



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**FAKULTA STROJNÍ**



**Ústav konstruování a částí strojů**

**Návrh nové koncepce pohonu a uložení vodících válců v sušícím tunelu flexotiskového stroje Optima<sup>2</sup>**

**New Concept Design Of a Drive And Carriage Of a Guiding Cylinders In a Drying Tunnel For a Flexographic Machine Optima<sup>2</sup>**

Diplomová práce

Studijní program: N2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ  
Studijní obor: 2301T047 Dopravní, letadlová a transportní technika  
Vedoucí práce: Ing. Jakub Chmelař

**Bc. Michal Bajus**

---

**Praha 2016**



## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „*Návrh nové koncepce pohonu a uložení vodících válců v sušícím tunelu flexotiskového stroje Optima<sup>2</sup>*“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jakuba Chmelaře, s použitím literatury, uvedené na konci této diplomové práce v seznamu použité literatury.



## Poděkování

Děkuji Ing. Jakubu Chmelařovi za odborné vedení diplomové práce. Mé poděkování patří také celému kolektivu firmy SOMA, za cenné rady a připomínky jmenovitě: Ing. Radku Minářovi, Ing. Janu Vernerovi, Ing. Lukáši Skalickému a Ing. Miroslavu Podzemskému. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu ve studiu.



## Anotační list

Jméno autora: **Michal BAJUS**

Název DP: *Návrh nové koncepce pohonu a uložení vodících válců v sušícím tunelu flexotiskového stroje Optima<sup>2</sup>*

Anglický název: *New Concept Design Of a Drive And Carriage Of Guiding Cylinders In a Drying Tunnel For a Flexographic Machine Optima<sup>2</sup>*

Rok: 2016

Studijní program: *N 2301 Strojní Inženýrství*

Obor studia: *2301T047 Dopravní, Letadlová a Transportní Technika*

Ústav: *Ústav konstruování a částí strojů*

Vedoucí BP: *Ing. Jakub Chmelař*

Bibliografické údaje: počet stran 62  
počet obrázků 57  
počet tabulek 13  
počet příloh 11

Klíčová slova: flexotisk, pohon, uložení, sušící tunel

Keywords: flexography, drive, carriage, drying tunnel

### Anotace:

Úkolem práce je navrhnout novou koncepci pohonu a uložení vodících válců v sušícím tunelu flexotiskového stroje Optima<sup>2</sup>. Hlavním cílem je eliminace rozdílu rychlosti potiskovaného materiálu a obvodové rychlosti vodících válců.

### Abstract:

The task of the thesis is to design a new concept drive and carriage of a guiding cylinders in a drying tunnel for flexographic machine Optima<sup>2</sup>. The main objective is to eliminate the difference in speed of the material and the peripheral speed of the guiding cylinders.



# OBSAH

<b>1</b>	<b>CHARAKTERISTIKA FIRMY SOMA.....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>FLEXOTISK.....</b>	<b>3</b>
2.1	TISKOVÁ TECHNIKA.....	3
2.2	TISKOVÉ BARVY PRO FLEXOTISK.....	4
2.2.1	ŘEDIDLOVÉ BARVY.....	4
2.2.2	BARVY ŘEDITELNÉ VODOU.....	4
2.2.3	UV BARVY.....	4
2.3	TISKOVÉ FORMY PRO FLEXOTISK.....	5
2.3.1	ZHOTOVENÍ FOTOPOLYMERNÍCH FLEXOTISKOVÝCH FOREM.....	6
2.3.2	ZHOTOVENÍ PRYŽOVÝCH FLEXOTISKOVÝCH FOREM ZA VYUŽITÍ TECHNOLOGIE CTP.....	7
2.4	TISKOVÁ JEDNOTKA.....	7
2.5	FLEXOTISKOVÉ STROJE.....	9
2.5.1	ARCHOVÉ FLEXOTISKOVÉ STROJE.....	9
2.5.2	KOTOUČOVÉ FLEXOTISKOVÉ STROJE.....	9
2.6	FLEXOTISKOVÉ STROJE FIRMY SOMA.....	11
<b>3</b>	<b>POPIS STROJE OPTIMA<sup>2</sup>.....</b>	<b>13</b>
3.1	ZÁLADNÍ TECHNICKÉ PARAMETRY.....	14
3.2	SUŠÍCÍ TUNEL.....	15
3.2.1	ZÁKLADNÍ PARAMETRY SUŠÍCÍHO TUNELU.....	15
<b>4</b>	<b>ANALÝZA ŘEŠENÉHO PROBLÉMU.....</b>	<b>17</b>
4.1	PŮVODNÍ PROVEDENÍ VODÍCÍCH VÁLCŮ.....	17
4.1.1	VODÍCÍ VÁLCE BEZ POHONU.....	18
4.1.2	VODÍCÍ VÁLCE S POHONEM.....	18
4.2	NEVÝHODY PŮVODNÍ KONCEPCE S POHONEM.....	19
4.3	MĚŘENÍ RYCHLOSTI VÁLCŮ – STROJ PREMIA.....	20
4.3.1	VÝSLEDEK MĚŘENÍ.....	21
<b>5</b>	<b>NÁVRH NOVÉ KONCEPCE.....</b>	<b>22</b>
5.1	POPIS NOVÉ KONCEPCE.....	23
5.2	PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH HŘÍDELE.....	24
5.3	VLASTNÍ FREKVENCE HŘÍDELE.....	25
5.3.1	MODÁLNÍ ANALÝZA HŘÍDELE V PROGRAMU ABAQUS.....	26
5.3.2	VÝPOČET VL. FREKVENCÍ HŘÍDELE V PROGRAMU KISSOFT.....	29
5.3.3	POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH METOD VÝPOČTU.....	31
5.3.4	SOUHRN VÝSLEDKŮ.....	31
5.3.5	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	32



5.4	NÁVRH LOŽISEK .....	33
5.4.1	ZATÍŽENÍ LOŽISEK HŘÍDELE .....	33
5.4.2	ZATÍŽENÍ LOŽISEK VÁLCE .....	34
5.4.3	POUŽITÁ LOŽISKA .....	35
5.4.4	POJIŠTĚNÍ VNITŘNÍHO KROUŽKU LOŽISKA PROTI PROTÁČENÍ.....	36
5.4.5	NAKLOPENÍ LOŽISEK .....	37
5.5	MONTÁŽ SESTAVY VÁLCE A HŘÍDELE .....	38
5.5.1	VARIANTA A: JEDNOSTRANNÉ AXIÁLNÍ ZAJIŠTĚNÍ OBOU LOŽISEK .....	39
5.5.2	VARIANTA B: OBOUSTRANNÉ AXIÁLNÍ ZAJIŠTĚNÍ LOŽISKA Č1 .....	41
5.5.3	VARIANTA C: OBOUSTRANNÉ AXIÁLNÍ ZAJIŠTĚNÍ LOŽISKA Č.2 .....	42
5.5.4	VZNIKLÁ KOLIZE - POPIS .....	43
5.5.5	VZNIKLÁ KOLIZE - POSTUP VÝPOČTU NAPĚTÍ.....	44
5.5.6	VZNIKLÁ KOLIZE - ZJIŠTĚNÉ NAPĚTÍ.....	46
5.5.7	SOUHRN – VOLBA NEJVHODNĚJŠÍ VARIANTY POSTUPU.....	48
5.6	NÁVRH POHONU .....	49
5.6.1	VÝPOČET ÚHLOVÉHO ZRYCHLENÍ A ZRYCHLENÍ ŘEMENU .....	50
5.6.2	PARAMETRY SOUČÁSTÍ POHONU VÁLCŮ .....	50
5.6.3	HMOTNOST JEDNOHO ŘEMENU $M_{\text{řm}}$ .....	50
5.6.4	MOMENT POTŘEBNÝ K ROZBĚHU .....	51
5.6.5	VÝPOČET POTŘEBNÉHO VÝKONU.....	51
5.6.6	VÝBĚR MOTORU .....	51
5.7	DEMONTÁŽ VÁLCE ZE SUŠÍCÍHO TUNELU .....	52
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>54</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>55</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZNAČEK .....</b>	<b>56</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>58</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>60</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>61</b>



# ÚVOD

Většina obalových materiálů je v dnešní době potisknuta technologií flexotisku. S tiskovou technologií flexotisku se tedy setkáváme téměř na každém kroku. Firma SOMA, která se zabývá vývojem a výrobou flexotiskových strojů, dále také řezaček a laminátorů, je zadavatelem této diplomové práce.

V sušícím tunelu, kde dochází ke koncovému sušení tisku, nastává v současném provedení vodících válců s pohonem k rozdílu mezi obvodovou rychlostí jednotlivých vodících válců a rychlostí tisku.

Tato problematika, včetně návrhu nové koncepce pohonu a uložení vodících válců v sušícím tunelu flexotiskového stroje Optima<sup>2</sup>, je obsahem této diplomové práce.

# 1 CHARAKTERISTIKA FIRMY SOMA

Společnost SOMA, pro kterou je řešena tato diplomová práce, vznikla v roce 1992 privatizací konstrukčních a strojních dílen státního podniku Tesla Lanškroun, která se zabývala vývojem a výrobou řezaček pro výrobu svitkových kondenzátorů a jednoúčelových strojů pro elektrotechnický průmysl. V roce 1993, tedy rok po jejím založení, firma představila nový výrobní program s velkou přidanou hodnotou v rychle rostoucím segmentu potisku a zpracování flexibilního obalového materiálu. Jednalo se o flexotiskové jednotky pro potisk archů, vysekávací automaty a příčné řezačky. Velký zlom nastal v roce 1995, kdy firma představila první flexotiskový stroj s centrálním válcem Soma Flex Central, který byl s úspěchem prodáván po více než 7 let. Toto zvládnutí technologie flexografického tisku zajistilo firmě rychlý růst. Od roku 2002 jsou hlavní produktovou řadou v portfoliu společnosti flexotiskové stroje. V roce 2012, ke svému dvacátému výročí založení, firma otevřela nové technologické centrum Soma Globe. V roce 2013 byl na trh uveden nový flexografický tiskový stroj OPTIMA. Ten o rok později obdržel ocenění v soutěži iF design awards v kategorii průmyslového designu. Ještě téhož roku, v roce 2014, bylo při příležitosti konání konference Flexo Challenges otevřeno v Lanškrouně nové školící centrum společnosti s názvem Villa Globe. Drtivá většina produkce firmy SOMA míří do zahraničí a v poslední době i na Americký trh. Tento rok firma na výstavě Drupa v Düsseldorfu představila nový flexografický tiskový stroj OPTIMA<sup>2</sup>. [1]



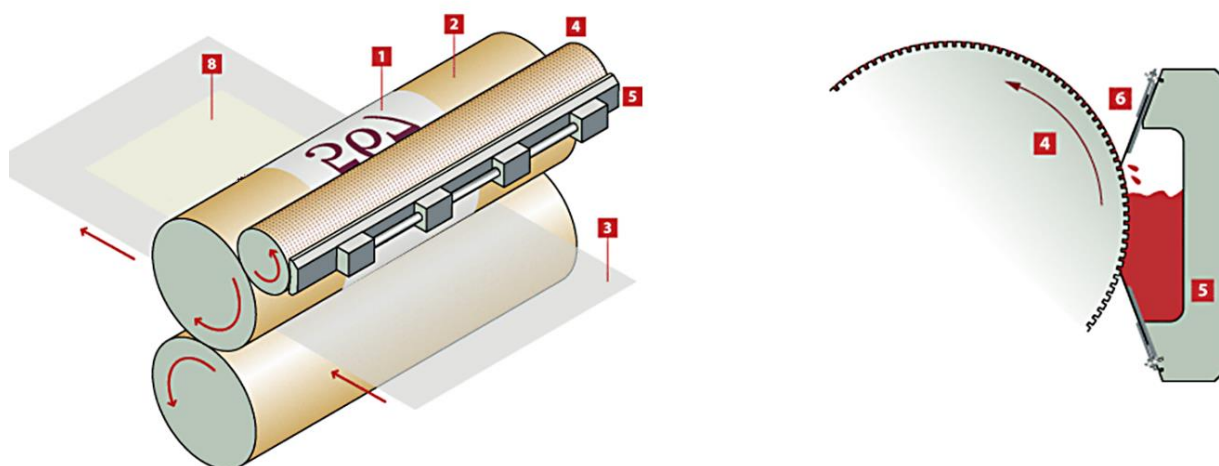
Obr. 1 Sídlo firmy SOMA s.r.o. [7]



## 2 FLEXOTISK

### 2.1 TISKOVÁ TECHNIKA

Flexotisk vznikl z knihtisku, a protože i jeho tisková forma je reliéfní, zařazuje se mezi metody tisku z výšky. Flexotisk má však oproti knihtisku slibné perspektivy, protože je levný, rychlý, kvalitní a co se týká možnosti potisku různých substrátů, také velmi variabilní. Na rozdíl od knihtisku není možné nanášet barvu na tiskovou formu pomocí nanášecích válců, protože flexotisk používá nízkoviskózní (řídké) tiskové barvy. Nanášení barvy tak zabezpečuje tzv. aniloxový válec, jehož povrch tvoří jemná struktura pravidelných zahloubených jamek. Jamky se nejprve v uzavřeném barevníku (viz schéma flexotiskové jednotky Obr. 2) naplní řídkou barvou, kterou poté předávají na vyvýšená místa tiskové formy. Použití aniloxového válce současně řeší i přesné dávkování barvy, protože jamky mají přesně definovaný objem, a proto množství přenášené barvy nelze v průběhu tisku příliš měnit. Nízká viskozita barev je dána vysokým obsahem rozpouštědel, protože při potisku nesavých materiálů, což je typická oblast flexotisku, je vyžadováno rychlé zasušení nanesené vrstvy barvy. Typickými ředidly flexotiskových barev jsou voda nebo alkohol. Stále častější nacházejí uplatnění také UV vytvrditelné barvy. [3]



Obr. 2 Schéma flexotiskové jednotky [3]

Na Obr. 2 odpovídají jednotlivá čísla následujícím popiskům: 1 – obraz na tiskové formě, 2 – návleková tisková forma (sleev), 3 – potiskovaný materiál, 4 – aniloxový válec, nanášející barvu na sleev, 5 – zabarvovací komora aniloxového válce, 6 – stěrací nůž aniloxového válce, stírající z povrchu přebytečnou barvu.



## 2.2 TISKOVÉ BARVY PRO FLEXOTISK

Se zvyšujícími se požadavky na kvalitu a rychlost tisku se zvyšují také nároky na tiskové barvy. V současnosti musí flexotiskové barvy splňovat velké množství požadavků na jejich vlastnosti. Můžeme jmenovat např. odolnost proti otěru, vzdušným emisím, dennímu světlu, UV záření apod. S rostoucí rychlostí tisku dnešních flexotiskových strojů rostou také nároky na rychlost zpracování, zasychání či vytvrzování. Flexotiskové barvy můžeme rozdělit na konvenční tiskové barvy, které jsou tvořeny především barvami ředitelovými a vodou ředitelnými, a nekonvenční bezředitlové, které jsou tvořeny z větší části UV barvami.[4]

### 2.2.1 ŘEDIDLOVÉ BARVY

Ředitlové barvy se nasazují zejména při potisku nesavých materiálů, jako jsou například polyetylenové, polypropylenové, polyesterové, polyamidové nebo hliníkové fólie. Velmi málo se používají pro potisk lepenky a papíru z důvodu vysoké hořlavosti některých složek barvy, což má za následek nasazení bezpečnostních opatření, které zvyšují náklady tisku. Jedna z výhod ředitlových barev je vratnost procesu schnutí. Znamená to, že uschlou barvu je možno rozpustit pravým rozpouštědlem, nejčastěji estery. Umytí stroje je pak díky tomu bez komplikací. Tyto barvy se vyznačují také vyšším leskem a dobrou odolností proti oděru.

### 2.2.2 BARVY ŘEDITELNÉ VODOU

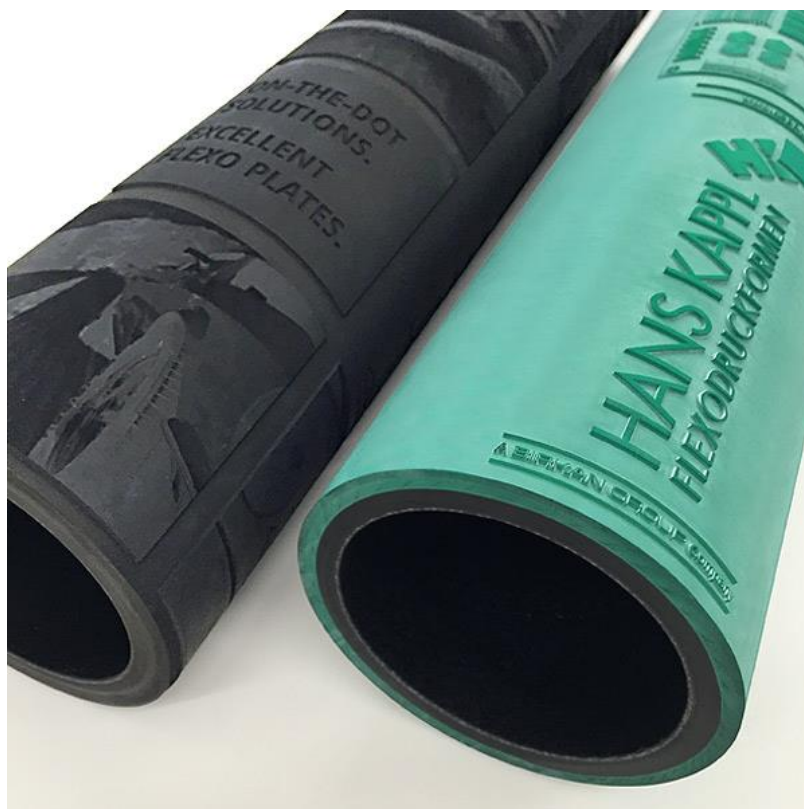
Barvy ředitelné vodou se využívají především k potisku papíru a vlnitých lepenek. Výhodou těchto barev je nízká cena, dobrá tisknutelnost, malý zápach a nenáročnost ve zpracování. Na druhou stranu není proces schnutí vratný, tak jako u ředitlových barev. Vodou ředitelné barvy jsou také více náchylné na tvorbu pěny, což způsobuje mnoho komplikací. Takto zpěněná barva ztrácí tekutost, nabývá na objemu, ucpává barevník apod.

### 2.2.3 UV BARVY

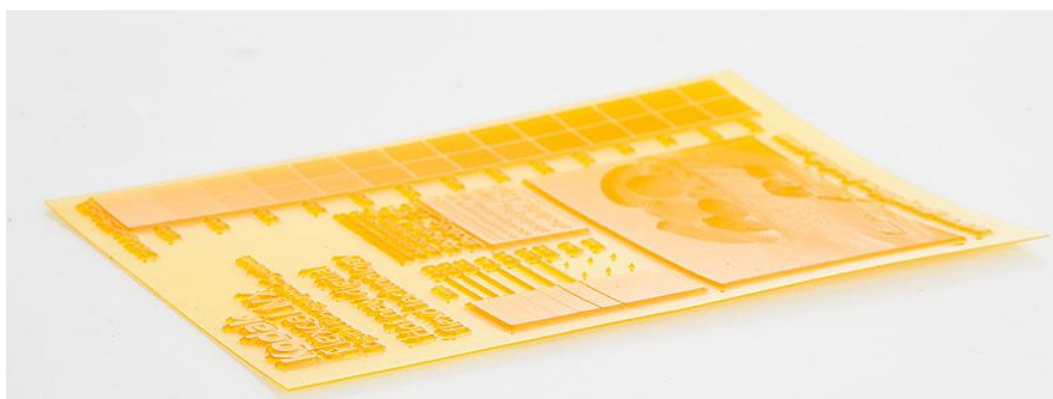
UV barvy si díky své univerzálnosti získávají čím dál lepší pozici na trhu barev. Tyto barvy vytvrzované ultrafialovými paprsky neobsahují žádná rozpouštědla ani nevyžadují žádné protipožární zabezpečení. Velkou výhodou je fakt, že nedochází k volnému zasychání barvy, zejména pak na aniloxových válcích. Tyto barvy nevyžadují žádnou úpravu před tiskem, není potřeba je ředit, vyznačují se vysokou stabilitou, vynikající tiskovou schopností pro velké množství substrátů, dobrou odolností proti otěru a vysokým teplotám. V neprospěch hovoří vyšší cena a vyšší technologické nároky na konstrukci stroje

## 2.3 TISKOVÉ FORMY PRO FLEXOTISK

Tiskové formy pro flexotisk dělíme podle materiálového složení na pryžové a fotopolymerní. Z pohledu tvaru pak rozlišujeme rovinné štočky, návleky (sleevy) a celistvé formové válce. Ke zhotovení tiskového reliéfu (tiskového obrazu) se v současnosti využívá především laserové technologie (CTP), postup je však při zhotovování pryžových forem odlišný než u fotopolymerních. [3]



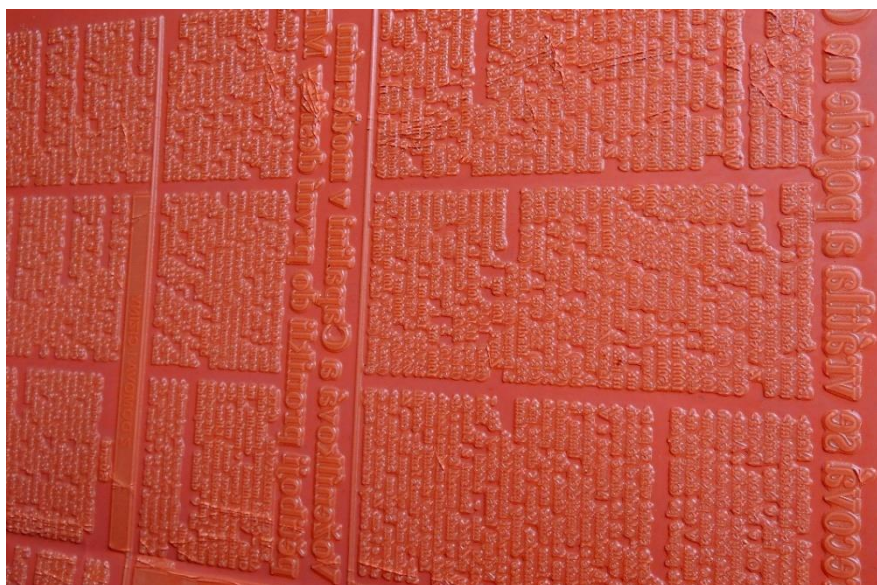
Obr. 3 Tisková forma – sleeve [8]



Obr. 4 Tisková deska ve formě rovinného štočku [4]

### 2.3.1 ZHOTOVENÍ FOTOPOLYMERNÍCH FLEXOTISKOVÝCH FOREM

Při zhotovování fotopolymerních forem se využívají fotochemické postupy, zejména chemická reakce zvaná polymerace. V zásadě existují dva výrobní postupy. Prvním je konvenční postup. Tiskový obraz se přenáší na fotopolymer přes kopírovací předlohu (film). Na povrch fotopolymeru je nejprve přiložen film zakrývající netisknouce místa, tisknouce naopak ponechává pro světlo průchodné. Následuje krátké působení UV záření, které svým účinkem způsobí vytvrzení hmoty fotopolymeru. Na neosvícených místech proces polymerace neproběhl, a tudíž tato místa zůstávají rozpustná v rozpouštědle. V dalším kroku proto následuje proces vymývání vývojkou, čímž vznikne reliéf tiskové formy, který se poté umístí (nalepí) na formový válec. Konvenční postup přípravy tiskové formy s sebou nese určité nevýhody. Mezi hlavní patří nižší tisková kvalita, kterou způsobuje malá strmost tiskových bodů. Po opotřebenosti povrchu reliéfu dochází k výraznému nárůstu tónové hodnoty. Další nevýhodou pramenící z předcházející je nemožnost přenosu velmi jemných tiskových sítí (rastrů). V druhém postupu zhotovování flexotiskových forem je použita digitální technologie a laserový paprsek (CTP), který nahrazuje kopírovací předlohu. V principu se opět jedná o obdobu CTP zařízení v ofsetu. Fotopolymerní štoček je na svém povrchu opatřen tzv. LAMS vrstvou (Laser Ablation Mask System). Tuto vrstvu laserový paprsek v tisknoucích místech odstraní (proces ablace), čímž obnaží spodní fotopolymerní vrstvu. Dále následuje stejný postup jako u výroby konvenčních fotopolymerů, tj. na fotopolymer působí UV záření, které způsobí vytvrzení obnažených – tisknoucích míst. Místa krytá LAMS vrstvou nebyla vytvrzena a budou v následujícím kroku vymyta. Tento postup umožňuje vytvořit štoček s poměrně strmými hranami tiskových bodů, což je nutné k tisku větších nákladů (minimální nárůst tónové hodnoty při opotřebenosti plošky tiskových bodů). [3]



Obr. 5 Flexotisková forma – fotopolymer [3]





### 2.3.2 ZHOTOVENÍ PRYŽOVÝCH FLEXOTISKOVÝCH FOREM ZA VYUŽITÍ TECHNOLOGIE CTP

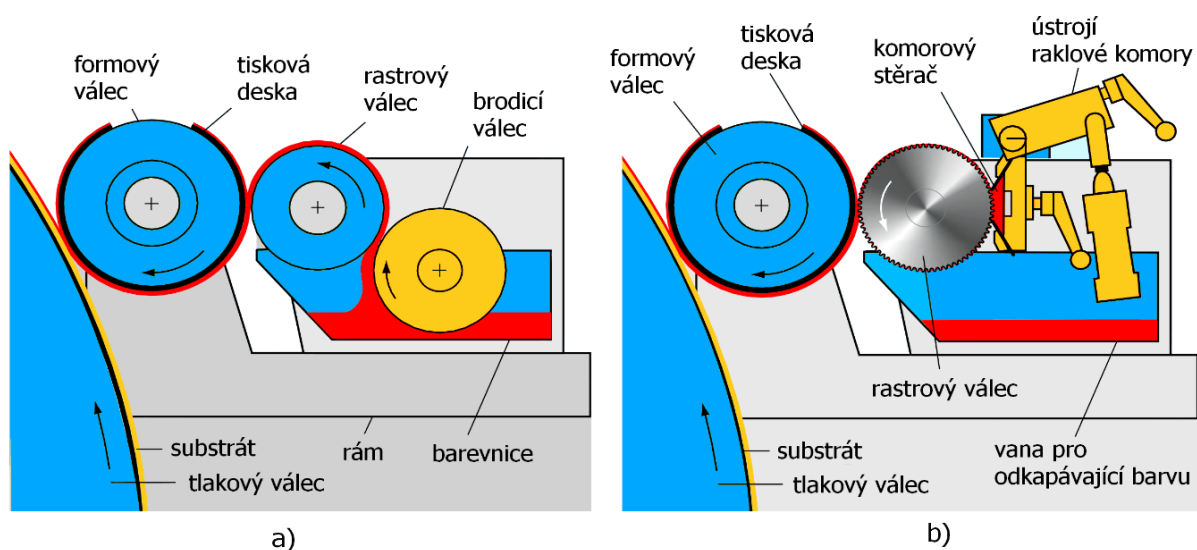
V případě pryžových flexotiskových forem (tloušťka pryže 3–10 mm) odstraňuje laser netisknouce místa, čímž vzniká typický reliéf flexotiskové formy s hloubkou netisknoucích míst přibližně 500  $\mu\text{m}$ . K odstranění vrstvy pryže potřebují lasery vyvinout poměrně vysoký výkon (1–2,5 kW). V praxi se osvědčuje plynový laser  $\text{CO}_2$  s vlnovou délkou záření 10,6  $\mu\text{m}$ . Rekordéry CTP pracují v principu obdobně jako při osvitě ofsetových tiskových forem. Štoček, sleeve nebo válec je upnut na hřídel, která se při vypalování otáčí. Z vnější strany axiálně přejíždí vypalovací hlava a prostřednictvím laserů a optických usměrňovačů vypaluje netisknouce místa. Oproti jiným technologiím zhotovení flexotiskové formy umožňuje CTP vytvářet různé profily tiskových bodů, zejména profily s horní válcovou částí a základnou v podobě kužele. Výhoda válcového profilu spočívá v minimálním nárůstu tónové hodnoty při opotřebením tiskové formy. Je proto vhodnou volbou pro tisk větších nákladů. U kuželovitého profilu bude hodnota nárůstu v důsledku opotřebením povrchu vždy významně stoupat.[3]

## 2.4 TISKOVÁ JEDNOTKA

Tisková jednotka flexotiskového stroje je místo, kde dochází k potisku materiálu. Skládá se z formového válce, na kterém je připevněna tisková forma, tlakového válce a barevníku. Tlakový válec, podle uspořádání stroje, může obsahovat každá tisková jednotka nebo je jeden společný pro všechny jednotky (satelitní uspořádání). Barevník zajišťuje přenos barvy na formový válec, resp. na tiskovou formu. V dnešní době se využívají dva systémy barevníku. S brodicím válcem nebo s raklovou komorou. Barevník s brodicím válcem (Obr. 6 a) je původní, jednodušší a levnější systém, který se používá pro nenáročné aplikace, ale dnes se již u nově navrhovaných strojů téměř nevyskytuje.

Princip přenosu barvy spočívá v nanesení barvy brodicím válcem z barevnice na rastrový válec. Barva následně zateče do jamek na rastrovém válci, při-čemž přebytečná barva je stírána za mírného tlaku brodicím válcem. Změna přenášeného množství barvy na tiskovou desku se provádí buď výměnou rastrového válce nebo změnou přítlaku brodicího válce k rastrovému. Nevýhodou tohoto systému je otevřený barevník, díky kterému může docházet k odpařování ředidel z barvy, což má za následek změnu vlastností barev.

Postupem času, s přibývajícím významem flexotisku a stále se zvyšujícími požadavky na kvalitu tisku bylo potřeba změnit systém barevníku, který by dokázal zajistit potřebnou kvalitu tisku. Byl tedy vyvinut uzavřený barevníkový systém s komorovým stěračem (Obr. 6 b), který je dnes u moderních flexotiskových strojů naprostým standardem. Do komorového stěrače je přiváděna barva pod určitým tlakem barvovým čerpadlem a dále přenášena na rastrový válec. Díky pozitivní a negativní stěrce a také bočnímu těsnění je zajištěna uzavřenost systému, díky které nedochází k odpařování ředidel z barvy a je tak zajištěna vysoká stabilita systému. Přebytečná barva je následně odváděna samospádem i s malým množstvím vzduchu vytlačeného z jamek rastrového válce zpět do zásobníku s barvou. [4]



Obr. 6 Flexotiskový barevník [4]

a) s přívodem barvy přes soustavu válců, b) s přívodem barvy přes raklovou komoru

## 2.5 FLEXOTISKOVÉ STROJE

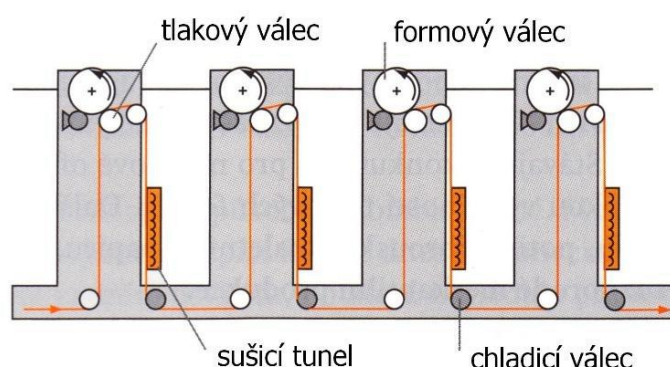
Pod označením flexotiskový stroj se rozumí stroj, který využívá k potisku materiálu technologii flexotisk. S rozšiřováním sortimentu výrobků zpracovávaných flexotiskovou technologií se rozšiřovala také nabídka flexotiskových strojů různých koncepcí. Flexotiskové stroje se dělí zejména na archové a kotoučové. [4]

### 2.5.1 ARCHOVÉ FLEXOTISKOVÉ STROJE

Archové stroje zpracovávají tuhé, neohebné materiály, mezi kterou se řadí především vlnitá lepenka. Materiál v podobě archů je nakládán do zásobníku, ze kterého je pomocí podtlakového válečkového dopravníku přepravován přes všechny tiskové jednotky stroje. Celý stroj je uzpůsoben tak, aby během tisku nedošlo k deformaci nebo k ohýbání materiálu.

### 2.5.2 KOTOUČOVÉ FLEXOTISKOVÉ STROJE

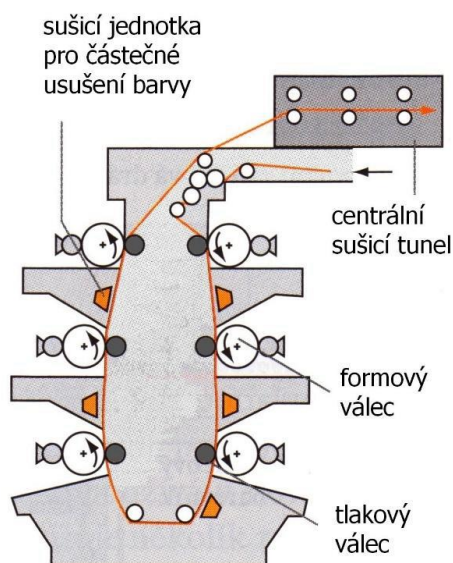
Kotoučové flexotiskové stroje tvoří velkou skupinu strojů pro potisk materiálu na kotouči. Do této skupiny se řadí kotoučové stroje s tiskovými jednotkami za sebou, s tiskovými jednotkami ve sloupcích nad sebou a se satelitním uspořádáním tiskových jednotek.



Obr. 7 Schéma flexotiskového stroje s tiskovými jednotkami v řadě za sebou [4]

Schéma stroje s tiskovými jednotkami za sebou je zobrazeno na Obr. 7. Tyto stroje se vyznačují svojí značnou délkou, což klade vysoké nároky na zástavbový prostor. Výhodou těchto strojů je jejich snadné rozšíření o další tiskové jednotky, které se jako stavebnice skládají za sebe. Mezi každou tiskovou jednotkou se nachází sušící zařízení a chladičí válec. V důsledku velké délky těchto strojů, resp. velké vzdálenosti mezi jednotlivými barevníky, dochází při potisku tenkých a flexibilních materiálů ke značné rozměrové změně potiskovaného materiálu. To vede k chybám při soutisku. Proto musí být tyto stroje vybaveny za každou tiskovou jednotkou kvalitním systémem regulace soutisku. [4]

Aby se zmenšil zástavbový prostor stroje, byla vyvinuta koncepce stroje s tiskovými jednotkami ve sloupcích nad sebou (Obr. 8). Zpravidla se používá konstrukce se čtyřmi, šesti nebo osmi barevníky. Se zvyšujícím se počtem barevníků roste také výška stroje, což má za následek špatný přístup k vrchním barevníkům. Na rozdíl od koncepce s tiskovými jednotkami za sebou nemá tento typ konstrukce možnost rozšíření o další tiskové jednotky. Všechny barevníky mají jednu společnou bočnici, která žádné modulární rozšíření nedovoluje. Aby nedocházelo k obtahování barvy na tiskovou formu, musí být za každou tiskovou jednotkou umístěno sušící zařízení, které částečně usuší barvu. K dokonalému usušení barvy dojde až v hlavním sušicím tunelu, který je umístěn za poslední tiskovou jednotkou.

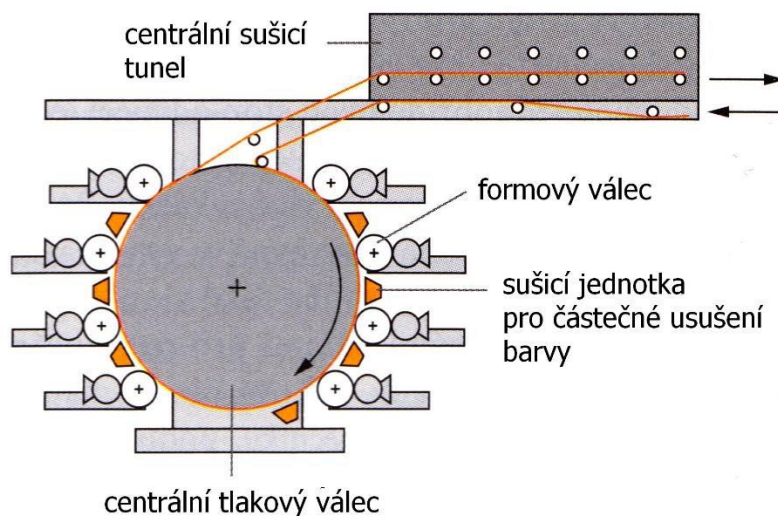


Obr. 8 Schéma flexotiskového stroje s tiskovými jednotkami ve sloupcích nad sebou [4]

Hlavní důvod pro vytvoření konstrukce flexotiskového stroje se satelitním uspořádáním tiskových jednotek kolem centrálního válce (Obr. 9) bylo zlepšení přesnosti soutisku u tenkých rozměrově nestabilních materiálů. Potiskovaný materiál obepíná při tisku skoro celý tlakový centrální válec, čímž je zajištěna jeho fixace a rozměrová stabilita. Průměry centrálního válce dosahují i přes 2 m. Jelikož flexotisk používá při tiskovém procesu poměrně malé přitlaky, musí centrální válec splňovat přísné požadavky. Např. tolerance obvodového házení centrálního válce, která během tiskového procesu ovlivňuje kolísání tiskového tlaku, musí dosahovat zhruba 5  $\mu\text{m}$  a teplota musí být udržována v toleranci  $\pm 1$   $^{\circ}\text{C}$ . U těchto strojů se běžně používají čtyři až deset tiskových jednotek, mezi kterými se vždy nachází sušící zařízení pro částečné usušení barvy. K dokonalému usušení dojde až v centrálním sušicím tunelu. Jednotlivé barevníky najíždějí k centrálnímu válci pomocí kuličkových šroubů poháněných servomotory. Pro uložení formového a rastrového



válce na bočnici stroje se využívá profilové valivé vedení nebo hydrodynamické kluzné vedení. [4]



Obr. 9 Schéma flexotiskového stroje se satelitním uspořádáním tiskových jednotek [4]

## 2.6 FLEXOTISKOVÉ STROJE FIRMY SOMA

V současném výrobním portfoliu lanškrounské firmy SOMA se nacházejí 4 flexotiskové stroje. Jedná se o stroje s názvem IMPERIA, PREMIA, OPTIMA a nejnovější OPTIMA<sup>2</sup>. U všech svých tiskových strojů používá firma SOMA satelitní uspořádání tiskových jednotek. Největším strojem ze současné nabídky je stroj IMPERIA. Jako jediný nabízí desetibarevné provedení. Zbylé stroje jich nabízí osm. PREMIA nabízí moderní technologie obvykle dostupné až u strojů vyšších tříd a šíře potiskovaného materiálu dosahuje až 1500 mm. Stroj OPTIMA zareagoval na aktuální požadavky trhu, kterým stále více dominují krátké zakázky. Veškerou obsluhu stroje je možno vykonávat bez použití žebříků, schůdků nebo plošin, tedy ze země. Výrazně je tedy usnadněna manipulace s materiálem a také se zkracují přípravné časy stroje. Svoji výjimečnost tento stroj potvrdil také vítězstvím v mezinárodní soutěži iF Product Design Award 2014. Moderní flexotiskové stroje se neobejdou bez nejnovějších technologií zajišťující požadovanou produktivitu, kvalitu tisku, obslužnost a v neposlední řadě také bezpečnost a ergonomii. K nejdůležitějším technologiím, použitých na tiskových strojích firmy SOMA, patří například patentovaný systém tepelné stabilizace centrálního tlakového válce, která reguluje teplotu centrálního válce na teplotu okolí. Tento systém je propojen s elektronickou kompenzací tiskových přítlaků regulující odchylku teploty centrálního tlakového válce a teploty rámu. Další patentovaná technologie je systém tepelné stabilizace formového a rastrového válce, které jsou nejvíce ovlivňovány působícím teplem od přímých pohonů těchto válců, uložení v ložiscích a mezibarevných sušících zařízeních. Regulace teploty probíhá podle teploty

rámu stroje, čímž je dosažena eliminace změny průměru tiskových návléků, včetně tiskové formy, a zajištění konstantních tiskových tlaků. Na raklových komorách, které přiléhají k rastrovým válcům a zajišťují přívod barvy, je použit patentovaný nanotechnologový POSITEC, vyvinutý ve spolupráci s výzkumným ústavem a technickou univerzitou v České republice. Tento povrch zajišťuje chemickou odolnost a odolnost proti otěru. Přesnou polohu raklové komory zajišťuje patentovaný systém Fast adapt, který automaticky kompenzuje opotřebení raklových nožů stírající barvu z povrchu rastrového válce. Dále jsou stroje vybaveny systémem automatického mytí barevníků a centrálního válce, který nejdříve odsaje barvu ze všech částí a následně je promývá. Mezi další technologie lze zmínit automatické nastavení tiskových přítlaků, bezhřídelové nonstop navíjení a odvíjení materiálu z role a systém umožňující přesnou regulaci tahů materiálu v jednotlivých zónách stroje v závislosti na druhu potiskovaného materiálu.



Obr. 10 Flexotiskové stroje firmy Soma

## 3 POPIS STROJE OPTIMA<sup>2</sup>



*Obr. 11 Model stroje Optima<sup>2</sup>*

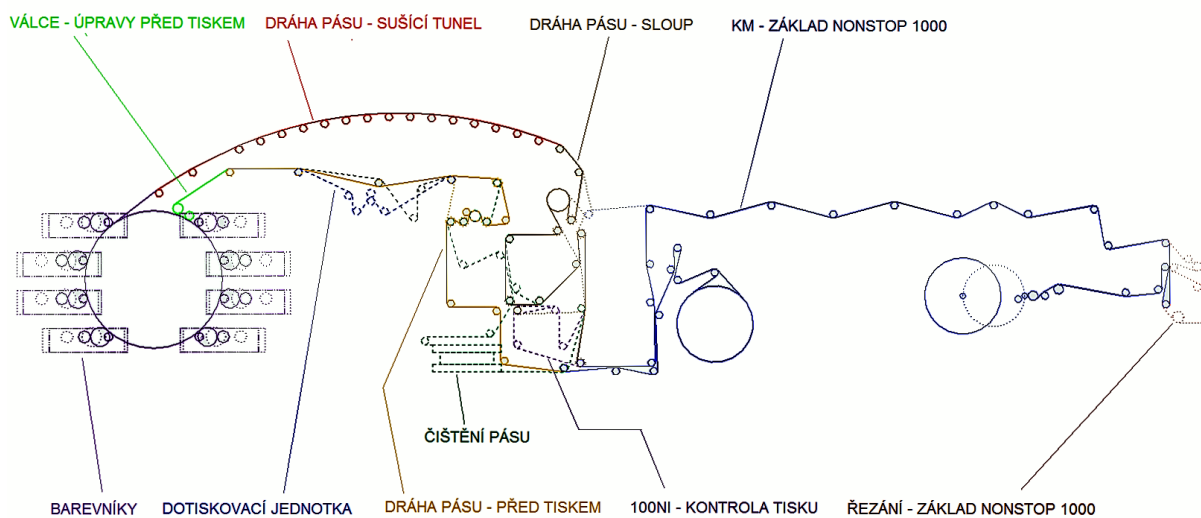
Soma Flex Optima<sup>2</sup> je flexotiskový stroj bez ozubených kol s centrálním protitlakým válcem určený pro kontinuální potisk flexibilních obalových materiálů, jako i papírů nebo laminátů technologií flexotisku s převíjením z role na roli. Umožňuje tisk až osmi barev z vrchní a spodní strany materiálu. [15]

Stroj je vybaven systémy pro rychlou výměnu zakázky, disponuje robustní a tuhou konstrukcí. Systém masivních odlitků vzájemně propojených tuhými příčnicími zabezpečuje optimální dynamické vlastnosti všech jednotek i stroje jako celku. [15]

Asynchronní elektromotory v kombinaci s frekvenčními měniči zabezpečují rychlé a plynulé zrychlení a zpomalení pohybujících se hmot. Pohony stroje umožňují dosažení velice nízké úrovně tahu pásu - až 10N, což je důležité u tenkých potiskovaných materiálů. Přímé pohony formových a rastrových válců včetně řídicí elektroniky a softwaru od firmy Bosch Rexroth zaručují spolehlivou a mnohými aplikacemi prověřenou úroveň zvládnutí “gearless” technologie. [15]

### 3.1 ZÁKLADNÍ TECHNICKÉ PARAMETRY

Počet barevníků: .....	8
Max. šíře tisku: .....	1270 mm
Max. šíře materiálu: .....	1320 mm
Min. šíře materiálu: .....	300 mm
Min. délka tisku: .....	800 mm
Tah v potiskovaném materiálu	
Odvíjení/navíjení NONSTOP: .....	40 ÷ 400 N
Odvíjení/navíjení bez automatické výměny: .....	10 ÷ 400 N
Tah v potiskovaném materiálu	
Odvíjení/navíjení NONSTOP: .....	40 ÷ 400 N
Odvíjení/navíjení bez automatické výměny: .....	10 ÷ 400 N
Max. mechanická rychlost stroje: .....	400 / 500 m/min
Rozměry (š x d x v) [mm]: .....	6000x12870x4200
Hmotnost cca: .....	40 000 kg

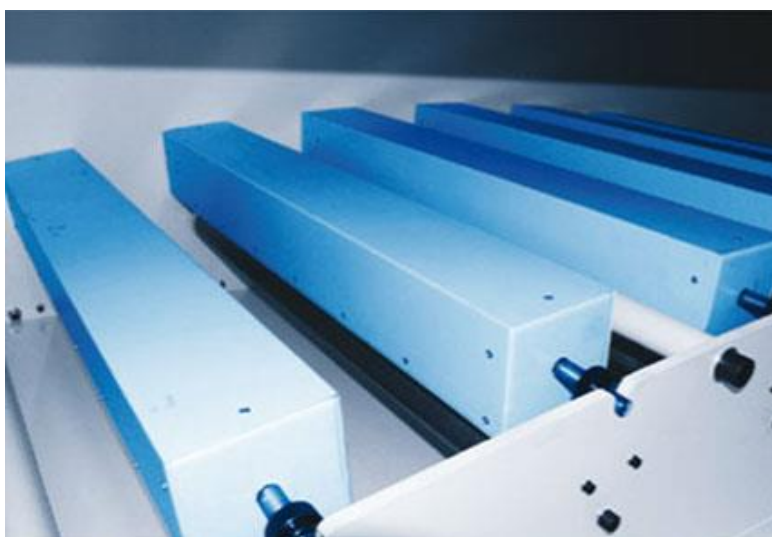


Obr. 12 Průtah materiálu strojem Optima<sup>2</sup>

## 3.2 SUŠÍCÍ TUNEL

Aby nedocházelo k obtahování barvy na tiskovou formu, musí být za každou tiskovou jednotkou umístěno sušící zařízení, které částečně usuší barvu. K dokonalému usušení barvy dojde až v hlavním sušícím tunelu, který je umístěn za poslední tiskovou jednotkou.

Tepelně izolovaný sušící tunel tedy představuje koncové sušení tisku. Na Obr. 12 je vidět dráha průtahu materiálu strojem, kde červená část značí sušící tunel. Tunel obsahuje ventilátory s frekvenčním řízením otáček – optimální nastavení výkonu, nízká hlučnost. Dále motoricky ovládané servoklapky. [15]



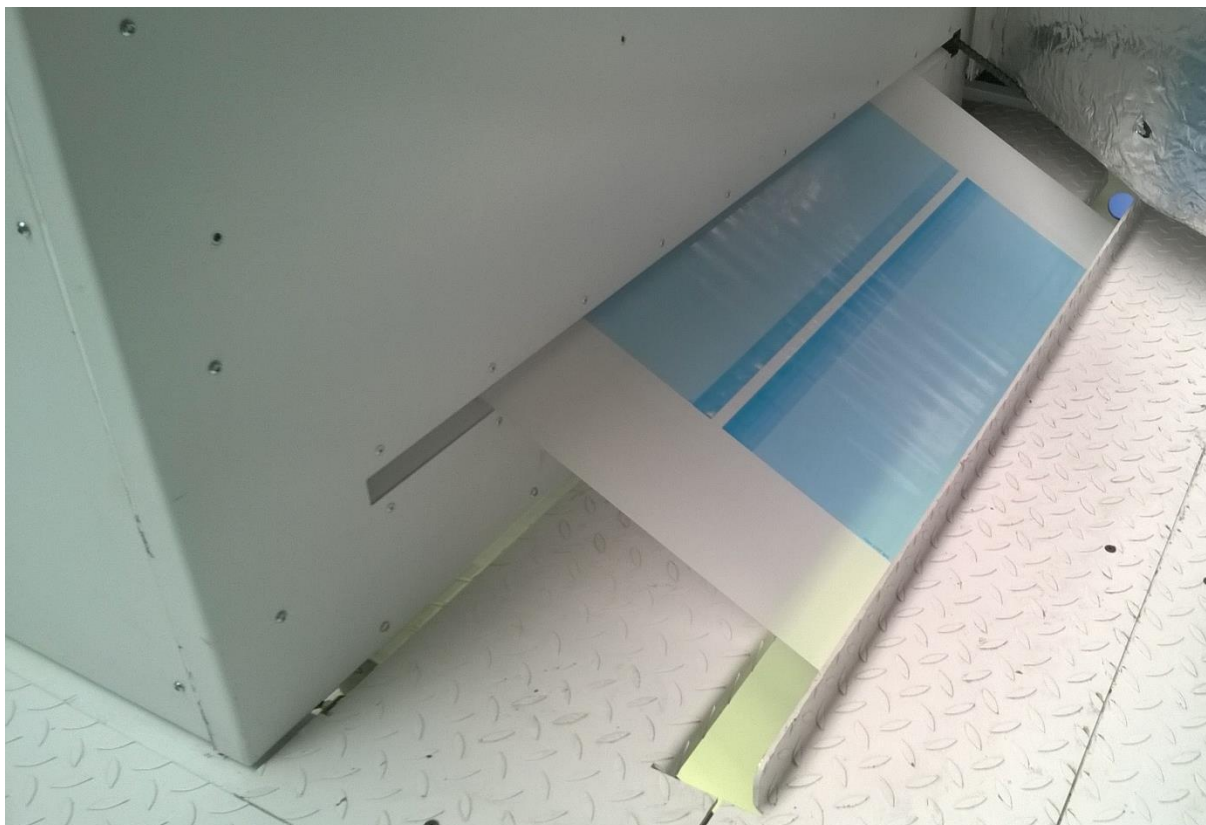
Obr. 13 Sušící hlavy v sušícím tunelu

Všechny hadice, sušící hlavy a boxy jsou tepelně a hlukově izolované a významně snižují spotřebu energie. Vylepšený design sušících hlav se dvěma tryskami zajišťuje větší rychlost vzduchu na trysce a objemnější dodávku vzduchu do sušícího okruhu. Vyjímatelné sušící boxy s rychloupínatelnými přírubami místo hadic mají velmi chytrý design pro snadné vyjmutí a jejich údržbu. Efektivita sušení je maximalizována funkcí iDRY pro optimální, energeticky úsporné nastavení sušení. Tento softwarový upgrade nastavuje různé úrovně výkonu sušení jednotlivým režimům stroje – pohotovostnímu režimu, stop stavu nebo provozu při nízkých rychlostech – a snižuje tak spotřebu energie při procesu sušení na minimum.

### 3.2.1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY SUŠÍCÍHO TUNELU

Délka tunelu: .....4,5 m  
 Počet trysek: .....26  
 Rychlost na trysce: .....max. 50 m/s  
 Teplota vzdušiny: .....max. 90 °C





*Obr. 15 Výstup potiskovaného materiálu ze sušícího tunelu*

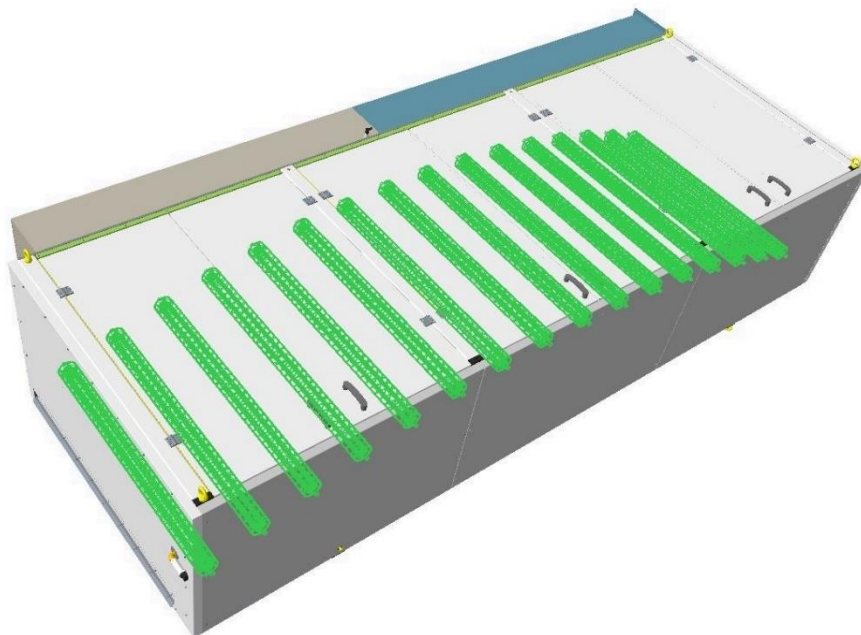


*Obr. 14 Pohled na zavřený sušící tunel*

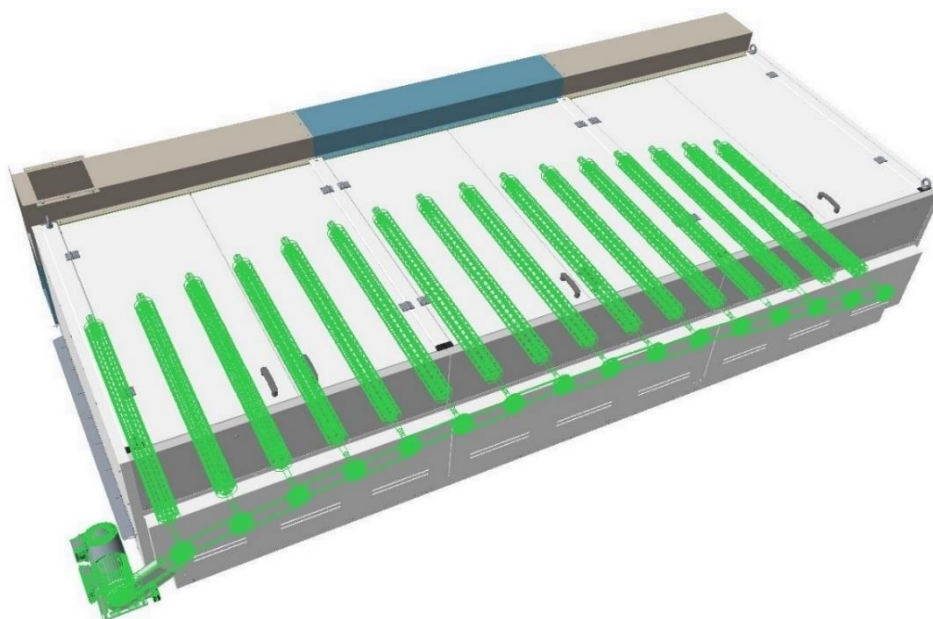
## 4 ANALÝZA ŘEŠENÉHO PROBLÉMU

### 4.1 PŮVODNÍ PROVEDENÍ VODÍCÍCH VÁLCŮ

V současné době jsou vodící válce v sušícím tunelu flexotiskových strojů firmy Soma řešeny buď bez pohonu, nebo s pohonem viz Obr. 16 a Obr. 17. Obě varianty jsou podrobněji popsány v následujících kapitolách 4.1.1 a 4.1.2.

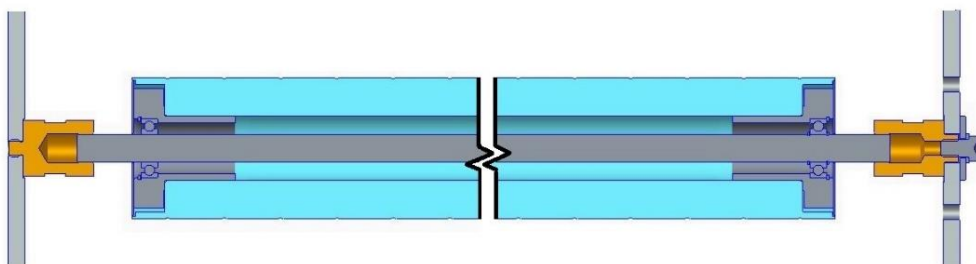


Obr. 16 Sušící tunel se zvýrazněnými vodícími válci – verze bez pohonu



Obr. 17 Sušící tunel se zvýrazněnými vodícími válci – verze s pohonem

#### 4.1.1 VODÍCÍ VÁLCE BEZ POHONU

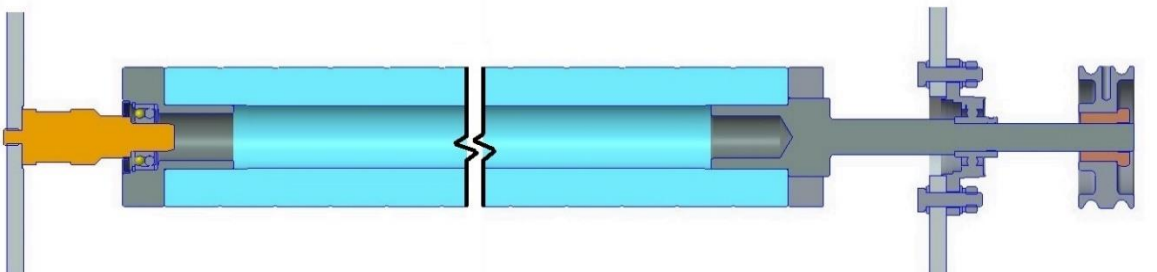


Obr. 18 Sestava vodícího válce- verze bez pohonu

Do vodícího válce je na obou stranách nalisované čelo, ve kterém je přes vnější kroužek nalisováno ložisko válce (kuličkové jednořadé). Válec se otáčí na tyči, která je uložena v pouzdrech a pomocí šroubů zajištěna proti axiálnímu posuvu. Tato pouzdra jsou připevněna k bočnicím sušícího tunelu. Na straně obsluhy je pouzdro našroubováno do bočnice a pojištěno proti povolení lepidlem LOCTITE 243. Na straně pohonu stroje jsou pouzdra osazením nasunuta do příslušných otvorů a upevněna pomocí šroubů.

Vodící válce jsou roztáčeny pouze pohybem potiskovaného materiálu. Pohled v řezu na tuto variantu viz Obr. 18.

#### 4.1.2 VODÍCÍ VÁLCE S POHONEM



Obr. 19 Sestava vodícího válce – verze s pohonem

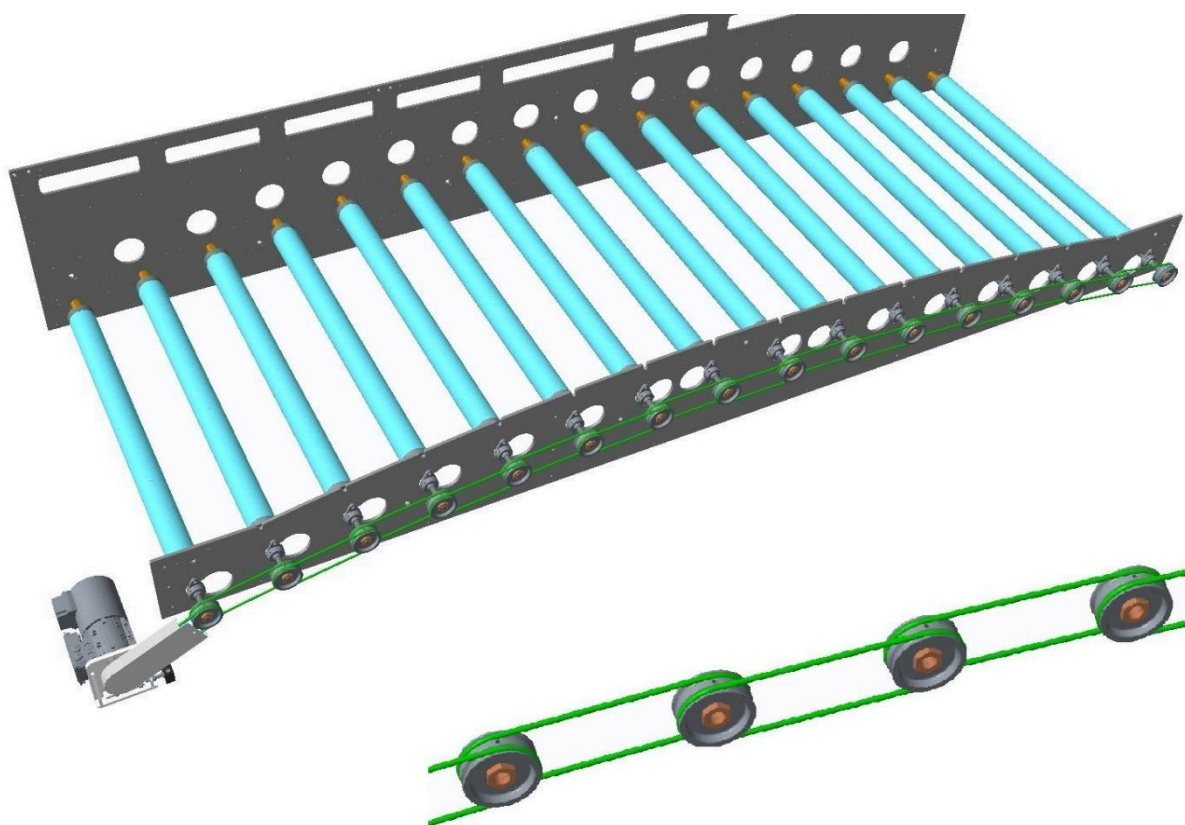
Druhé řešení je s pohonem asynchronním motorem. Do vodícího válce jsou opět nalisovaná čela válce. V levém čelu válce je dvouřadé naklápěcí ložisko. Na pravé straně má čelo tvar hřídele a je bez ložiska.

Na straně obsluhy stroje je tedy válec nasunut ložiskem na čep, který je k bočnici sušícího tunelu připevněn stejně jako pouzdro na straně obsluhy v 4.1.1. Na straně pohonu je ale válec uložen přes hřídelovou část čela do přírubového ložiska. Na hřídelové části čela válce je řemenice, přes kterou se pomocí kruhového řemenu přenáší z asynchronního motoru na další válce kroutící moment.

Princip a nevýhoda takového přenosu výkonu respektive kroutícího momentu mezi jednotlivými válci je blíže popsán v následující kapitole 4.2.



## 4.2 NEVÝHODY PŮVODNÍ KONCEPCE S POHONEM



*Obr. 20 Původní koncepce s pohonem - bez krytů, izolace, sušících hlav atd.*

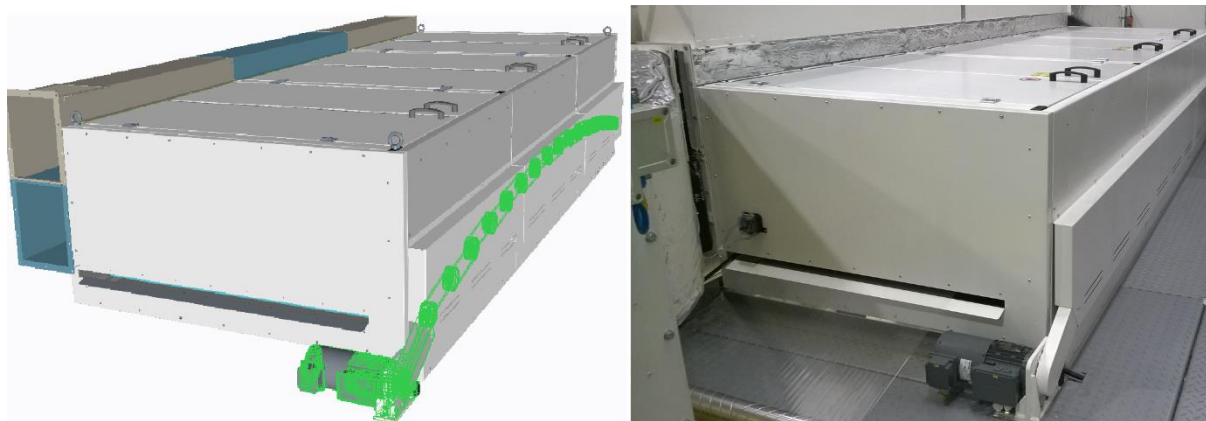
Na Obr. 20 vpravo dole je vidět detailněji princip přenosu výkonu, respektive krouticího momentu, který je přenášen z jedné řemenice na druhou pomocí řemenové smyčky s jedním centrálním pohonem.

Řemenice jsou spojeny vždy ve dvojici a jsou tím pádem vyžadovány řemenice se dvěma drážkami. K přenosu dochází na rozdíl od ozubených řemenů prostřednictvím tření a dochází zde tudíž ke skluzu. Skluz mezi jednou dvojicí řemenic je v podstatě zanedbatelný. V tomto případě je ale k pohonu válců použito 16 řemenic a jednotlivé skluzu se nasčítají. Na poslední řemenici a tím i na posledním vodícím válci je tedy díky tomu už znatelný pokles otáček (respektive obvodové rychlosti).

Rozdíl mezi rychlostí tisku a obvodovou rychlostí zejména vzdálenějších válců znamená rozdíl v rychlosti potiskovaného materiálu a válce, který je s materiálem v kontaktu a má za následek smýkání potiskovaného materiálu na povrchu válce.

Na následující straně je popsáno provedené měření obvodové rychlosti jednotlivých válců v sušícím tunelu. V kapitole 4.3.1 jsou výsledky tohoto měření.

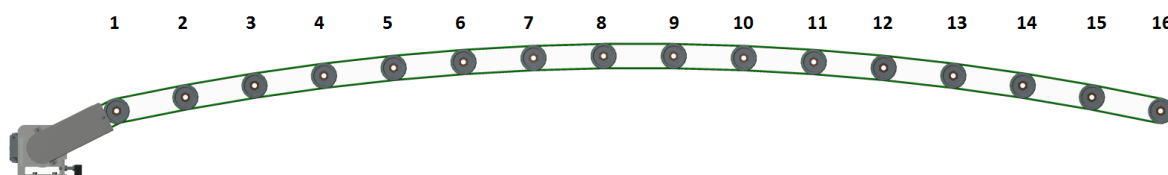
### 4.3 MĚŘENÍ RYCHLOSTI VÁLCŮ – STROJ PREMIA



Obr. 21 CAD vs. reálný model sušícího tunelu stroje Premia

Měření rychlosti válců proběhlo na stroji PREMIA, ve kterém je původní koncepce pohonu válců sušícího tunelu, při které dochází k poklesu otáček jednotlivých válců vlivem prokluzu řemenů viz kapitola 4.1.2 a 4.2. Měření bylo provedeno při nominální rychlosti tisku 40 m/min. K měření byl použit otáčkoměr TESTO 470, který umožňuje měřit opticky i mechanicky (parametry otáčkoměru viz příloha P10).

Na každém válci (číslování válců viz Obr. 23) byly odečteny dvě hodnoty rychlosti. Z těchto hodnot se následně vypočítal aritmetický průměr. Naměřené hodnoty jsou zapsány v Tab. 1 a zaneseny do Graf 1 v následující kapitole 4.3.1.



Obr. 23 Číslování jednotlivých válců pro měření



Obr. 22 Pohled na měřící zařízení Testo 470 při měření

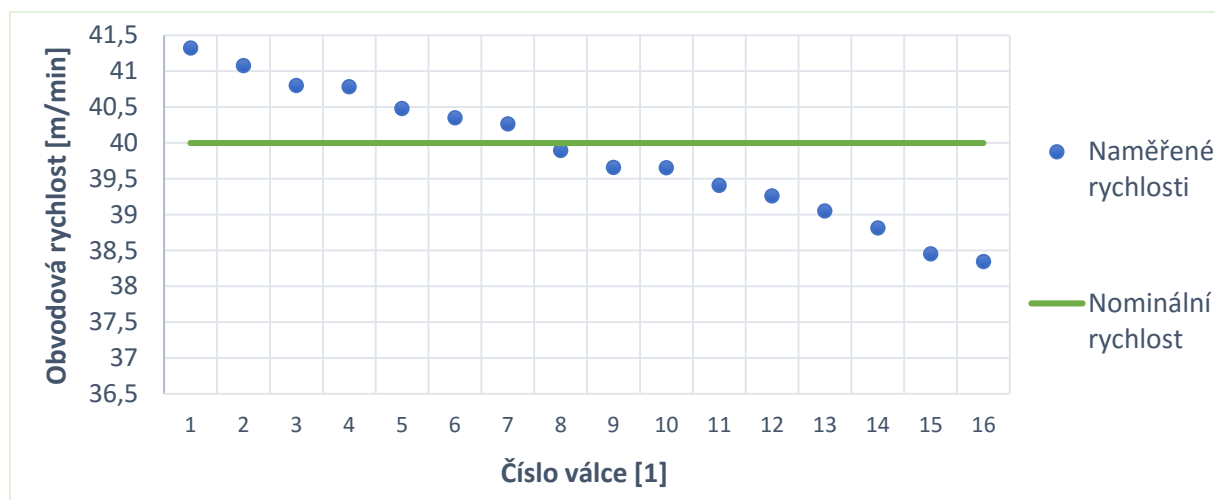


### 4.3.1 VÝSLEDEK MĚŘENÍ

Měřením se potvrdil již zmíněný problém poklesu otáček/obvodové rychlosti vodících válců sušícího tunelu. Z měření vyplývá, že rozdíl obvodové rychlosti mezi prvním válcem, který je nejbližší pohonu a posledním válcem činí 2,98 m/min. Měření probíhalo při nominální rychlosti tisku 40 m/min a procentuální pokles rychlosti je tedy 7,45%. Hodnota rychlosti prvního válce není 40 m/min, ale 41,5 m/min, což je dáno tím, že pro pohon je elektronicky nastavená vyšší hodnota rychlosti (tzv. předstih), než je nominální rychlost tisku. Tímto opatřením je zajištěn obecně menší rozdíl rychlosti materiálu a obvodové rychlosti válců v sušícím tunelu. Z grafu je dobře vidět, že zhruba první polovina vodících válců má rychlost větší než materiál a další válce mají díky prokluzu řemenů rychlost již menší než je rychlost tisku. V absolutní hodnotě je tento rozdíl ale vždy menší než v případě nenavýšení rychlosti pohonu válců v sušícím tunelu.

Naměřené hodnoty obvodových rychlostí na jednotlivých válcích								
	Válec č.							
Měření č.	1	2	3	4	5	6	7	8
M <sub>1</sub> [m/min]	41,12	40,94	40,62	40,61	40,36	40,19	40,05	39,84
M <sub>2</sub> [m/min]	41,52	41,21	40,98	40,95	40,6	40,51	40,48	39,95
M <sub>∅</sub> [m/min]	<b>41,32</b>	<b>41,075</b>	<b>40,8</b>	<b>40,78</b>	<b>40,48</b>	<b>40,35</b>	<b>40,265</b>	<b>39,895</b>
	Válec č.							
Měření č.	9	10	11	12	13	14	15	16
M <sub>1</sub> [m/min]	39,57	39,44	39,23	39,11	38,86	38,65	38,39	38,11
M <sub>2</sub> [m/min]	39,74	39,86	39,58	39,41	39,24	38,97	38,51	38,58
M <sub>∅</sub> [m/min]	<b>39,655</b>	<b>39,65</b>	<b>39,41</b>	<b>39,26</b>	<b>39,05</b>	<b>38,81</b>	<b>38,45</b>	<b>38,34</b>

Tab. 1 Naměřené hodnoty obvodových rychlostí na jednotlivých válcích



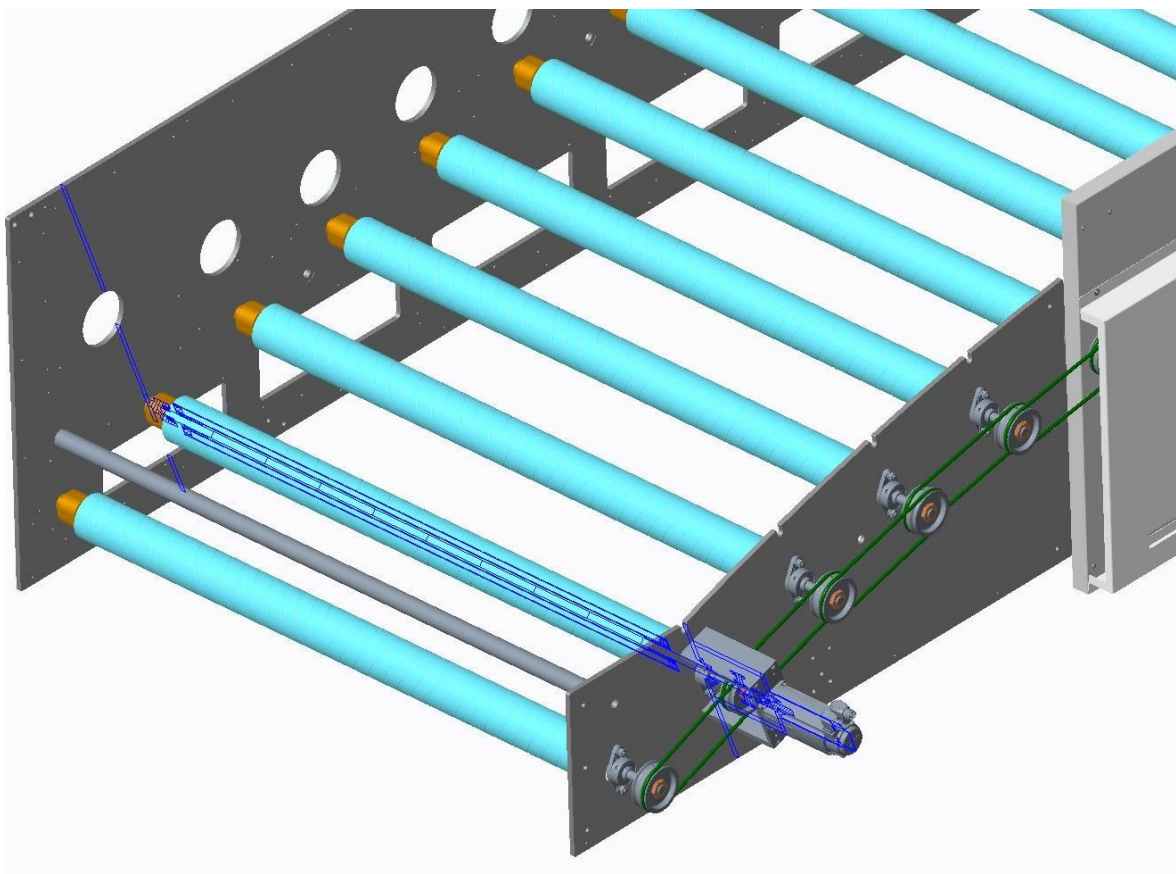
Graf 1 naměřené obvodové rychlosti na válcích

## 5 NÁVRH NOVÉ KONCEPCE

Návrh je prováděn pro dvě šířkové verze stroje, 1270 a 1050. Hodnoty 1270 a 1050 odpovídají maximální šíři tisku stroje v milimetrech, od které se odvíjí délka vodících válců dané šířkové verze stroje, které mají délky 1370 respektive 1150 milimetrů.

Nové řešení pohonu má eliminovat již dříve popsany rozdíl obvodové rychlosti vodících válců a rychlostí potiskovaného materiálu.

Na Obr. 24 je modře vyznačena rovina řezu (skrže motor a druhý válece zleva). Výsledkem tohoto řezu jsou Obr. 25 a Obr. 26 na následující straně. Tyto obrázky jsou použity k popisu nové koncepce v kapitole 5.1.



Obr. 24 Nová koncepce s naznačením roviny řezu (tmavě modře)

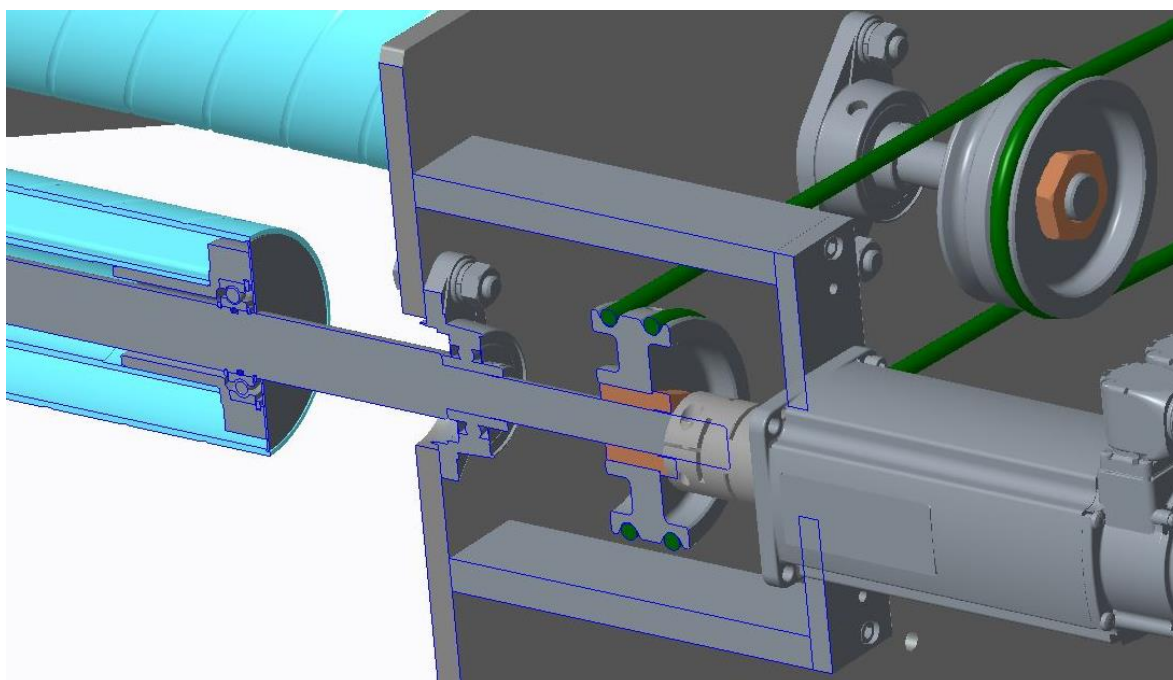


## 5.1 POPIS NOVÉ KONCEPCE

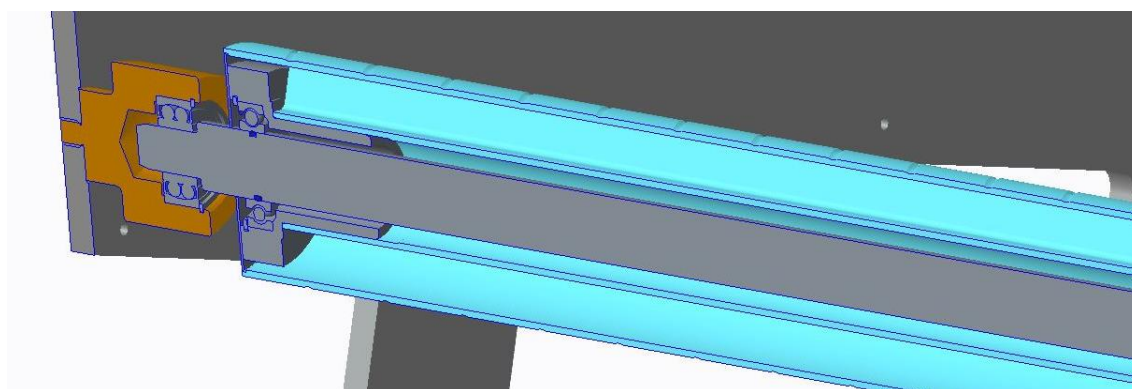
Přenos výkonu a tedy i krouticího momentu mezi jednotlivými vodícími válci, je stejně jako v původním řešení vodících válců s pohonem viz kapitola 4.1.2, realizován kruhovým řemenem přes řemenice, které jsou na hřídelích upevněny pomocí svěrných pouzder.

Rozdíl oproti původnímu řešení je ale v tom, že se krouticí výkon nepřenáší přímo na vodící válce - ty se na hřídeli otáčejí na kuličkových ložiscích. Pohon tedy není přímo svázán s vodícími válci, které jsou v kontaktu s potiskovaným materiálem. Motor tímto v podstatě pomáhá roztáčet válce a snižuje odpor ložisek válce, který se tak může snáze točit a měnit svou rychlost podle rychlosti potiskovaného materiálu.

Tato nová koncepce je v podstatě kombinací obou původních řešení vodících válců sušícího tunelu, viz kapitoly 4.1.1 a 4.1.2.



Obr. 25 Detail nové koncepce (řez) – strana pohonu stroje



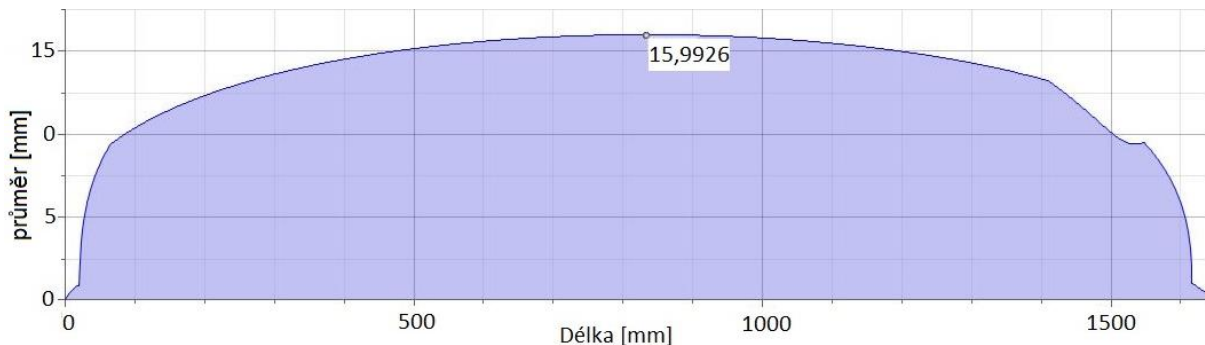
Obr. 26 Detail nové koncepce (řez) – strana obsluhy stroje

## 5.2 PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH HŘÍDELE

Při uvažování vlastní tíhy hřídele (ocel S235, nebo starší značení dle ČSN 11373 – parametry viz příloha P9) a válce s řemenicí na ní uloženého, vychází hodnota minimálního průměru hřídele 16 mm. Při takovém průměru je sice vzniklé napětí menší než dovolené napětí dle vztahu

$$\sigma_d = \frac{R_e}{k} = \frac{235}{2} = 117,5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (1)$$

ale vzniklé deformace jsou velké - průhyb hřídele 3,4 mm (výpočet viz příloha P1). Taková deformace je v rozporu s faktem, že je na hřídeli uložen vodící válec na jednořadých kuličkových ložiscích, které by se na takto deformovaném hřídeli nedaly použít (velké úhlové natočení plynoucí z velkého průhybu).



Obr. 27 Minimální průměr hřídele při daném zatížení

Pokud si navíc uvědomíme, že hřídel bude při maximální rychlosti tisku  $v_m = 500 \text{ m/min}$  dosahovat otáček

$$n_m = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} = \frac{v_m}{2 \cdot \pi \cdot r_v} = \frac{500}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 0,05} = 26,525 \text{ s}^{-1} = 1591 \text{ min}^{-1} \quad (2)$$

musí se dát pozor také na krouživé kmitání (kritické otáčky). Návrh hřídele se tedy musí provést tak, aby byly vlastní frekvence hřídele nad frekvencí odpovídající maximální rychlosti stroje (2).



Obr. 28 přepočítání obvodové rychlosti na otáčky



## 5.3 VLASTNÍ FREKVENCE HŘÍDELE

Je to stav, kdy dochází k vibracím, vzniku hluku a možné nevratné deformaci hřídele. Jedná se o jakýsi stav nestability rotace hřídele v kritických otáčkách. Pro kontrolu tohoto stavu byla použita teorie a rovnice z literatury [10]. Kritické otáčky jsou popsány následující rovnicí

$$\Omega_i = \left(\frac{i \cdot \pi}{L_h}\right)^2 \sqrt{\frac{E \cdot J}{\rho \cdot S}} \quad (3)$$

Kde	$\Omega_i$	je kritická úhlová rychlost
	$i$	je řád harmonické složky
	$L_h$	je délka hřídele
	$E$	je modul pružnosti v tahu
	$J$	je kvadratický moment průřezu hřídele
	$\rho$	je hustota materiálu
	$S$	je plocha průřezu

Jelikož z výše uvedeného vzorce (3) vyplývá, že kritické otáčky budou nižší se zvětšující se délkou hřídele, byla analýza zaměřena na delší hřídel (o délce 1634 mm - pro šířkovou verzi stroje 1270). Průměr hřídele, při kterém se budou kontrolovat kritické otáčky a případně zvětšovat/zmenšovat je stanoven na 30 mm.

Ve slabě tlumeném systému tlumící síly výrazně neovlivňují vlastní frekvence a tvary volného kmitání. Proto může být problematika volného kmitání řešena pomocí rovnice pro netlumené kmitání (3).

Pro co nejrelevantnější výsledky je výpočet frekvencí proveden ještě pomocí MKP výpočetního programu Abaqus CAE a do třetice pomocí programu KisoSoft. Všechny tři výsledky jsou navzájem porovnány v Tab. 5.

### 5.3.1 MODÁLNÍ ANALÝZA HŘÍDELE V PROGRAMU ABAQUS

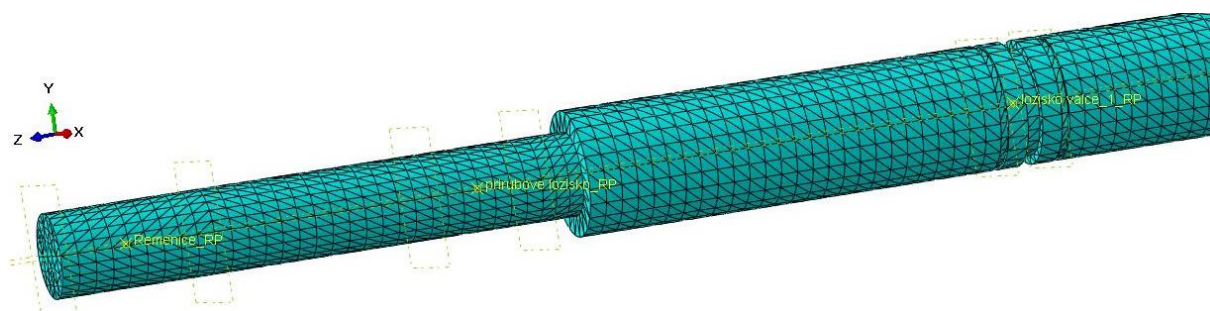
Produkt ABAQUS je softwarový balík pro výpočetní podporu návrhu nového produktu pomocí metody konečných prvků (MKP). ABAQUS CAE je kompletní řešení pro rychlou a efektivní stavbu a úpravu konečně prvkových modelů. Následně pak umožňuje vizualizaci výsledků, vyhodnocení a zpracování. [11]

Hřídel byla importována z programu ProEngineer WF4. Minimální zjednodušení modelu se provedlo pouze odstraněním sražení hran.

Pomocí vazby kinematic coupling viz Obr. 30 byly na hřídeli svázány referenční body s odpovídající válcovou plochou dílů umístěných na hřídeli. Tyto referenční body představují z-tovou souřadnici těžiště jednotlivých dílů, které jsou na hřídeli umístěny. Referenčním bodům byla přiřazena hmotnost odpovídající hmotnosti těchto dílů (řemenice, vodící válec) viz Obr. 31. Takto jsou zohledněny přídavné hmoty hřídele, které zásadně ovlivňují výsledky modální analýzy.

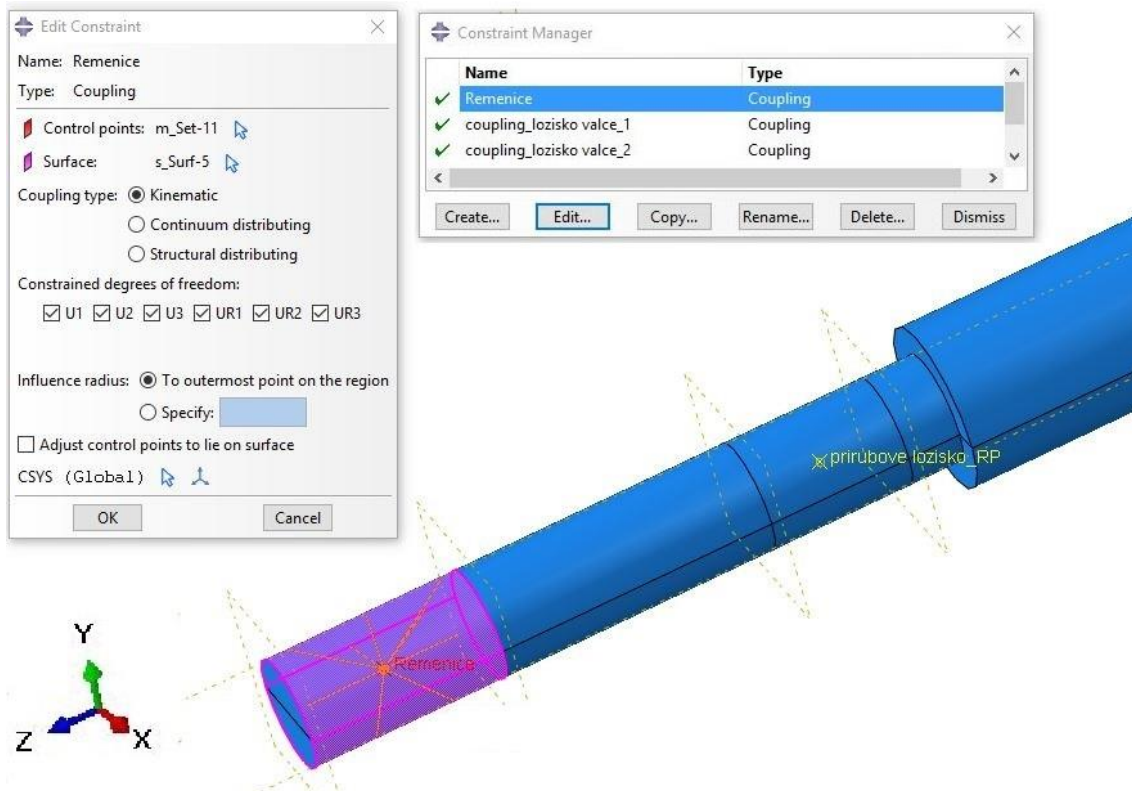
Velikost elementů sítě byl nastaven na hodnotu 1,5 mm. Byly použity lineární prvky typu TET. Pohled na síť části hřídele je vidět na Obr. 29.

V Tab. 2 na straně 28 jsou uvedeny výsledné vlastní frekvence modelu hřídele. Pořadí vlastního tvaru je značeno příslušným indexem a v pravé části je také uveden tvar kmitu. Hřídel má jednu nulovou frekvenci odpovídající vlastnímu tvaru, který je charakterizován rotací jakožto tuhého tělesa. Následují vlastní tvary s dominantní ohybovou deformací hřídele.

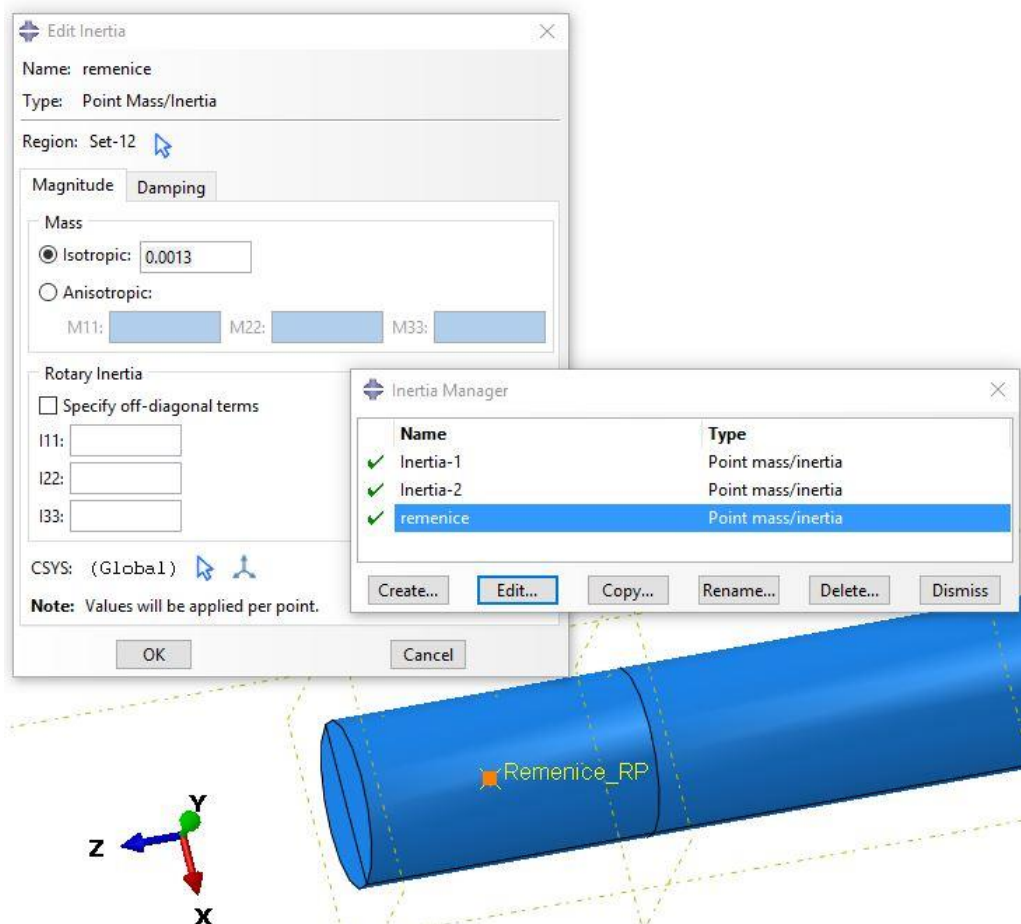


Obr. 29 Pohled na konečněprvkovou síť hřídele












Obr. 30 Aplikace funkce kinematic coupling řemenice



Obr. 31 Přřazení hmotnosti řemenice do bodu RP

Vlastní frekvence hřídele a tvary kmitu		
Index	Frekvence	Tvar kmitu
[1]	[Hz]	[1]
0	0	
1	25,50	
2	25,50	
3	91,97	
4	91,60	
5	186,54	
6	186,55	

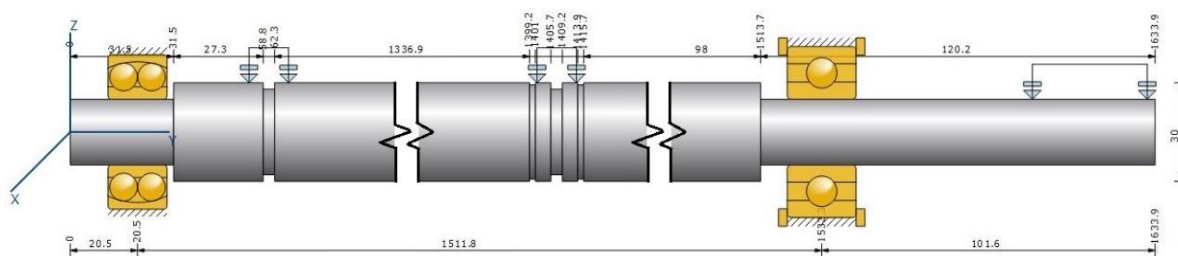
Tab. 2 Vlastní frekvence hřídele ( $\varnothing 30\text{ mm}$ ,  $L=1634\text{mm}$ )

### 5.3.2 VÝPOČET VL. FREKVENCÍ HŘÍDELE V PROGRAMU KISSOFT

Kissoft je vysoce specializovaný program na geometrický a pevnostní výpočet ozubení a výpočet hřídelí, ložisek, strojních součástí, spojů, řemenů a řetězů. Konkrétně u hřídelí zvládá vypočítat průhyb, ohybový moment, smykové napětí normálové napětí včetně grafických zobrazení. Dále kritické otáčky, krut, vzpěr, pevnost a životnost, deformace atd. [14]

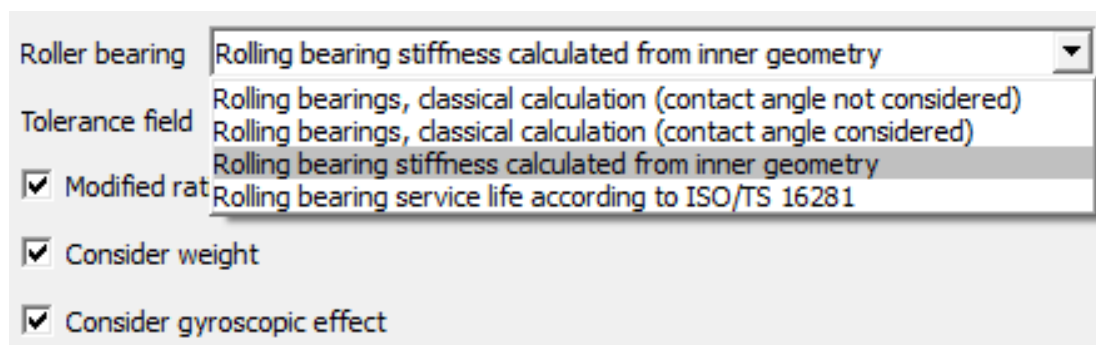
Program zvládá výpočet přirozených frekvencí (ohyb), kdy v úvahu je brána elasticita ložisek a přídavné hmoty. Do úvahy je brán také gyroskopický efekt velkých hmot (setrvačnost). Výpočet je prováděn pro kritické otáčky (ohyb), nehybný stav (přirozená frekvence) a pro dopředné a zpětné otáčení.

Hřídel byl v programu Kissoft vymodelován bez jakýchkoliv zjednodušení viz Obr. 32. Výhodou bylo, že se nemuselo složitě nastavovat uložení, jako tomu bylo v Abaqusu, pouze se na příslušná místa vymodelovaného hřídele nakonfigurovala ložiska a informace, zda je ložisko axiálně pohyblivé, nebo zafixované (Kissoft disponuje databází více než 3500 ložisek značek FAG, SKF, INA atd.). Na příslušná místa byly nastaveny přídavné hmoty odpovídající hmotnosti řemenice a vodícího válce.



Obr. 32 Model hřídele vytvořený v programu Kissoft

Pokud se v Kissoftu při nastavení základních parametrů výpočtu zvolí u valivých ložisek možnost klasického výpočtu (buď s uvažováním stykového úhlu ložiska, nebo bez uvažování), vycházejí frekvence velice podobně jako z analýzy v Abaqusu (viz Tab. 5). Když ale zvolíme, aby si program navíc počítal tuhost ložiska z vnitřní geometrie matematického modelu (viz Obr. 33), vycházejí frekvence sice stejně, ale mezi výčtem frekvencí se zobrazí ještě jedna frekvence navíc, této frekvenci odpovídá hodnota 17,01 Hz. Tato hodnota představuje kmitání hřídele v axiálním směru díky vůli v ložisku.



Obr. 33 Nastavení výpočtu v Kisoftu - část nastavení parametrů ložisek

Kisoft - vlastní frekvence hřídele									
<i>klasický výpočet</i>									
vlastní tvar									
1		2		3		4		5	
min <sup>-1</sup>	Hz	min <sup>-1</sup>	Hz	min <sup>-1</sup>	Hz	min <sup>-1</sup>	Hz	min <sup>-1</sup>	Hz
0,59	0,01	17,8	0,3	1509	25,15	1513	25,22	5295	88,25

Tab. 3 Hodnoty frekvencí při klasickém výpočtu (Kisoft)

Kisoft - vlastní frekvence hřídele									
<i>tuhost ložiska z vnitřní geometrie matematického modelu</i>									
vlastní tvar									
1		2		3		4		5	
min <sup>-1</sup>	Hz	min <sup>-1</sup>	Hz	min <sup>-1</sup>	Hz	min <sup>-1</sup>	Hz	min <sup>-1</sup>	Hz
0,59	0,01	1021	17,01	1509	25,15	1513	25,22	5295	88,25

Tab. 4 Hodnoty frekvencí při zohlednění tuhosti ložiska (Kisoft)



### 5.3.3 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH METOD VÝPOČTU

Porovnání jednotlivých výpočtů						
	Abaqus		Kissoft		Výpočet dle (3)	
	Hz	min <sup>-1</sup>	Hz	min <sup>-1</sup>	Hz	min <sup>-1</sup>
1. tvar	25,50	1530,06	25,15	1509,30	25,33	1519,50

Tab. 5 Hodnoty frekvencí hřídele – porovnání výpočtů (Ø30 mm, L=1634mm)

Z Tab. 5 je vidět že, hodnoty z jednotlivých metod výpočtu mají jen nepatrnou odchylku. U hřídele o průměru 30 mm pro šířkovou verzi stroje 1270 má první tvar kmitu hodnotu zhruba 25,3 Hz (tj. průměr hodnot 25,5 Hz, 25,15 Hz a 25,33 Hz).

Hřídel o průměru 30 mm šířkové verze 1270 tedy nevyhovuje, protože hodnota 25,3 Hz je menší než hodnota frekvence odpovídající maximální rychlosti stroje 25,52 Hz. Při maximálních rychlostech tisku by se tak hřídele vodících válců vyskytovaly v pásmu kritických otáček.

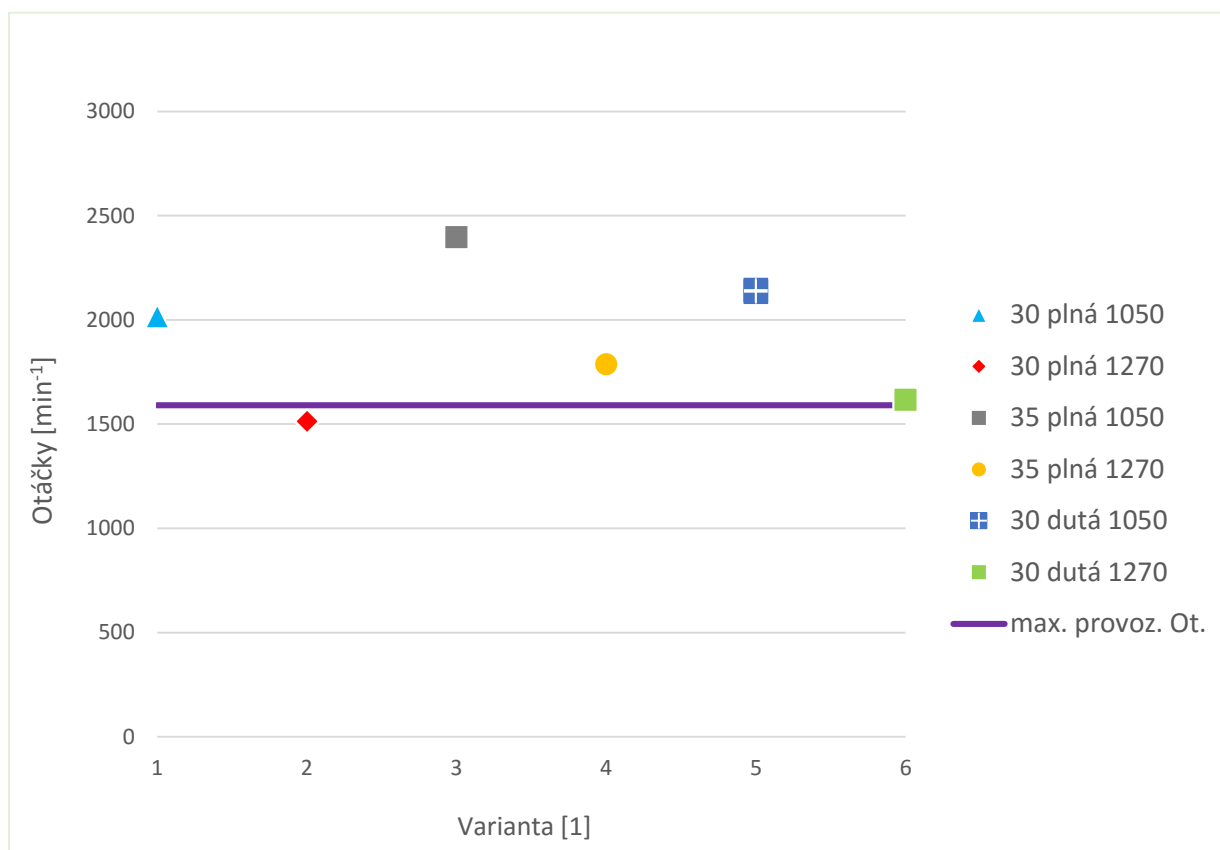
Z rovnice (3) je zřejmé, že kritické otáčky klesají s druhou mocninou délky hřídele a zvětšují se se zvětšující se plochou průřezu a s rostoucím kvadratickým momentem průřezu. Jelikož délku hřídele měnit nelze, ta je pevně daná pro obě šířkové verze stroje, tak možná řešení zvýšení hodnoty kritických otáček jsou: dutá hřídel nebo větší průměr hřídele.

### 5.3.4 SOUHRN VÝSLEDKŮ

V Tab. 6 je výpis hodnot frekvencí z programu Kissoft odpovídající prvním třem vlastním tvarům kmitu pro průměr hřídele 30 mm v délkách 1414 mm a 1634 mm. Dále jsou zde hodnoty frekvencí hřídelí se zvětšeným průměrem, respektive průřezem (duté hřídel). Hodnoty všech těchto frekvencí včetně frekvence odpovídající maximální rychlosti stroje, jsou zaneseny do Graf 2 na další straně.

Vlastní frekvence – SOUHRN (hodnoty z programu Kissoft)								
Hřídel			Vlastní tvar					
Ø	typ	délka	1		2		3	
mm	-	mm	min <sup>-1</sup>	Hz	min <sup>-1</sup>	Hz	min <sup>-1</sup>	Hz
30	plná	1414	2010,4	33,51	2016,4	33,61	6706,8	109,73
30	plná	1634	1509,3	25,15	1513,2	25,22	5294,8	88,25
35	plná	1414	2391,7	39,86	2396,8	39,95	8246,2	137,44
35	plná	1634	1783,2	29,72	1786,6	29,78	6439,4	107,32
30	dutá	1414	2135,6	35,59	2142,6	35,71	6957,3	115,95
30	dutá	1634	1611	26,85	1615,6	26,93	5535,6	92,26

Tab. 6 Porovnání hodnot frekvencí pro jednotlivá provedení hřídelí (délka, průřez)



Graf 2 Grafické znázornění vlastních frekvencí hřídele v různém provedení

### 5.3.5 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Z Graf 2 respektive Tab. 6 je patrné, že hřídel má menší vlastní frekvenci, než frekvenci odpovídající maximální rychlosti stroje pouze v případě průměru 30 mm a délce 1634 mm (verze stroje 1270). Možné řešení jak se vyhnout kritickým otáčkám je tedy hřídel z dutého polotovaru (prodávají se opět i hlazené tyče s tolerancí průměru h6 viz příloha P8), nebo zvětšit průměr na hodnotu 35 mm.

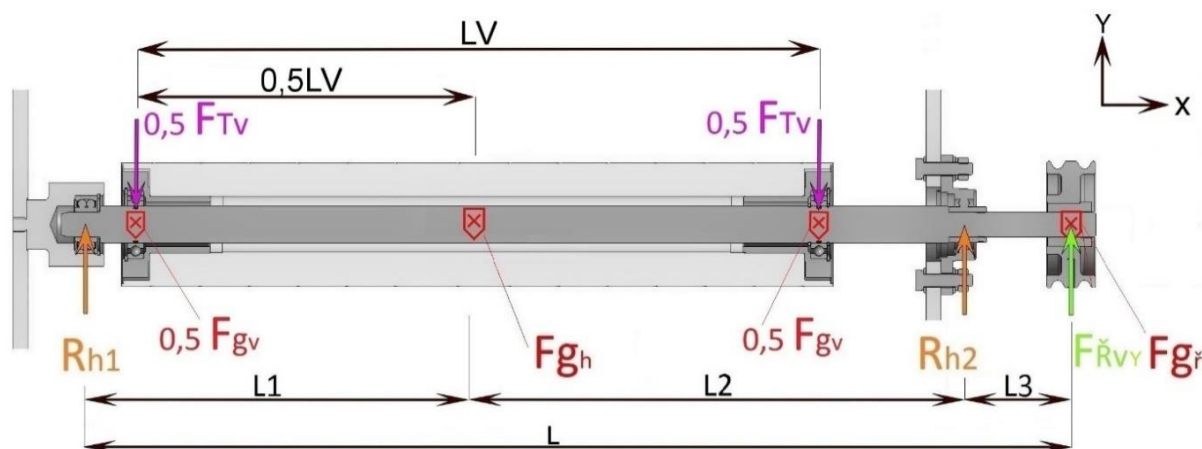
V případě zvětšení průměru na hodnotu 35 mm by bylo potřeba upravit čelo vodícího válce z důvodu rozdílných rozměrů ložiska pro průměr hřídele 35 mm. Vznikly by tedy dvě verze vodících válců, které by se od sebe lišily rozdílnými čely pro verzi stroje 1050 a 1270. Vhodnější by ale spíše bylo zvětšit průměr hřídele na 35 mm i u verze 1050, která sice vyhovuje i při průměru 30 mm, ale nebyly by (možná zbytečně) dvě verze vodících válců v podskupině sušícího tunelu stroje Optima<sup>2</sup> (myšleno v databázi firmy SOMA).

V případě dutého polotovaru by byl zachován původně stanovený průměr hřídele 30 mm pro obě verze stroje. Duté broušené tyče v toleranci h6 prodává například společnost HIWIN ve výrobní délce až 6000 mm viz katalogový list – příloha P8.



## 5.4 NÁVRH LOŽISEK

### 5.4.1 ZATÍŽENÍ LOŽISEK HŘÍDELE

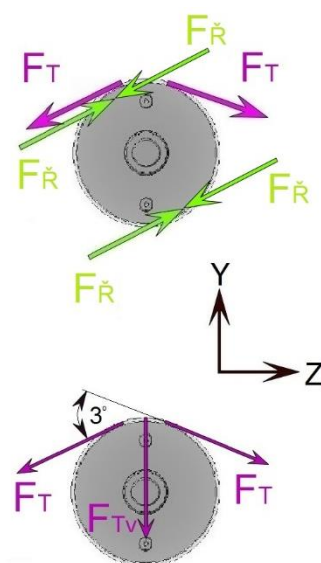


Obr. 34 Zatížení ložisek hřídele

Ložiska hřídele jsou v rovině XY zatížena od hmotností jak hřídele samotné, tak hmotnosti válce a řemenice, které jsou na hřídeli. Dále od y-složky tahové síly potiskovaného materiálu a předepnutí řemenu. Jednotlivé síly jsou vidět na Obr. 34 a Obr. 35.

Kde:

- $F_T$  je tah materiálu
- $F_{Tv}$  je výsledná složka tahu materiálu
- $F_{gv}$  je tíha válce
- $F_{gh}$  je tíha hřídele
- $F_{gř}$  je tíha řemenice
- $F_{Ř}$  je síla v jedné větvi řemene od předepnutí
- $F_{Řv}$  je výsledná síla od řemene
- $R_{h1,2}$  jsou reakce v ložiscích hřídele



Obr. 35 Boční pohled na zatížení

Velikost  $F_T$  je 400 N (uvažována maximální hodnota viz kapitola 3.1), velikost  $F_{Ř}$  je 90 N – odpovídá tažné síle v řemenu po 8% prodloužení řemenu (po nasazení na řemenice). Hmotnosti hřídele a válce jsou 8,56 kg a 7,9 kg. Řemenice váží 1,3 kg.

Výpočet reakcí  $R_{h1}$  a  $R_{h2}$  ze statické rovnováhy v rovině XY:

$$\sum M = -R_{h1} \cdot (L1 + L2) + (0,5 \cdot F_{TV} + 0,5 \cdot F_{gV}) \cdot (L2 + 0,5LV) + F_{gh} \cdot L2 + (0,5 \cdot F_{TV} + 0,5 \cdot F_{gV}) \cdot (L2 - 0,5LV) + F_{gV} \cdot L3 = 0 \quad (4)$$

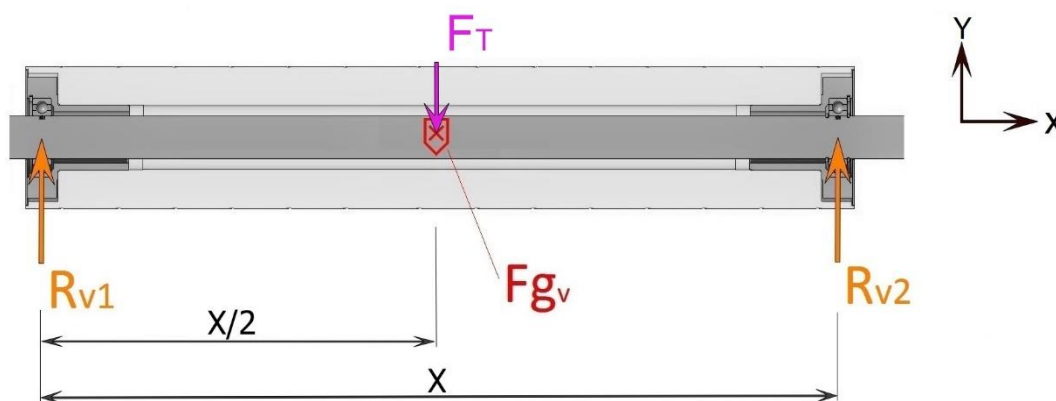
$$\sum F_y = R_{h1} + R_{h2} - F_{TV} - F_{gV} - F_{gh} - F_{gŘ} = 0 \quad (5)$$

Výsledné reakce jsou:

$$R_{h1} = 97 \text{ N}$$

$$R_{h2} = 92,6 \text{ N}$$

### 5.4.2 ZATÍŽENÍ LOŽISEK VÁLCE



Obr. 36 Zatížení ložisek válce

Výpočet reakcí  $R_{V1}$  a  $R_{V2}$  ze statické rovnováhy v rovině XY:

$$\sum F_y = R_{V1} + R_{V2} - F_{gV} - F_{TV} = 0 \quad (6)$$

$$\sum M = R_{V2} \cdot X - F_{gV} \cdot \frac{X}{2} - F_{TV} \cdot \frac{X}{2} = 0 \quad (7)$$

Výsledné reakce jsou:

$$R_{V1} = 49 \text{ N}$$

$$R_{V2} = 49 \text{ N}$$

Zvolená ložiska a jejich parametry jsou v Tab. 7, Tab. 8 a Tab. 9 na následující straně.



### 5.4.3 POUŽITÁ LOŽISKA

Z výsledků výpočtů zatížení ložisek v kapitolách 5.4.1 a 5.4.2 a porovnání hodnot dovolených zatížení vybraných ložisek viz Tab. 7, Tab. 8 a Tab. 9, je zřejmé, že u ložisek nebude problém s jejich velkým zatížením, ale naopak s jejich malým zatížením. V případě ložisek válce vycházejí reakce 49 N, což je velmi blízko minimálnímu radiálnímu zatížení 25 N daného ložiska.

Určité minimální zatížení musí na ložiska s bodovým nebo čárovým stykem působit, aby byl zajištěn jejich uspokojivý provoz. To platí i pro kuličková ložiska, především v případě, kdy mají pracovat při vysokých otáčkách, s vysokým zrychlením anebo při náhlých změnách směru působícího zatížení. Za takových podmínek mohou mít setrvačné síly kuliček a klece, jakož i tření v mazivu, negativní vliv na podmínky odvalování a způsobit poškození valivých těles a oběžných drah prokluzováním. [5]

Kromě poškození valivých těles a oběžných drah hrozí v tomto případě i k prokluzu vnitřního kroužku na hřídeli. Tento problém je blíže popsán v následující kapitole.

Naklápěcí ložisko FBJ - 2204 2RS						
rozměry [mm]			zatížení [kN]			hmotnost [kg]
d	D	b	C <sub>r</sub>	C <sub>or</sub>	F <sub>rmin</sub>	m
20	47	18	12,6	3,3	0,025	0,14



Tab. 7 Parametry ložiska FBJ – 2204 2RS

Ložisková jednotka SNR - UCFLZ204						
rozměry [mm]			zatížení [kN]			hmotnost [kg]
d	D	b	C <sub>r</sub>	C <sub>or</sub>	F <sub>rmin</sub>	m
20	55	37,3	12,8	6,65	0,025	0,5



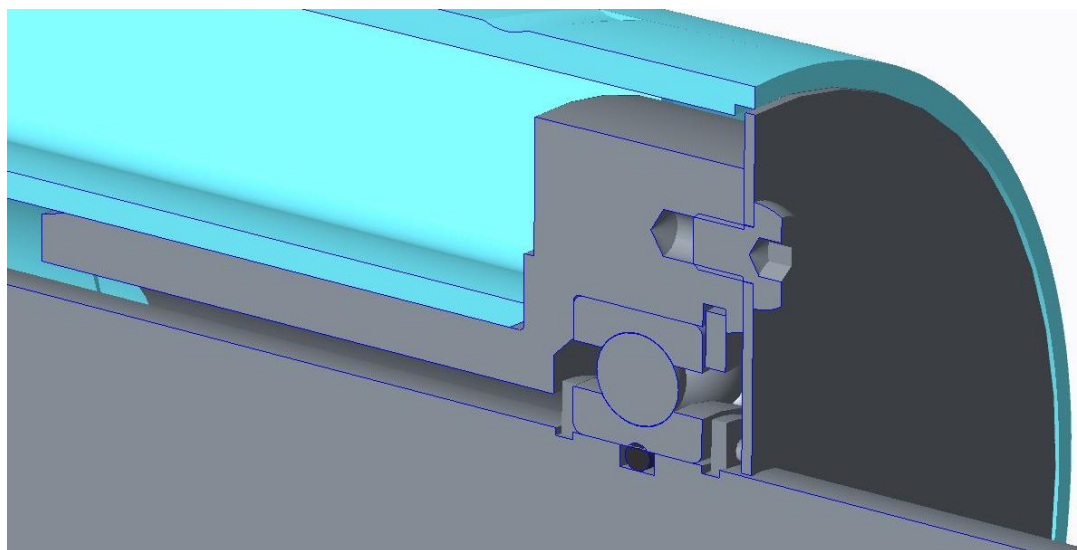
Tab. 8 Parametry ložiska SNR – UCFLZ204

Kuličkové ložisko, jednořadé SKF - 6006 C3						
rozměry [mm]			zatížení [kN]			hmotnost [kg]
d	D	b	C <sub>r</sub>	C <sub>or</sub>	F <sub>rmin</sub>	m
30	55	13	13,8	8,3	0,025	0,117



Tab. 9 Parametry ložiska SKF – 6006 C3

### 5.4.4 POJIŠTĚNÍ VNITŘNÍHO KROUŽKU LOŽISKA PROTI PROTÁČENÍ

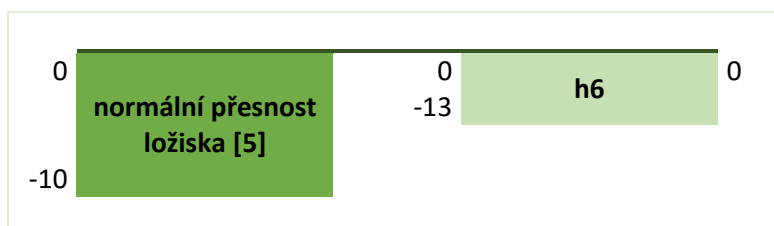


Obr. 37 Pojištění vnitřního kroužku ložiska válce proti protáčení

Jako polotovar pro hřídele se používají tyčové polotovary s tolerancí průměru h6. Hřídele jsou dlouhé 1634 mm a jakékoli obrábění navíc, které není nezbytně nutné, je časově a finančně náročné. Nejvýhodnější je tedy koupit tyč už s tolerovaným průměrem a obrábět pouze části jako jsou konce hřídelí, drážky atd.

Jelikož jsou ložiska válce uloženy na hřídeli s tolerancí h6, vzniká mezi vnitřním kroužkem a hřídelí buď malý přesah, nebo malá vůle (přechodné uložení) viz Obr. 38. Z montážních důvodů, viz kapitola 5.5, je vůle sice vhodná, je potřeba si ale uvědomit, že zatížení, které se na tyto ložiska přenáší, je velmi blízko minimálnímu zatížení ložisek. V kombinaci se smyslem zatížení a zrychlováním např. při nájezdu tisku, hrozí díky možné vůli mezi vnitřním kroužkem ložiska a hřídelí protáčení vnitřního kroužku ložiska na hřídeli a následnému vydírání této plochy pod ložiskem, tomu je potřeba zamezit.

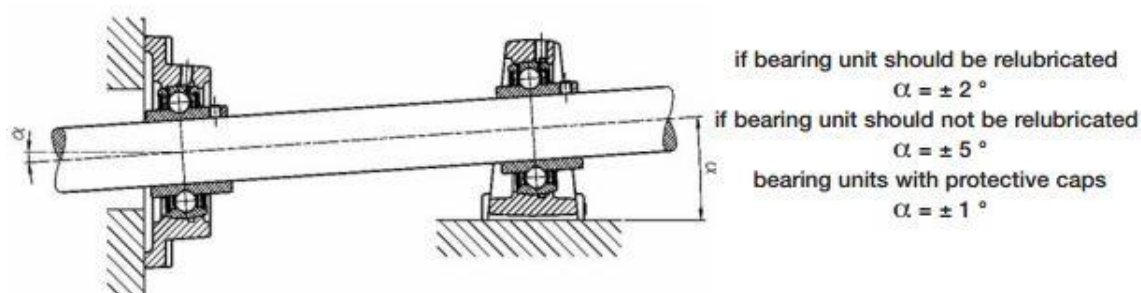
Pod ložiska jsou umístěny těsnící kroužky, které zamezí prokluzu vnitřního kroužku ložiska. Těsnící kroužky jsou z materiálu EPDM 70 a jsou vhodné pro páru a horkou vodu. Dále jsou odolné některým tlakovým kapalinám (brzdové), ředěným kyselinám a louhům (prací louh), ozónu a povětrnostním vlivům. Teplotní rozsah vhodný pro použití je  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+130\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Obr. 38 Úchylny hřídele a vnitřního kroužku ložiska (rozměry v  $\mu\text{m}$ )

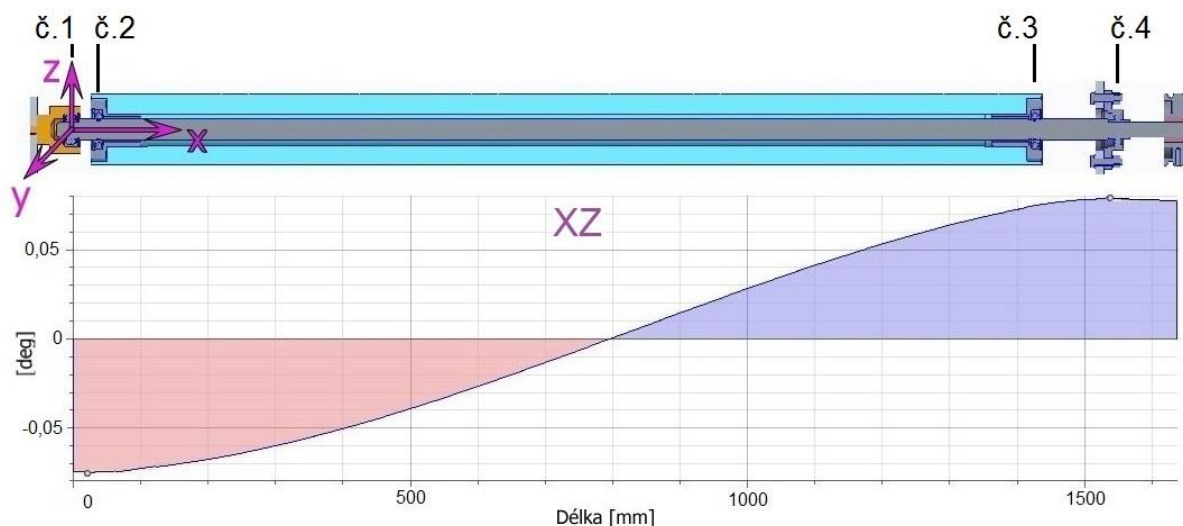
### 5.4.5 NAKLOPENÍ LOŽISEK

Jednořadá kuličková ložiska nejsou vhodná pro vyrovnávání nesouososti. Přípustné naklopení vnitřního kroužku vůči vnějšímu, které nevyvolá nepřipustné přídavné zatížení v ložisku, závisí na radiální vnitřní vůli ložiska za provozu, velikosti ložiska, vnitřní konstrukci, silách a momentech, které působí na ložisko. Jelikož vzájemná závislost všech těchto vlivů je velmi složitá, přesné hodnoty nelze uvést. V závislosti na různých vlivech však činí přípustné naklopení zpravidla 2 až 10 úhlových minut, tedy 0,033 až 0,166 úhlových stupňů. Jakékoli naklopení ložiskových kroužků podstatně zvýší hlučnost a zkrátí provozní trvanlivost ložiska. [5]



Obr. 39 Naklopení ložiskových jednotek SNR [12]

Použité ložiskové jednotky SNR mají dovolené naklopení  $\pm 2^\circ$  [12] a naklápěcí ložisko FBJ má maximální dovolené naklopení  $1,5^\circ$  [13] viz příloha P2. Z níže uvedené Tab. 10 je zřejmé, že při průměru hřídele 30 mm zvolená ložiska na naklopení vyhovují.



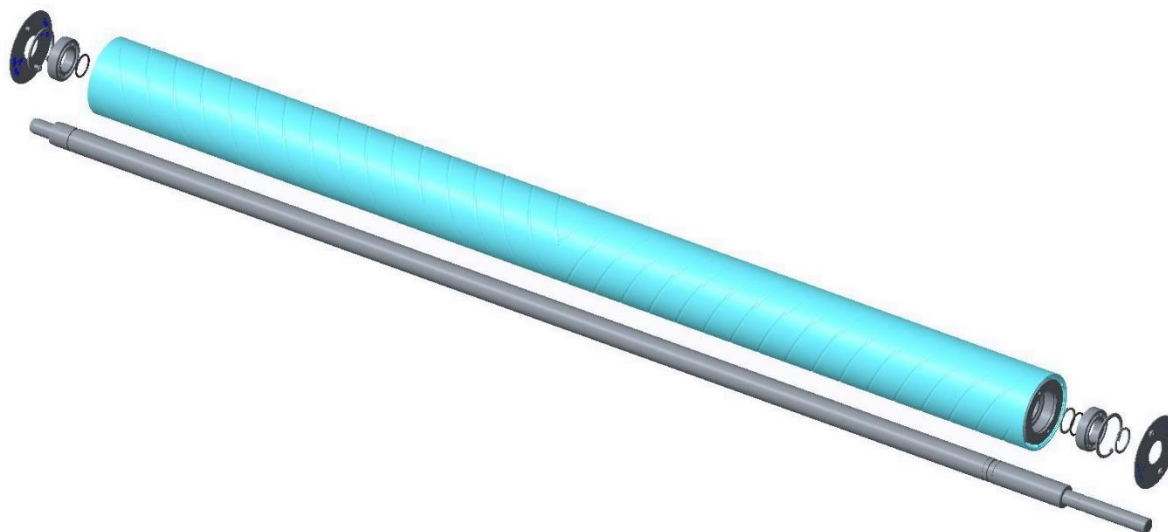
Obr. 40 Úhel průhybu hřídele v rovině XZ ( $\varnothing 30$  mm,  $L=1634$ mm)

Naklopení ložisek				
ložisko č.	1	2	3	4
naklopení [°]	0,076	0,073	0,075	0,079

Tab. 10 Hodnoty naklopení jednotlivých ložisek

## 5.5 MONTÁŽ SESTAVY VÁLCE A HŘÍDELE

Pojištění axiálního posuvu vodícího válce na hřídeli je v podstatě možno provést třemi způsoby. Ve všech třech případech jsou k tomu použity dva hřídelové pojistné kroužky, které mohou být rozmístěny tak, že je u levého ložiska použit jeden pojistný kroužek a druhého ložiska druhý pojistný kroužek (varianta A). U dalších dvou variant jsou oba pojistné kroužky buď u levého ložiska (varianta B), nebo u pravého ložiska (varianta C). Varianty A, B a C jsou dále podrobněji popsány v následujících kapitolách 5.5.1, 5.5.2 a 5.5.3. V kapitole 5.5.7 je poté provedeno tabulkové porovnání (ne)výhod těchto variant a výběr nejvhodnější varianty.

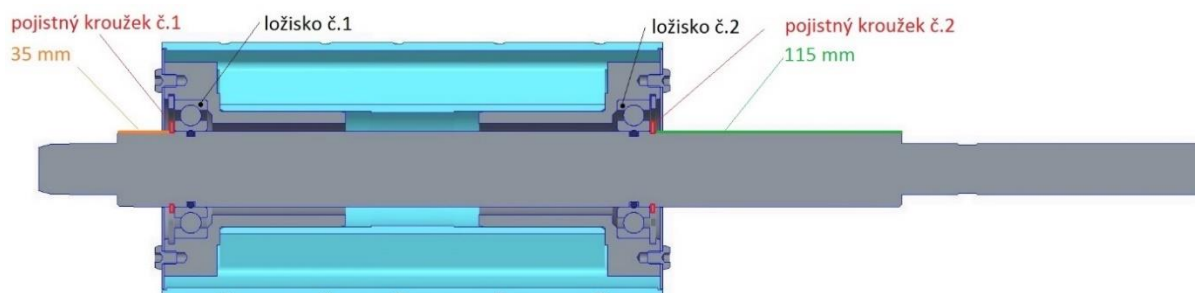


*Obr. 41 Pohled na díly sestavy válce a hřídele*

Z důvodu opakování se u všech třech variant, nejsou v kapitolách 5.5.1, 5.5.2 a 5.5.3 v postupech montáže sestavy válce a hřídele stále dokola vypisovány tyto kroky: nasazení těsnícího kroužku č. 1 a č. 2 (pro zamezení prokluzu vnitřního kroužku ložiska viz kapitola 5.4.4) a montáž vnějšího pojistného kroužku č. 1 a č. 2 u obou ložisek.

Jako válec je ve všech případech myšlena podsestava válce s již nalisovanými čely, do kterých se lisují ložiska válce.

### 5.5.1 VARIANTA A: JEDNOSTRANNÉ AXIÁLNÍ ZAJIŠTĚNÍ OBOU LOŽISEK



Obr. 42 Varianta A uložení vodícího válce na hřídeli

#### MOŽNOST Č. 1

1. Nalisovat ložisko č. 1 do válce
2. Protáhnout hřídel skrze nalisované ložisko č. 1 (část 35 mm dlouhá)
3. Přetáhnout ložisko č. 2 přes hřídel (část 115 mm dlouhá) a nalisovat do válce
4. Nasadit oba pojistné kroužky

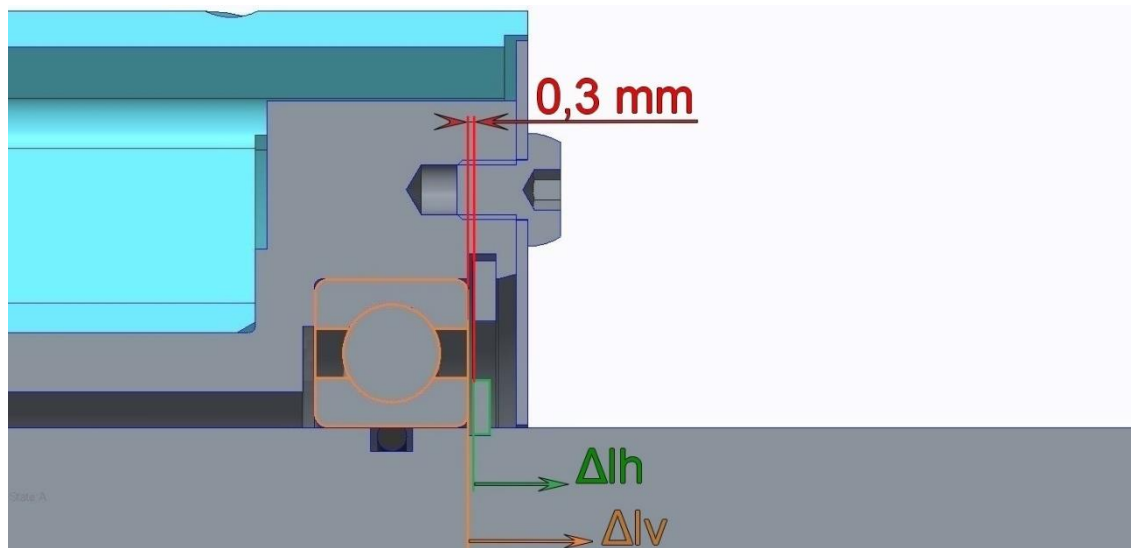
#### MOŽNOST Č. 2

1. Nalisovat ložisko č. 2 do válce
2. Protáhnout hřídel skrze nalisované ložisko (část 115 mm dlouhá)
3. Přetáhnout ložisko č. 1 přes hřídel (část 35 mm dlouhá) a nalisovat do válce
4. Nasadit oba pojistné kroužky

Vzhledem k rozměrům a hmotnosti válce i hřídele není ani jedna z možností jednoduchá. Jednodušší z nich je ale určitě možnost č. 1, protože se hřídel skrze nalisované ložisko protahuje přes kratší vzdálenost (35 vs. 115 mm).

Nevýhoda této varianty ale je, že vzhledem k teplotám 90° C v sušícím tunelu a smyslu umístění pojistných kroužků, je nutno mít v axiálním směru větší než jen montážní vůli. Je potřeba brát v úvahu teplotní roztažnost ocelové hřídele i duralového válce.

Na následující straně je proveden rozbor potřebné vůle s uvažováním teploty 90° C, kdy je uvažována nulová referenční teplota. Rozdíl mezi počáteční a koncovou teplotou je tedy 90° C, což zapříčiní vyšší potřebnou vůli a tím pádem malou rezervu vůči případné kolizi ložiska a pojistného kroužku hřídele.



Obr. 43 Teplotní roztažnost hřídele a vodícího válce

Montážní vůli je nutno přizpůsobit teplotní roztažnosti hřídele a válce. Materiál hřídele je ocel 11 373 s teplotním součinitelem roztažnosti  $\alpha_h = 11,1 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ . Válec je z duralové slitiny, která má  $\alpha_v = 23 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ , nalisovaná ocelová čela pro ložiska nemají na teplotní délkovou roztažnost válce vliv. Změna délky hřídele a válce je vypočítána dle následujícího vztahu

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta t \quad (8)$$

$$\Delta l_h = \alpha_h \cdot l_h \cdot \Delta t = 11,1 \cdot 10^{-6} \cdot 1634 \cdot 90 = 1,632 \text{ mm} \quad (9)$$

$$\Delta l_v = \alpha_v \cdot l_v \cdot \Delta t = 23 \cdot 10^{-6} \cdot 1370 \cdot 90 = 2,836 \text{ mm} \quad (10)$$

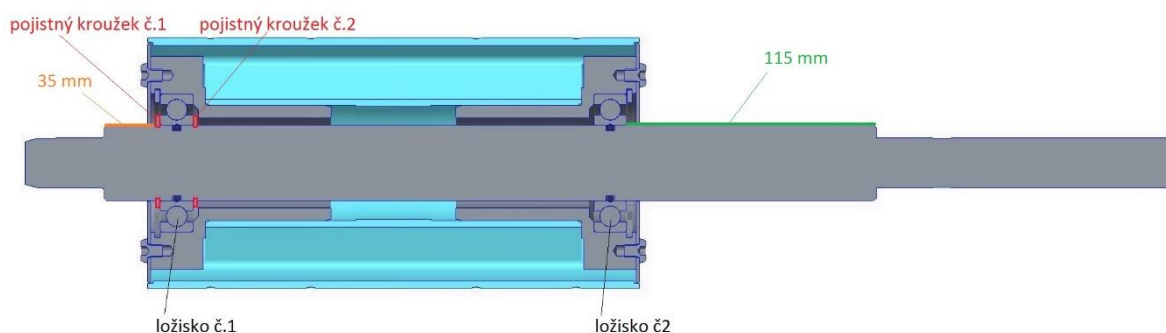
Válec má větší součinitel teplotní roztažnosti než hřídel. Ložisko, které by mohlo přijít do kolize s hřídelovým pojistným kroužkem je nalisováno přes vnější kroužek do válce (do ocelového čela válce). Je tedy nutné, aby součet počáteční vůle a hodnoty, o kterou se prodlouží hřídel (a s ní i pojistný kroužek hřídele), byl větší, než hodnota o kterou se prodlouží válec. Tedy aby platila následující nerovnice.

$$0,3 + 0,5 \cdot \Delta l_h > 0,5 \cdot \Delta l_v \quad (11)$$

Po dosazení z (9) a (10) ale nerovnice (11) neplatí. Aby se tedy mohla použít varianta A, musela by se montážní vůle mezi pojistným kroužkem hřídele a ložiskem zvětšit minimálně o 0,302 mm, tedy na hodnotu minimálně 0,602 mm. Tato vůle vzniká na obou stranách a dohromady tak vytváří v axiálním směru celkovou vůli 1,2 mm, v které se může válec volně pohybovat. Ve skutečnosti by se ale hodnota 0,602 mm navýšila ještě o nějakou rezervu, např. na 0,65 mm nebo 0,7 mm a mezera v axiálním směru by dosahovala až 1,5 mm.



## 5.5.2 VARIANTA B: OBOUSTRANNÉ AXIÁLNÍ ZAJIŠTĚNÍ LOŽISKA Č1



Obr. 44 Varianta B uložení vodícího válce na hřídeli

### POSTUP Č. 1

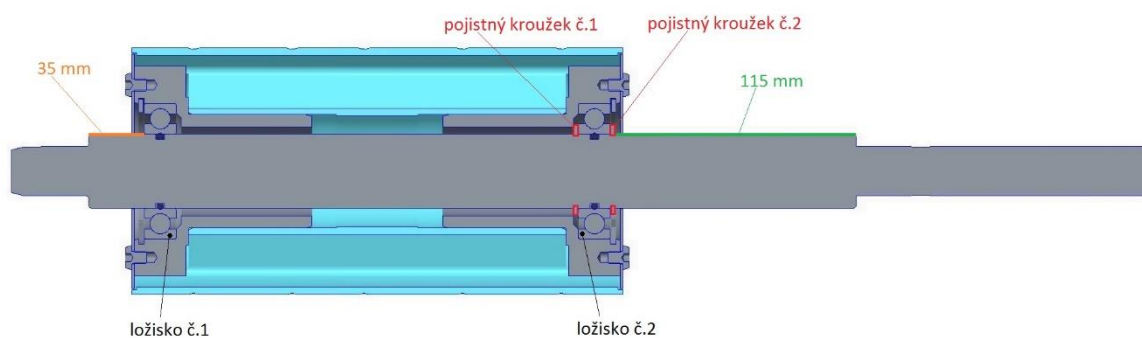
1. Nalisovat ložisko č. 1 do válce
2. Protáhnout hřídel skrze nalisované ložisko (část 35 mm dlouhá) s připraveným pojistným kroužkem č. 2 – kolize pojistného kroužku a nalisovaného čela ve válci
3. Přetáhnout ložisko č. 2 přes hřídel (část 115 mm dlouhá) a nalisovat do válce
4. Nasadit pojistný kroužek č.1

### POSTUP Č. 2

1. Nalisovat ložisko č. 2 do válce
2. Protáhnout hřídel skrze nalisované ložisko (část 115 mm dlouhá) s připraveným pojistným kroužkem č. 2
3. Přetáhnout ložisko č. 1 přes hřídel (část 35 mm dlouhá) a nalisovat do válce
4. Nasadit pojistný kroužek č. 1

Vzniklá kolize v postupu č. 1 je vysvětlena v kapitole 5.5.4.

### 5.5.3 VARIANTA C: OBOUSTRANNÉ AXIÁLNÍ ZAJIŠTĚNÍ LOŽISKA Č.2



Obr. 45 Varianta C uložení vodícího válce na hřídeli

#### POSTUP Č. 1

1. Nalisovat ložisko č. 1 do válce
2. Protáhnout hřídel skrze nalisované ložisko (část 35 mm dlouhá) s připraveným pojistným kroužkem č. 1
3. Přetáhnout ložisko č. 2 přes hřídel (část 115 mm dlouhá) a nalisovat do válce
4. Nasadit pojistný kroužek č. 2

#### POSTUP Č. 2

1. Nalisovat ložisko č. 2 do válce
2. Protáhnout hřídel skrze nalisované ložisko (115 mm) s připraveným pojistným kroužkem č. 1 - kolize pojistného kroužku a nalisovaného čela ve válci
3. Přetáhnout ložisko č. 1 přes hřídel (část 35 mm dlouhá) a nalisovat do válce
4. Nasadit pojistný kroužek č. 2

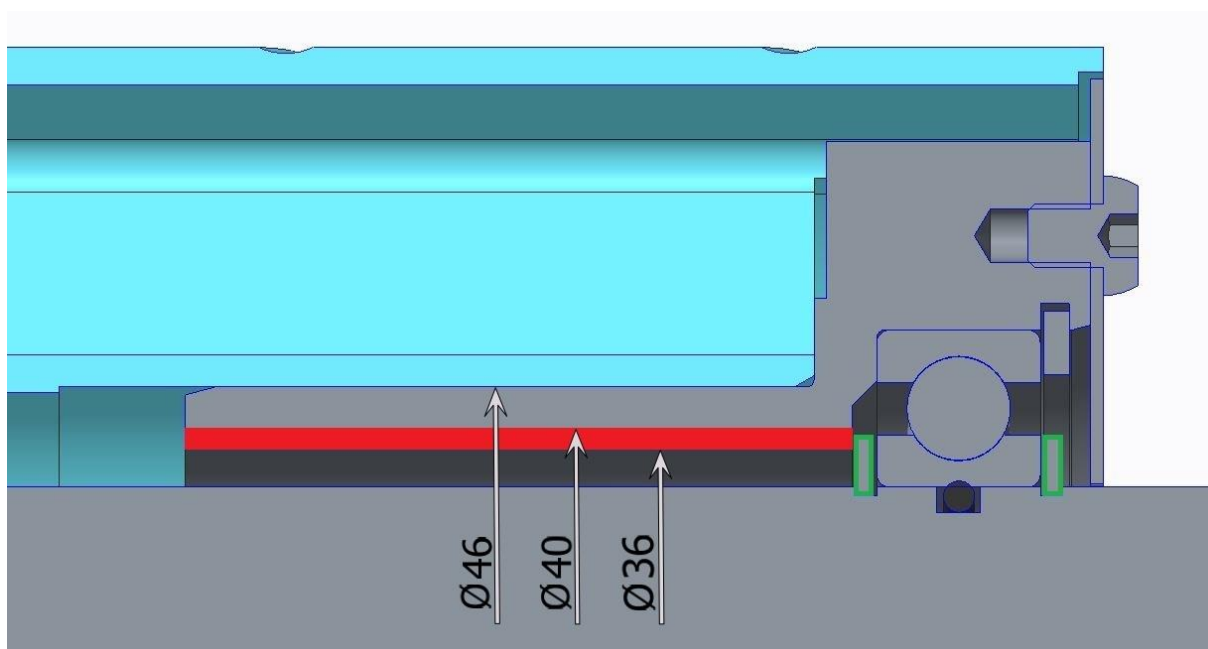
Vzniklá kolize v možnosti č. 2 je popsána v kapitole 5.5.4.

### 5.5.4 VZNIKLÁ KOLIZE - POPIS

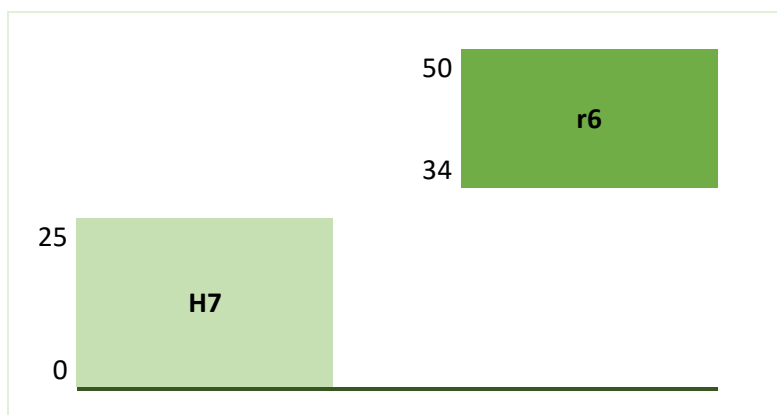
U varianty B - postupu č. 1 a varianty C - postupu č. 2 vzniká při protahování hřídele skrze nalisované ložisko kolize mezi pojistným kroužkem a vnitřním průměrem čela válce. Vnitřní průměr 36 mm je menší než průměr 38,441 mm kružnice reprezentující kolidující rozměr pojistného kroužku viz Obr. 48 na další straně.

Průměr 36 mm by tedy bylo nutno upravit na hodnotu alespoň 40 mm. Na další straně v kapitole 5.5.5 respektive 5.5.6, je provedena napěťová analýza nalisovaného spoje vodícího válce s původním a upraveným čelem, který by měl vnitřní průměr 40 mm. Na vnějším průměru čela 46 mm je uložení vůči válci H7/r6.

Pro napěťovou analýzu byl brán nejhorší případ, kdy je díra ve válci vyrobena s nulovou úchylkou a průměr čela válce s horní úchylkou 50  $\mu\text{m}$ . Přesah pro lisování je tedy 50  $\mu\text{m}$  viz Obr. 47.



Obr. 46 Kolize vložky ložiska ve válci s pojistným kroužkem



Obr. 47 Uložení čela ve válci (úchylky v  $\mu\text{m}$ )

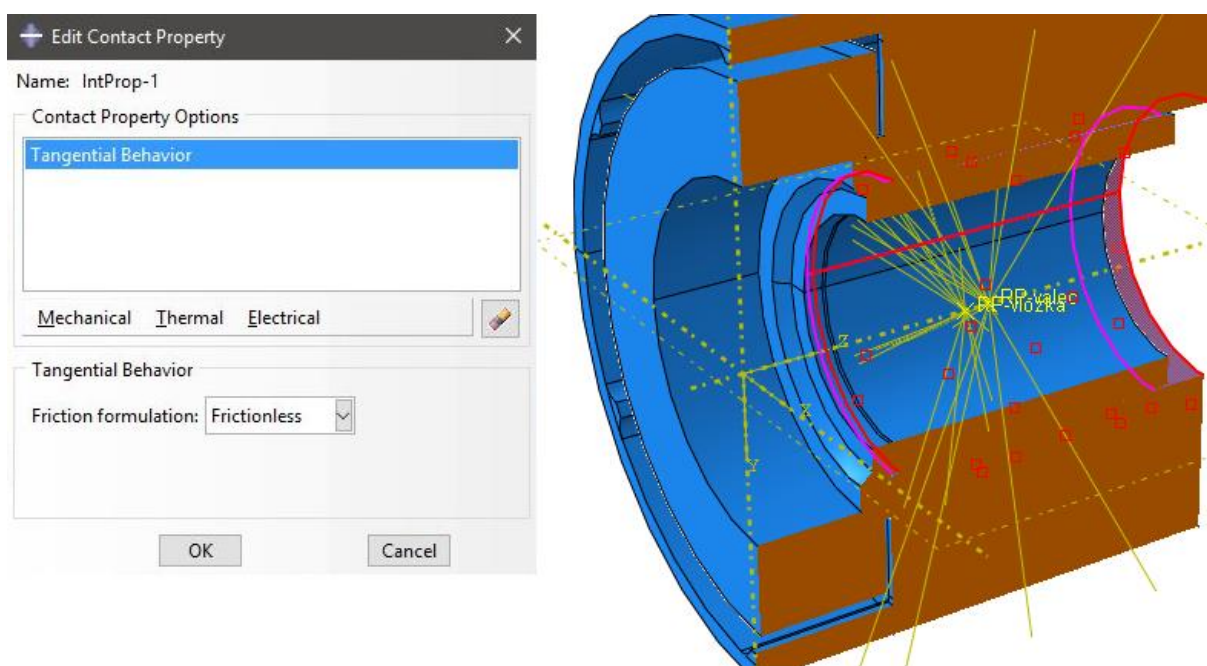


Obr. 48 Kolidující rozměr (kružnice pojistného kroužku - zeleně)

### 5.5.5 VZNIKLÁ KOLIZE - POSTUP VÝPOČTU NAPĚTÍ

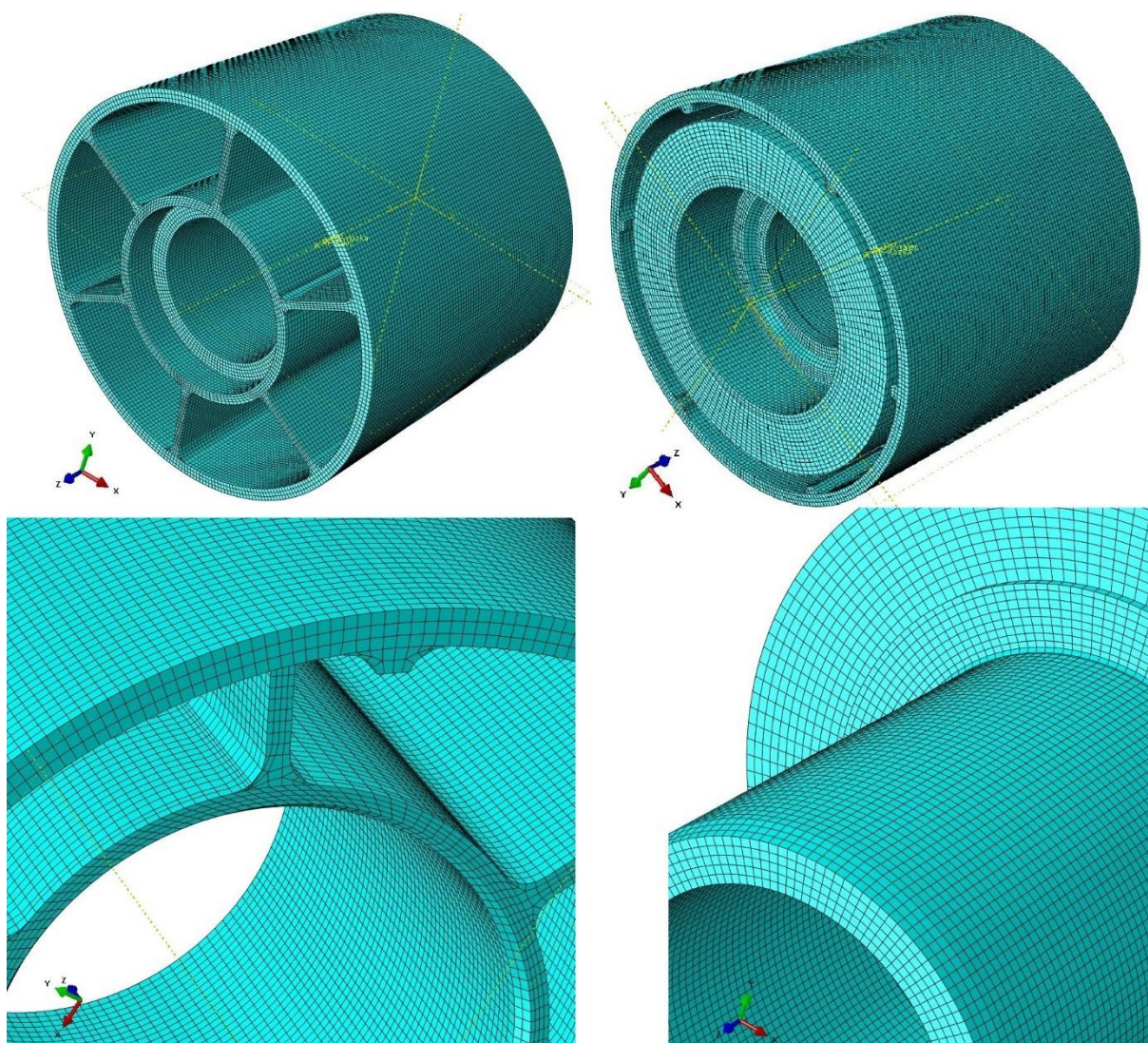
Pro zjištění vzniklého napětí ve válci a nalisovaném čele válce pro následné porovnání napětí v čele s původním vnitřním průměrem, byl použit opět program Abaqus. Analýza byla provedena na koncové části válce v oblasti, kde je nalisované čelo viz Obr. 49 vpravo.

Úloha byla řešena jako kontaktní bez tření (frictionless) viz Obr. 49 vlevo. Nastavení bylo takto provedeno z důvodu, že byla zjišťována pouze změna napětí při rozdílné tloušťce stěny čela válce. Nebyla zjišťována například potřebná lisovací síla.



Obr. 49 Řez sestavy koncové části válce s nalisovaným čelem v programu Abaqus (vpravo) a nastavení vlastnosti kontaktu bez tření (vlevo)





Obr. 50 Pohled na vysítovanou sestavu válce (koncové části) a čela válce

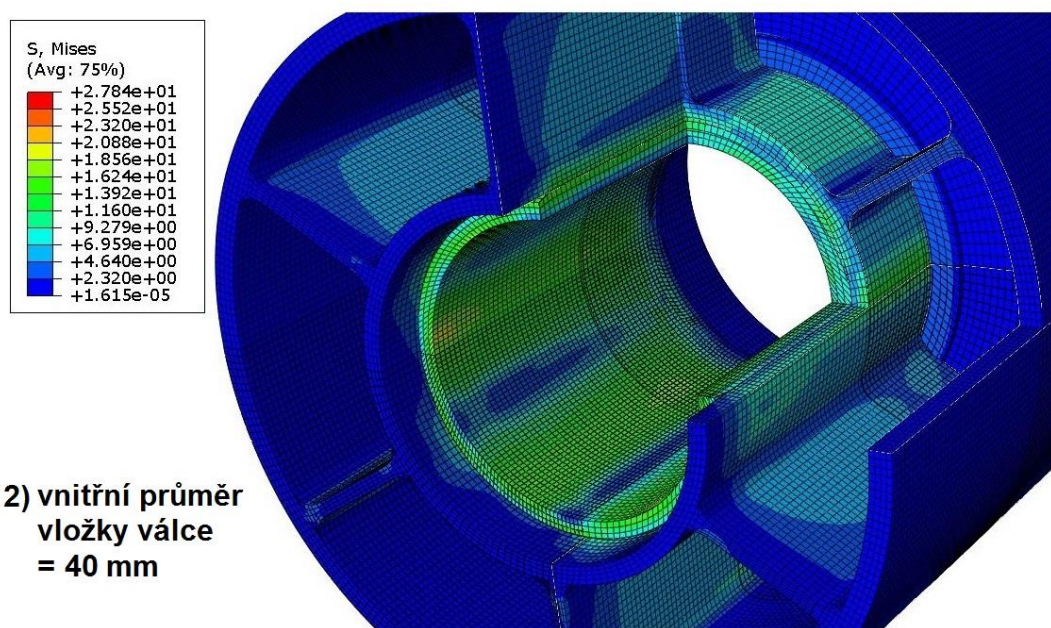
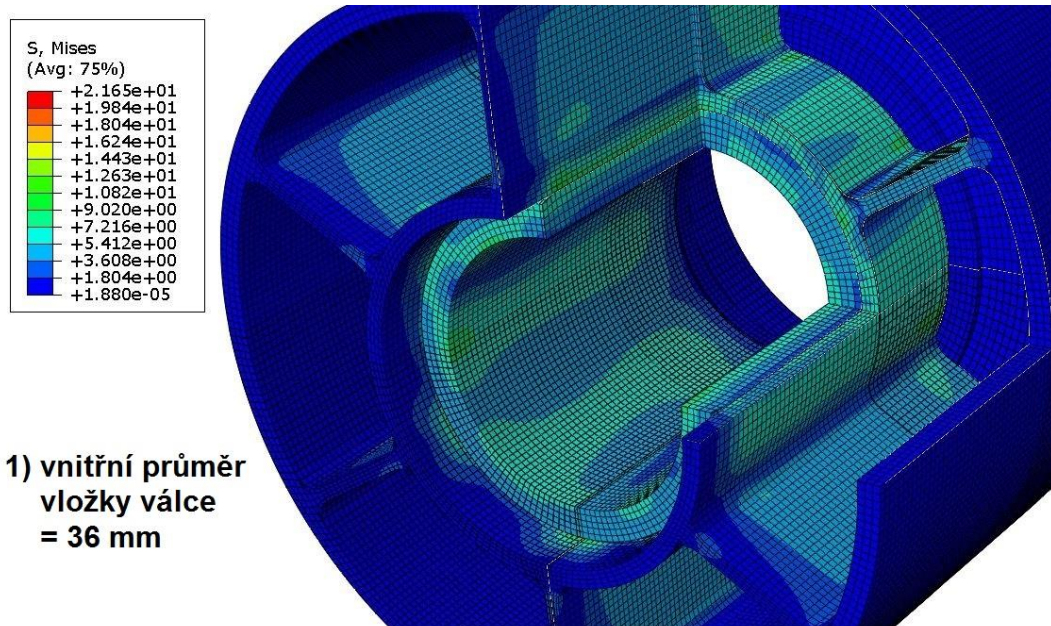
Na Obr. 50 nahoře je vidět síť celé sestavy – pohledy z obou stran. V dolní polovině tohoto obrázku je detail sítě válce i čela válce.

V obou případech jsou použity prvky tvaru HEX (krychle) kterých je potřeba k pokrytí stejné oblasti mnohem méně, oproti TET prvkům (čtyřstěny). Díky tomu bylo možno síť udělat velice jemnou a vejít se do limitu počtu prvků, daným studentskou licencí programu.

Aby bylo možno použít prvky tvaru HEX, musel se válec i čelo válce rozdělit na suboblasti, které topologicky vyhovují pro rozdělení na krychličky (bricky) a splňují požadavky pro velikosti prvků na křivkách, plochách atd. Výhodou takové sítě je podstatně menší počet vygenerovaných prvků a uzlů a tedy nižší výpočtové časy a paměťové požadavky, než při použití automatického generování čtyřstěny. Jelikož nebyly očekávány velké deformace, tak byly použity lineární prvky.



### 5.5.6 VZNIKLÁ KOLIZE - ZJIŠTĚNÉ NAPĚTÍ

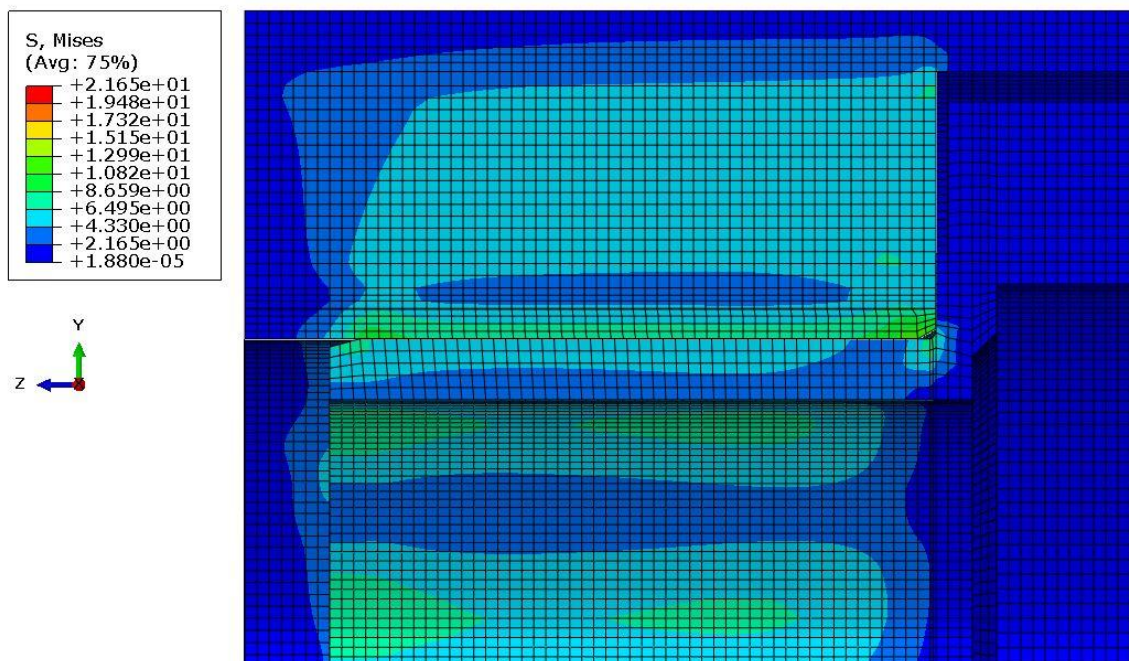


Obr. 51 Napětí v nalisovaném spoji (řez třemi rovinami) vodícího válce a čela válce

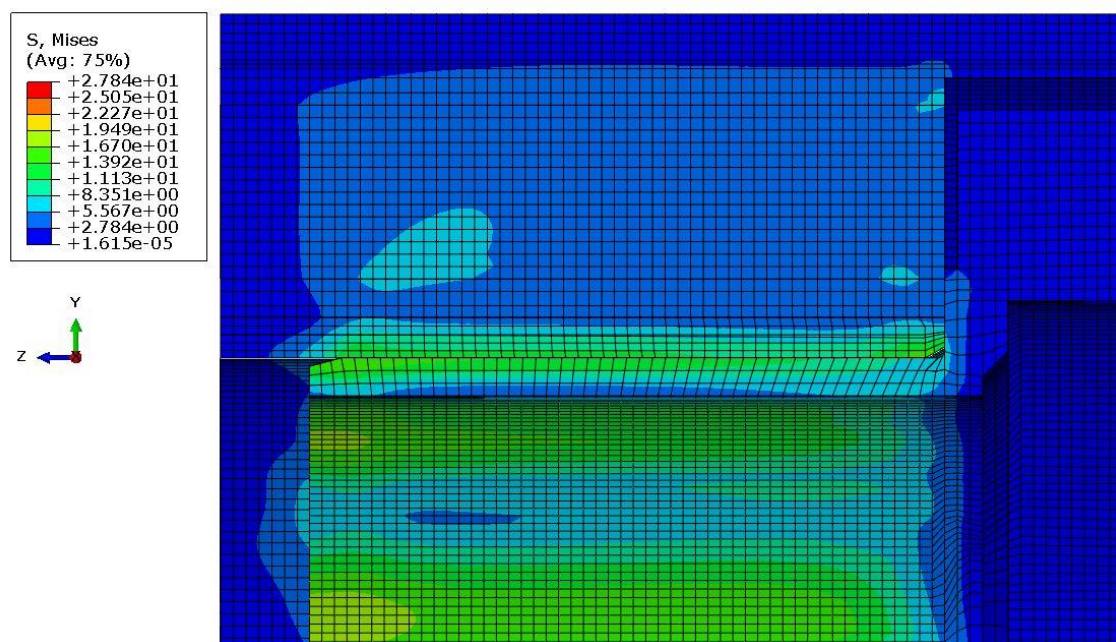
Z Obr. 51, na kterém je zobrazeno napětí v nalisovaném spoji čela válce a válce, je patrné, že největší napětí jsou mezi vnitřním žebrováním válce a na válcové části čela válce které je do válce nalisováno. V místech pod žebrováním válce je vidět ztelný pokles napětí. Největší napětí je v prvním případě  $21,65 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$  a v druhém případě  $27,84 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ . Obě hodnoty jsou napěťové špičky, které vznikly deformací geometrie při modelování a nejsou proto započteny do výsledků. Nejvyšší reálné napětí, které na součástech vzniká, má hodnotu okolo  $10 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$  v prvním případě a  $14 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$  v druhém případě. Tyto hodnoty jsou lépe vidět na Obr. 52 a Obr. 53 na následující straně.



Mez kluzu oceli S235 použité na čela válce je  $235 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$  a mez kluzu duralové slitiny, z které jsou vyrobeny vodící válce, se pohybuje okolo  $60 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ . S ohledem na vznikající napětí v obou součástech je v obou případech zaručena vysoká bezpečnost vůči meznímu stavu pružnosti. Z hlediska pevnosti tedy čelo válce vyhovuje dle očekávání jak v původním provedení s vnitřním průměrem nalisované části 36 mm, tak v provedení se zvětšeným průměrem na hodnotu 40 mm. Problém by teoreticky mohl nastat z technologického hlediska – obrábění tolerované části (r6) při tloušťce stěny 3mm.



Obr. 52 Napětí v rovině řezu, která jde skrze žebro válce - verze 1)



Obr. 53 Napětí v rovině řezu, která jde skrze žebro válce - verze 2)



### 5.5.7 SOUHRN – VOLBA NEJVHODNĚJŠÍ VARIANTY POSTUPU

Souhrn						
Varianta	varianta A		varianta B		varianta C	
Postup č.	č.1	č.2	č.1	č.2	č.1	č.2
axiální vůle [1]	ANO	ANO	NE	NE	NE	NE
Protáhnutí hřídele [mm]	35	115	35	115	35	115
kolize [1]	NE	NE	ANO	NE	NE	ANO

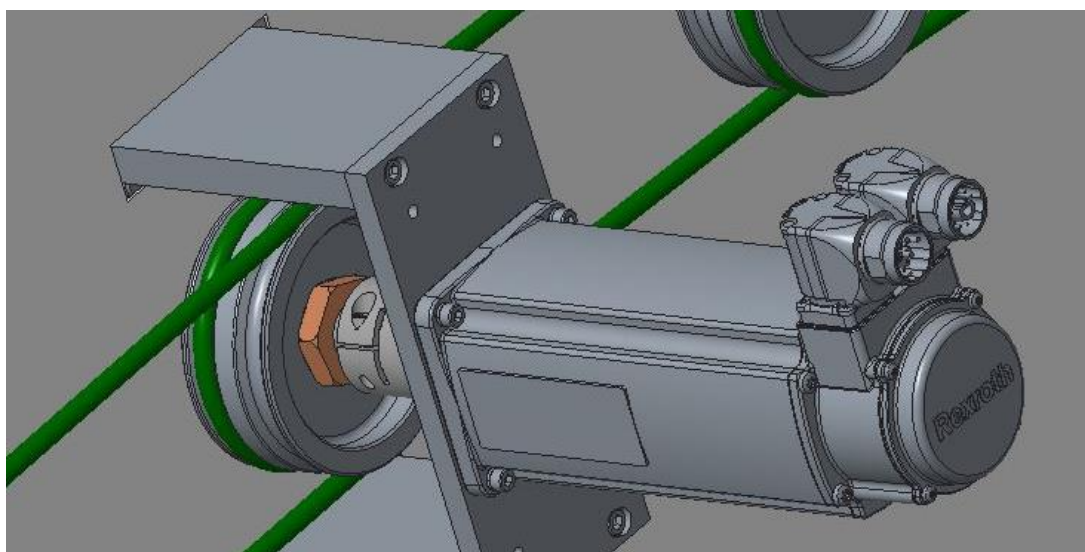
Tab. 11 Klady a zápory jednotlivých variant montáže sestavy válce a čela válce

Vůli, díky které by se válec mohl ve vymezeném prostoru v axiálním směru po hřídeli pohybovat, je lepší nemít, než mít. Varianta A tedy byla zamítnuta jako první.

Manipulačně jednodušší je přetahovat ložisko přes hřídel, než protahovat hřídel skrze již nalisované ložisko, navíc v případě potřeby je možno část hřídele o délce 35 mm, která se protahuje skrze ložisko, obrobit na průměr se zápornou tolerancí, nebo i na menší rozměr a tím si tento úkon usnadnit. Obrábět takto průměr části hřídele o délce 115 mm je nevýhodnější oproti obrábění části hřídele o délce 35 mm. Varianty (možnosti) u kterých se protahuje hřídel skrze ložisko po délce 35 mm, jsou tedy vhodnější. Jako kandidát na nejvhodnější postup montáže tedy zůstala varianta B (postup č. 1) a varianta C (postup č. 1).

V předchozí kapitole 5.5.6 bylo zjištěno, že napětí v upraveném čele válce vyhovuje v obou případech, ale protože varianta C (postup č. 1) je vlastně shodná s variantou B (postup č. 1) a nevyžaduje úpravu čela válce, je tedy varianta C (postup č.1) nejvhodnější.

## 5.6 NÁVRH POHONU



Obr. 54 Pohon vodících válců – Servomotor Bosch Rexroth MSK040C-0450

Moment potřebný k rozběhu je vypočítán dle následujícího vztahu

$$M_R = M_M + M_H + M_K + M_{\ddot{R}} + M_{\ddot{R}M} + M_S \quad (12)$$

Kde

$M_M = I_M \cdot \alpha$  je moment motoru

$M_H = K_h \cdot I_h \cdot \alpha$  je moment hřídelí

$M_{\ddot{R}} = K_{\ddot{R}} \cdot I_{\ddot{R}} \cdot \alpha$  je moment řemenice

$M_{\ddot{R}M} = K_{\ddot{R}M} \cdot m_{\ddot{R}M} \cdot a_{\ddot{R}} \cdot r_{\ddot{R}}$  je moment řemene

$M_S = I_S \cdot \alpha$  je moment spojky

Kde

$I_M, I_h, I_{\ddot{R}}, I_S$  je moment setrvačnosti motoru, hřídele, řemenice a spojky

$K_h, K_{\ddot{R}}, K_{\ddot{R}M}$  je počet kusů hřídelí, řemenic a řemenů

$\alpha$  je úhlové zrychlení

$a_{\ddot{R}}$  je zrychlení řemenu

$m_{\ddot{R}M}$  je hmotnost jednoho řemenu

$r_{\ddot{R}}$  je střední poloměr řemenice

### 5.6.1 VÝPOČET ÚHLOVÉHO ZRYCHLENÍ A ZRYCHLENÍ ŘEMENU

Stroj se rozbíhá z nulové rychlosti na hodnotu  $v_1 = 300 \text{ m/min}$ , kterému odpovídají otáčky  $n_1 = 954,9 \text{ min}^{-1}$ , za dobu rozběhu  $t_r = 10 \text{ s}$ . Úhlové zrychlení je vypočteno následovně:

$$\alpha = \frac{\omega_1}{t_r} = \frac{n_1 \cdot \pi \cdot 2}{t_r \cdot 60} = \frac{954,9 \cdot \pi \cdot 2}{10 \cdot 60} = 9,99 \approx 10 \text{ rad/s}^2 \quad (13)$$

$$a_{\ddot{R}} = \frac{v_1}{t_r} = \frac{300}{60 \cdot 10} = 0,5 \text{ m/s}^2 \quad (14)$$

### 5.6.2 PARAMETRY SOUČÁSTÍ POHONU VÁLCŮ

Další potřebné parametry pro dosazení do rovnice (12) jsou v následující tabulce. Momenty setrvačnosti vyráběných dílů jsou zjištěné z parametrů 3D modelů v programu ProEngineer (viz výřezy obrazovky v příloze P3 a P4). Parametry spojky, řemenu a motoru jsou převzaty z katalogových listů viz příloha P5, P6 a P7.

Značení	Parametr	Jednotka	Hodnota
$I_h$	Moment setrvačnosti hřídele viz P3	$[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	0,00094
$I_{\ddot{R}}$	Moment setrvačnosti řemenice viz P4	$[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	0,001937
$I_s$	Moment setrvačnosti spojky P5	$[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$	0,0001
$m_{\ddot{R}}$	Hmotnost 1 metru řemenu viz P6	$[\text{kg/m}]$	0,06
$r_{\ddot{R}}$	Střední poloměr řemenice	$[\text{m}]$	0,05
$K_h$	Počet kusů hřídelí	$[1]$	16
$K_{\ddot{R}}$	Počet kusů řemenic	$[1]$	16
$K_{\ddot{R}M}$	Počet kusů řemenů	$[1]$	15

Tab. 12 Parametry součástí pohonu válců

### 5.6.3 HMOTNOST JEDNOHO ŘEMENU $m_{\ddot{R}M}$



Obr. 55 Řemen Habasit Polycord R8

Délka jednoho řemene  $L_{\ddot{R}}$  viz Obr. 55 je

$$L_{\ddot{R}} = 2 \cdot L_R + 2 \cdot \pi \cdot R = 2 \cdot 287,3 + 2 \cdot \pi \cdot 98 = 882,48 \text{ mm} \quad (15)$$

Jedná se o délku řemenu po nasazení na řemenice, kdy dojde k prodloužení o 8%.





Délka řemenu v neprodlouženém stavu je tedy

$$L_{\check{R}0} = 882,48 \cdot 0,92 = 811,88 \text{ mm} \quad (16)$$

A hmotnost jednoho řemenu tedy je

$$m_{\check{R}M} = L_{\check{R}0} \cdot m_{\check{R}} = 0,811 \cdot 0,06 = 0,049 \text{ kg} \quad (17)$$

### 5.6.4 MOMENT POTŘEBNÝ K ROZBĚHU

K výpočtu potřebného momentu na rozběh celé soustavy, použijeme vztah (12), kde jednotlivé části jsou vypočítány pomocí parametrů z Tab. 12 a vztahů (13), (14) a (17).

$$M_V = K_h \cdot I_h \cdot \alpha = 16 \cdot 0,000940 \cdot 10 = 0,15 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (18)$$

$$M_{\check{R}} = K_{\check{R}} \cdot I_{\check{R}} \cdot \alpha = 16 \cdot 0,001937 \cdot 10 = 0,31 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (19)$$

$$M_{\check{R}M} = K_{\check{R}M} \cdot m_{\check{R}M} \cdot a_{\check{R}} \cdot r_{\check{R}} = 15 \cdot 0,049 \cdot 0,5 \cdot 0,05 = 0,028 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (20)$$

$$M_S = I_S \cdot \alpha = 0,0001 \cdot 10 = 0,001 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (21)$$

Moment potřebný k rozběhu soustavy je tedy

$$M_R = 0,0014 + 0,15 + 0,31 + 0,028 + 0,001 = 0,49 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (22)$$

### 5.6.5 VÝPOČET POTŘEBNÉHO VÝKONU

Potřebný výkon je

$$P = M_R \cdot \omega = \frac{M_R \cdot n_m \cdot 2 \cdot \pi}{60} = \frac{0,49 \cdot 1591 \cdot 2 \cdot \pi}{60} = 82 \text{ W} \quad (23)$$

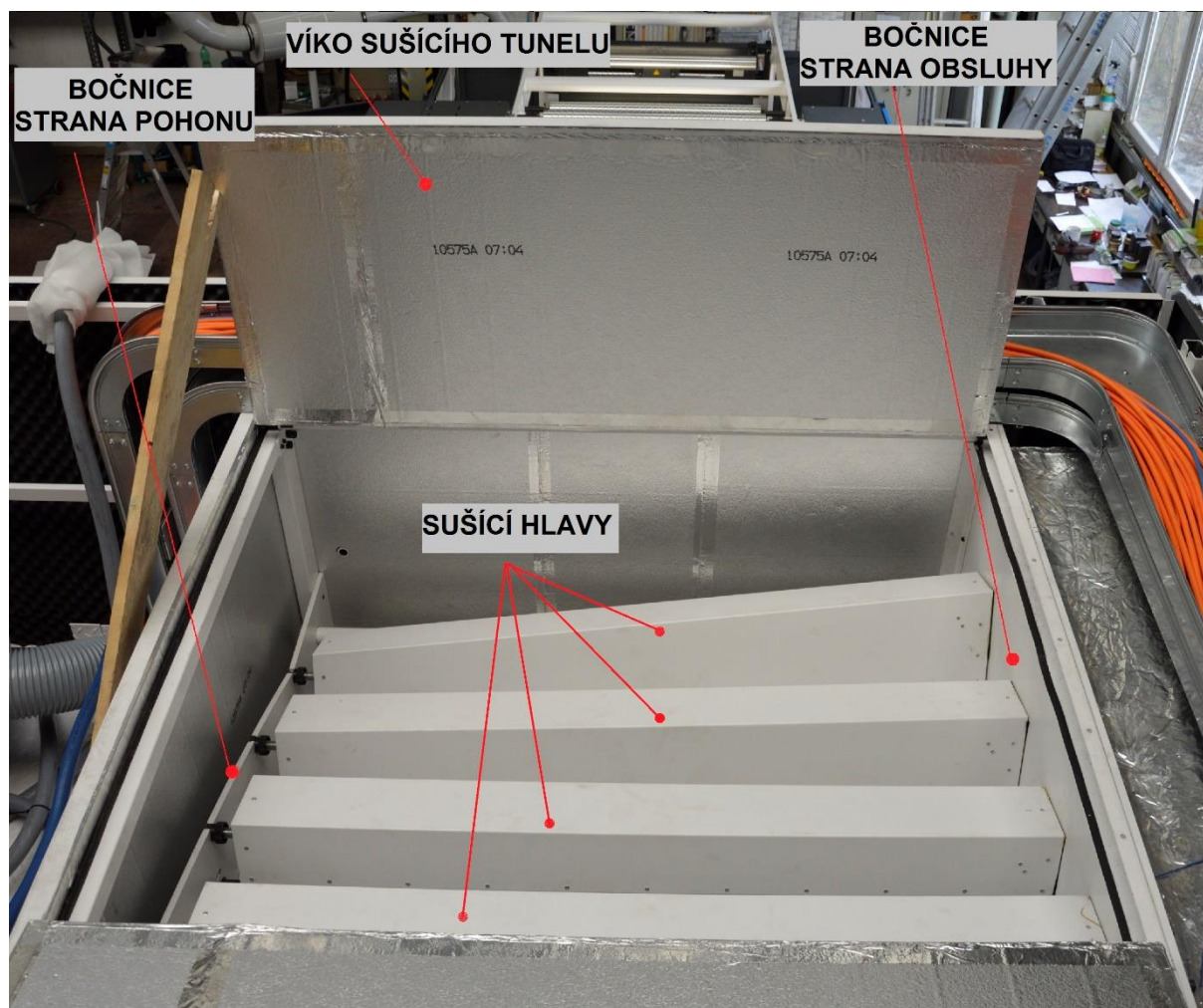
### 5.6.6 VÝBĚR MOTORU

Na základě hodnot vypočtených v předešlých kapitolách 5.6.4 a 5.6.5 byl zvolen servomotor Bosch Rexroth MSK040C-0450. Základní parametry motoru jsou v následující tabulce. Katalogový list zvoleného servomotoru viz příloha P7.

Základní parametry motoru BOSH Rexroth MSK040X-0450			
Max. rychlost	Kroutící moment	Max. kroutící moment	Moment setrvačnosti
$n_{\text{MAX}}$	$M_0$	$M_{\text{max}}$	$I$
[ot/min]	[N·m]	[N·m]	[kg·m <sup>2</sup> ]
6000	2,7	8,1	0,00014

Tab. 13 Parametry motoru

## 5.7 DEMONTÁŽ VÁLCE ZE SUŠÍČÍHO TUNELU

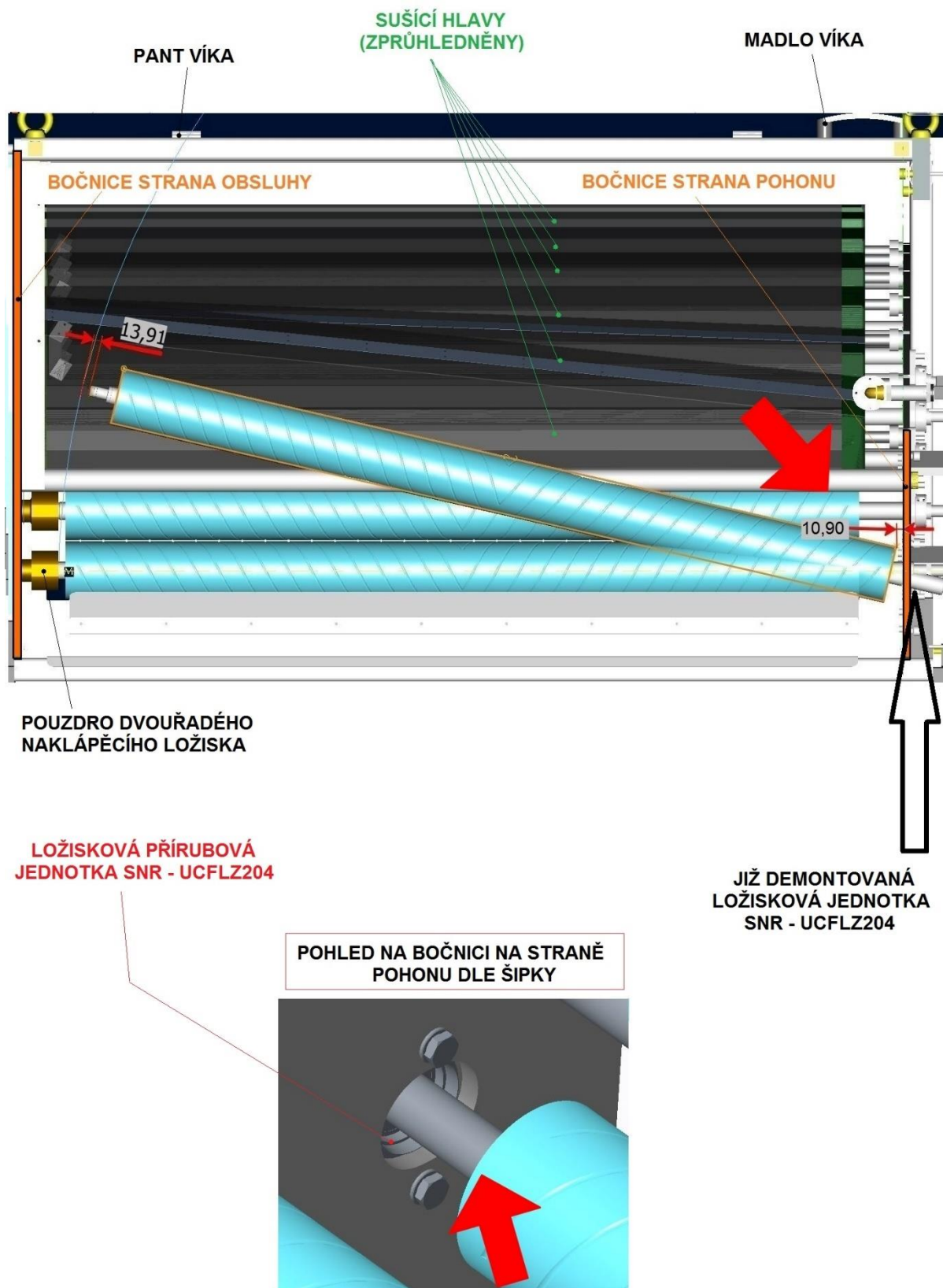


Obr. 56 Pohled na otevřený sušící tunel

Součástí zadání této práce je požadavek na možnost demontáže vodících válců ze sušícího tunelu skrze jeho víko. V případě jakékoliv poruchy nebo nějakého problému, kdy by bylo potřeba demontovat jeden nebo i více vodících válců, je vhodné, aby bylo možné tuto operaci provést bez nutnosti rozebrání celého sušícího tunelu (myšleno celý rám včetně bočnic, krytů, izolace atd.).

Ověření tohoto požadavku bylo provedeno přímo v programu ProEngineer v kompletní sestavě sušícího tunelu. Nejdříve se demontuje přírubové ložisko z bočnice na straně pohonu. Poté se sestava válce s hřídelí vysune z dvouřadého naklápěcího ložiska, které je v pouzdru přišroubovaném k bočnici na straně obsluhy. Z Obr. 57 je vidět, že mezi čelem již dostatečně povysunutého, plus natočeného válce a bočnicí na straně pohonu, je stále mezera necelých 11 mm. K takovému natočení je přizpůsoben rozměr otvoru v bočnici sušícího tunelu, který je na Obr. 57 vidět z pohledu označeného červenou šipkou. Je tedy zřejmé, že dále nic nebrání válec ze sušícího tunelu skrze víko vytáhnout.





Obr. 57 Demontáž vodícího válce ze sušícího tunelu



## 6 ZÁVĚR

V této práci jsem se zabýval návrhem nové koncepce pohonu a uložení vodících válců v sušícím tunelu flexotiskového stroje OPTIMA<sup>2</sup>.

První část práce je zaměřena na popis firmy SOMA, rešerši problematiky flexotisku a popisu stroje OPTIMA<sup>2</sup>.

V druhé části práce je provedena analýza původních řešení vodících válců v sušících tunelech flexotiskových strojů firmy SOMA a popis nevýhody původní koncepce vodících válců s pohonem.

Návrh nové koncepce v další části práce se skládá z návrhu hřídele na základě vlastních frekvencí, volbě vhodných ložisek hřídele a vodícího válce a dále problematikou montáže sestavy hřídele a vodícího válce. Součástí práce je také návrh vhodného servomotoru a ověření možnosti demontáže válce skrze víko sušícího tunelu. Součástí práce není návrh a výpočet kruhového řemenu, protože byl převzat řemen z původního řešení vodících válců s pohonem, ze stroje PREMIA.

Byla vytvořena kompletní výrobní výkresová dokumentace. Součástí této práce je ale mezi přílohami zařazen pouze výkres sestavy.



## 7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Historie společnosti. Soma Engineering [online]. [cit. 2016-06-30]. Dostupné z: <http://www.soma-eng.com/cs/profil-spolecnosti/historie-spolecnosti>
- [2] Soma (společnost). In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2016-07-07]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Soma\\_\(spole%C4%8Dnost\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Soma_(spole%C4%8Dnost))
- [3] Tisková technika flexotisk [online]. Olomoucký kraj [cit. 2016-06-28]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1789>
- [4] PAVLAS, Petr. Návrh optimalizovaného řešení konstrukce a suportu formového a rastrového válce flexotiskového barevníku. Brno, 2014. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Doc. Ing. RADEK KNOFLÍČEK, Dr.
- [5] SKF Hlavní katalog. SKF, 2007, 1130 s. Katalog 600 CS
- [6] BATRAK, Yuriy. Lateral vibration prediction issues. London, 2010. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/77016324/6/Lateral-vibration-equation>
- [7] Soma Engineering. Mapy Google [online]. Lanškroun, 2014 [cit. 2016-07-07]. Dostupné z: <https://goo.gl/maps/r1LEiVNbnX12>
- [8] Elastomere Sleeves. HANS KAPPL GmbH & Co.KG Flexodruckformen [online]. Nürnberg, 2016 [cit. 2016-06-28]. Dostupné z: <http://www.kappl.de/de/sleeves.html>
- [9] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické Tabulky. Čtvrté doplněné vydání. Úvaly: Albra, 2008. ISBN 978-80-7361-051-7.
- [10] PÍŠTĚK, Václav. Pevnost a životnost. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1993, 205 s. ISBN 80-214-0474-4.
- [11] ABAQUS: software na prověřování funkčnosti konstrukčních řešení. Technet.cz [online]. 2013 [cit. 2016-07-08]. Dostupné z: [http://sdeleni.idnes.cz/abaqus-software-na-proverovani-funkcnosti-konstrukcnich-reseni-ph6-/tec\\_sdeleni.aspx?c=A130419\\_164804\\_tec\\_sdeleni\\_ahr](http://sdeleni.idnes.cz/abaqus-software-na-proverovani-funkcnosti-konstrukcnich-reseni-ph6-/tec_sdeleni.aspx?c=A130419_164804_tec_sdeleni_ahr)
- [12] SNR ball bearing units with cast iron or pressed steel housings. France, c2006-2016, (Code NAF 291H), 199 s.
- [13] 2204-2RS-TVH. Motion industries: Keeping Industry in Motion [online]. 1605 Alton Rd. Birmingham, c2001-2016 [cit. 2016-07-09]. Dostupné z: <https://www.motionindustries.com/productDetail.jsp?sku=00129083>
- [14] Stručný popis programu. Vackerhorn [online]. [cit. 2016-07-09]. Dostupné z: <http://www.vachekhorn.cz/images/KISSsoft-preklad.htm>
- [15] Původní návod k použití Optima2. Lanškroun, 2016, 209 s.



## 8 SEZNAM SYMBOLŮ A ZNAČEK

Značka	Popis	jednotka
$M_1$	První naměřená hodnota obvodové rychlosti vodícího válce	[m/min]
$M_2$	Druhá naměřená hodnota obvodové rychlosti vodícího válce	[m/min]
$M_\emptyset$	Průměr hodnot $M_1$ a $M_2$	[m/min]
$\sigma_d$	Dovolené napětí materiálu	[N·mm <sup>-2</sup> ]
$R_e$	Mez kluzu materiálu	[N·mm <sup>-2</sup> ]
$k$	Bezpečnost k mezi kluzu	[1]
$v_m$	Maximální rychlost stroje	[m/min]
$n_m$	Maximální otáčky stroje	[min <sup>-1</sup> ]
$\Omega_i$	Kritická úhlová rychlost	[Hz]
$i$	Řád harmonické složky	[1]
$L_h$	Délka hřídele	[mm]
$E$	Modul pružnosti v tahu	[N·mm <sup>-2</sup> ]
$J$	Kvadratický moment průřezu hřídele	[mm <sup>4</sup> ]
$\rho$	Hustota materiálu	[kg·mm <sup>-3</sup> ]
$S$	Plocha průřezu hřídele	[mm <sup>2</sup> ]
$F_T$	Tah materiálu	[N]
$F_{TV}$	Výsledná složka tahu materiálu	[N]
$F_{gV}$	Tíhová síla válce	[N]
$F_{gh}$	Tíhová síla hřídele	[N]
$F_{gř}$	Tíhová síla řemenice	[N]
$F_{Ř}$	Síla v jedné větvi řemene od předepnutí	[N]
$F_{ŘV}$	Výsledná síla od řemene	[N]
$R_{h1,2}$	Reakce v ložisku č.1 a č.2 hřídele	[N]
$R_{v1,2}$	Reakce v ložisku č.1 a č.2 válce	[N]
$L_1$	Vzdálenost mezi těžištěm hřídele a $R_{h1}$	[mm]
$L_2$	Vzdálenost mezi těžištěm hřídele a $R_{h2}$	[mm]
$L_3$	Vzdálenost mezi těžištěm řemenice a $R_{h2}$	[mm]
$L$	$L_1+L_2+L_3$	[mm]
$X$	Vzdálenost mezi $R_{v1}$ a $R_{v2}$	[mm]
$d$	Vnitřní průměr ložiska	[mm]
$D$	Vnější průměr ložiska	[mm]



Značka	Popis	jednotka
$C_r$	Základní dynamická únosnost ložiska	[kN]
$C_{or}$	Statická únosnost ložiska	[kN]
$F_{min}$	Minimální radiální zatížení ložiska	[N]
$m$	Hmotnost ložiska	[kg]
$\alpha_h$	Součinitel teplotní roztažnosti hřídele	[°C <sup>-1</sup> ]
$\alpha_v$	Součinitel teplotní roztažnosti válce	[°C <sup>-1</sup> ]
$\Delta l$	Změna délky	[mm]
$\Delta t$	Změna teploty	[°C]
$\Delta l_h$	Změna délky hřídele	[mm]
$\Delta l_v$	Změna délky válce	[mm]
$l_h$	Délka hřídele	[mm]
$l_v$	Délka válce	[mm]
$M_R$	Moment potřebný k rozběhu	[N.m]
$M_M$	Moment motoru	[N.m]
$M_H$	Moment hřídele	[N.m]
$M_{\check{R}}$	Moment řemenice	[N.m]
$M_{\check{R}M}$	Moment řemene	[N.m]
$M_S$	Moment spojky	[N.m]
$I_M$	Moment setrvačnosti motoru	[kg·m <sup>2</sup> ]
$I_h$	Moment setrvačnosti hřídele	[kg·m <sup>2</sup> ]
$I_{\check{R}}$	Moment setrvačnosti řemenice	[kg·m <sup>2</sup> ]
$I_S$	Moment setrvačnosti řemenu	[kg·m <sup>2</sup> ]
$K_h$	počet kusů hřídelí	[1]
$K_{\check{R}}$	počet kusů řemenic	[1]
$K_{\check{R}M}$	počet kusů řemenů	[1]
$\alpha$	Úhlové zrychlení	[rad·s <sup>-2</sup> ]
$a_{\check{R}}$	Zrychlení řemenu	[m·s <sup>-2</sup> ]
$m_{\check{R}M}$	Hmotnost jednoho řemenu	[Kg]
$r_{\check{R}}$	Poloměr řemenice (střední)	[m]
$t_r$	Doba rozběhu	[s]
$L_{\check{R}}$	Délka jednoho řemenu	[mm]
$L_R$	Rozteč mezi řemenicemi	[mm]
$L_{\check{R}0}$	Délka řemene v neprodouženém stavu	[mm]
$P$	Výkon motoru	[W]

## 9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Sídlo firmy SOMA s.r.o. [7]	2
Obr. 2	Schéma flexotiskové jednotky [3]	3
Obr. 3	Tisková forma – sleeve [8]	5
Obr. 4	Tisková deska ve formě rovinného štočku [4]	5
Obr. 5	Flexotisková forma – fotopolymer [3]	6
Obr. 6	Flexotiskový barevník [4]	8
Obr. 7	Schéma flexotiskového stroje s tiskovými jednotkami v řadě za sebou [4]	9
Obr. 8	Schéma flexotiskového stroje s tiskovými jednotkami ve sloupcích nad sebou [4]	10
Obr. 9	Schéma flexotiskového stroje se satelitním uspořádáním tiskových jednotek [4]	11
Obr. 10	Flexotiskové stroje firmy Soma	12
Obr. 11	Model stroje Optima2	13
Obr. 12	Průtah materiálu strojem Optima2	14
Obr. 13	Sušící hlavy v sušícím tunelu	15
Obr. 15	Výstup potiskovaného materiálu ze sušícího tunelu	16
Obr. 14	Pohled na zavřený sušící tunel	16
Obr. 16	Sušící tunel se zvýrazněnými vodícími válci – verze bez pohonu	17
Obr. 17	Sušící tunel se zvýrazněnými vodícími válci – verze s pohonem	17
Obr. 18	Sestava vodícího válce- verze bez pohonu	18
Obr. 19	Sestava vodícího válce – verze s pohonem	18
Obr. 20	Původní koncepce s pohonem - bez krytů, izolace, sušících hlav atd.	19
Obr. 21	CAD vs. reálný model sušícího tunelu stroje Premia	20
Obr. 23	Číslování jednotlivých válců pro měření	20
Obr. 22	Pohled na měřicí zařízení Testo 470 při měření	20
Obr. 24	Nová koncepce s naznačením roviny řezu (tmavě modře)	22
Obr. 25	Detail nové koncepce (řez) – strana pohonu stroje	23
Obr. 26	Detail nové koncepce (řez) – strana obsluhy stroje	23
Obr. 27	Minimální průměr hřídele	24
Obr. 28	přepočet obvodové rychlosti na otáčky	24
Obr. 29	Pohled na konečněprvkovou síť hřídele	26
Obr. 30	Aplikace funkce kinematic coupling řemenice	27





Obr. 31	Přiřazení hmotnosti řemenice do bodu RP	27
Obr. 32	Model hřídele vytvořený v programu Kisoft	29
Obr. 33	Nastavení výpočtu v Kisoftu - část nastavení parametrů ložisek	30
Obr. 34	Zatížení ložisek hřídele	33
Obr. 35	Boční pohled na zatížení	33
Obr. 36	Zatížení ložisek válce	34
Obr. 37	Pojištění vnitřního kroužku ložiska válce proti protáčení	36
Obr. 38	Úchylky hřídele a vnitřního kroužku ložiska (rozměry v $\mu\text{m}$ )	36
Obr. 39	Naklopení ložiskových jednotek SNR	37
Obr. 40	Úhel průhybu hřídele v rovině XZ ( $\varnothing 30\text{ mm}$ , $L=1634\text{mm}$ )	37
Obr. 41	Pohled na díly sestavy válce a hřídele	38
Obr. 42	Varianta A uložení vodícího válce na hřídeli	39
Obr. 43	Teplotní roztažnost hřídele a vodícího válce	40
Obr. 44	Varianta B uložení vodícího válce na hřídeli	41
Obr. 45	Varianta C uložení vodícího válce na hřídeli	42
Obr. 46	Kolize vložky ložiska ve válci s	43
Obr. 47	Uložení čela ve válci (úchylky v $\mu\text{m}$ )	43
Obr. 48	Kolidující rozměr (kružnice pojistného kroužku - zeleně)	44
Obr. 49	Řez sestavy koncové části válce s nalisovaným čelem v programu Abaqus (vpravo) a nastavení vlastnosti kontaktu bez tření (vlevo)	44
Obr. 50	Pohled na vysíťovanou sestavu válce (koncové části) a čela válce	45
Obr. 51	Napětí v nalisovaném spoji (řez třemi rovinami) vodícího válce a čela válce	46
Obr. 52	Napětí v rovině řezu, která jde skrze žebro válce - verze 1)	47
Obr. 53	Napětí v rovině řezu, která jde skrze žebro válce - verze 2)	47
Obr. 54	Pohon vodících válců – Servomotor Bosch Rexroth MSK040C-0450	49
Obr. 55	Řemen Habasit Polycord R8	50
Obr. 56	Pohled na otevřený sušící tunel	52
Obr. 57	Demontáž vodícího válce ze sušícího tunelu	53



## 10 SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Naměřené hodnoty obvodových rychlostí na jednotlivých válcích	21
Tab. 2	Vlastní frekvence hřídele ( $\varnothing 30$ mm, L=1634mm)	28
Tab. 3	Hodnoty frekvencí při klasickém výpočtu (Kissoft)	30
Tab. 4	Hodnoty frekvencí při zohlednění tuhosti ložiska (Kissoft)	30
Tab. 5	Hodnoty frekvencí hřídele – porovnání výpočtů ( $\varnothing 30$ mm, L=1634mm)	31
Tab. 6	Porovnání hodnot frekvencí pro jednotlivá provedení hřídelí (délka, průřez)	31
Tab. 7	Parametry ložiska FBJ – 2204 2RS	35
Tab. 8	Parametry ložiska SNR – UCFLZ204	35
Tab. 9	Parametry ložiska SKF – 6006 C3	35
Tab. 10	Hodnoty naklopení jednotlivých ložisek	37
Tab. 11	Klady a zápory jednotlivých variant montáže sestavy válce a čela válce	48
Tab. 12	Parametry součástí pohonu válců	50
Tab. 13	Parametry motoru	51



# 11 SEZNAM PŘÍLOH

P1	Průhyb hřídele L = 1634 mm, d = 16 mm (Report)	CD
P2	SNR Ložiskové jednotky (Katalog PDF)	CD
P3	Výřez obrazovky parametrů hřídele (Obrázek)	CD
P4	Výřez obrazovky parametrů řemenice (Obrázek)	CD
P5	RW Spojka EKL (Katalogový list PDF)	CD
P6	Habasit Polycord R-8 (Katalogový list PDF)	CD
P7	Bosch Rexroth MSK (Katalog PDF)	CD
P8	Duté tyče HIWIN (katalogový list)	CD
P9	Ocel ČSN 11373 (materiálový list)	CD
P10	Testo 470 – parametry (list PDF)	CD
P11	Výkres sestavy (PDF, formát A0)	str. 62 + CD

Veškeré přílohy a PDF soubor této diplomové práce, jsou k dispozici na přiloženém CD.

Zmenšený náhled přílohy P11 - výkresu sestavy, je navíc součástí této práce na straně 62.



Příloha P11 - Výkres sestavy pohonu vodičích válců v sušícím tunelu stroje  
OPTIMA<sup>2</sup>

