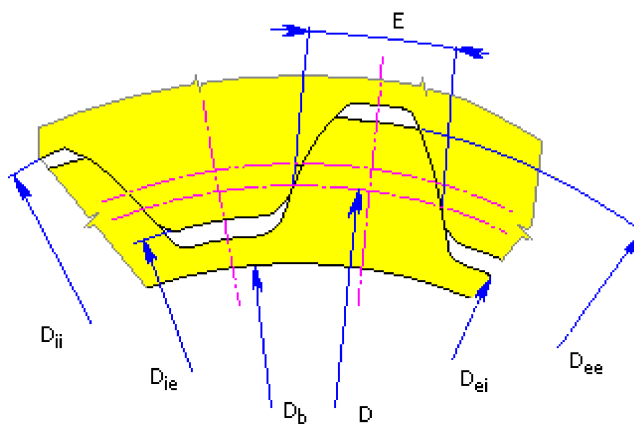
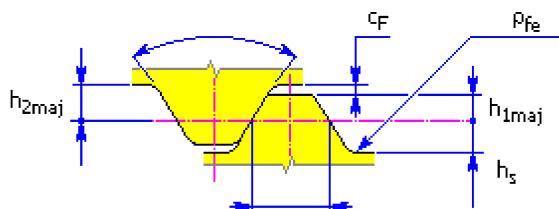
Výkon	P	38,000 kW
Otáčky	n	500,515 rpm
Krouticí moment	T	725,000 N m

Rozměry

Označení drážkování	ISO 4156 - 30 stupňů, ploché dno drážky, na boky zubů - INT/EXT 33z x 2,50m x 30,0P x 5H/5h		
Vnitřní průměr dutého hřídele	d_i		0,000 mm
Vnější průměr drážkovaného náboje	D_o		140,000 mm
Délka	l		20,000 mm

Rozměry drážkování

Vnitřní drážkování ISO 4156			Vnější drážkování ISO 4156		
Určení	INT 33z x m2,50 x 30,0P x 5H		Určení	EXT 33z x m2,50 x 30,0P x 5h	
Počet zubů	z	33,000 ul	Počet zubů	z	33,000 ul
Modul	m	2,500 mm	Modul	m	2,500 mm
Úhel záběru	α	30,00 deg	Úhel záběru	α	30,00 deg
Roztečný průměr	D	82,500 mm	Roztečný průměr	D	82,500 mm
Průměr základní kružnice	D_b	71,447 mm	Průměr základní kružnice	D_b	71,447 mm
Max. hlavní průměr, vnitřní	$D_{e\max}$	86,589 mm	Max. hlavní průměr, vnější	$D_{o\max}$	85,000 mm
Min. tvarový průměr, vnitřní	$D_{f\min}$	85,500 mm	Max. tvarový průměr, vnější	$D_{f\max}$	79,670 mm
Max. vedlejší průměr, vnitřní	$D_{l\max}$	80,520 mm	Min. vedlejší průměr, vnější	$D_{o\min}$	78,411 mm
Šířka mezery náboje			Tloušťka zuby hřídele		
Max. skutečná obvodová šířka drážky	E_{\max}	4,005 mm	Max. účinná šířka zuby	$S_{v\max}$	3,927 mm
Max. účinná obvodová šířka drážky	E_{\max}	3,971 mm	Max. skutečná šířka zuby	S_{\max}	3,893 mm
Min. skutečná obvodová šířka drážky	E_{\min}	3,961 mm	Min. účinná šířka zuby	$S_{v\min}$	3,883 mm
Min. účinná obvodová šířka drážky	E_{\min}	3,927 mm	Min. skutečná šířka zuby	S_{\min}	3,849 mm
Max. měření přes dvě kuličky nebo kolíky, vnitřní	$M_{R\max}$	89,151 mm	Max. měření přes dvě kuličky nebo kolíky, vnější	$M_{R\max}$	89,683 mm
Min. měření přes dvě kuličky nebo kolíky, vnitřní	$M_{R\min}$	89,079 mm	Min. měření přes dvě kuličky nebo kolíky, vnější	$M_{R\min}$	89,612 mm
Průměr kuličky nebo kolíku pro vnitřní drážkování	D_{Ri}	4,500 mm	Průměr kuličky nebo kolíku pro vnější drážkování	D_{Re}	4,750 mm
Poloměr zaoblení základního rámu, vnitřní	ρ_i	0,500 mm	Poloměr zaoblení základního rámu, vnější	ρ_e	0,500 mm



Materiál

Materiál		C45
Dovolený tlak	p_A	130,000 MPa
Dovolené smykové napětí	τ_A	148,000 MPa
Dovolené napětí v ohybu	σ_{oB}	246,000 MPa

Výsledky

Pevnostní kontrola		Kladný
Minimální průměr hřídele	d_{\min}	29,220 mm
Minimální délka drážkování	l_{\min}	3,724 mm
Deformace boků drážek		
Vypočtený tlak	p_c	24,209 MPa
Bezpečnost	S	5,370 ul
Napětí v ohybu na bocích zubů drážkování		
Vypočtené napětí v ohybu	σ_{oB}	29,317 MPa
Bezpečnost	S	8,391 ul

Evolutionální spojení s drážkou - 1. převodový stupeň (spojení hřídele 2 a hřídele 4)

Zatížení

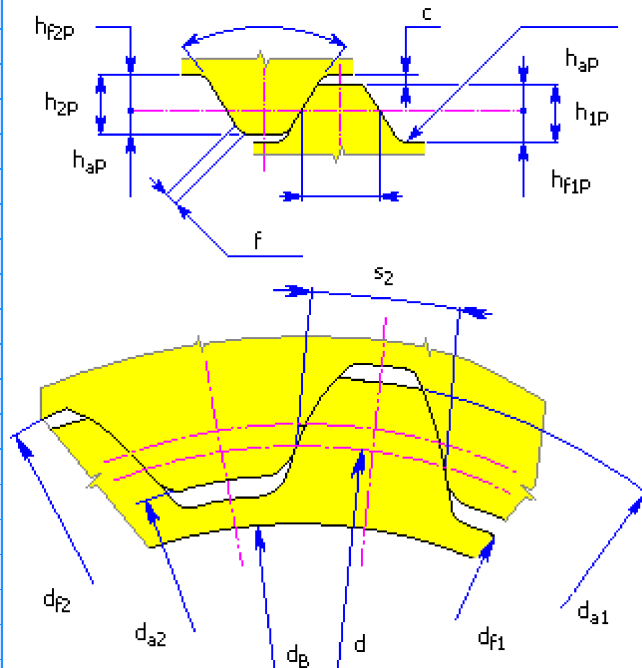
Výkon	P	38,000 kW
Otáčky	n	60,620 rpm
Krouticí moment	T	5986,000 N m

Rozměry

Označení drážkování	DIN 5480 - 30 stupňů, ploché dno drážky, na boky zubů - 110 x 2,50 x 30,00 x 42,00 7H 9h		
Vnitřní průměr dutého hřídele	d_i		0,000 mm
Vnější průměr drážkovaného náboje	D_{a2}		140,000 mm
Délka	l		45,000 mm

Rozměry drážkování

Jmenovitý průměr	d_b	110,000 mm
Počet zubů	z	42,000 ul
Modul	m	2,500 mm
Roztečný průměr	d	105,000 mm
Průměr základní kružnice	d_b	90,933 mm
Rozteč zubů	p	7,854 mm
Zkosení	f	0,375 mm
Poloměr	ρ_p	0,400 mm
Vůle	c	0,250 mm
Data vnitřního evolutionálního drážkování		
Modifikace výšky hlavy zubu náboje	x,m	-1,125 mm
Výška hlavy zubu náboje	h_{2p}	1,375 mm
Výška zubu náboje	h_{1p}	2,500 mm
Průměr vrcholu náboje	d_{a2}	105,000 mm
Min. tvarový patní průměr náboje	d_{f2min}	109,600 mm
Patní průměr náboje	d_{f2}	110,000 mm
Tloušťka zubu náboje	s_2	2,628 mm
Šířka mezery náboje	e_2	5,226 mm
Data vnějšího evolutionálního drážkování		
Modifikace výšky hlavy zubu hřídele	x,m	1,125 mm
Výška hlavy zubu hřídele	h_{1p}	1,375 mm
Výška zubu hřídele	h_{1p}	2,500 mm
Průměr vrcholu hřídele	d_{a1}	109,500 mm
Max. tvarový patní průměr hřídele	d_{f1max}	104,900 mm
Patní průměr hřídele	d_{f1}	104,500 mm
Tloušťka zubu hřídele	s_1	5,226 mm
Úchylka tloušťky zubu		
Horní úchylka tloušťky zubu	A_{se}	0,000 mm
Dolní úchylka tloušťky zubu	A_{si}	0,090 mm
Dolní úchylka tloušťky zubu pro samostatné měření	A_{seE}	0,000 mm
Tolerance rozměrů	T	0,090 mm
Jednotlivá tolerance (pro jednotlivé měření)	T_e	0,056 mm
Pole tolerance	$T - T_e$	0,034 mm
Úchylka šířky mezery		
Horní úchylka šířky mezery	A_{se}	0,045 mm
Dolní úchylka šířky mezery	A_{si}	0,000 mm
Dolní úchylka šířky mezery pro samostatné měření	A_{seE}	0,017 mm
Tolerance rozměrů	T	0,045 mm
Jednotlivá tolerance (pro jednotlivé měření)	T_e	0,028 mm
Pole tolerance	$T - T_e$	0,017 mm
Zkušební rozměry		
Základní délka tečny přes zuby	W_k	57,026 mm



Základní délka tečny přes mezery	W_l	47,250 mm
Zkušební rozměr přes kolíky	M_e	115,799 mm
Zkušební rozměr mezi kolíky	M_l	100,552 mm
Průměr kolíku, hřídel	d_{s1}	5,250 mm
Průměr kolíku, náboj	d_{s2}	4,500 mm
Počet zubů, hřídel	n_1	8,000 ul
Počet zubů, náboj	n_2	8,000 ul

☐ Materiál

Materiál	C45	
Dovolený tlak	p_A	130,000 MPa
Dovolené smykové napětí	τ_A	148,000 MPa
Dovolené napětí v ohybu	σ_{AB}	246,000 MPa

☐ Výsledky

Pevnostní kontrola	Kladný	
Minimální průměr hřídele	d_{min}	59,058 mm
Minimální délka drážkování	l_{min}	18,984 mm
Deformace boků drážek		
Vypočtený tlak	p_c	54,843 MPa
Bezpečnost	S	2,370 ul
Napětí v ohybu na bocích zubů drážkování		
Vypočtené napětí v ohybu	σ_{cAB}	66,414 MPa
Bezpečnost	S	3,704 ul

PŘÍLOHA č. 6

Dovolené hodnoty posunutí a sklonu hřídele

Deformace hřídele

Přípustné hodnoty sklonu hřídele v ložisku

Ložisko	Sklon			Max. zatížení
	'	°	rad	
Válečkové N., NN, kuželíková	4	0,07	0,001	P/C < 0,2
Kuličková ložiska:				
• 62, 622, 63, 623, 64	16	0,27	0,005	
• 618, 160, 60	10	0,17	0,003	
• dvouřadá	-	4	0,070	
Soudečková:				
• jednořadá	-	4	0,070	
• dvouřadá	-	0,5	0,009	

Dovolené deformace v ozubených převodech pro dokonale tuhé podpory

		Čelní kola	Čelní kola	Kuž. kola	Pozn.:
Posunutí	mm	0,04	0,01 m _n	0,005 m _n	m _n ...modul
Sklon	rad	0,001	-	-	

Pozn.: Velké hodnoty deformací negativně ovlivňují velikost přenášeného výkonu.

Dovolené deformace v ozubených převodech pro poddajné podpory

Výpočty KISSsoft zahrnují poddajnost ložisek – užití uvedených hodnot je proto problematické.

PŘÍLOHA č. 7
Výpočet nalisovaného spoje
výstupní hřídele převodovky a ozubeného kola

Maximální výstupní moment:	$M_t := 6112 \text{ N} \cdot \text{m}$	
Průměr hřídele:	$d_1 := 120 \text{ mm}$	
Průměr náboje:	$d_2 := 180 \text{ mm}$	
Délka náboje:	$l := 136 \text{ mm}$	
Materiál hřídele 12 050:	$R_{eH} := 370 \text{ MPa}$	$E := 2.1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$
Materiál náboje:	$R_{eN} := 640 \text{ MPa}$	
Dynamický součinitel:	$c_{dyn} := 1.33$	
Součinitel proti prokluzu:	$s_f := 2$	
Součinitel tření:	$f := 0.15$	

Výpočet potřebného tlaku ve spoji

$$p_{1potr} := \frac{2 \cdot s_f \cdot M_t}{\pi \cdot d_1^2 \cdot l \cdot f} = 26.491 \text{ MPa}$$

Potřebný přesah

$$\Delta d_{1potr} := \frac{d_1}{E} \cdot p_{1potr} \cdot \left(\frac{d_2^2 + d_1^2}{d_2^2 - d_1^2} \right) = 0.039 \text{ mm}$$

Tolerance uložení

NÁBOJ

$$d_{jmN} := 120 \text{ mm} \quad \mathbf{H7} \quad u_{hN} := 0.035 \text{ mm}$$

$$u_{dN} := 0 \text{ mm}$$

Minimální dolní hodnota tolerance hřídele

$$u_{dH} := u_{hN} + \Delta d_{1potr} = 0.074 \text{ mm}$$

HŘÍDEL

$$d_{jmH} := 120 \text{ mm} \quad \rightarrow \text{ zvolena tolerance } \mathbf{s5} \quad u_{hH} := 0.094 \text{ mm}$$

$$u_{dH} := 0.079 \text{ mm}$$

Maximální přesah

$$\Delta d_{1max} := u_{hH} - u_{dN} = 0.094 \text{ mm}$$

Maximální tlak ve spoji

$$p_{1max} := \frac{E \cdot \Delta d_{1max}}{\left(\frac{d_2^2 + d_1^2}{d_2^2 - d_1^2} \right) \cdot d_1} = 63.269 \text{ MPa}$$

Redukované napětí dle Guestovy hypotézy

$$\sigma_{red} := p_{1max} \cdot \left(\frac{d_2^2 + d_1^2}{d_2^2 - d_1^2} \right) - (-p_{1max}) = 227.769 \text{ MPa}$$

Součinitel bezpečnosti

$$s_{k\tau max} := \frac{R_{eN}}{\sigma_{red}} = 2.81$$

VYHOVUJE

Potřebný rozsah teplot pro montáž

Součinitel teplotní roztažnosti: $\alpha := 11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Montážní vůle: $\Delta d_{1mont} := \Delta d_{1max} + 0.1 \text{ mm} = 0.194 \text{ mm}$

Výchozí teplota: $t_C := 293.15 \text{ K}$

Teplota ohřátí: $t_N := \frac{\Delta d_{1mont}}{d_1 \cdot \alpha} + t_C = 440.12 \text{ K}$

$$t_N := 166.97 \text{ }^\circ\text{C}$$

PŘÍLOHA č. 12
Výpočet předepnutí axiálních ložisek

Axiální ložisko zachycující sílu zprava

Typ ložiska: **SKF 81252M**

Statická únosnost: $C_0 := 5300 \text{ kN}$

Součinitel minimálního zatížení: $k_a := 2.247$...dle katalogu SKF

Maximální otáčky vřetene: $n_M := 697 \text{ min}^{-1}$

Minimální zatížení ložiska

$$F_{minP} := 0.0005 \cdot C_0 + k_a \cdot \left(\frac{n_M}{1000} \right)^2 = 3.742 \text{ kN}$$

$$F_{minP} := 3.742 \text{ kN}$$

Maximální zatížení ložiska

Ze zatěžovacího stavu vzpočteného v programu Kisssoft je vybrán nejméně příznivý stav z hlediska axiálního zatížení zprava.

Nejméně příznivý stav - zatěžovací stav 3

$$F_{y3} := -196.128 \text{ kN}$$

Posunutí ve směru osy y pro uvažovaný zatěžovací stav

Posunutí je získáno z výpočtu programu Kisssoft.

$$\Delta_3 := 0.023 \text{ mm}$$

Tuhost ložiska zachycující sílu zprava

$$k_P := \frac{|F_{y3}|}{\Delta_3} = (8.527 \cdot 10^3) \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$$

Axiální ložisko zachycující sílu zleva

Typ ložiska: **SKF 81244M**

Statická únosnost: $C_0 := 3350 \text{ kN}$

Součinitel minimálního zatížení: $k_a := 0.898$...dle katalogu SKF

Maximální otáčky vřetene: $n_M := 697 \text{ min}^{-1}$

Minimální zatížení ložiska

$$F_{minL} := 0.0005 \cdot C_0 + k_a \cdot \left(\frac{n_M}{1000} \right)^2 = 2.111 \text{ kN}$$

$$F_{minL} := 2.111 \text{ kN}$$

Maximální zatížení ložiska

Ze zatěžovacího stavu vzpočteného v programu Kisssoft je vybrán nejméně příznivý stav z hlediska axiálního zatížení zleva.

Nejméně příznivý stav - zatěžovací stav 9

$$F_{y9} := 28.367 \text{ kN}$$

Posunutí ve směru osy y pro uvažovaný zatěžovací stav

Posunutí je získáno z výpočtu programu Kisssoft.

$$\Delta_9 := 0.003 \text{ mm}$$

Tuhost ložiska zachycující sílu zleva

$$k_L := \frac{F_{y9}}{\Delta_9} = (9.456 \cdot 10^3) \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$$

Výpočet potřebného předpětí pravého ložiska

$$F_{0P} := F_{y9} \cdot \frac{k_P}{k_P + k_L} + F_{minP} = 17.193 \text{ kN}$$

Výpočet potřebného předpětí levého ložiska

$$F_{0L} := |F_{y3}| \cdot \frac{k_L}{k_P + k_L} + F_{minL} = 105.238 \text{ kN}$$

Požadované předpětí

$$F_0 := \max(F_{0P}, F_{0L}) = 105.238 \text{ kN}$$

PŘÍLOHA č. 13
Výpočet tuhosti vřetene a uložení

Tuhost ve směru osy x

Hlavní ložisko: SKF NNU4976 BK/SPW33 ... ložisko A

Vnější průměr vnitřního kroužku $E_A := 426 \text{ mm}$

Vnitřní průměr vnějšího kroužku $F_A := 470.8 \text{ mm}$

Počet řad válečků $i_A := 2$

Délka válečků $l_{vA} := 44 \text{ mm}$

Zadní ložisko: SKF NNU4940 BK/SPW33 ... ložisko B

Vnější průměr vnitřního kroužku $E_B := 225 \text{ mm}$

Vnitřní průměr vnějšího kroužku $F_B := 252.2 \text{ mm}$

Počet řad válečků $i_B := 2$

Délka válečků $l_{vB} := 24 \text{ mm}$

Reakce v ložiskách ve směru osy x

Zatěžovací stav 3

Hlavní ložisko A $R_{xA} := 41.443 \text{ kN}$

Zadní ložisko B $R_{xB} := 6.648 \text{ kN}$

Posunutí vřetene v místě hrotu ve směru osy x

Zatěžovací stav 3 $u_x := -0.039 \text{ mm}$

Zatížení vřetene ve směru osy x

Zatěžovací stav 3 $F_{Rx} := -21 \text{ kN}$

Rozměry vřetene

$L := 990 \text{ mm}$ $a := 450 \text{ mm}$

Tuhost vřetene $k_{Vx} := \frac{F_{Rx}}{u_x} = 538.462 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$

Tuhost ložisek

Hlavní ložisko A

Zadní ložisko B

Průměr válečků

$$D_{vA} := \frac{F_A - E_A}{2} = 22.4 \text{ mm}$$

$$D_{vB} := \frac{F_B - E_B}{2} = 13.6 \text{ mm}$$

Počet válečků

$$n_{vA} := \pi \cdot \frac{F_A + D_{vA}}{D_{vA} + 3 \text{ mm}} = 61.001$$

$$n_{vB} := \pi \cdot \frac{F_B + D_{vB}}{D_{vB} + 3 \text{ mm}} = 50.303$$

$$n_{vA} := 61$$

$$n_{vB} := 50$$

Deformace a tuhost ložiska A

$$\delta_A := 7.68 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{|R_{xA}|^{0.9}}{\left(i_A \cdot \frac{n_{vA}}{5}\right)^{0.9} \cdot l_{vA}^{0.8}} = 0.004 \text{ mm}$$

$$k_A := \frac{R_{xA}}{0.9 \cdot \delta_A} = (1.151 \cdot 10^4) \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$$

Deformace ložiska A

$$\Delta_{xA} = \delta_A \cdot (-1) \cdot \text{sgn}(R_{xA})$$

$$\Delta_{xA} := -0.004 \text{ mm}$$

Deformace a tuhost ložiska B

$$\delta_B := 7.68 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{|R_{xB}|^{0.9}}{\left(i_B \cdot \frac{n_{vB}}{5}\right)^{0.9} \cdot l_{vB}^{0.8}} = 0.001 \text{ mm}$$

$$k_{B9} := \frac{R_{xB}}{0.9 \cdot \delta_B} = (7.387 \cdot 10^3) \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$$

Deformace ložiska B

$$\Delta_{xB} = \delta_B \cdot (-1) \cdot \text{sgn}(R_{xB})$$

$$\Delta_{xB} := -0.001 \text{ mm}$$

Deformace ložisek transformovaných na vřeteno

$$\text{Ložisko A} \quad \delta_{vxA} := \Delta_{xA} \cdot \left(1 + \frac{a}{L}\right) = -0.006 \text{ mm}$$

$$\text{Ložisko B} \quad \delta_{vxB} := -\Delta_{xB} \cdot \frac{a}{L} = (4.545 \cdot 10^{-4}) \text{ mm}$$

Celkové posunutí vřetena v místě hrotu

$$\delta_{Lx} := \delta_{vxA} + \delta_{vxB} = -0.005 \text{ mm}$$

Tuhost vřetena v místě hrotu daná ložisky

$$k_{Lx} := \frac{F_{Rx}}{\delta_{Lx}} = (3.915 \cdot 10^3) \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$$

Celková tuhost ve směru osy X

$$k_{Cx} := \frac{k_{Lx} \cdot k_{Vx}}{k_{Lx} + k_{Vx}} = 473.361 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$$

Tuhost ve směru osy y

Ložisko zachycující sílu zprava: SKF 81252 M ... ložisko Aax

$$\text{Průměr válečku} \quad D_{vax} := 32 \text{ mm}$$

$$\text{Počet řad válečků} \quad i_{ax} := 1$$

$$\text{Počet válečků} \quad n_{vax} := 25$$

$$\text{Délka válečků} \quad l_{vax} := 32 \text{ mm}$$

Reakce v ložisku ve směru osy y

$$\text{Zatěžovací stav 3} \quad R_{yax} := 218.428 \text{ kN}$$

Posunutí vřetene v místě hrotu ve směru osy y

$$u_y := -0.021 \text{ mm}$$

Zatížení vřetene ve směru osy y

$$F_{Ry} := -196.128 \text{ kN}$$

Tuhost vřetene

$$k_{Vy} := \frac{F_{Ry}}{u_y} = (9.339 \cdot 10^3) \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$$

Tuhost ložisek

$$\delta_{Aax} := 7.68 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{|R_{yax}|^{0.9}}{\left(i_{ax} \cdot \frac{n_{vax}}{5}\right)^{0.9} \cdot l_{vax}^{0.8}} = 0.072 \text{ mm}$$

$$k_{Aax4} := \frac{R_{yax}}{0.9 \cdot \delta_{ax}} = (3.371 \cdot 10^3) \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$$

Deformace ložiska A

$$\Delta_{yAax} = \delta_{ax} \cdot (-1) \cdot \text{sgn}(R_{yax4})$$

$$\Delta_{yax} := -0.072 \text{ mm}$$

Posunutí vřetena v místě hrotu

$$\delta_{Ly} := \Delta_{yax} = -0.072 \text{ mm}$$

Tuhost vřetena v místě hrotu daná ložisky

$$k_{Ly} := \frac{F_{Ry}}{\delta_{Ly}} = (2.724 \cdot 10^3) \frac{kN}{mm}$$

Celková tuhost ve směru osy y

$$k_{Cy} := \frac{k_{Ly} \cdot k_{Vy}}{k_{Ly} + k_{Vy}} = (2.109 \cdot 10^3) \frac{kN}{mm}$$

PŘÍLOHA č. 14
Výpočet nalisovaného spoje
vřetene a ozubeného kola finálního převodu

Výpočet nalisovaného spoje - spojení vřetene a kola finálního převodu

Maximální výstupní moment: $M_t := 77.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Průměr vřetene: $d_1 := 365 \text{ mm}$

Průměr náboje: $d_2 := 530 \text{ mm}$

Délka náboje: $l := 160 \text{ mm}$

Materiál vřetene 12 050: $R_{eH} := 370 \text{ MPa}$ $E := 2.1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$

Materiál náboje: $R_{eN} := 640 \text{ MPa}$

Dynamický součinitel: $c_{dyn} := 1.33$

Součinitel proti prokluzu: $s_f := 2$

Součinitel tření: $f := 0.15$

Výpočet potřebného tlaku ve spoji

$$p_{1potr} := \frac{2 \cdot s_f \cdot M_t}{\pi \cdot d_1^2 \cdot l \cdot f} = 30.782 \text{ MPa}$$

Potřebný přesah

$$\Delta d_{1potr} := \frac{d_1}{E} \cdot p_{1potr} \cdot \left(\frac{d_2^2 + d_1^2}{d_2^2 - d_1^2} \right) = 0.15 \text{ mm}$$

Tolerance uložení

NÁBOJ

$d_{jmN} := 365 \text{ mm}$ **H7**

$u_{hN} := 0.057 \text{ mm}$

$u_{dN} := 0 \text{ mm}$

Minimální dolní hodnota tolerance hřídele

$$u_{dH} := u_{hN} + \Delta d_{1potr} = 0.207 \text{ mm}$$

HŘÍDEL

$d_{jmH} := 365 \text{ mm}$ -> zvolena tolerance **s5**

$u_{hH} := 0.233 \text{ mm}$

$u_{dH} := 0.208 \text{ mm}$

Maximální přesah

$$\Delta d_{1max} := u_{hH} - u_{dN} = 0.233 \text{ mm}$$

Maximální tlak ve spoji

$$p_{1max} := \frac{E \cdot \Delta d_{1max}}{\left(\frac{d_2^2 + d_1^2}{d_2^2 - d_1^2} \right) \cdot d_1} = 47.803 \text{ MPa}$$

Redukované napětí dle Guestovy hypotézy

$$\sigma_{red} := p_{1max} \cdot \left(\frac{d_2^2 + d_1^2}{d_2^2 - d_1^2} \right) - (-p_{1max}) = 181.858 \text{ MPa}$$

Součinitel bezpečnosti

$$s_{k\tau max} := \frac{R_{eN}}{\sigma_{red}} = 3.519$$

VYHOVUJE

Potřebný rozsah teplot pro montáž

Součinitel teplotní roztažnosti: $\alpha := 11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Montážní vůle: $\Delta d_{1mont} := \Delta d_{1max} + 0.1 \text{ mm} = 0.333 \text{ mm}$

Výchozí teplota: $t_C := 293.15 \text{ K}$

Teplota ohřátí náboje: $t_N := \frac{\Delta d_{1mont}}{d_1 \cdot \alpha} + t_C = 376.089 \text{ K}$

$$t_N := 103 \text{ }^\circ\text{C}$$

PŘÍLOHA č. 15
Výstupní protokol programu KISSsoft
v návrhu vřetene a jeho uložení

Analysis of shafts, axle and beams

Input data

Coordinate system shaft: see picture W-002

Label	Vreteno
Drawing	
Initial position (mm)	0.000
Length (mm)	1725.000
Speed (1/min)	8.83
Sense of rotation: counter clockwise	
Material	C45 (1)
Young's modulus (N/mm ²)	206000.000
Poisson's ratio nu	0.300
Density (kg/m ³)	7830.000
Coefficient of thermal expansion (10 ⁻⁶ /K)	11.500
Temperature (°C)	20.000
Weight of shaft (kg)	3522.857
Weight of shaft, including additional masses (kg)	3522.857
Mass moment of inertia (kg*m ²)	689.215
Momentum of mass GD2 (Nm ²)	27044.792
Weight towards	(0.000, 0.000, -1.000)
Consider deformations due to shearing	
Shear correction coefficient	1.100
Rolling bearing stiffness is calculated from inner bearing geometry	
Tolerance field: Mean value	
Reference temperature (°C)	20.000

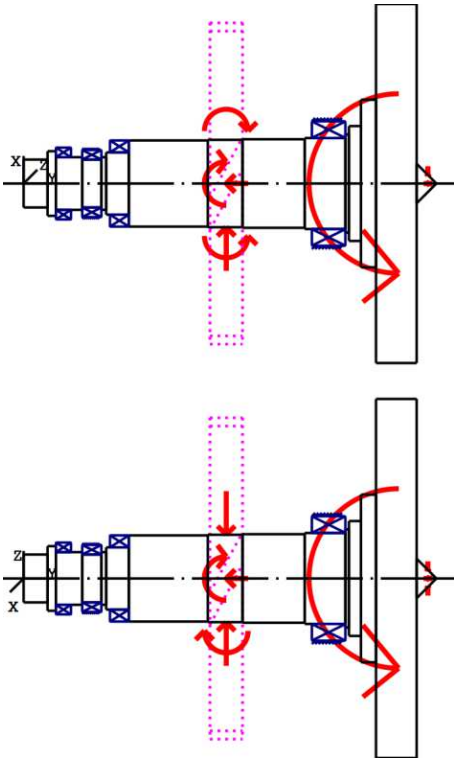


Figure: Load applications

Shaft definition (Vreteno)

Outer contour

<u>Cylinder (Cylinder)</u> 0.000mm ... 100.000mm		
Diameter (mm)	[d]	200.0000
Length (mm)	[l]	100.0000
Surface roughness (µm)	[Rz]	8.0000
<u>Cylinder (Cylinder)</u> 100.000mm ... 135.000mm		
Diameter (mm)	[d]	270.0000
Length (mm)	[l]	35.0000
Surface roughness (µm)	[Rz]	8.0000
<u>Cylinder (Cylinder)</u> 135.000mm ... 245.000mm		
Diameter (mm)	[d]	220.0000
Length (mm)	[l]	110.0000
Surface roughness (µm)	[Rz]	8.0000
<u>Cylinder (Cylinder)</u> 245.000mm ... 325.000mm		
Diameter (mm)	[d]	200.0000
Length (mm)	[l]	80.0000
Surface roughness (µm)	[Rz]	8.0000
<u>Cylinder (Cylinder)</u> 325.000mm ... 345.000mm		
Diameter (mm)	[d]	220.0000
Length (mm)	[l]	20.0000
Surface roughness (µm)	[Rz]	8.0000

Cylinder (Cylinder)			345.000mm ... 440.000mm
Diameter (mm)	[d]	260.0000	
Length (mm)	[l]	95.0000	
Surface roughness (µm)	[Rz]	8.0000	

Cylinder (Cylinder)			440.000mm ... 770.000mm
Diameter (mm)	[d]	360.0000	
Length (mm)	[l]	330.0000	
Surface roughness (µm)	[Rz]	8.0000	

Cylinder (Cylinder)			770.000mm ... 915.000mm
Diameter (mm)	[d]	365.0000	
Length (mm)	[l]	145.0000	
Surface roughness (µm)	[Rz]	8.0000	

Cylinder (Cylinder)			915.000mm ... 1175.000mm
Diameter (mm)	[d]	370.0000	
Length (mm)	[l]	260.0000	
Surface roughness (µm)	[Rz]	8.0000	

Cylinder (Cylinder)			1175.000mm ... 1345.000mm
Diameter (mm)	[d]	380.0000	
Length (mm)	[l]	170.0000	
Surface roughness (µm)	[Rz]	8.0000	

Cylinder (Cylinder)			1345.000mm ... 1360.000mm
Diameter (mm)	[d]	410.0000	
Length (mm)	[l]	15.0000	
Surface roughness (µm)	[Rz]	8.0000	

Cylinder (Cylinder)			1360.000mm ... 1410.000mm
Diameter (mm)	[d]	480.0000	
Length (mm)	[l]	50.0000	
Surface roughness (µm)	[Rz]	8.0000	

Cylinder (Cylinder)			1410.000mm ... 1473.000mm
Diameter (mm)	[d]	700.0000	
Length (mm)	[l]	63.0000	
Surface roughness (µm)	[Rz]	8.0000	

Cylinder (Cylinder)			1473.000mm ... 1643.000mm
Diameter (mm)	[d]	1500.0000	
Length (mm)	[l]	170.0000	
Surface roughness (µm)	[Rz]	8.0000	

Taper (Taper)			1643.000mm ... 1725.000mm
Diameter left (mm)	[d _l]	165.0000	
Diameter right (mm)	[d _r]	1.0000	
Length (mm)	[l]	82.0000	
Surface roughness (µm)	[Rz]	8.0000	

Forces

Type of force element		Centric force
Label in the model		Stav1
Position on shaft (mm)	[ylocal]	1690.0000
Position in global system (mm)	[yglobal]	1690.0000

Length of load application (mm)	0.0000		
Power (kW)	0.0000		
Torque (Nm)	0.0000		
Axial force (load spectrum) (N)	-106000.0000 /	-0.0001 /	-0.0001
Shearing force X (load spectrum) (N)	-42000.0000 /	-0.0000 /	-0.0000
Shearing force Z (Load spectrum) (N)	6000.0000 /	0.0000 /	0.0000
Bending moment X (Load spectrum) (Nm)	0.0000 /	0.0000 /	0.0000
Bending moment Z (Load spectrum) (Nm)	0.0000 /	0.0000 /	0.0000
Load spectrum:			

No.	Frequency (%)	Speed (1/min)	Power (%)	Torque (%)	Force (%)
1	7.0000e+000	8.834	100.000	100.000	100.000
2	1.3000e+001	8.834	0.000	0.000	0.000
3	3.5000e+000	-8.834	-0.000	0.000	0.000
4	6.5000e+000	-8.834	-0.000	0.000	0.000
5	2.5000e+001	148.164	0.000	0.000	0.000
6	1.0000e+001	740.802	0.000	0.000	0.000
7	1.0500e+001	70.672	0.000	0.000	0.000
8	1.9500e+001	70.672	0.000	0.000	0.000
9	5.0000e+000	35.336	0.000	0.000	0.000

Type of force element	Centric force		
Label in the model	Stav2		
Position on shaft (mm)	[Ylocal]	1690.0000	
Position in global system (mm)	[Yglobal]	1690.0000	
Length of load application (mm)	0.0000		
Power (kW)	0.0000		
Torque (Nm)	0.0000		
Axial force (load spectrum) (N)	-0.0001 /	-64000.0000 /	-0.0001
Shearing force X (load spectrum) (N)	0.0000 /	0.0000 /	0.0000
Shearing force Z (Load spectrum) (N)	-0.0001 /	-64000.0000 /	-0.0001
Bending moment X (Load spectrum) (Nm)	0.0000 /	0.0000 /	0.0000
Bending moment Z (Load spectrum) (Nm)	0.0000 /	0.0000 /	0.0000
Load spectrum:			

No.	Frequency (%)	Speed (1/min)	Power (%)	Torque (%)	Force (%)
1	7.0000e+000	8.834	0.000	0.000	0.000
2	1.3000e+001	8.834	100.000	100.000	100.000
3	3.5000e+000	-8.834	-0.000	0.000	0.000
4	6.5000e+000	-8.834	-0.000	0.000	0.000
5	2.5000e+001	148.164	0.000	0.000	0.000
6	1.0000e+001	740.802	0.000	0.000	0.000
7	1.0500e+001	70.672	0.000	0.000	0.000
8	1.9500e+001	70.672	0.000	0.000	0.000
9	5.0000e+000	35.336	0.000	0.000	0.000

Type of force element	Centric force		
Label in the model	Stav3		
Position on shaft (mm)	[Ylocal]	1690.0000	
Position in global system (mm)	[Yglobal]	1690.0000	
Length of load application (mm)	0.0000		
Power (kW)	0.0000		
Torque (Nm)	0.0000		
Axial force (load spectrum) (N)	-0.0002 /	-0.0002 /	-196128.0000
Shearing force X (load spectrum) (N)	-0.0000 /	-0.0000 /	-21000.0000
Shearing force Z (Load spectrum) (N)	-0.0002 /	-0.0002 /	-195000.0000
Bending moment X (Load spectrum) (Nm)	0.0000 /	0.0000 /	0.0000
Bending moment Z (Load spectrum) (Nm)	0.0000 /	0.0000 /	0.0000

Load spectrum:

No.	Frequency (%)	Speed (1/min)	Power (%)	Torque (%)	Force (%)
1	7.0000e+000	8.834	0.000	0.000	0.000
2	1.3000e+001	8.834	0.000	0.000	0.000
3	3.5000e+000	-8.834	-100.000	100.000	100.000
4	6.5000e+000	-8.834	-0.000	0.000	0.000
5	2.5000e+001	148.164	0.000	0.000	0.000
6	1.0000e+001	740.802	0.000	0.000	0.000
7	1.0500e+001	70.672	0.000	0.000	0.000
8	1.9500e+001	70.672	0.000	0.000	0.000
9	5.0000e+000	35.336	0.000	0.000	0.000

Type of force element	Centric force		
Label in the model	Stav4		
Position on shaft (mm)	[ylocal]	1690.0000	
Position in global system (mm)	[yglobal]	1690.0000	
Length of load application (mm)	0.0000		
Power (kW)	0.0000		
Torque (Nm)	0.0000		
Axial force (load spectrum) (N)	-0.0002 /	-0.0002 /	-0.0002
Shearing force X (load spectrum) (N)	0.0000 /	0.0000 /	0.0000
Shearing force Z (Load spectrum) (N)	-0.0002 /	-0.0002 /	-0.0002
Bending moment X (Load spectrum) (Nm)	0.0000 /	0.0000 /	0.0000
Bending moment Z (Load spectrum) (Nm)	0.0000 /	0.0000 /	0.0000

Load spectrum:

No.	Frequency (%)	Speed (1/min)	Power (%)	Torque (%)	Force (%)
1	7.0000e+000	8.834	0.000	0.000	0.000
2	1.3000e+001	8.834	0.000	0.000	0.000
3	3.5000e+000	-8.834	-0.000	0.000	0.000
4	6.5000e+000	-8.834	-100.000	100.000	100.000
5	2.5000e+001	148.164	0.000	0.000	0.000
6	1.0000e+001	740.802	0.000	0.000	0.000
7	1.0500e+001	70.672	0.000	0.000	0.000
8	1.9500e+001	70.672	0.000	0.000	0.000
9	5.0000e+000	35.336	0.000	0.000	0.000

Type of force element	Centric force		
Label in the model	Stav5		
Position on shaft (mm)	[ylocal]	1690.0000	
Position in global system (mm)	[yglobal]	1690.0000	
Length of load application (mm)	0.0000		
Power (kW)	0.0000		
Torque (Nm)	0.0000		
Axial force (load spectrum) (N)	-0.0002 /	-0.0002 /	-0.0002
Shearing force X (load spectrum) (N)	0.0000 /	0.0000 /	0.0000
Shearing force Z (Load spectrum) (N)	-0.0002 /	-0.0002 /	-0.0002
Bending moment X (Load spectrum) (Nm)	0.0000 /	0.0000 /	0.0000
Bending moment Z (Load spectrum) (Nm)	0.0000 /	0.0000 /	0.0000

Load spectrum:

No.	Frequency (%)	Speed (1/min)	Power (%)	Torque (%)	Force (%)
1	7.0000e+000	8.834	0.000	0.000	0.000
2	1.3000e+001	8.834	0.000	0.000	0.000
3	3.5000e+000	-8.834	-0.000	0.000	0.000
4	6.5000e+000	-8.834	-0.000	0.000	0.000
5	2.5000e+001	148.164	1677.200	100.000	100.000

6	1.0000e+001	740.802	0.000	0.000	0.000
7	1.0500e+001	70.672	0.000	0.000	0.000
8	1.9500e+001	70.672	0.000	0.000	0.000
9	5.0000e+000	35.336	0.000	0.000	0.000

Type of force element		Centric force		
Label in the model		Stav6		
Position on shaft (mm)	[Ylocal]	1690.0000		
Position in global system (mm)	[Yglobal]	1690.0000		
Length of load application (mm)		0.0000		
Power (kW)		0.0000		
Torque (Nm)		0.0000		
Axial force (load spectrum) (N)		-0.0001 /	-0.0001 /	-0.0001
Shearing force X (load spectrum) (N)		0.0000 /	0.0000 /	0.0000
Shearing force Z (Load spectrum) (N)		-0.0000 /	-0.0000 /	-0.0000
Bending moment X (Load spectrum) (Nm)		0.0000 /	0.0000 /	0.0000
Bending moment Z (Load spectrum) (Nm)		0.0000 /	0.0000 /	0.0000

Load spectrum:

No.	Frequency (%)	Speed (1/min)	Power (%)	Torque (%)	Force (%)
1	7.0000e+000	8.834	0.000	0.000	0.000
2	1.3000e+001	8.834	0.000	0.000	0.000
3	3.5000e+000	-8.834	-0.000	0.000	0.000
4	6.5000e+000	-8.834	-0.000	0.000	0.000
5	2.5000e+001	148.164	0.000	0.000	0.000
6	1.0000e+001	740.802	8385.800	100.000	100.000
7	1.0500e+001	70.672	0.000	0.000	0.000
8	1.9500e+001	70.672	0.000	0.000	0.000
9	5.0000e+000	35.336	0.000	0.000	0.000

Type of force element		Centric force		
Label in the model		Stav7		
Position on shaft (mm)	[Ylocal]	1690.0000		
Position in global system (mm)	[Yglobal]	1690.0000		
Length of load application (mm)		0.0000		
Power (kW)		0.0000		
Torque (Nm)		0.0000		
Axial force (load spectrum) (N)		-0.0001 /	-0.0001 /	-0.0001
Shearing force X (load spectrum) (N)		-0.0000 /	-0.0000 /	-0.0000
Shearing force Z (Load spectrum) (N)		-0.0000 /	-0.0000 /	-0.0000
Bending moment X (Load spectrum) (Nm)		0.0000 /	0.0000 /	0.0000
Bending moment Z (Load spectrum) (Nm)		0.0000 /	0.0000 /	0.0000

Load spectrum:

No.	Frequency (%)	Speed (1/min)	Power (%)	Torque (%)	Force (%)
1	7.0000e+000	8.834	0.000	0.000	0.000
2	1.3000e+001	8.834	0.000	0.000	0.000
3	3.5000e+000	-8.834	-0.000	0.000	0.000
4	6.5000e+000	-8.834	-0.000	0.000	0.000
5	2.5000e+001	148.164	0.000	0.000	0.000
6	1.0000e+001	740.802	0.000	0.000	0.000
7	1.0500e+001	70.672	800.000	100.000	100.000
8	1.9500e+001	70.672	0.000	0.000	0.000
9	5.0000e+000	35.336	0.000	0.000	0.000

Type of force element		Centric force		
Label in the model		Stav8		
Position on shaft (mm)	[Ylocal]	1690.0000		

Position in global system (mm)	[Yglobal]	1690.0000		
Length of load application (mm)		0.0000		
Power (kW)		0.0000		
Torque (Nm)		0.0000		
Axial force (load spectrum) (N)		-0.0000 /	-0.0000 /	-0.0000
Shearing force X (load spectrum) (N)		0.0000 /	0.0000 /	0.0000
Shearing force Z (Load spectrum) (N)		-0.0000 /	-0.0000 /	-0.0000
Bending moment X (Load spectrum) (Nm)		0.0000 /	0.0000 /	0.0000
Bending moment Z (Load spectrum) (Nm)		0.0000 /	0.0000 /	0.0000
Load spectrum:				

No.	Frequency (%)	Speed (1/min)	Power (%)	Torque (%)	Force (%)
1	7.0000e+000	8.834	0.000	0.000	0.000
2	1.3000e+001	8.834	0.000	0.000	0.000
3	3.5000e+000	-8.834	-0.000	0.000	0.000
4	6.5000e+000	-8.834	-0.000	0.000	0.000
5	2.5000e+001	148.164	0.000	0.000	0.000
6	1.0000e+001	740.802	0.000	0.000	0.000
7	1.0500e+001	70.672	0.000	0.000	0.000
8	1.9500e+001	70.672	800.000	100.000	100.000
9	5.0000e+000	35.336	0.000	0.000	0.000

Type of force element		Centric force
Label in the model		Stav9
Position on shaft (mm)	[Ylocal]	1690.0000
Position in global system (mm)	[Yglobal]	1690.0000
Length of load application (mm)		0.0000
Power (kW)		0.0000
Torque (Nm)		0.0000
Axial force (load spectrum) (N)		0.0000 / 0.0000 / 0.0000
Shearing force X (load spectrum) (N)		-0.0000 / -0.0000 / -0.0000
Shearing force Z (Load spectrum) (N)		0.0000 / 0.0000 / 0.0000
Bending moment X (Load spectrum) (Nm)		0.0000 / 0.0000 / 0.0000
Bending moment Z (Load spectrum) (Nm)		0.0000 / 0.0000 / 0.0000
Load spectrum:		

No.	Frequency (%)	Speed (1/min)	Power (%)	Torque (%)	Force (%)
1	7.0000e+000	8.834	0.000	0.000	0.000
2	1.3000e+001	8.834	0.000	0.000	0.000
3	3.5000e+000	-8.834	-0.000	0.000	0.000
4	6.5000e+000	-8.834	-0.000	0.000	0.000
5	2.5000e+001	148.164	0.000	0.000	0.000
6	1.0000e+001	740.802	0.000	0.000	0.000
7	1.0500e+001	70.672	0.000	0.000	0.000
8	1.9500e+001	70.672	0.000	0.000	0.000
9	5.0000e+000	35.336	400.000	100.000	100.000

Type of force element		Cylindrical gear
Label in the model		vetev_a
Position on shaft (mm)	[Ylocal]	847.0000
Position in global system (mm)	[Yglobal]	847.0000
Operating pitch diameter (mm)		1342.1788
Helix angle (°)		22.0713 left
Working pressure angle at normal section (°)		20.4779
Position of contact (°)		-30.0000
Length of load application (mm)		136.0000
Power (kW)		33.6410
Torque (Nm)		-36364.9407

Axial force (load spectrum) (N)	-21971.8493 /	-0.0000 /	10985.9247
Shearing force X (load spectrum) (N)	8182.9886 /	0.0000 /	-23002.4678
Shearing force Z (Load spectrum) (N)	57846.3745 /	0.0001 /	-18004.9316
Bending moment X (Load spectrum) (Nm)	-7372.5374 /	-0.0000 /	3686.2687
Bending moment Z (Load spectrum) (Nm)	-12769.6094 /	-0.0000 /	6384.8047
Load spectrum, driven (input)			

No.	Frequency (%)	Speed (1/min)	Power (kW)	Torque (Nm)
1	7.0000e+000	-8.834	33.641	-36364.941
2	1.3000e+001	-8.834	0.000	-0.000
3	3.5000e+000	8.834	16.821	18182.470
4	6.5000e+000	8.834	-0.000	-0.000
5	2.5000e+001	-148.164	0.000	-0.000
6	1.0000e+001	-740.802	0.000	-0.000
7	1.0500e+001	-70.672	30.748	-4154.694
8	1.9500e+001	-70.672	0.000	-0.000
9	5.0000e+000	-35.336	33.641	-9091.235

Type of force element	Cylindrical gear		
Label in the model		vetev_b	
Position on shaft (mm)	[ylocal]	847.0000	
Position in global system (mm)	[yglobal]	847.0000	
Operating pitch diameter (mm)		1342.1788	
Helix angle (°)		22.0713 left	
Working pressure angle at normal section (°)		20.4779	
Position of contact (°)		210.0000	
Length of load application (mm)		136.0000	
Power (kW)		33.6410	
Torque (Nm)		-36364.9407	
Axial force (load spectrum) (N)	-21971.8493 /	-0.0000 /	10985.9247
Shearing force X (load spectrum) (N)	46004.9356 /	0.0000 /	-4091.4943
Shearing force Z (Load spectrum) (N)	-36009.8633 /	-0.0000 /	28923.1873
Bending moment X (Load spectrum) (Nm)	-7372.5374 /	-0.0000 /	3686.2687
Bending moment Z (Load spectrum) (Nm)	12769.6094 /	0.0000 /	-6384.8047
Load spectrum, driven (input)			

No.	Frequency (%)	Speed (1/min)	Power (kW)	Torque (Nm)
1	7.0000e+000	-8.834	33.641	-36364.941
2	1.3000e+001	-8.834	0.000	-0.000
3	3.5000e+000	8.834	16.821	18182.470
4	6.5000e+000	8.834	-0.000	-0.000
5	2.5000e+001	-148.164	0.000	-0.000
6	1.0000e+001	-740.802	0.000	-0.000
7	1.0500e+001	-70.672	30.748	-4154.694
8	1.9500e+001	-70.672	0.000	-0.000
9	5.0000e+000	-35.336	33.641	-9091.235

Type of force element	Coupling		
Label in the model		Coupling	
Position on shaft (mm)	[ylocal]	1568.0000	
Position in global system (mm)	[yglobal]	1568.0000	
Effective diameter (mm)		0.0000	
Radial force factor (-)		0.0000	
Direction of the radial force (°)		0.0000	
Axial force factor (-)		0.0000	
Length of load application (mm)		130.0000	
Power (kW)		67.2820	
Torque (Nm)		72729.8815	

Axial force (load spectrum) (N)	0.0000 /	0.0000 /	0.0000
Shearing force X (load spectrum) (N)	0.0000 /	0.0000 /	0.0000
Shearing force Z (Load spectrum) (N)	0.0000 /	0.0000 /	0.0000
Mass (kg)	0.0000		
Mass moment of inertia Jp (kg*m ²)	0.0000		
Mass moment of inertia Jxx (kg*m ²)	0.0000		
Mass moment of inertia Jzz (kg*m ²)	0.0000		
Eccentricity (mm)	0.0000		
Load spectrum, driving (output)			

No.	Frequency (%)	Speed (1/min)	Power (kW)	Torque (Nm)
1	7.0000e+000	-8.834	-67.282	72729.881
2	1.3000e+001	-8.834	-0.000	0.000
3	3.5000e+000	8.834	-33.641	-36364.941
4	6.5000e+000	8.834	0.000	0.000
5	2.5000e+001	-148.164	-0.000	0.000
6	1.0000e+001	-740.802	-0.000	0.000
7	1.0500e+001	-70.672	-61.497	8309.568
8	1.9500e+001	-70.672	-0.000	0.000
9	5.0000e+000	-35.336	-67.282	18182.470

Bearing

Label in the model	hlavni_lozisko
Bearing type	SKF NNU 4976 BK/SPW33
Bearing type	Cylindrical roller bearing(double row)

Bearing position (mm)	[ylokal]	1275.000
Bearing position (mm)	[yglobal]	1275.000
Attachment of external ring		Free bearing
Inner diameter (mm)	[d]	380.000
External diameter (mm)	[D]	520.000
Width (mm)	[b]	140.000
Corner radius (mm)	[r]	4.000
Number of rolling bodies	[Z]	40
Rolling body reference circle (mm)	[D _{pw}]	455.265
Diameter rolling body (mm)	[D _w]	28.631
Rolling body length (mm)	[L _{we}]	38.117
Diameter, external race (mm)	[d _o]	484.013
Diameter, internal race (mm)	[d _i]	426.517

Calculation with approximate bearings internal geometry (*)

Bearing clearance		DIN 620:1988 C0 (235.00 µm)
Basic static load rating (kN)	[C ₀]	3600.000
Basic dynamic load rating (kN)	[C]	1450.000
Fatigue load rating (kN)	[C _u]	320.000
Values for approximated geometry:		
Basic dynamic load rating (kN)	[C _{theo}]	1449.563
Basic static load rating (kN)	[C _{0theo}]	3599.846

Label in the model	zadni_lozisko
Bearing type	SKF NNU 4940 B/SPW33
Bearing type	Cylindrical roller bearing(double row)

Bearing position (mm)	[ylokal]	285.000
Bearing position (mm)	[yglobal]	285.000
Attachment of external ring		Free bearing
Inner diameter (mm)	[d]	200.000

External diameter (mm)	[D]	280.000
Width (mm)	[b]	80.000
Corner radius (mm)	[r]	2.100
Number of rolling bodies	[Z]	34
Rolling body reference circle (mm)	[D _{pw}]	242.808
Diameter rolling body (mm)	[D _w]	16.749
Rolling body length (mm)	[L _{we}]	22.290
Diameter, external race (mm)	[d _o]	259.616
Diameter, internal race (mm)	[d _i]	226.000
Calculation with approximate bearings internal geometry (*)		
Bearing clearance		DIN 620:1988 C0 (117.50 μm)
Basic static load rating (kN)	[C ₀]	1040.000
Basic dynamic load rating (kN)	[C]	484.000
Fatigue load rating (kN)	[C _u]	106.000
Values for approximated geometry:		
Basic dynamic load rating (kN)	[C _{theo}]	483.906
Basic static load rating (kN)	[C _{0theo}]	1039.966

Label in the model	axialni_zprava
Bearing type	SKF 81252 M
Bearing type	Axial cylindrical roller bearing

Bearing position (mm)	[y _{lokal}]	400.500
Bearing position (mm)	[y _{global}]	400.500
Attachment of external ring		Set axial bearing left
Inner diameter (mm)	[d]	260.000
External diameter (mm)	[D]	360.000
Width (mm)	[b]	79.000
Corner radius (mm)	[r]	2.100
Number of rolling bodies	[Z]	24
Rolling body reference circle (mm)	[D _{pw}]	313.782
Diameter rolling body (mm)	[D _w]	31.179
Rolling body length (mm)	[L _{we}]	32.195
Diameter, external race (mm)	[d _o]	345.977
Diameter, internal race (mm)	[d _i]	281.587

Calculation with approximate bearings internal geometry (*)		
Bearing clearance		0.00 μm
Pretension force (N)	[F _V]	3742.000
Bearing offset (Y direction) (mm)	[δ _y]	0.002
Basic static load rating (kN)	[C ₀]	5300.000
Basic dynamic load rating (kN)	[C]	1140.000
Fatigue load rating (kN)	[C _u]	415.000
Values for approximated geometry:		
Basic dynamic load rating (kN)	[C _{theo}]	1140.682
Basic static load rating (kN)	[C _{0theo}]	5300.000

Label in the model	axialni_zleva
Bearing type	SKF 81244 M
Bearing type	Axial cylindrical roller bearing

Bearing position (mm)	[y _{lokal}]	166.500
Bearing position (mm)	[y _{global}]	166.500
Attachment of external ring		Set axial bearing right
Inner diameter (mm)	[d]	220.000
External diameter (mm)	[D]	300.000
Width (mm)	[b]	63.000

Corner radius (mm)	[r]	2.000
Number of rolling bodies	[Z]	24
Rolling body reference circle (mm)	[D _{pw}]	263.172
Diameter rolling body (mm)	[D _w]	25.298
Rolling body length (mm)	[L _{we}]	25.080
Diameter, external race (mm)	[d _o]	288.252
Diameter, internal race (mm)	[d _i]	238.092
Calculation with approximate bearings internal geometry (*)		
Bearing clearance		0.00 μm
Pretension force (N)	[F _V]	-3742.000
Bearing offset (Y direction) (mm)	[δ _y]	-0.002
Basic static load rating (kN)	[C ₀]	3350.000
Basic dynamic load rating (kN)	[C]	750.000
Fatigue load rating (kN)	[C _u]	275.000
Values for approximated geometry:		
Basic dynamic load rating (kN)	[C _{theo}]	750.433
Basic static load rating (kN)	[C _{0theo}]	3350.000

Results

Note: the maximum deflection and torsion of the shaft under torque, the life modification factor aISO, and the bearing's thinnest lubricant film thickness EHL, are predefined for the first load bin.

Shaft

Maximum deflection (μm)	719.548
Position of the maximum (mm)	1725.000
Mass center of gravity (mm)	1355.651
Total axial load (N)	-920499.699
Torsion under torque (°)	0.015

Bearing

Probability of failure	[n]	10.00	%
Axial clearance	[u _A]	10.00	μm
Lubricant		Oil: ISO-VG 220	
Lubricant - service temperature	[T _B]	70.00	°C
Rolling bearing stiffness calculated from internal geometry			

Shaft 'Vreteno' Rolling bearing 'hlavni_lozisko'

Position (Y-coordinate)	[y]	1275.00	mm
Life modification factor for reliability[a ₁]		1.000	
Nominal bearing service life	[L _{nh}]	159550.44	h
Operating viscosity	[ν]	48.88	mm ² /s
Minimum EHL lubricant film thickness	[h _{min}]	0.025	μm
Static safety factor	[S ₀]	13.04	
Operating bearing clearance	[Pd]	235.000	μm
Reference rating service life	[L _{nrh}]	43037.98	h

Bearing reaction force

F_x (kN) F_y (kN)

Bearing reaction moment

F_z (kN) F_r (kN) M_x (Nm) M_y (Nm) M_z (Nm) M_r (Nm)

1	16.830	0.000	19.633	25.859	1015.266	0.000	-870.883	1337.611
2	0.000	0.000	110.467	110.467	4547.861	0.000	-0.000	4547.861
3	41.928	0.000	272.978	276.179	9620.309	0.000	-1380.019	9718.786
4	0.000	0.000	236.567	236.567	8484.526	0.000	-0.000	8484.526
5	0.000	0.000	238.291	238.291	8500.802	0.000	-0.000	8500.802
6	0.000	0.000	67.224	67.224	3037.357	0.000	-0.000	3037.357
7	1.500	0.000	78.622	78.637	3441.069	0.000	-81.087	3442.025
8	0.000	0.000	89.278	89.278	3830.062	0.000	-0.000	3830.062
9	3.304	0.000	27.918	28.113	1307.801	0.000	-163.255	1317.951

Displacement of bearing

Misalignment of bearing

	ux (µm)	uy (µm)	uz (µm)	rr (µm)	rx (mrad)	ry (mrad)	rz (mrad)	rr (mrad)
1	-78.6934	-22.0884	-96.4752	124.4995	-0.152	0.210	0.209	0.259
2	-0.0000	-6.6401	-144.2018	144.2018	-0.279	0.000	0.000	0.279
3	-26.2056	-26.4189	-161.9923	164.0983	-0.410	-0.105	0.023	0.410
4	-0.0000	-29.2599	-159.9149	159.9149	-0.378	0.000	0.000	0.378
5	-0.0000	-23.3235	-160.1350	160.1350	-0.377	0.000	0.000	0.377
6	-0.0000	-7.0531	-137.2023	137.2023	-0.238	0.000	0.000	0.238
7	-1.1686	-5.6998	-139.2048	139.2098	-0.249	0.024	0.036	0.251
8	-0.0000	-3.8091	-140.9300	140.9300	-0.260	0.000	0.000	0.260
9	-11.9736	3.8913	-129.0607	129.6150	-0.149	0.053	0.095	0.176

Shaft 'Vreteno' Rolling bearing 'zadni_lozisko'

Position (Y-coordinate)	[y]	285.00	mm
Life modification factor for reliability[a ₁]		1.000	
Nominal bearing service life	[L _{nh}]	673524.96	h
Operating viscosity	[v]	48.88	mm ² /s
Minimum EHL lubricant film thickness	[h _{min}]	0.015	µm
Static safety factor	[S ₀]	19.02	
Operating bearing clearance	[Pd]	117.500	µm
Reference rating service life	[L _{nrh}]	647599.12	h

Bearing reaction force

Bearing reaction moment

	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Fr (kN)	Mx (Nm)	My (Nm)	Mz (Nm)	Mr (Nm)
1	-29.027	0.000	-12.904	31.766	145.585	0.000	-297.628	331.327
2	-0.000	0.000	-11.891	11.891	259.285	0.000	-0.000	259.285
3	6.163	0.000	-54.340	54.688	455.665	0.000	37.635	457.217
4	-0.000	0.000	-41.991	41.991	445.973	0.000	-0.000	445.973
5	-0.000	0.000	-43.715	43.715	461.812	0.000	-0.000	461.812
6	-0.000	0.000	-0.648	0.648	18.570	0.000	-0.000	18.570
7	-2.891	0.000	-6.557	7.166	165.795	0.000	-72.200	180.834
8	-0.000	0.000	-6.702	6.702	179.609	0.000	-0.000	179.609
9	-6.353	0.000	-0.315	6.361	10.099	0.000	-79.719	80.356

Displacement of bearing

Misalignment of bearing

	ux (µm)	uy (µm)	uz (µm)	rr (µm)	rx (mrad)	ry (mrad)	rz (mrad)	rr (mrad)
1	68.8088	-16.6244	30.1663	75.1309	-0.091	-0.000	0.090	0.127
2	0.0000	-4.2373	67.7332	67.7332	-0.153	-0.000	0.000	0.153
3	-9.4004	-18.6687	80.5014	81.0484	-0.135	0.000	0.018	0.136
4	0.0000	-21.0037	77.8576	77.8576	-0.142	-0.000	0.000	0.142
5	0.0000	-16.6089	78.2971	78.2971	-0.145	-0.000	0.000	0.145
6	0.0000	-4.6298	57.7816	57.7816	-0.150	-0.000	0.000	0.150
7	27.1671	-3.6593	59.3511	65.2733	-0.148	0.000	0.020	0.149
8	0.0000	-2.1465	64.7955	64.7955	-0.152	-0.000	0.000	0.152
9	65.6748	3.2563	2.2141	65.7121	-0.102	-0.000	0.055	0.116

Shaft 'Vreteno' Rolling bearing 'axialni_zprava'

Position (Y-coordinate)	[y]	400.50	mm
Life modification factor for reliability[a1]		1.000	
Nominal bearing service life	[L _{nh}]	212281.47	h
Operating viscosity	[v]	48.88	mm ² /s
Minimum EHL lubricant film thickness	[h _{min}]	0.022	μm
Static safety factor	[S ₀]	27.02	
Operating bearing clearance	[Pd]	0.000	μm
Reference rating service life	[L _{nrh}]	122374.37	h

Bearing reaction force

	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)
1	0.000	150.337	0.000
2	0.000	85.097	0.000
3	0.000	174.316	0.000
4	0.000	196.128	0.000
5	0.000	161.495	0.000
6	0.000	83.609	0.000
7	0.000	79.342	0.000
8	0.000	73.924	0.000
9	0.000	32.701	0.000

Bearing reaction moment

	Fr (kN)	Mx (Nm)	My (Nm)	Mz (Nm)	Mr (Nm)
1	0.000	10419.172	0.000	-10672.844	14915.386
2	0.000	10414.267	0.000	-0.000	10414.267
3	0.000	17119.934	0.000	-1872.683	17222.052
4	0.000	18694.580	0.000	-0.000	18694.580
5	0.000	16765.630	0.000	-0.000	16765.630
6	0.000	10171.219	0.000	-0.000	10171.219
7	0.000	9669.282	0.000	-1310.194	9757.644
8	0.000	9237.997	0.000	-0.000	9237.997
9	0.000	3776.260	0.000	-2095.900	4318.905

Displacement of bearing

	ux (μm)	uy (μm)	uz (μm)
1	59.1910	-16.6190	20.0179
2	0.0000	-3.9460	49.5695
3	-11.6089	-18.6665	66.3025
4	0.0000	-21.0037	62.5220
5	0.0000	-16.5882	62.6186
6	0.0000	-4.3590	39.7240
7	24.8682	-3.3621	41.6199
8	0.0000	-1.7885	46.4369
9	58.9508	3.7011	-10.4232

Misalignment of bearing

	rr (μm)	rx (mrad)	ry (mrad)	rz (mrad)	rr (mrad)
1	62.4843	-0.095	-0.000	0.097	0.135
2	49.5695	-0.168	-0.000	0.000	0.168
3	67.3112	-0.149	0.000	0.016	0.150
4	62.5220	-0.153	-0.000	0.000	0.153
5	62.6186	-0.157	-0.000	0.000	0.157
6	39.7240	-0.161	-0.000	0.000	0.161
7	48.4834	-0.161	0.000	0.022	0.163
8	46.4369	-0.168	-0.000	0.000	0.168
9	59.8652	-0.115	-0.000	0.064	0.132

Shaft 'Vreteno' Rolling bearing 'axialni_zleva'

Position (Y-coordinate)	[y]	166.50	mm
Life modification factor for reliability[a1]		1.000	
Nominal bearing service life	[L _{nh}]	1000000.00	h
Operating viscosity	[v]	0.00	mm ² /s
Minimum EHL lubricant film thickness	[h _{min}]	1.#IO	μm
Static safety factor	[S ₀]	103.99	
Operating bearing clearance	[Pd]	0.000	μm
Reference rating service life	[L _{nrh}]	> 1000000	h

Bearing reaction force

	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)
1	0.000	-0.396	0.000
2	0.000	-21.097	0.000
3	0.000	-0.162	0.000
4	0.000	0.000	0.000
5	0.000	-1.495	0.000
6	0.000	-19.609	0.000
7	0.000	-21.522	0.000
8	0.000	-25.924	0.000
9	0.000	-32.215	0.000

Bearing reaction moment

	Fr (kN)	Mx (Nm)	My (Nm)	Mz (Nm)	Mr (Nm)
1	0.000	35.739	0.000	-35.754	50.553
2	0.000	2362.253	0.000	-0.000	2362.253
3	0.000	20.614	0.000	-2.577	20.775
4	0.000	0.005	0.000	-0.000	0.005
5	0.000	189.662	0.000	-0.000	189.662
6	0.000	2207.272	0.000	-0.000	2207.272
7	0.000	2378.318	0.000	-315.629	2399.170
8	0.000	2833.615	0.000	-0.000	2833.615
9	0.000	2787.939	0.000	-1525.948	3178.227

Displacement of bearing

Misalignment of bearing

	ux (µm)	uy (µm)	uz (µm)	rr (µm)	rx (mrad)	ry (mrad)	rz (mrad)	rr (mrad)
1	79.4130	-16.6308	40.8084	89.2846	-0.090	-0.000	0.089	0.127
2	0.0000	-4.5792	84.8981	84.8981	-0.139	-0.000	0.000	0.139
3	-7.3127	-18.6712	96.4462	96.7230	-0.135	0.000	0.018	0.136
4	0.0000	-21.0037	94.6343	94.6343	-0.142	-0.000	0.000	0.142
5	0.0000	-16.6331	95.3381	95.3381	-0.143	-0.000	0.000	0.143
6	0.0000	-4.9476	74.6890	74.6890	-0.137	-0.000	0.000	0.137
7	29.3653	-4.0081	75.9189	81.4002	-0.134	0.000	0.018	0.135
8	0.0000	-2.5666	81.6977	81.6977	-0.135	-0.000	0.000	0.135
9	71.6575	2.7342	13.1313	72.8507	-0.085	-0.000	0.046	0.097

(*) Note about roller bearings with an approximated bearing geometry:
The internal geometry of these bearings has not been input in the database.
The geometry is back-calculated as specified in ISO 281, from C and C0 (details in the manufacturer's catalog).
For this reason, the geometry may be different from the actual geometry.
In some situations, this may result in significant variations in roller bearing stiffness.

Damage (%)					[Lreq] (20000.000)
Bin no	B1	B2	B3	B4	
1	0.14	0.14	0.14	0.14	
2	0.26	0.26	0.26	0.26	
3	0.15	0.07	0.07	0.07	
4	0.16	0.13	0.20	0.13	
5	10.81	1.47	6.59	0.50	
6	0.32	0.20	1.47	0.20	
7	0.21	0.21	0.21	0.21	
8	0.39	0.39	0.39	0.39	
9	0.10	0.10	0.10	0.10	
<hr/>					
Σ	12.54	2.97	9.42	2.00	

Utilization (%)				[Lreq] (20000.000)
B1	B2	B3	B4	
53.63	34.82	49.23	30.92	

Note: Utilization = (Lreq/Lh)^(1/k)
Ball bearing: k = 3, roller bearing: k = 10/3

B1: hlavni_lozisko
B2: zadni_lozisko
B3: axialni_zprava
B4: axialni_zleva

Shaft '

Vreteno', Dokumentationspunkt Documentation point

Y position (mm)	[y]	1725.00		
Equivalent stress (N/mm ²)	[sigV]	0.00		
	X	Y	Z	R
Displacement (mm)	-0.0804	-0.1335	-0.7150	0.7195
Rotation (mrad)	-1.1306	0.2582	0.1460	1.1400
Force (kN)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Torque (Nm)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

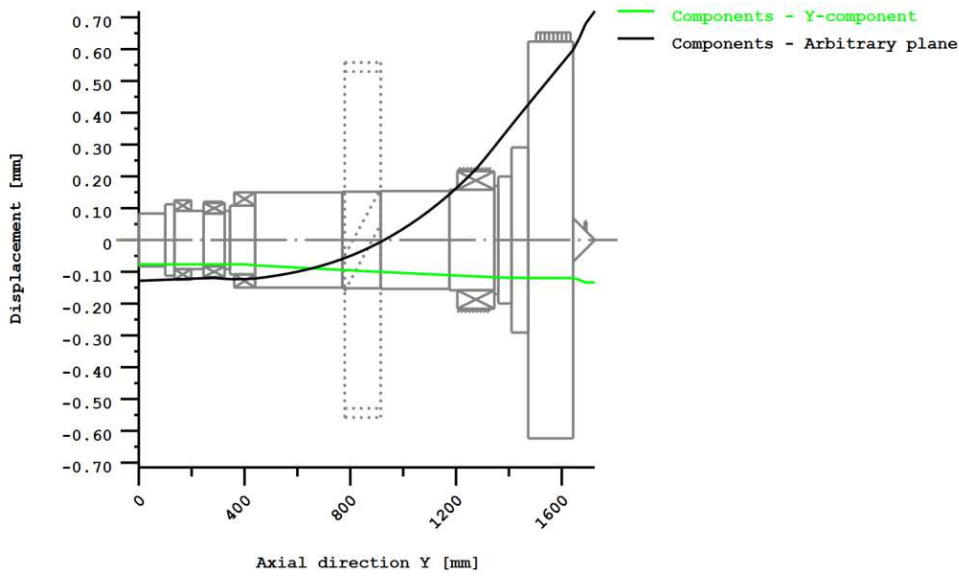
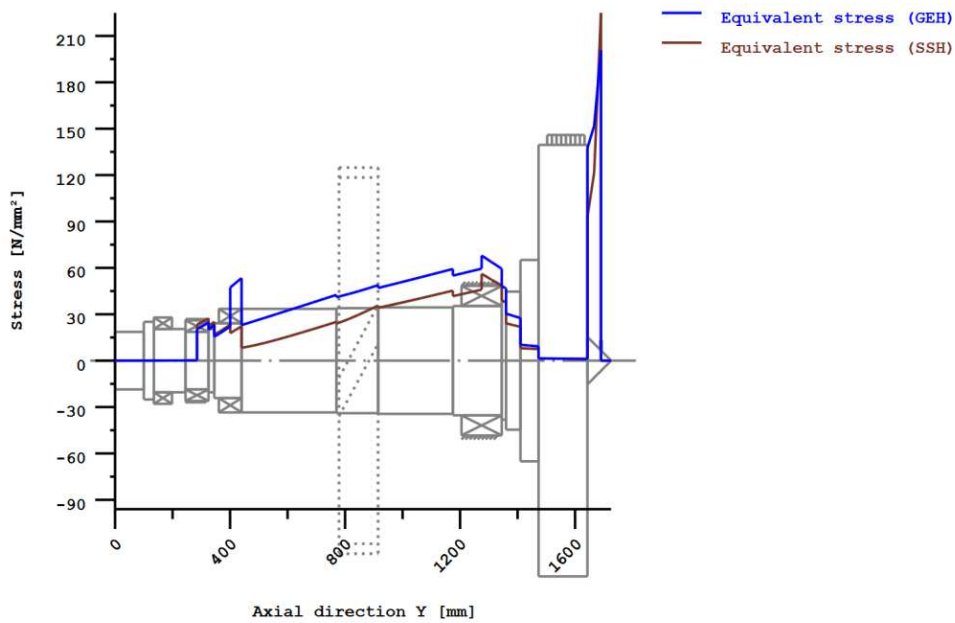


Figure: Deformation (bending etc.) (Arbitrary plane 263.5818406 121)



Nominal stresses, without taking into account stress concentrations

$$\text{GEH(von Mises): } \sigma_V = ((\sigma_B + \sigma_{Z,D})^2 + 3 \cdot (\tau_T + \tau_S)^2)^{1/2}$$

$$\text{SSH(Tresca): } \sigma_V = ((\sigma_B - \sigma_{Z,D})^2 + 4 \cdot (\tau_T + \tau_S)^2)^{1/2}$$

Figure: Equivalent stress

PŘÍLOHA č. 16
Výstupní protokol programu KISSsoft
ve výpočtu tepelně stabilních otáček

THERMALLY SAFE OPERATING SPEED CALCULATION

(according to DIN ISO 15312 and DIN 732)

Lubricant	Oil: ISO-VG 220		
Lubrication type:			
Oil-groove lubrication			
Mean bearing temperature	[T _m]	70.000	°C
Temperature of bearing environment	[T _u]	20.000	°C
Lubricant - service temperature	[T _B]	70.000	°C
Lubricant temperature - Reference conditions	[T _{ref}]	70.000	°C

Shaft 'Vreteno', Rolling bearing 'hlavni_lozisko':

Thermal nominal speed according to DIN ISO 15312:

Type of support	Cylindrical roller bearing(double row)		
Bearing number	SKF NNU 4976 BK/SPW33		
Design series	NNU49		
Speed	[n]	740.802	1/min
Coefficient	[f _{0r}]	3.000	
(Depends upon type of design and lubrication at reference conditions)			
Coefficient	[f _{1r}]	0.000300	
(Depends upon type of design and load at reference conditions)			
Heat sink reference surface	[A _s]	395840.674	mm ²
Reference load	[P _{1r}]	180.000	kN
Bearing mean diameter	[d _m]	450.000	mm
Bearing-specific reference heat flow density	[q _r]	7.918	kW/m ²
kinematic viscosity (for reference conditions)	[ν _r]	12.000	mm ² /s
Thermal nominal speed	[n _{θr}]	1554.554	1/min

Thermally safe operating speed according to DIN 732:

Coefficient	[f ₀]	3.000	
(Depends upon type of design and lubrication)			
Coefficient	[f ₁]	0.000300	
(Depends upon type of design and load)			
Temperature difference	[Δθ=θ _o -θ _i]	5.000	°C
Lubricant Oil-volume	[V _L]	0.500	l/min
Heat flow (dissipated by the lubricant)	[Φ _L]	0.071	kW
Heat flow (dissipated by the bearing support surface)	[Φ _S]	3.134	kW
Total heat flow	[Φ]	3.206	kW
Dynamic equivalent load	[P ₁]	67224.107	N
kinematic viscosity at service temperature	[ν]	48.884	mm ² /s
Lubricant film parameter	[K _L]	2.491	
Charge parameter	[K _P]	0.461	
Speed ratio	[f _n]	0.498	
Thermally safe operating speed	[n _θ]	774.241	1/min

Shaft 'Vreteno', Rolling bearing 'zadni_lozisko':

Thermal nominal speed according to DIN ISO 15312:

Type of support	Cylindrical roller bearing(double row)		
Bearing number	SKF NNU 4940 B/SPW33		
Design series	NNU49		
Speed	[n]	740.802	1/min
Coefficient	[f _{0r}]	3.000	

(Depends upon type of design and lubrication at reference conditions)

Coefficient	[f _{1r}]	0.000300	
(Depends upon type of design and load at reference conditions)			
Heat sink reference surface	[A _s]	120637.158	mm ²
Reference load	[P _{1r}]	52.000	kN
Bearing mean diameter	[d _m]	240.000	mm
Bearing-specific reference heat flow density	[q _r]	11.859	kW/m ²
kinematic viscosity (for reference conditions)	[ν _r]	12.000	mm ² /s
Thermal nominal speed	[n _{θr}]	3011.415	1/min

Thermally safe operating speed according to DIN 732:

Coefficient	[f ₀]	3.000	
(Depends upon type of design and lubrication)			
Coefficient	[f ₁]	0.000300	
(Depends upon type of design and load)			
Temperature difference	[Δθ=θ _o -θ _i]	5.000	°C
Lubricant Oil-volume	[V _L]	0.500	l/min
Heat flow (dissipated by the lubricant)	[Φ _L]	0.071	kW
Heat flow (dissipated by the bearing support surface)	[Φ _S]	1.431	kW
Total heat flow	[Φ]	1.502	kW
Dynamic equivalent load	[P ₁]	648.064	N
kinematic viscosity at service temperature	[ν]	48.884	mm ² /s
Lubricant film parameter	[K _L]	2.428	
Charge parameter	[K _P]	0.010	
Speed ratio	[f _n]	0.586	
Thermally safe operating speed	[n _θ]	1764.501	1/min

Shaft 'Vreteno', Rolling bearing 'axialni_zprava':

Thermal nominal speed according to DIN ISO 15312:

Type of support	Axial cylindrical roller bearing		
Bearing number	SKF 81252 M		
Design series	812		
Speed	[n]	740.802	1/min
Coefficient	[f _{0r}]	4.000	
(Depends upon type of design and lubrication at reference conditions)			
Coefficient	[f _{1r}]	0.001500	
(Depends upon type of design and load at reference conditions)			
Heat sink reference surface	[A _s]	97389.372	mm ²
Reference load	[P _{1r}]	106.000	kN
Bearing mean diameter	[d _m]	310.000	mm
Bearing-specific reference heat flow density	[q _r]	17.976	kW/m ²
kinematic viscosity (for reference conditions)	[ν _r]	24.000	mm ² /s
Thermal nominal speed	[n _{θr}]	1364.865	1/min

Thermally safe operating speed according to DIN 732:

Coefficient	[f ₀]	4.000	
(Depends upon type of design and lubrication)			
Coefficient	[f ₁]	0.001500	
(Depends upon type of design and load)			
Temperature difference	[Δθ=θ _o -θ _i]	5.000	°C
Lubricant Oil-volume	[V _L]	4.000	l/min
Heat flow (dissipated by the lubricant)	[Φ _L]	0.570	kW
Heat flow (dissipated by the bearing support surface)	[Φ _S]	1.751	kW

Total heat flow	[Φ]	2.321	kW
Dynamic equivalent load	[P ₁]	83609.139	N
kinematic viscosity at service temperature	[ν]	48.884	mm ² /s
Lubricant film parameter	[K _L]	1.207	
Charge parameter	[K _P]	2.394	
Speed ratio	[f _n]	0.337	
Thermally safe operating speed	[n _θ]	459.842	1/min

Shaft 'Vreteno', Rolling bearing 'axialni_zleva':

Thermal nominal speed according to DIN ISO 15312:

Type of support	Axial cylindrical roller bearing		
Bearing number	SKF 81244 M		
Design series	812		
Speed	[n]	740.802	1/min
Coefficient	[f _{0r}]	4.000	
(Depends upon type of design and lubrication at reference conditions)			
Coefficient	[f _{1r}]	0.001500	
(Depends upon type of design and load at reference conditions)			
Heat sink reference surface	[A _s]	65345.127	mm ²
Reference load	[P _{1r}]	67.000	kN
Bearing mean diameter	[d _m]	260.000	mm
Bearing-specific reference heat flow density	[q _r]	19.162	kW/m ²
kinematic viscosity (for reference conditions)	[ν _r]	24.000	mm ² /s
Thermal nominal speed	[n _{θr}]	1532.578	1/min

Thermally safe operating speed according to DIN 732:

Coefficient	[f ₀]	4.000	
(Depends upon type of design and lubrication)			
Coefficient	[f ₁]	0.001500	
(Depends upon type of design and load)			
Temperature difference	[Δθ=θ _o -θ _i]	5.000	°C
Lubricant Oil-volume	[V _L]	3.500	l/min
Heat flow (dissipated by the lubricant)	[Φ _L]	0.499	kW
Heat flow (dissipated by the bearing support surface)	[Φ _S]	1.252	kW
Total heat flow	[Φ]	1.751	kW
Dynamic equivalent load	[P ₁]	19609.141	N
kinematic viscosity at service temperature	[ν]	48.884	mm ² /s
Lubricant film parameter	[K _L]	1.145	
Charge parameter	[K _P]	0.701	
Speed ratio	[f _n]	0.645	
Thermally safe operating speed	[n _θ]	987.795	1/min

For one or more bearings:

The thermally safe operating speed will be exceeded in operation!

The reference conditions for calculating the thermal nominal speed are taken from the DIN ISO 15312 standard.

End of Report

lines: 174

PŘÍLOHA č. 19
Technické listy materiálů

Přehled vlastností oceli C45E (C45 R)							1.1191 (1.1201)										
Druh oceli	Nelegovaná ušlechtilá ocel k zušlechťování																
TDP	ČSN EN 10083-2: 2007. Tato norma obsahuje též ocel C45, klasifikovanou jako jakostní ocel k zušlechťování. Ocelí C45 nelze nahradit ušlechtilé oceli C45E popř. C45R. C45 však lze nahradit ocelmi C45E resp. C45R.																
Dřívější označení	C45E (C45R) podle ČSN EN 10083-1: 1991+A1: 1996; Ck 45 (Cm 45) podle DIN 17200; 12 050 podle ČSN.																
Použití	Často používaná nelegovaná ocel pro výrobu méně namáhaných strojních dílů ve stavu zušlechťeném nebo normalizačně žíhaném. Optimálních mechanických hodnot včetně houževnatosti se dosahuje v zakaleném a následně popuštěném stavu. U tvarově složitějších dílů se pro zamezení vzniku trhlin dává přednost kalení do oleje. Ocel je vhodná i k povrchovému kalení plamenem nebo indukci.																
Chemické složení v % hmot. (rozbor tavby)	C	Si max.	Mn	P max.	S max. ¹⁾	Cr max.	Mo max.	Ni max.	Cr+Mo+Ni								
	0,42-0,50	0,40	0,50-0,80	0,030	0,035	0,40	0,10	0,40	max. 0,63								
Složení hotového výrobku ²⁾	0,40-0,52	0,43	0,46-0,84	0,035	0,040	0,45	0,13	0,45									
Mechanické vlastnosti v zušlechťeném stavu. ³⁾	Průměr mm	R _e min. MPa		R _m MPa		A min. %		Z min. %		KV min. J							
	d ≤ 16	490		700-850		14		35		-							
	16 < d ≤ 40	430		650-800		16		40		25							
Mechanické vlastnosti ve stavu normalizačně žíhaném ³⁾	d ≤ 16	340		min. 620		14		-		-							
	16 < d ≤ 100	305		580		16		-		-							
	100 < d ≤ 250	275		560		16		-		-							
Maximální hodnoty tvrdosti pro stav :	Zpracováno na stříhatelnost (+S)			Žíháno na měkko (+A)			Povrchově kaleno (tvrdost povrchu)										
	HB max. 255			HB max. 207			HRC min. 55										
Prokalitelnost ⁴⁾	Vzdálenost od plochy kaleného čela zkušebního tělesa v mm																
	Tvrdost v HRC																
	+H	Mez	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	15	20	25	30
	max	62	61	61	60	57	51	44	37	34	33	32	31	30	-	-	-
	min	55	51	37	30	28	27	26	25	24	23	22	21	20	-	-	-
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Popouštěcí křivka (referenční vzorek průměr 10 mm)</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Křivky prokalitelnosti</p> </div> </div>																	
Technologické vlastnosti																	
Tváření za tepla	Doporučené rozmezí teplot pro tváření za tepla : 1150 až 850 °C																
Teplné zpracování	Normalizační Žíhání °C	Žíhání na měkko °C	Isotermické Žíhání °C	Teplota Kalení °C	Kalící prostředí	Teplota popouštění °C	Zkouška kalením čela °C										
	840 až 880	650 až 700	800 až 950 660 -1 hod.	820 až 860	voda nebo olej	550 až 660	850 ± 5										
	Uvedené podmínky jsou doporučené s výjimkou zkoušky kalením čela (zkouška prokalitelnosti.) Teplota kalení při spodní hranici se doporučuje pro kalení do vody a při horní hranici při kalení do oleje. Jako kalící prostředí lze použít i syntetické kapaliny-emulze.																
Obrobitelnost	Obrobitelnost třískovým obráběním může být ve stavu po válcování ztížena vlivem zvýšené pevnosti. Pro obrábění je výhodnější stav žíhaný na měkko. Zlepšenou obrobitelnost vykazuje ocel C45R se zvýšeným obsahem S.																
Stříhatelnost	Přichází v úvahu např. při dělení tyčí na vsázkové délky pro zápusťkové kování. Ocel C45 je stříhatelná za studena i ve stavu po válcování u průměrů nad 80 mm.																
¹⁾ obsah síry u oceli C45R je 0,020 až 0,040 % s dovolenou odchylkou v hotovém výrobku ± 0,005 %. ²⁾ u jedné tavby smí být překročena horní nebo spodní hranice rozmezí, ale nikoliv obě současně. ³⁾ uvedené hodnoty musí být dosažitelné po odpovídajícím tepelném zpracování (zušlechťení popř. normalizačním žíhání) též u oceli dodávané ve stavu po válcování nebo ve stavu měkce žíhaném. Prokazují se na referenčním vzorku odpovídajícího průměru. Zkušební tělesa pro stanovení mechanických hodnot musí být odebrána v souladu s předpisem normy TDP. R _e –mez kluzu, R _m – pevnost v tahu, A – tažnost (počáteční délka L ₀ = 5,65√S ₀), Z – kontrakce, KV – nárazová práce, zkušební těleso ISO s V-vrubem (průměr ze tří naměřených hodnot, z nichž žádná nesmí být menší než 70% minimální střední hodnoty). ⁴⁾ pro ocel objednanou bez požadavků na prokalitelnost jsou hodnoty prokalitelnosti pouze informativní.																	

Přehled vlastností oceli 42CrMo4 (42CrMoS4) **1.7225 (1.7227)**

Druh oceli	Nizkolegovaná ušlechtilá chrom - molybdenová ocel k zušlechťování							
TDP	ČSN EN 10083-3: 2007							
Dřívější označení	42CrMo4 (42CrMoS4) podle ČSN EN 10083-1: 1991+A1: 1996; 42CrMo4 (42CrMoS4) podle DIN 17200, 15 142 podle ČSN							
Použití	Ocel s vyšší prokalitelností pro výše namáhané strojní díly. Po zakalení dosahuje tvrdosti přibližně 58 HRC. Do průměru 100 mm lze po zušlechťení docílit pevností nad 1000 MPa při ještě dostatečné houževnatosti. Není náchylná k popouštění křehkosti. Kalí se do méně razantního kalicího prostředí, poněvadž je náchylná ke vzniku kalicích trhlin v místech s vrubovým účinkem nebo povrchových vad. V kaleném stavu dobře odolává opotřebení. Patří k nejčastěji používaným oceli k zušlechťování.							

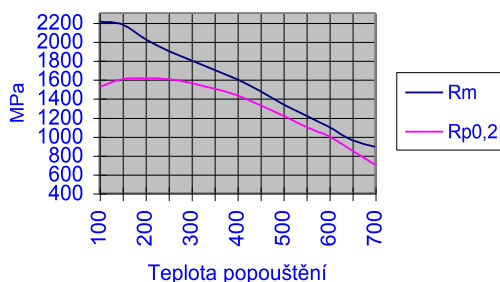
Chemické složení v hmot. % (rozbor tavby)	C	Si max.	Mn	P max.	S max. ¹⁾	Cr	Mo	Ni	V
	0,38 – 0,45	max. 0,40	0,60 – 0,90	max. 0,025	max. 0,035	0,90 – 1,20	0,15 – 0,30	-	-
Složení hotového výrobku ²⁾	0,36 – 0,47	max. 0,43	0,56 – 0,94	max. 0,030	max. 0,040	0,85 – 1,25	0,12 – 0,33	-	-

Mechanické vlastnosti v zušlechťeném stavu. ³⁾	Průměr mm	R _e min. MPa	R _m MPa	A min. %	Z min. %	KV min. J
	d ≤ 16	900	1100 - 1300	10	40	-
	16 < d ≤ 40	750	1000 - 1200	11	45	35
	40 < d ≤ 100	650	900 - 1100	12	50	35
	100 < d ≤ 160	550	800 - 950	13	50	35
	160 < d ≤ 250	500	750 - 900	14	55	35

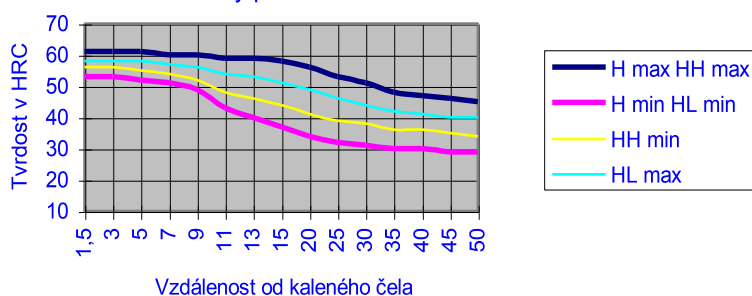
Maximální hodnoty tvrdosti pro stav :	Zpracováno na stříhatelnost	Žíháno na měkko	Povrchově kaleno (tvrdost povrchu)
	HB max. 255	HB max. 241	HRC min. 53

Prokalitelnost ⁴⁾	Vzdálenost od plochy kaleného čela zkušební tělesa v mm																
	Tvrdost v HRC																
	⁵⁾	Mez	1,5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40	45	50
	+H	max.	61	61	61	60	60	59	59	58	56	53	51	48	47	46	45
		min.	53	53	52	51	49	43	40	37	34	32	31	30	30	29	29
	+HH	max.	61	61	61	60	60	59	59	58	56	53	51	48	47	46	45
min.		56	56	55	54	52	48	46	44	41	39	38	36	36	35	34	
+HL	max.	58	58	58	57	56	54	53	51	49	46	44	42	41	40	40	
	min.	53	53	52	51	49	43	40	37	34	32	31	30	30	29	29	

Popouštěcí křivka (referenční vzorek průměr 30 mm)



Křivky prokalitelnosti



Technologické vlastnosti

Tváření za tepla	Doporučené rozmezí teplot pro tváření za tepla : 1100 až 850 °C						
Tepelné zpracování	Normalizační žíhání °C	Žíhání na měkko °C	Isotermické žíhání °C	Teplota kalení °C	Kalicí prostředí	Teplota popouštění °C	Zkouška kalením čela °C
	850 až 880	680 až 720	800 až 900 670 - 3 hod.	820 až 860	olej nebo voda	540 až 680	850 ± 5
	Uvedené podmínky jsou doporučené s výjimkou zkoušky kalením čela (zkouška prokal.). Jako kalicí prostředí se s ohledem na náchylnost ke kalicím trhlinám doporučují syntetické polymery a olej. K docílení rovnoměrných hodnot po zušlechťení u větších průměrů (zejména kovaných) přispívá normalizační žíhání před zušlechťením. Body přeměny : Ac ₁ = 745°C, Ac ₃ = 790°C, Ms = 300°C						
Obrobitelnost	Obrábí se ve stavu žíhaném na měkko. Při nižších pevnostech lze obrábět i ve stavu zušlechťeném. Zlepšenou obrobitelnost vykazuje ocel 42CrMoS4 se zvýšeným obsahem S. Díly, které se zušlechťují na vyšší pevnost se nejprve předhrubují ve stavu žíhaném a dokončí po zušlechťení.						
Stříhatelnost	Pro docílení tvrdosti vhodné pro stříhání se ocel žíhá nebo řízeně vychlazuje.						

¹⁾ obsah síry u oceli 42CrMoS4 je 0,020 až 0,040 % s dovolenou odchylkou v hotovém výrobku ± 0,005 %.

²⁾ u jedné tavby smí být překročena horní nebo spodní hranice rozmezí, ale nikoliv obě současně.

³⁾ uvedené hodnoty musí být dosažitelné po odpovídajícím tepelném zpracování (zušlechťení) též u oceli dodávané ve stavu po válcování nebo ve stavu měkce žíhaném. Prokazují se na referenčním vzorku odpovídajícího průměru. Zkušební tělesa pro stanovení mechanických hodnot musí být odebrána v souladu s předpisem normy TDP.

R_e – mez kluzu, R_m – pevnost v tahu, A – tažnost (počáteční délka L₀ = 5,65√S₀), Z – kontrakce, KV – nárazová práce, zkušební těleso ISO s V-vrubem (průměr ze tří naměřených hodnot, z nichž žádná nesmí být menší než 70% minimální střední hodnoty).

⁴⁾ pro ocel objednanou bez požadavků na prokalitelnost jsou hodnoty prokalitelnosti pouze informativní.

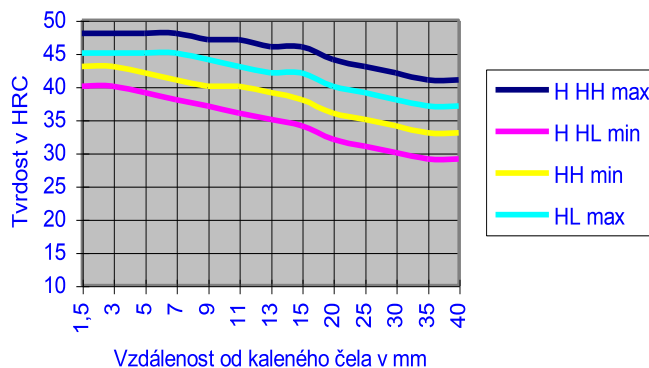
⁵⁾ +H – normální hodnoty pro celý pás prokalitelnosti, +HH - zúžený pás prokalitelnosti směrem k horní hranici, +HL – zúžený pás prokalitelnosti směrem ke spodní hranici.

Přehled vlastností oceli 18CrNiMo7-6

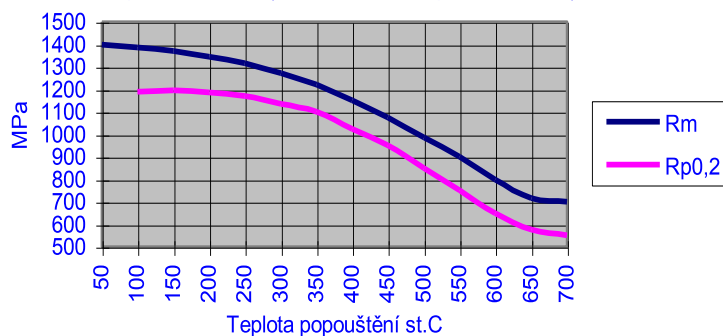
1.6587

Druh oceli	Středně legovaná ušlechtilá chrom-nikl-molybdenová ocel k cementování														
TDP	ČSN EN 10084														
Dřívější označení	17CrNiMo6 podle DIN 17210														
Charakteristika	Velmi namáhané strojní součásti s cementovaným povrchem. Cementovaná vrstva po tepelném zpracování dosahuje na povrchu tvrdosti 62 až 64 HRC, zatímco jádro cementované součásti je i při relativně vysoké pevnosti značně houževnaté. Přísada Mo zvyšuje prokalitelnost, Ocel prokaluje do hloubky přibližně 60 mm. Je vhodná pro dynamicky namáhané součásti.														
Chemické složení v % hmot. (rozbor tavby)	C	Si max.	Mn	P max.	S max.	Cr	Mo	Ni	Al						
	0,15 - 0,21	0,40	0,50 - 0,90	0,035	0,035	1,50 - 1,80	0,25 - 0,35	1,40 - 1,70	Při kontrolované velikosti austenitického zrna 0,015-0,050 (informativně, není uvedeno v normě).						
Dovolené odchylky ve výrobku od rozboru tavby³⁾	± 0,02	+ 0,03	± 0,04	+ 0,005	+ 0,005	± 0,05	± 0,03 ⁵⁾	± 0,05							
Mechanické vlastnosti v jádře referenčního vzorku po kalení a popuštění při 150-200 °C (uvedené hodnoty nejsou součástí EN 10084)¹⁾	Průměr mm		Rp0,2 min MPa		Rm MPa		A min %		Z min %	KCU min. J.cm ⁻²					
	d ≤ 11		980		1230 - 1520		9		-	30					
	11 < d ≤ 25		735		980 - 1320		9		-	35					
	25 < d ≤ 50		640		885 - 1080		10		-	35					
50 < d ≤ 100		490		685 - 980		11		-	35						
Hodnoty tvrdosti HB pro stav :	Zpracováno na stříhatelnost (stav S)			Žiháno na měkko (A)			Zpracováno na rozmezí tvrdosti (TH)			Zpracováno na feritiko-perlitickou strukturu (FP)					
	max. 255			max. 229			179 - 229			159 - 207					
	Stav po válcování			Stav po normalizaci			Žiháno na globulární cementit (vhodné pro tváření za studena)								
	ca 270 ⁴⁾			ca 260 ⁴⁾			max. 180 ⁴⁾								
Prokalitelnost²⁾	Druh	Meze	Vzdálenost od plochy kaleného čela v mm												
			Tvrdost v HRC												
	H	max.	48	48	48	48	47	47	46	46	44	43	42	41	41
		min.	40	40	39	38	37	36	35	34	32	31	30	29	29
	HH	max.	48	48	48	48	47	47	46	46	44	43	42	41	41
		min.	43	43	42	41	40	40	39	38	36	35	34	33	33
HL	max.	45	45	45	45	44	43	42	42	40	39	38	37	37	
	min.	40	40	39	38	37	36	35	34	32	31	30	29	29	

Pásy prokalitelnosti



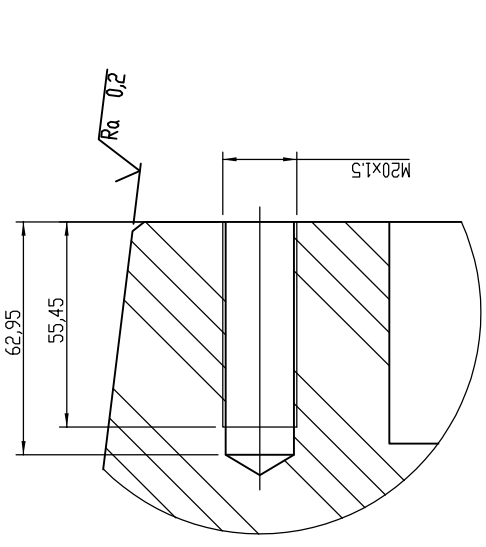
Popouštěcí křivka (referenční vzorek průměr 10 mm)



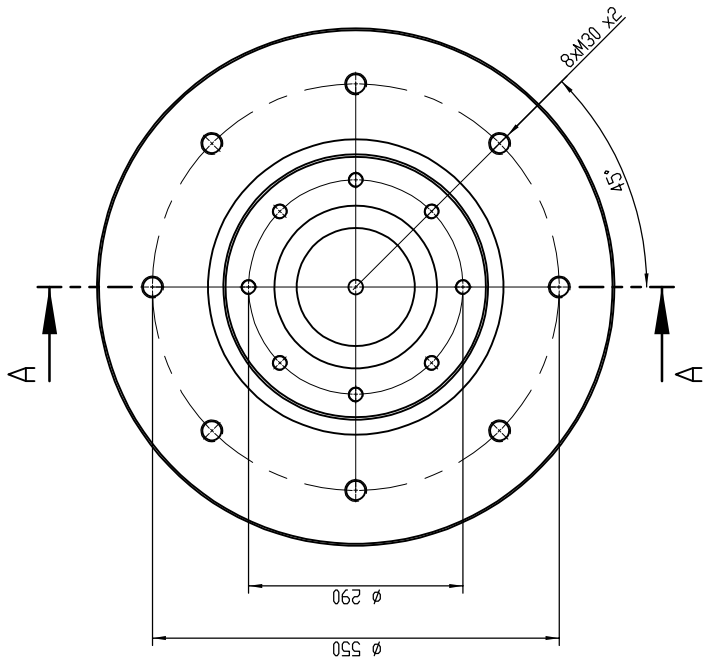
Technologické vlastnosti

Tváření za tepla	Doporučené rozmezí teplot pro tváření za tepla : 1100 až 900 °C							
Tepelné zpracování	Normalizační žihání °C	Žihání na měkko °C	Isotermické žihání °C	Teplota cementace °C ^{a)}	Teplota kalení na jádro °C ^{b)}	Teplota kalení na vrstvu °C ^{b)}	Teplota popouštění °C ^{c)}	Teplota kalení pro Jominyho zkoušku °C
	850	600 až 680	850 až 950 640 - 3 hod.	880 až 980	830 - 870 olej	780 až 820 olej	150 až 200	860 (prodleva ca 0,5 h)
	Body přeměny : Ac ₁ ~ 735°C, Ac ₃ ~ 810°C, Ms (základní materiál) ~ 360°C, Ms (cementovaná vrstva) ~ 180°C							
	Uvedené podmínky jsou doporučené. ^{a)} při jednoduchém kalení se ocel kalí z teploty cementace nebo nižší (závisí na tvaru výrobku). ^{b)} mimo oleje přichází v úvahu i teplota lázeň 160 až 250° C. Způsob ochlazování závisí na tvaru výrobku s ohledem na možné deformace po kalení. ^{c)} doba popouštění minimálně 1 hod.							
Obrobitelnost	Pro dobrou obrobitelnost je výhodný stav FP po případě stav A							
Stříhatelnost	Ocel je stříhatelná za studena ve stavu žiháném							

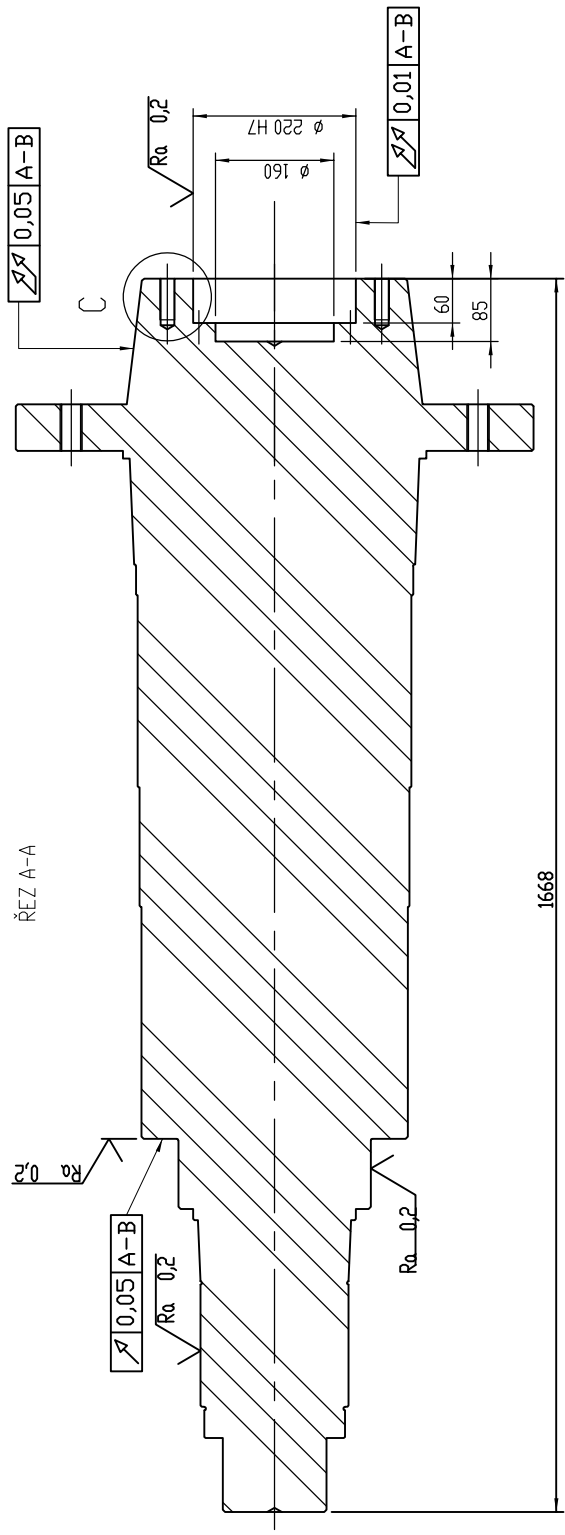
¹⁾ Slouží k průkazku dosažitelnosti mechanických hodnot v jádře odpovídajícího průřezu referenčního vzorku po kalení a popuštění.
 Rp0,2 - mez 0,2; Rm - pevnost v tahu; A - tažnost (počáteční délka L₀ = 5,65√S₀); KCU - nárazová práce, zkušební těleso KCU s U-vrubem.
²⁾ Pro ocel objednanou bez požadavku na prokalitelnost jsou hodnoty prokalitelnosti pouze informativní.
³⁾ ± znamená, že u jedné tavby smí být překročena horní nebo spodní hranice rozmezí rozboru tavby, ale nikoli obě současně.
⁴⁾ Uvedené údaje jsou informativní a nejsou součástí EN 10084.
⁵⁾ Pro Mo > 0,30% je odchylka ± 0,04%



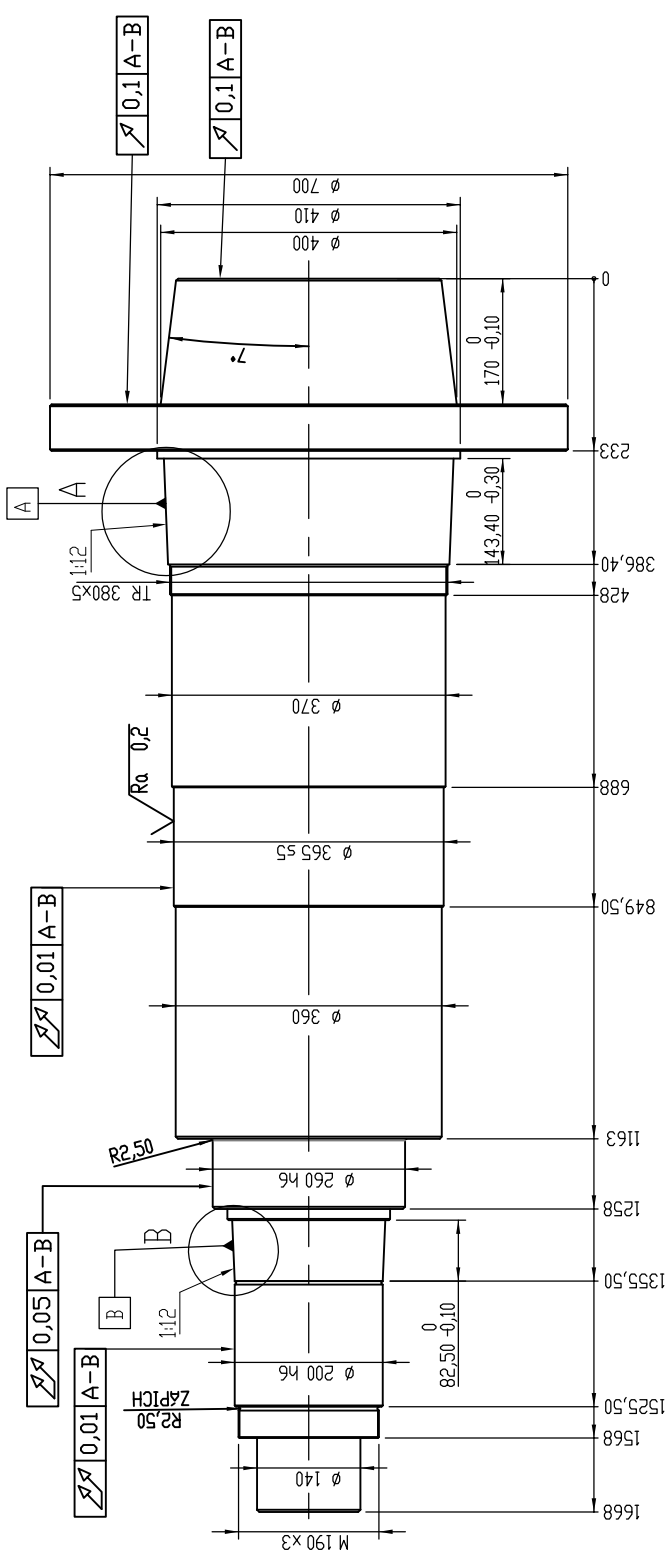
DETAIL C
MÉRÍTKO 1:2



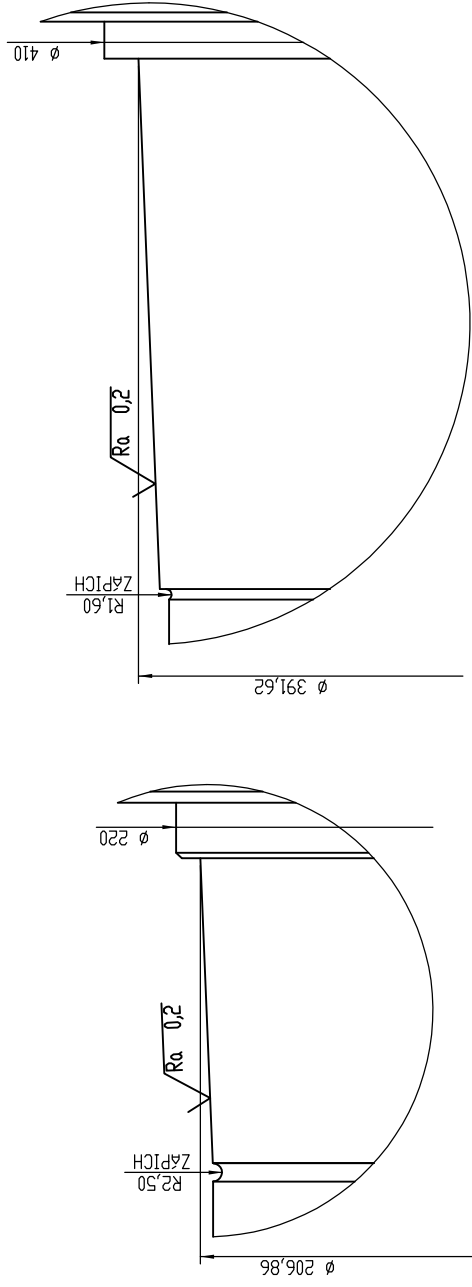
DETAIL B
MÉRÍTKO 1:2



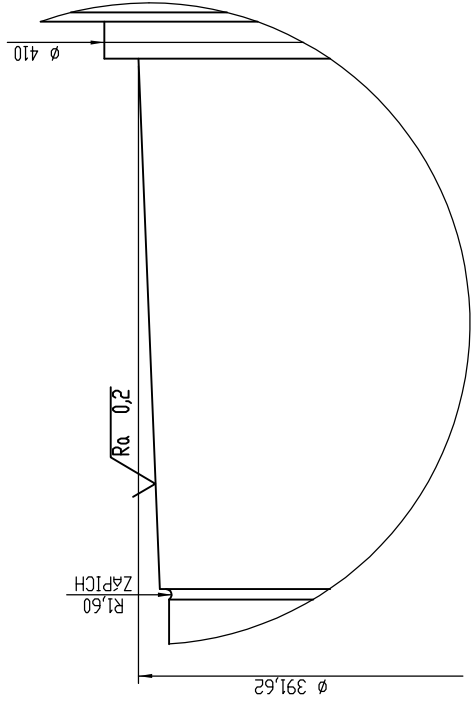
ŘEZ A-A



Nekótovaná sražená 1,5 x 45°

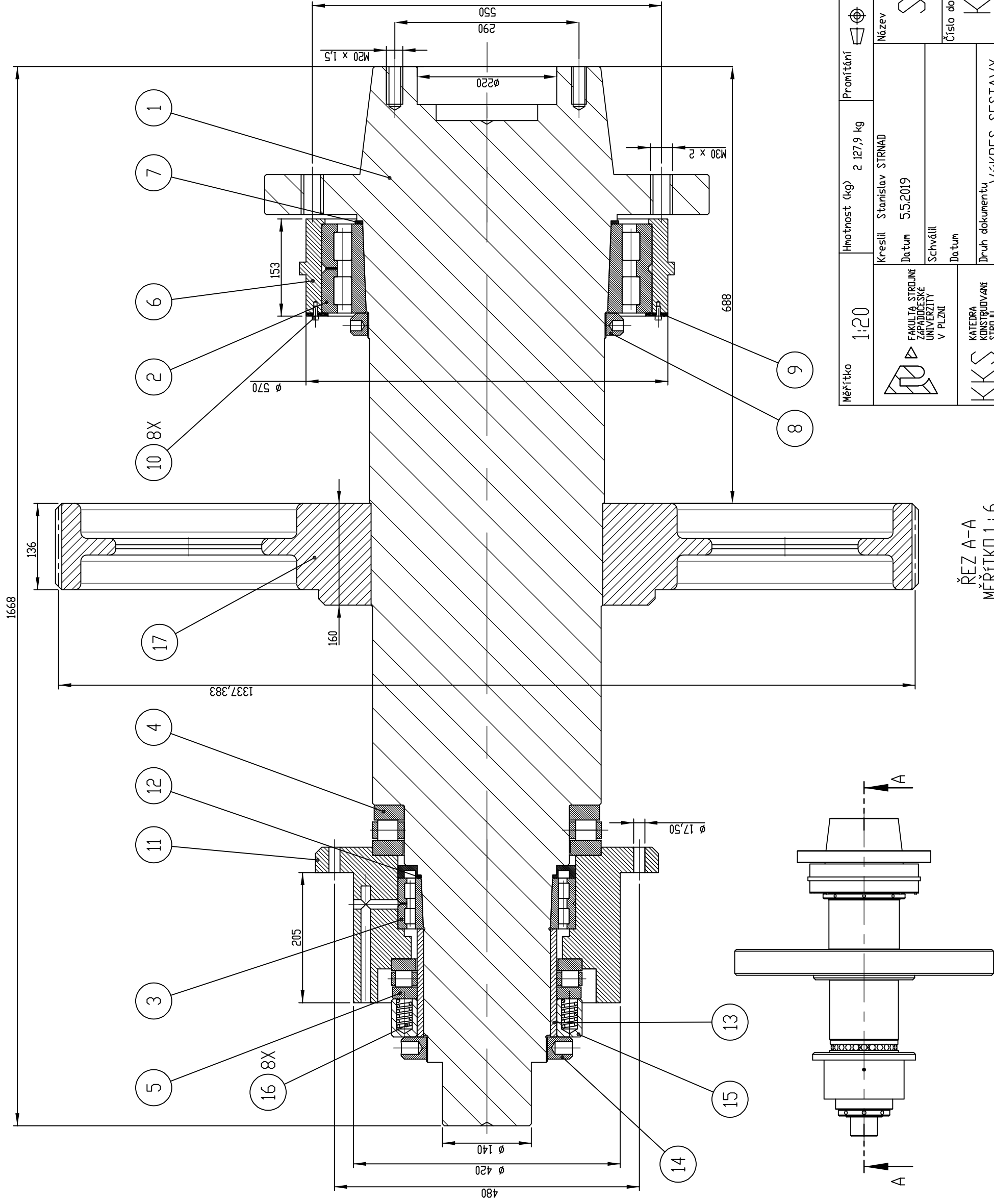


DETAIL A
MÉRÍTKO 1:2



Textura povrchu $\sqrt{Ra\ 3,2}(\checkmark)$	Hrany ISO 13715 -0,5	Přesnost ISO 2768 - mK	Merítko 1:10	Tolerování ISO 8015	Promítání	Formát A3
Materiál - Polotovár 12 050		Název Vřeteno soustruhu S150MT				
	Kreslil: Stanislav STRNAD	Číslo dokumentu KKS-DP-D001				
	Datum: 15.04.2019					
	Schválil:	Druh dokumentu VÝROBNÍ VÝKRES				
	Datum:					

POZ.	Název	Mn.	Hmot. (kg)
1	VŘETENO S150MT	1	1217
2	SKF NNU 4976 BK/SPW33	1	83,5
3	SKF NNU 4940 BK/SPW33	1	15
4	SKF 81252M	1	27
5	SKF 81244M	1	14,9
6	POUZDRO HLAVNÍHO LOŽISKA	1	52,8
7	VYMEZOVACÍ PODLOŽKA	1	0,6
8	ZAJIŠŤOVACÍ MATICE TR 380x5	1	8,6
9	ZAJIŠŤOVACÍ PODLOŽKA	1	2,3
10	ŠROUB ISO 4762 M6 x 16 - 16N	8	-
11	POUZDRO ZADNÍHO ULOŽENÍ	2	160,2
12	VYMEZOVACÍ PODLOŽKA	1	0,2
13	VYMEZOVACÍ KROUŽEK	1	8,8
14	ZAJIŠŤOVACÍ MATICE M190x3	1	7,2
15	PODLOŽKA - VRTANÁ	1	13,6
16	ŠROUBOVÁ PRŮŽINA	8	0,1
17	OZ. KOLO FINÁLNÍHO PŘEVODU	1	515,4



ŘEZ A-A
MĚŘÍTKO 1:6

Měřítko	1:20	Hmotnost (kg)	2 127,9 kg	Průměření		Formát	A3
		Kreslil	Stanislav STRNAD	Název	Sestava vřetne		
		Dotum	5.5.2019	Schválil			
		Dotum		Dotum			
KKS		Druh dokumentu	VÝKRES SESTAVY	Číslo dokumentu	KKS-DP-S001		
KATEDRA KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ		List 1 Listů 1					