# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI FAKULTA STROJNÍ

# Katedra textilních a jednoúčelových strojů



# Optimalizace systému rozváděcí tyče rotorových dopřádacích strojů

Optimization of the traversing rod system of rotor spinning machines

# Autoreferát disertační práce

Autor: Ing. Jan Valtera

Liberec 2013

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

# FAKULTA STROJNÍ

# Katedra textilních a jednoúčelových strojů



# Optimalizace systému rozváděcí tyče rotorových dopřádacích strojů

Optimization of the traversing rod system of rotor spinning machines

# Autoreferát disertační práce

Studijní program:	P2301 Stroje a zařízení
Studijní obor:	2301V010 Konstrukce strojů a zařízení
Zaměření:	Textilní stroje
Autor:	Ing. Jan Valtera
Vedoucí práce:	prof. Ing. Jaroslav Beran, CSc.

Liberec 2013

# ROZSAH DISERTAČNÍ PRÁCE A PŘÍLOH:

Počet stran: 100

Počet stran příloh: 68

#### Anotace

Tato práce je zaměřena na systém rozváděcí tyče rotorových dopřádacích strojů. Centrální systém s průběžnou rozváděcí tyčí, vykonávající přímočarý vratný pohyb s proměnnou úvratí, představuje v současnosti jeden z hlavních uzlů limitujících celkový výkon rotorových dopřádacích strojů. Cílem této práce je uplatnění získaných poznatků z dynamického chování systému rozváděcí tyče při jeho optimalizaci za účelem snížení dynamického zatížení a zvýšení přesnosti rozvádění.

V rámci studie a popisu problematiky systému rozváděcí tyče byl vytvořen matematický model v programu MSC.Adams. Parametry rozváděcí tyče použité v matematickém modelu byly zjištěny experimentálně. Výsledky provedené dynamické analýzy modelu, podpořené měřením odpovídajícího systému na zkušebním zařízení, potvrdily vysoké dynamické namáhání systému RT na dopřádacích strojích. Na základě těchto výsledků a poznatků získaných z provedené rešerše známých způsobů akumulace kinetické energie v úvratích rozváděcího pohybu, bylo navrženo nové řešení pro snížení dynamické náročnosti systému rozváděcí tyče. Jedná se o magneto-mechanický akumulátor, umožňující bezkontaktní akumulaci kinetické energie v úvratích pohybu do potenciální energie magnetické pružiny a následně do potenciální energie mechanické pružiny.

Výsledky analýz a testovacích měření ověřily funkčnost prototypu zařízení při rozváděcím pohybu s proměnnou úvratí. Měření systému rozváděcí tyče s akumulátory potvrdilo přínos navrženého řešení ve snížení namáhání rozváděcí tyče i ve snížení maximální odchylky polohy úvratě rozváděcího pohybu na stroji. Provedená analýza konfigurace systému s delší rozváděcí tyčí také prokázala potenciál řešení pro moderní stroje s vyšším počtem sekcí a větší celkovou délkou.

Výsledky potvrdily významný přínos navrženého řešení pro snížení namáhání rozváděcí tyče a přesnosti rozvádění, což z technologického hlediska představuje zvýšení kvality a stejnoměrnosti návinů výstupních cívek rotorového dopřádacího stroje.

### Klíčová slova

Rotorový dopřádací stroj, rozváděcí tyč, vratný pohyb, magnetická pružina, akumulace energie

#### Abstract

This thesis focuses on the system of the traversing rod on rotor spinning machines, where the reciprocating motion with variable dead-end position is required. The central system of continuous traversing rod represents one of the key factors limiting the productivity of nowadays machines. The aim of this work is to gain knowledge of the dynamic behaviour of the system. Consequently, the scientific understanding of the problem is applied in the process of its optimization to reduce the dynamic load and to increase the system accuracy.

In order to study and define the key aspects of the system of the traversing rod, its mathematical model was devised in the software MSC.Adams. From the results of dynamic analyses, as well as from the corresponding system measurement on the testing rig, the target parameters on the system optimization were set. In order to meet these requirements, a new device of kinetic energy accumulation in the dead-end positions of the traversing motion was developed. This device enables a non-contacting kinetic energy accumulation and its transfer to the potential energy of the magnetic spring and also to the potential energy of the mechanical spring.

Both simulations and experiments proved the prototype functionality. The measurement of the system equipped with numbers of accumulators confirmed the benefits of the developed solution. It proved reduction of overall dynamic load and position deviation within the full-length machine. Moreover, the system of traversing rod in configuration for longer machines, and higher number of units respectively, was analysed by means of modified mathematical model. Results clearly demonstrated the potential of the developed device for modern machines with a higher number of units and greater length.

The results confirmed significant contribution of proposed device to reduce the load of traversing rod and traversing motion deviation. From a technological point of view, this solution provides output bobbins of higher quality and winding evenness.

#### Key words

Rotor spinning machine, traversing rod, reversible motion, magnetic spring, energy accumulation

Seznam použitých značek	5
1 Úvod	7
2 Cíle práce	3
3 Současný stav systému RT	)
4 Matematický model systému v programu Adams/View14	1
4.1 Verifikační měření na dlouhém zkušebním zařízení17	7
5 Magneto-mechanický akumulátor	)
5.1 Testy funkčního modelu akumulátoru21	l
6 Uplatnění navrženého řešení a možnosti dalšího výzkumu27	7
6.1 Analýza systému RT s 20-ti sekcemi a polovičním počtem akumulátorů27	7
6.2 Analýza systému RT s 30-ti sekcemi a polovičním počtem akumulátorů	)
6.3 Zhodnocení	l
7 Závěr	2
Literatura	1
Publikace autora	7

# Seznam použitých značek

RT	[-]	Rozváděcí tyč
RTS	[-]	Rozváděcí tyč délky jedné sekce
zzpm	[-]	Dvojzdvih za minutu

$[N.s.m^{-1}]$	Koeficient viskózního tlumení
[N.s.m <sup>-1</sup> ]	Matice koeficientů tlumení v matematickém modelu
[mm]	Odchylka polohy úvratě analyzovaných elementů v modelu RT
<sub>x</sub> [mm]	Maximální odchylka polohy úvratě analyzovaných elementů v modelu
[J]	Kinetická energie rozváděcí tyče
[J]	Potenciální energie
[J]	Potenciální energie magnetického pole
	[N.s.m <sup>-1</sup> ] [N.s.m <sup>-1</sup> ] [mm] [mm] [J] [J] [J]

$F_d$	[N]	Dovolené namáhání rozváděcí tyče
$\mathbf{F}_{\mathbf{v}}$	[N]	Vektor vnějších sil v matematickém modelu
k	$[N.mm^{-1}]$	Tuhost RTS
$\mathbf{k}_{\mathrm{A}}$	$[N.mm^{-1}]$	Tuhost navržené pružiny akumulátoru
Κ	$[N.m^{-1}]$	Matice hodnot tuhostí v matematickém modelu
$L_{RT}$	[mm]	Délka rozváděcí tyče
L <sub>RTS</sub>	[mm]	Délka rozváděcí tyče délky jedné sekce
М	[kg]	Matice hmotností elementů v matematickém modelu
$m_p$	[kg]	Hmotnost přívažků použitých v analýze navýšení hmotnosti RT
$m_{RT}$	[kg]	Celková hmotnost RT včetně komponent na ní připevněných
R	[zzpm]	Rychlost rozvádění – počet dvojzdvihů za minutu
S	[mm]	Poloha rozváděcího pohybu
$s_1$	[mm]	Poloha základního rozváděcího pohybu
$S_{1m}$	[mm]	Amplituda polohy základního rozváděcího pohybu
<b>s</b> <sub>2</sub>	[mm]	Poloha přidruženého pohybu rozmazávání krajů
$S_{2m}$	[mm]	Amplituda polohy přidruženého pohybu rozmazávání krajů
$S_{2max}$	[mm]	Maximální uvažovaná amplituda polohy přidruženého pohybu rozmazávání krajů
$V_z$	[mm]	Zbytková vzdálenost mezi magnety - po dosažení síly předpětí pružiny
Х	[m]	Vektor posuvů prvků matematického modelu
$Z_S$	[mm]	Zdvih rozváděcího pohybu
$Z_{S1}$	[mm]	Zdvih základního rozváděcího pohybu
$Z_{S2}$	[mm]	Zdvih přidruženého pohybu rozmazávání krajů
γ	[°]	Šířka přechodové oblasti rozváděcího pohybu vztažená k natočení virtuální vačky
μ	[mm/rad]	Převod virtuální vačky
ν	[mm/rad <sup>2</sup> ]	Derivace převodu virtuální vačky
φ	[rad]	Úhel natočení virtuální vačky

# 1 Úvod

Od samého počátku průmyslové výroby rotorových dopřádacích strojů byla zavedena koncepce modulární zástavby stroje. V této koncepci je stroj sestavován ze sekcí spojených do série, přičemž veškeré pohony jsou situovány ve skříni pohonů umístěné na jednom konci stroje. Tato koncepce setrvala u většiny výrobců dopřádacích strojů dodnes [1, 7, 9].

Podobně jako v jiných odvětvích je i zde v současnosti snaha o vývoj produktivnějších strojů. To se projevuje zvyšováním provozních rychlostí i větším počtem sekcí stroje. Příkladem může být dopřádací stroj R40 disponující více než 20-ti sekcemi s celkovou pracovní délkou přesahující 47 m, jak ilustruje obrázek 1.



**Obrázek 1:** Ukázka modulární koncepce dopřádacích strojů na příkladu stroje R40 (foto viz [1]).

S narůstající délkou stroje a vyššími provozními rychlostmi vyvstávají ve stávající koncepci stroje značné nároky na jednotlivé konstrukční uzly. Mimo jiné také na rozváděcí systém, který zajišťuje rozvádění příze při jejím navíjení na výstupní cívku. Systém rozváděcí tyče ( zkráceně systém RT) je ve stávajícím centrálním uspořádání jedním z limitujících faktorů zvyšování výkonu stroje. V souvislosti s vývojem moderních a výkonnějších strojů je tudíž optimalizace tohoto systému nezbytným krokem.

## 2 Cíle práce

Hlavním cílem této práce je získání nových poznatků z dynamického chování systému RT v různých režimech a uspořádáních, a uplatnění těchto poznatků při optimalizaci současného systému na rotorových dopřádacích strojích. Při optimalizaci je věnována pozornost především snížení celkového namáhání RT a zvýšení kvality návinu na výstupních cívkách po celé délce stroje. Kritériem optimalizace je zachování stávající délky a konstrukce RT odpovídající 20-ti sekcím, případně její rozšíření na délku pro stroj s 30-ti sekcemi.

RT je na rámu stroje uložena posuvně volně, přičemž svým jedním koncem je připevněna k rozváděcímu mechanismu generujícímu žádanou zdvihovou závislost. Z podstaty připojení zdroje k systému je tak první sekce RT vystavena nejvyššímu namáhání, neboť přenáší sílu celé v sérii spojené soustavy RTS. Dynamické účinky související s průběhem zdvihové závislosti se projevují především v úvratích pohybu, kde dochází k nárůstu hodnot zrychlení a tím i dynamických sil. Optimalizace RT za účelem snížení jejího namáhání je tak zaměřena především na tyto oblasti úvratí pohybu.

Pro naplnění výše uvedených cílů práce, byl stanoven následující postup řešení.

Za účelem ověření chování současného systému RT bude vytvořen matematický model RT s příslušným počtem sekcí. Materiálové parametry budou zjištěny experimentálně pomocí měření vzorků RTS. Matematický model bude sloužit pro dynamickou analýzu a optimalizaci systému. Verifikace modelu bude podpořena měřením odpovídajícího systému na zkušebním zařízení. Výsledky dynamické analýzy současného stavu společně se závěry zpracované rešerše známých způsobů a zařízení pro snížení namáhání u podobných mechanických systémů poslouží pro stanovení požadavků nového zařízení pro snížení namáhání RT.

Nově navržené řešení bude analyzováno v matematickém modelu za účelem ověření jak funkčnosti, tak přínosu v systému RT. Funkční model zařízení bude ověřen pomocí experimentálního měření na krátkém zkušebním zařízení. Po ověření optimálních parametrů zařízení bude provedeno také měření na dlouhém zkušebním zařízení s délkou RT odpovídající stroji s 20-ti sekcemi. Získané poznatky budou vyhodnoceny a porovnány s původním systémem. Na základě výsledků bude proveden návrh systému RT s vyšším počtem sekcí s využitím navrženého řešení.

## 3 Současný stav systému RT

Navíjecí ústrojí na dopřádacích strojích zajišťuje rozvádění příze při jejím navíjení ze spřádací komory na výstupní cívku, jak naznačuje schematický obrázek 2.



**Obrázek 2:** Schematické zobrazení rozváděcího mechanismu a spřádací jednotky s výstupní cívkou.

K zajištění divokého křížového vinutí na výstupní cívce je zapotřebí přízi při jejím navíjení rovnoměrně rozvádět po cívce z jednoho kraje na druhý [6, 7, 45]. Tento přímočarý vratný pohyb, jehož časový záznam vykazuje typický "pilovitý" průběh, se označuje jako rozváděcí pohyb *s*. Rozváděcí pohyb *s* se skládá ze základního rozváděcího pohybu  $s_1$  a přidruženého pohybu  $s_2$ . Běžně používaný zdvih základního rozváděcího pohybu je  $Z_{S1}=148 \text{ mm}$ , zatímco běžně používaný zdvih přidruženého pohybu rozmazávání je  $Z_{S2}=4 \text{ mm}$ .

V textilní terminologii se frekvence rozváděcího pohybu označuje pomocí tzv. dvojzdvihu (zkráceně zzpm). Veličiny rozváděcího pohybu se s výhodou interpretují pomocí úhlu virtuální nebo také fiktivní vačky  $\varphi$ , jejíž otáčky jsou rovnoměrné. Natočení virtuální vačky o jednu otáčku odpovídá jednomu dvojzdvihu rozváděcího pohybu.

Na obrázku 3 je uvedena zdvihová závislost základního rozváděcího pohybu  $s_1$  na natočení virtuální vačky  $\varphi$ . Dále je zde uveden převod  $\mu$  a derivace převodu  $\nu$  virtuální vačky  $\varphi$ . Zdvihová závislost pohybu  $s_1$  se skládá z lineárních a přechodových oblastí. Velikost zrychlení v úvratích pohybu je odvozena od rychlosti rozvádění R a šíře přechodové oblasti  $\gamma$ . Kratší přechodová oblast negativně zvyšuje maximální hodnotu

zrychlení nutnou pro zastavení tyče. Větší přechodová oblast, při níž je úroveň zrychlení nižší, naopak negativně ovlivňuje stavbu cívky a následné technologické operace, kdy dochází k nadměrnému hromadění příze na krajích cívky [6 s.105].



**Obrázek 3:** Charakteristický průběh zdvihové závislosti pohybu  $s_1$ , převodu  $\mu$  a derivace převodu v virtuální vačky  $\varphi$ .

Efekt hromadění příze v důsledku nenulové přechodové oblasti je eliminován pomocí přídavného pohybu  $s_2$  označovaného v textilní terminologii jako tzv. rozmazávání krajů.



**Obrázek 4:** Charakteristický průběh přidruženého pohybu  $s_2$  rozmazávání krajů v závislosti na natočení fiktivní vačky  $\varphi$ .

Přídavný harmonický pohyb rozmazávání krajů  $s_2$  zajišťuje posun středu základního rozváděcího pohybu  $s_1$  v řádu několika jednotek milimetrů, viz obrázek 4. V důsledku tohoto přídavného pohybu  $s_2$  se úvratě rozváděcího pohybu plynule posouvají ze své středové polohy s amplitudou, jejíž hodnota na současných strojích nepřekračuje

zpravidla  $S_{2max}=2 mm$ . Výsledný pohyb rozváděcí tyče *s* tak lze klasifikovat jako přímočarý vratný s proměnnou polohou úvratě.

Na strojích se využívá různých typů rozváděcích systémů. Konvenčním typem je systém s průchozí rozváděcí tyčí společnou pro všechny jednotky stroje.

Rozváděcí tyč zajišťuje přenos požadovaného rozváděcího pohybu od centrálního rozváděcího mechanismu k jednotkám stroje jak naznačuje obrázek 2. Rozváděcí tyč pro plnou délku stroje (dále jen RT) vzniká spojením jednotlivých tyčí o délce jedné sekce (zkráceně RTS) do série pomocí svěrných spojek. Celková délka RT L<sub>RT</sub> je tak dána počtem sekcí stroje, jejichž délka je typicky  $L_{RTS}$  = 2350 mm. S postupným nárůstem délky stroje a provozních rychlostí byla původně ocelová RT nahrazena materiály s nižší měrnou hmotností a vysokou pevností. U stroje BT923 se tak RT skládá z 11-ti RTS ze slitiny hliníku a 9-ti RTS z vysokopevnostního uhlíkového kompozitu [29]. Důvodem kombinace výše uvedených materiálů je dodržení minimálního rozdílu teplotní roztažnosti RT a ocelového rámu stroje [12]. I přes použití těchto nových materiálů dosahuje RT pro 20 sekcí běžně hmotnosti přes 7,5 kg. Dynamické síly vznikající při nerovnoměrně zrychleném pohybu na této přechodové oblasti vystavují RT vysokému namáhání, a to zejména na 1. sekci, kde je RT připojena k rozváděcímu mechanismu. V těchto místech jsou RTS vystaveny tahovým a tlakovým silám, které při vysokých rychlostech navíjení dosahují hodnot dovoleného namáhání RTS  $F_d = 1000 N$ . Z tohoto důvodu se věnuje snížení dynamického namáhání RT vysoká pozornost. Vzhledem k tomu, že další možnosti optimalizace materiálu RTS jsou z ekonomického hlediska značně vyčerpané, jeví se jako efektivní způsob ve vývoji produktivnějších strojů s centrální RT využití akumulace kinetické energie v koncových polohách zdvihu. Během vývoje strojů byly analyzovány různé způsoby snižování dynamických sil RT, z nichž některé byly realizovány v konstrukci strojů řady BD.

Za základní předpoklady efektivního akumulátoru na dlouhé RT jsou považovány konstrukční jednoduchost, spolehlivost a nízká cena umožňující použití na více místech podél RT. Z pohledu buzení a šíření nežádoucích vibrací je také výhodné vyhnout se mechanickým kontaktům RT s tělesy akumulátoru.

Jako základní široce používaný prvek dorazů lze označit pryžové akumulátory, nebo též pryžové pružiny. Jedná se o spolehlivý ekonomicky nenáročný prvek schopný absorbovat kinetickou energii v úvratích pohybu do deformační energie. Nevýhodou

použití těchto prvků je přímý mechanický kontakt se členy na RT, což může generovat rázy. Dalším nedostatkem je relativně nízká životnost takto cyklicky namáhaných pryžových prvků.

Dalším používaným způsobem akumulace energie v koncových polohách přímočarého pohybu s proměnným zdvihem je použití pružin různých typů a uspořádání. Zařízení popsané v patentovém spisu číslo WO2008/058605 [14] využívá k akumulaci kinetické energie soustavu válcových tlačných pružin, viz obrázek 5. Tuhost pružinového systému se zde vyznačuje dvěma stupni, přičemž v první fázi stlačení pružinového systému narůstá vyvozená síla strměji než ve druhé fázi.



**Obrázek 5:** *Pružinový akumulátor rozváděcího pohybu dle WO2008058605 [14].* 

Pneumatické akumulátory a tlumiče představují další široce používanou skupinu tlumících prvků koncových poloh vratných pohybů. V roce 1989 uvedla firma Schlafhorst & Co systém akumulace pomocí sofistikované soustavy vzájemně propojených pneumatických válců. Tento systém [17] využívá oboustranné koncepce rotorového dopřádacího stroje. Předpokladem efektivního využití tohoto systému je vzájemně opačný smysl vratného pohybu RT na každé straně dopřádacího stroje. Na každé RT jsou na začátku a na konci umístěny pneumatické válce. Písty válců jsou spolutvořeny průchozí RT. Řízeným přepouštěním vzduchu z válců jedné strany na druhou lze docílit optimálního tlumení, přičemž v případě potřeby je vzduch do systému doplněn ze vzdušníků. Tímto způsobem lze ovládat tlak ve válcích a sílů působící na RT.

Další pneumatický systém navržený pro eliminaci dynamických sil RT byl zpracován firmou Novibra GmbH [18]. Toto zařízení využívá řízeného pneumatického prvku jako přídavného motoru na volný konec RT. Žádaná poloha na rozváděcím mechanismu je elektronicky přenášena na ovládací prvky pneumatického motoru. Stlačený vzduch ve válci je regulován tak, aby žádaná poloha RT na volném konci odpovídala poloze na rozváděcím mechanismu. Přídavný pohyb rozmazávání krajů je řešen příslušným posuvem pneumatického válce vůči rámu stroje dle parametrů pohybu rozmazávání.

Díky stlačitelnosti vzduchu nedochází u těchto systémů k buzení rázových sil na RT. Hlavní nevýhodou tohoto systému je však relativně vysoká cena zařízení a nutnost použití přídavného pohonu pro posuv pneumatického válce. Další nevýhodou jsou ztráty systému v důsledku tření mezi těsnícími prvky.

Vzhledem k náročnosti na těsnost a dosažitelnou životnost nebyly tyto systémy na rotorových dopřádacích strojích realizovány.

Další řešení [19], vyvinuté ve firmě VÚTS, a.s., využívá k bezkontaktní akumulaci odpudivých sil permanentních magnetů. Pro vyšší účinnost jsou permanentní magnety sestaveny z magnetických segmentů tvořících Halbachův řetězec [20]. V úvratích pohybu vlivem přibližování narůstá odpudivá síla a dochází tak k akumulaci kinetické energie rozváděcího pohybu do energie magnetického pole. Při opětovném urychlování RT z úvratě tuto energii magnetické dvojice opět předávají do systému RT. Změna zdvihu rozvádění vlivem přídavného pohybu rozmazávání je eliminována relativním posunem magnetů vůči rámu, který je zajišťován přídavným servomotorem.

Všechna uvedená řešení v zásadě umožňují zvýšení provozních rychlostí či délky RT. Většina uvedených zařízení však nebyla z důvodu vysoké ceny, složitosti a vysokých nároků na zajištění potřebné životnosti realizována v konstrukci strojů. Jejich širšímu využití brání především vysoká cena přídavných pohonů nutných pro zajištění pohybu rozmazávání. Výjimkou je systém se soustavou válcových tlačných pružin, který je možné díky své jednoduchosti umístit na více místech po délce RT. Nevýhodou však zůstává mechanický doraz posuvných hmotných prvků akumulátoru s prvky RT, který způsobuje rázy a snižuje životnost zařízení.

13

## 4 Matematický model systému v programu Adams/View

Cílem matematického popisu RT je vytvořit model, který umožní dynamickou analýzu RT a následně optimalizaci systému RT za účelem snížení dynamických účinků na rozváděcí mechanismus. Dále by měl model umožňovat snadnou implementaci nových prvků do soustavy. Systém RT je popsán na základě následujících předpokladů:

• Matematický popis systému je zaměřen především na RT. Pohyb rozváděcího mechanismu jako nedílné součásti rozváděcího systému je popsán pomocí kinematického buzení s ideálně tuhou budicí křivkou, která je odvozena od žádané hodnoty pohonu mechanismu. S přihlédnutím k vysoké tuhosti pohonu s vačkovým nebo klikovým mechanismem [7, 21] lze považovat míru zkreslení vzniklého absencí dynamického chování pohonu za přijatelnou.

• Pro matematický popis soustavy RT je zvolena diskretizační metoda. Tato metoda popisuje spojitá tělesa RTS diskrétně jako soustavu hmotných elementů vzájemně spojených pomocí vazeb reflektujících vlastnosti materiálu. Při dostatečně velkém stupni diskretizace je míra zkreslení způsobená tímto popisem zanedbatelná.

RT je na rámu stroje uložena v kluzných pouzdrech s radiální vůlí. Kinematické vazby příslušných elementů v matematickém modelu posunutí v radiálním směru zamezují.
Vzhledem k tomu, že hlavní dynamické děje probíhají v podélném směru RT, lze radiální vůle ve vazbách RT k rámu zanedbat.

• Vodiče příze a spojka, které jsou na RTS rozmístěny v určité vzdálenosti, jsou v modelu popsány spojitě pomocí odpovídající tuhosti materiálu RTS. Vzhledem k vysokému poměru hmotnosti RTS a vodičů se spojkou, lze považovat vliv tohoto zjednodušení na přesnost výsledků za zanedbatelný.

• Příze procházející při navíjecím procesu vodiči působí také na systém RT. Tahové síly v přízi jsou v porovnání s dynamickými silami RT řádově nižší [45] a lze je tak pro dynamické analýzy v matematickém popisu systému RT zanedbat.

Počáteční poloha systému RT definována v úvrati rozváděcího pohybu. Vzhledem k tomu, že reálné počáteční podmínky elementů v ustáleném režimu nelze předepsat, odpovídají počáteční podmínky nedeformovanému stavu RT. Za předpokladu simulace více period pohybu a vyhodnocení výsledků z periody v níž je pohyb již ustálený lze míru zkreslení způsobenou nepřesnými počátečními podmínkami zanedbat.

Matematický model systému RT byl vytvořen v softwarovém prostředí programu MSC.Adams, v modulu View, pomocí prvků "discrete flexible links", viz [22, s. 171]. Model RT s 20-ti sekcemi byl vytvořen sériovým spojením diskrétních pružných nosníků, kdy každý pružný nosník odpovídá jedné RTS. Vnitřním dělením nosníků je tak model RT tvořen 320-ti hmotnými elementy spojenými pružnými vazbami. Tyto vazby jsou obecně definovány materiálovým tlumením a tuhostí. Dynamické chování takto vzniklé soustavy je popsané diferenciální pohybovou rovnicí:

$$\mathbf{M} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{F}_{\mathbf{v}} = \mathbf{0} , \qquad (1)$$

kde **M** je matice hmotnosti elementů, **B** je matice tlumení a **K** je matice tuhosti prvků. **X** reprezentuje vektor posuvů prvků a  $F_v$  je vektor vnějších sil zahrnující pasivní odpory v uložení vybraných elementů k rámu. Struktura této soustavy je schematicky zobrazena na obrázku 6.

**Obrázek 6:** Schematické zobrazení struktury matematického modelu soustavy RT.

Elementy soustavy jsou indexovány od 1, 2, ..., i-1, i, i+1, ..., n-1, n, kde n=320. Prvnímu elementu je definována okrajová podmínka žádaného zrychlení. Tato podmínka simuluje připojení elementu k tuhému členu generujícímu rozváděcí pohyb. Vybraným elementům, které svou polohou odpovídají umístění podpor RT, je přidána posuvná vazba k rámu s definovanými pasivními odpory.

Materiálové vlastnosti příslušných RTS byly získány experimentálně [26]. Následné obrázky 7 a 8 ukazují průběhy polohy a zrychlení při rychlosti *150 zzpm*. Výsledky se týkají vybraných elementů modelu odpovídajících středu 1., 10. a 20. sekce RT.

Z uvedených průběhů je patrné kmitání soustavy elementů modelu RT. Jedná se o podélné kmitání RT v důsledku kinematického buzení soustavy žádanou zdvihovou funkcí na prvním elementu soustavy.



**Obrázek 7:** Průběhy polohy na 1., 10. a 20. sekci modelu RT při R=150 zzpm.



**Obrázek 8:** Průběhy zrychlení na 1., 10. a 20. sekci modelu RT při R=150 zzpm.

Na obrázku 9 jsou uvedené souhrnné výsledky dynamické analýzy RT. Výsledky přibližují chování RT při třech rychlostech rozvádění 50, 150 a 250 zzpm. Obrázek 9-A

zobrazuje nárůst maximálních hodnot zrychlení směrem od první k poslední sekci. Průběhy na obrázku 9-B zobrazují sílu v RT, která je nejvyšší právě v místě připojení k mechanismu, tj. na první sekci. Obrázek 9-C popisuje odchylku polohy úvratě při pohybu RT. Tato veličina popisuje míru překročení teoretické úvratě v důsledku prodloužení RT. S maximální deformací téměř *11 mm* může za předpokladu stejné deformace v tahu a tlaku dosahovat rozdíl v šířce návinu až *22 mm*, což představuje téměř *15 %* zdvihu.



**Obrázek 9:** Souhrnné výsledky dynamické analýzy pro rychlosti 50, 150 a 250 zzpm. A: max. zrychlení na vybraných segmentech RT. B: max. síla ve vybraných segmentech RT. C: odchylka polohy úvratě dpu (míra překročení úvratě v důsledku prodloužení RT). D: max. síla na 1. sekci v závislosti na poměrném navýšení hmotnosti RT.

Poslední graf 9-D ukazuje výsledky samostatné analýzy, která byla provedena pro ověření chování systému s různě hmotnou RT. Cílem bylo získat přehled o změně síly v místě připojení k mechanismu při nárůstu celkové hmotnosti soustavy. Přídavná hmota  $m_p$  byla do modelu začleněna prostřednictvím těles - přívažků umístěných ve středu každé sekce. Změnou parametru hustoty těchto těles bylo simulováno navýšení až o 75 % hmotnosti RT. Při zvyšování hmotnosti soustavy RT vzrůstají dynamické síly a lze tak očekávat nárůst maximální síly v místě připojení RT k rozváděcímu mechanismu. Výsledky provedené analýzy však prokázaly, že při určité rychlosti rozvádění a hmotnosti systému RT k nárůstu nedochází a v některých případech naopak maximální síla s narůstající hmotou klesá. Na obrázku 9-D tomuto případu odpovídá například rychlost R=250 zzpm a 25 % navýšení hmotnosti RT, kdy došlo ke snížení síly z hodnoty 3,1 kN na 1,65 kN. Tento jev souvisí s podélným kmitáním RT, které se při těchto rychlostech, a při navýšené hmotnosti RT dostává do fáze, nebo naopak do protifáze s frekvencí pohybu rozvádění. Tato problematika byla ověřena také experimentálně a je popsána v [29, 40].

### 4.1 Verifikační měření na dlouhém zkušebním zařízení

Výsledky simulací matematického modelu RT byly porovnány s výsledky měření RT, které proběhlo na dlouhém zkušebním zařízení. RT tohoto zkušebního zařízení svou délkou odpovídá stroji s 20-ti sekcemi. Žádaná zdvihová závislost zde byla generována pomocí klikového rozváděcího mechanismu s řízeným rotačním pohonem [7, 40].

Na obrázku 10 jsou porovnány průběhy naměřené a analyzované síly RT na 1. sekci při rychlosti rozvádění *150 zzpm*. Pro porovnání je v grafu zobrazen průběh síly dokonale tuhé RT (v grafu označen *teor*).



**Obrázek 10:** Porovnání průběhu síly v RT na 1. sekci RT, rychlost rozvádění 150 zzpm.

Z grafu je patrná shoda v dosažených maximech naměřených a analyzovaných průběhů v úvratích pohybu. Frekvence kmitání a útlum podélných kmitů v lineární části zdvihu však nekoresponduje s naměřenými průběhy. Rozdílná frekvence kmitání souvisí

s regulací a řízením pohonu rozváděcího mechanismu. Na rozdílném útlumu kmitání v lineární části zdvihu se podílí více faktorů. Prvním faktorem je zvolený model diskretizace, kdy použitý stupeň diskretizace není pro popis kmitání a jeho útlumu v lineární části zdvihu dostačující. Dalším faktorem je nepřesnost použité metody pro získání parametru viskózního tlumení materiálů RTS. Posledním faktorem je pak opět řízení servopohonu rozváděcího mechanismu.

Celkově lze však říci, že pro vyhodnocení maximálních sil a odchylek poloh v úvratích pohybu jsou výsledky modelu dostačující. To dokazuje i porovnání souhrnných výsledků měření a simulace na obrázku 11. Obrázek 11-A zobrazuje průběhy maximální síly v RT. Z tohoto grafu je patrná shoda obou průběhů pro porovnatelné rychlosti rozvádění. Z výsledků je vidět vysoké namáhání RT překračující hladinu dovoleného namáhání RT  $F_d=1000 N$  při rychlostech rozvádění nad 150 zzpm. Další obrázek 11-B pak zobrazuje porovnání maximálních odchylek poloh úvratí na RT. Maximální odchylka  $dpu_{max}$  popisuje maximální hodnotu ze všech odchylek poloh úvratí na vybraných sekcích modelu RT. Až na výjimky tato hodnota odpovídá odchylce polohy úvratě na poslední 20. sekci. Při vysokých rychlostech rozvádění je zde patrný rozdíl výsledků z měření a simulací. To pravděpodobně souvisí s řízením servopohonu rozváděcího mechanismu, které při vyšších rychlostech významněji ovlivňuje chování systému.



**Obrázek 11:** Porovnání výsledků z měření a simulací RT s klikovým rozváděcím mechanismem - pro různé rychlosti rozvádění. A: maximální síla v tyči B: maximální odchylka polohy úvratě.

Celkově lze konstatovat dobrou shodu výsledků modelu RT s měřením odpovídající RT na zkušebním zařízení, a to zejména ve sledovaných parametrech maximální síly

a odchylky polohy úvratě. Z výsledků je evidentní, že dynamické namáhání RT se negativně projevuje v podélných deformacích RT, které způsobují nerovnoměrnost stavby cívky v navíjecích místech podél stroje. Pro zajištění kvalitní stavby návinu a provozu systému pod hranicí dovoleného namáhání tyčí  $F_d$  je nezbytné provést optimalizaci systému RT.

### 5 Magneto-mechanický akumulátor

V rámci optimalizace dynamického namáhání RT byl navržen magneto-mechanický akumulátor kinetické energie RT v úvratích rozváděcího pohybu s proměnnou úvratí. Základní princip tohoto zařízení spočívá ve vzájemné přeměně kinetické energie RT v přechodových oblastech  $E_k$  do potenciální energie magnetického pole  $E_{Pmg}$  a elastického prvku akumulátoru  $E_{Pel}$ . Toho je docíleno pomocí magnetické odpudivé síly permanentních magnetů a tlačné vinuté pružiny. Na toto zařízení byla podána přihláška vynálezu a od roku 2013 je toto zařízení patentově chráněno [33].

Na obrázku 12 je uvedena koncová část silové charakteristiky navrženého akumulátoru v oblasti pravé úvratě. Tato charakteristika odpovídá kvazistatickému ději, ve kterém nejsou uvažovány dynamické účinky posuvných těles akumulátoru ani deformace RT.



**Obrázek 12:** Charakteristika magneto-mechanického akumulátoru v koncové části pravé úvratě pohybu RT ( $S_{1max}$ =7 mm,  $S_{2max}$ =2 mm).

Graf s označením MG ukazuje průběh odpudivé síly magnetické pružiny. Tento průběh byl získán magneto-statickou analýzou navržených magnetů v programu FEMM 4.2 [38]. Lineární průběh s označením MECH popisuje silovou závislost navržené tlačné vinuté pružiny. Poslední průběh, označen MG-MECH, reprezentuje vyvozenou sílu navrhovaného magneto-mechanického akumulátoru, která byla získána měřením funkčního modelu akumulátoru. Parametry magnetických a elastických prvků jsou vhodně nastaveny tak, aby v bodě  $S_A$  dosáhla síla magnetické pružiny hodnoty předpětí pružiny. Kritériem návrhu také je, že k tomuto vyrovnání dojde při vzdálenosti mezi magnety  $V_z=1 mm$ .

Z grafu 12 je evidentní, že nahrazením progresivního nárůstu magnetické síly lineární charakteristikou pružiny lze při posouvání úvratě v důsledku rozmazávání krajů v rozsahu s<sub>2</sub>=  $\langle -S_{2max}, S_{2max} \rangle$  výrazně snížit rozdíl sil  $F_{max} - F_{min}$ . Tomu přispívá také návrh pružiny s nízkou tuhostí.

Obrázek 13 zobrazuje schéma navrženého magneto-mechanického akumulátoru kinetické energie pro rozváděcí pohyb s proměnnou úvratí.



Obrázek 13: Schéma magneto-mechanického akumulátoru v symetrickém uspořádání.

RT <u>0</u> je zde posuvně volně uložena k rámu stroje, zatímco rám akumulátoru <u>9</u> je uložen k rámu stroje pevně. Prstencové magnety <u>1L</u>, <u>2L</u>, <u>1R</u> a <u>2R</u> mají shodné rozměry a jejich vnitřní průměr umožňuje průchod RT <u>0</u>. Magnety <u>1L</u> a <u>1R</u> jsou fixně připevněny k plastovým středícím kroužkům <u>4L</u> a <u>4R</u>, které jsou na RT <u>0</u> v kontaktu s vodiči příze <u>5L</u> a <u>5R</u> a určují tak jejich polohu. Magnet <u>2L</u> je pevně uložen ve vedení <u>3L</u>, které je posuvně uloženo v rámu akumulátoru <u>9</u>. V počáteční středové poloze RT ( $s_1=0, s_2=0$ ), je poloha posuvného vedení <u>3L</u>, <u>3R</u> a magnetů <u>2L</u>, <u>2R</u> určena tlačnou silou předepjaté pružiny <u>4</u>, zajišťující opření těles na obou stranách o osazení rámu akumulátoru <u>9</u>. Při pohybu RT směrem do pravé úvratě, se magnety <u>1L</u> a <u>2L</u> vzájemně přibližují. Díky jejich axiální magnetizaci a orientaci s vzájemně přilehlými shodnými póly, narůstá během tohoto pohybu progresivně odpudivá magnetická síla. Předpětí pružiny <u>4</u> je nastaveno tak, že při docílení rovnováhy s magnetickou odpudivou silou je mezi oběma páry magnetů <u>1L</u>, <u>2L</u> a <u>1R</u>, <u>2R</u> dostatečná vzduchová mezera zamezující jejich kontaktu. V tomto rovnovážném bodě  $S_A$  se v případě dalšího posuvu RT <u>0</u> směrem do úvratě začínají pohybovat také vedení <u>3L</u>, resp. <u>3R</u>, přičemž dochází ke stlačování pružiny <u>4</u>. Tímto způsobem je eliminován nárůst akumulované síly v důsledku posuvu koncové polohy úvratě.

### 5.1 Testy funkčního modelu akumulátoru

Vyrobený funkční vzorek (viz obrázek 14) byl podroben prvotním testům na krátkém zkušebním zařízení. Cílem tohoto testu bylo ověřit funkčnost akumulátoru pro uvažované rychlosti na zkušebním rozváděcím zařízení a odhalit případné nedokonalosti před zadáním prototypové výroby 20-ti sad akumulátorů pro dlouhou RT. Toto měření bylo provedeno na krátkém rozváděcím zařízení s jedinou RTS. Základní rozváděcí zdvih odpovídal velikosti *148 mm*, přičemž natočením excentru rozváděcího mechanismu bylo možné polohu úvratě posouvat v každém směru o *2 mm*.



**Obrázek 14:** Funkční vzorek magneto-mechanického akumulátoru.

Na obrázku 15 jsou zobrazeny záznamy detailu pravé úvratě měřených průběhů sil při rychlosti 25 zzpm pro polohy pohybu rozmazávání  $s_2=-S_{2max}$ , 0 a  $S_{2max}$ . Dále je zde pro porovnání zobrazen také průběh síly získaný z dynamické analýzy akumulátoru v matematickém modelu.



**Obrázek 15:** *Měření 1 akumulátoru na krátkém zkušebním zařízení - detail pravé úvratě pohybu,* R=25 zzpm,  $Z_{SI}=148 mm$ .

Z výsledků vyplývá značná shoda simulace a měření. Průběhy z měření nicméně vykazují vyšší hodnoty třecích sil. Tento rozdíl byl pravděpodobně způsoben nepřesnou instalací RTS na zkušebním zařízení. V průběhu síly jsou dobře patrné překmity způsobené pohybem posuvných těles akumulátoru. Rostoucí amplitudy kmitů při vyšších rychlostech ukázaly na vliv dynamických dějů spojených se změnou hybnosti posuvných členů akumulátoru, což negativně ovlivňuje průběh vyvozené síly a také snižuje vzdálenost mezi čely magnetů. Měření však potvrdilo dostatečnou vzdálenost mezi magnety i při vyšších rychlostních režimech.

Následně bylo provedeno měření systému RT s 20-ti sadami akumulátorů na dlouhém zkušebním zařízení s délkou RT odpovídající stroji s 20-ti sekcemi. Z technických a komerčních důvodů průmyslového partnera, u kterého byl experiment prováděn, nebylo možné opakovat měření s klikovým rozváděcím mechanismem. Jako generátor žádaného zdvihu byl použit nový rozváděcí mechanismus s řemínkem a rotačním

servopohonem [31]. Výhodou tohoto nového systému je elektronická změna parametrů zdvihové funkce. Nevýhodou bylo nedokonalé řízení servopohonu v důsledku čehož docházelo při měření k odchylkám žádané polohy na motoru mechanismu.

V následujících grafech 16 a 17 jsou porovnány výsledky měření a simulace odpovídajícího systému RT. V případě výsledků simulace jsou hodnoty prezentovány pomocí oblastí, jejichž hranice označená symboly  $\blacktriangle$  odpovídá zdvihu  $Z_{SI}=140 mm$  a hranice označená symbolem  $\blacktriangledown$  zdvihu  $Z_{SI}=148 mm$ . Tyto hraniční zdvihy odpovídají krajním polohám při rozmazávání krajů. Předpokladem je, že výsledky analýz při zdvizích od 140 do 148 mm se nachází uvnitř této oblasti.

Průběhy maximální tahové síly (obrázek 16) z měření a simulace systému RT s akumulátory mají shodný charakter, kdy s narůstající rychlostí rozvádění od 120 do 250 zzpm maximální síla nejprve klesá a poté opět stoupá. Podobně jako v měření dochází i u průběhů síly získané ze simulace k překlopení hranic oblasti tak, že při rychlostech nad 190 zzpm se maximální síla vyskytuje při zdvihu  $Z_{SI}=140 \text{ mm}$ . Naproti tomu při rychlosti do 190 zzpm se maximální síla vyskytuje při zdvihu  $Z_{SI}=148 \text{ mm}$ .

V porovnání s měřením je vidět, že v případě tahových sil získaných ze simulací RT s akumulátory je dosaženo vyšších hodnot. Výjimku tvoří výsledky při rychlosti nad *225 zzpm*, kdy si síly ze simulací a z měření přibližně odpovídají. Rozdílné výsledky hodnot jsou způsobeny více faktory. Prvním faktorem je nedokonalé řízení servopohonu řemínkového mechanismu a nedodržování žádané zdvihové funkce. Druhým faktorem jsou radiální vůle v uložení RT k rámu stroje. Při měření na zkušebním zařízení tak může docházet k vyosení magnetů RT vůči magnetům akumulátoru. Vyosením dochází k poklesu vyvozené síly v axiálním směru. Matematický model tyto jevy nepopisuje.

Následující obrázek 17 porovnává maximální odchylku polohy úvratě pro zmíněné rychlosti rozvádění a zdvihy. Tato veličina popisuje rozdíl od teoretické polohy úvratě, přičemž kladné hodnoty značí překročení úvratě při pohybu RT ze střední polohy a naopak záporné hodnoty značí nedosažení úvratě pohybu. Z grafu je vidět, že k bližší shodě výsledků simulace a měření dochází při rychlostech nad 225 zzpm. Maximální odchylky polohy úvratě při rychlostech pod touto rychlostí jsou výrazně vyšší v porovnání s měřením. Tento rozdíl souvisí především s již zmíněným nedokonalým řízením servopohonu řemínkového rozváděcího mechanismu použitého při experimentu.



**Obrázek 16:** *Porovnání maximální tahové síly v RT z měření a simulace.* 



**Obrázek 17:** Porovnání maximální odchylky polohy úvratě RT z měření a simulace.

Další poznatek získaný z průběhů odchylek poloh úvratí na obrázku 17 se týká dodržení požadované velikosti rozmazávání krajů, resp. dodržení změny zdvihu žádaného rozváděcího pohybu ze 140 na 148 mm na všech místech RT. Z výsledků měření vychází rozdíl mezi  $dpu_{max}$  pro 140 a 148 mm přibližně shodně 0,6 mm. Nutno poznamenat, že vlivem nedokonalosti řízení pohonu byla reálná změna zdvihu při měření maximálně 5 mm. U výsledků simulací, kdy byla zdvihová funkce na 1. sekci dodržena (změna zdvihu je 8 mm), je rozdíl mezi  $dpu_{max}$  pro 140 a 148 mm při rychlosti 250 zzpm až po 2,9 mm při rychlosti 150 zzpm. Důsledkem tohoto jevu dochází ke snižování velikosti rozmazávání krajů, což může nepříznivě ovlivnit stavbu návinu, zejména na posledních sekcích RT.

Výsledky simulací na obrázku 16 ukazují, že do rychlosti *155 zzpm* je deformace RT v úvratích pohybu výhradně tlaková a do rychlosti *225 zzpm* stále tlaková částečně. Tyto výsledky napovídají, že energie akumulátorů, resp. jejich počet a rozmístění není zcela optimální.

Díky konstrukční jednoduchosti a provozu bez využití přídavných pohonů lze instalovat akumulátory do míst podél RT v libovolném počtu a rozmístění. Tím lze optimalizovat celkovou akumulovanou energii i její rozložení podél RT v závislosti na požadovaných výkonových a rozměrových parametrech rozváděcího systému, resp. dopřádacího stroje.

## 6 Uplatnění navrženého řešení a možnosti dalšího výzkumu

Výsledky z předchozí kapitoly naznačují, že navržený počet akumulátorů je pro systém RT s 20-ti sekcemi s řemínkovým mechanismem předimenzovaný. Důsledkem toho dochází k nadměrnému stlačování RT a vysokému rozdílu poloh úvratí při rozmazávání krajů. Následující kapitoly se proto zabývají simulací modelu RT s 20-ti a 30-ti sekcemi s polovičním počtem akumulátorů. Cílem je ověřit předpoklad snížení rozdílu odchylky polohy při rozmazávání krajů, resp. při změně základního zdvihu  $Z_{s1}$ , za použití nižšího počtu akumulátorů pro daný systém RT.

### 6.1 Analýza systému RT s 20-ti sekcemi a polovičním počtem akumulátorů

Ve snaze snížit rozdíl odchylek poloh úvratí při rozmazávání krajů byla provedena analýza systému RT s polovičním počtem akumulátorů. Matematický model byl pro tyto účely upraven tak, že byly odebrány prvky popisující akumulátory na lichých sekcích modelu RT. Tím byl zredukován počet akumulátorů v systému RT na polovinu.

Dynamické analýzy byly provedeny pro totožné rychlosti a nastavení jako v případě systému RT s akumulátory na každé sekci. Výsledky analýzy jsou prezentovány na obrázcích 18 a 19 pomocí oblasti jejíž definice je popsána v popisku příslušného obrázku.

Výsledky na obrázku 18 porovnávají sílu v RT v závislosti na rychlosti rozvádění pro případy RT bez akumulátorů, RT s akumulátory na každé sekci a RT s polovičním počtem akumulátorů. Průběhy ukazují přínos použití polovičního počtu akumulátorů ve snížení síly v RT pro rychlosti do 230 zzpm, kdy nedochází k překročení síly 700 N. Použitím polovičního počtu akumulátorů dochází také k posunutí oblasti vyrovnání sil k rychlosti přibližně 160 zzpm.

Přínos řešení s polovičním počtem dokazují i výsledky odchylek poloh úvratí na obrázku 19. Je evidentní, že snížením počtu akumulátorů došlo ke snížení rozdílu hodnot při rozmazávání krajů. Pro rychlosti do 225 zzpm nepřekračuje rozdíl maximálních odchylek poloh úvratí při rozmazávání krajů hodnotu 1 mm.

Při rychlosti 250 zzpm dochází k nárůstu jak síly v RT tak odchylek poloh úvratí. Z tohoto důvodu se jeví jako výhodné provozovat systém v této konfiguraci do rychlosti 225 zzpm.



**Obrázek 18:** Porovnání maximální tahové síly v modelu RT v konfiguraci bez akumulátorů (BM), s 20-ti (Mg20) a 10-ti (Mg10) akumulátory.(Hranice oblasti odpovídající  $Z_{SI}$ =140 mm - označena symbolem  $\blacktriangle$ , hranice odpovídající  $Z_{SI}$ =148 mm - označena symbolem  $\blacktriangledown$ ).



**Obrázek 19:** Porovnání maximální odchylky polohy úvratě v konfiguraci bez akumulátorů (BM), s 20-ti (Mg20) a 10-ti (Mg10) akumulátory.(Hranice oblasti odpovídající  $Z_{SI}$ =140 mm - označena symbolem  $\blacktriangle$ , hranice odpovídající  $Z_{SI}$ =148 mm - označena symbolem  $\blacktriangledown$ ).

#### 6.2 Analýza systému RT s 30-ti sekcemi a polovičním počtem akumulátorů

Uplatnění navrženého zařízení bylo analyzováno také pro moderní stroje s vyšším počtem sekcí, resp. s větší délkou RT. Pro tyto účely byla provedena úprava matematického modelu RT, která spočívala v přidání dalších 10-ti sekcí do původní soustavy. Způsob tvorby elementů a definice parametrů elementů i vazeb, jsou shodné s modelem RT v konfiguraci s 20-ti sekcemi. Materiály RTS byly voleny s ohledem na dodržení minimálního rozdílu celkového tepelného protažení RT a ocelového rámu. RT s 30-ti sekcemi se ve výsledku skládá z 15-ti RTS ze slitiny hliníku a 15-ti RTS z uhlíkového kompozitu. Podobně jako v předchozí kapitole, byly i zde prvky popisující akumulátory na lichých sekcích potlačeny a nejsou tak uvažovány v simulaci RT.

Dynamické analýzy byly provedeny pro rychlosti od *50 zzpm* do maximální předpokládané provozní rychlosti u tohoto systému *200 zzpm*. Výsledky se týkají systému bez akumulátorů a systému s polovičním počtem akumulátorů. V případě výsledků systému s akumulátory je variabilita vyhodnocených veličin při rozmazávání krajů v grafech opět vyjádřena pomocí oblasti, jejíž definice je uvedena v popisku příslušného obrázku.

Z výsledků simulace RT s 30-ti sekcemi bez použitých akumulátorů na obrázku 20 vyplývá, že tento systém lze provozovat maximálně do rychlosti *165 zzpm*, kdy síla v RT dosahuje dovoleného namáhání  $F_d$ =1000 N. S vysokými silami u tohoto systému souvisí i vysoké odchylky poloh úvratí (až 8 mm při rychlosti 200 zzpm) uvedené na obrázku 21.

V případě výsledků systému RT s akumulátory je při rychlostech nad *130 zzpm* patrný přínos ve snížení maximálních hodnot obou vyhodnocovaných veličin oproti systému bez akumulátorů. Z průběhu maximální síly v RT na obrázku 20 je vidět, že v rozsahu rychlostí od *50* do *200 zzpm* se maximální síla pohybuje pod hranicí *750 N*.

Obrázek 21 zobrazuje průběhy maximální odchylky polohy úvratě. U systému s akumulátory se rozdíl hodnot při rozmazávání krajů v rámci analyzovaných rychlostí mění od *1,7* do *2 mm*. Vhodným počtem a umístěním akumulátorů na RT bude možné nalézt optimální naladění soustavy, při kterém bude pro daný rozsah rychlostí a velikost rozmazávání změna odchylky polohy úvratě minimální.



**Obrázek 20:** Porovnání maximální tahové síly v modelu RT s 30-ti sekcemi v konfiguraci bez akumulátorů a s 15-ti akumulátory.(Hranice oblasti odpovídající  $Z_{S1}$ =140 mm - označena symbolem  $\blacktriangle$ , hranice odpovídající  $Z_{S1}$ =148 mm - označena symbolem  $\blacktriangledown$ ).



**Obrázek 21:** Porovnání maximální tahové síly v modelu RT s 30-ti sekcemi v konfiguraci bez akumulátorů a s 15-ti akumulátory. (Hranice oblasti odpovídající  $Z_{S1}$ =140 mm - označena symbolem  $\blacktriangle$ , hranice odpovídající  $Z_{S1}$ =148 mm - označena symbolem  $\blacktriangledown$ ).

#### 6.3 Zhodnocení

Provedené analýzy systému RT s 20-ti sekcemi potvrdily předpoklad, kdy při použití polovičního počtu akumulátorů došlo ke snížení rozdílu odchylky polohy úvratě při rozmazávání krajů. U rychlostí do 200 zzpm došlo ke snížení maximální hodnoty z 2,9 mm pod hladinu 1 mm.

Důležitým poznatkem z provedených analýz systému s 20-ti sekcemi s původním a polovičním počtem akumulátorů je synergie faktorů hmotnosti magnetů RT a celkové vyvozené síly magnetické pružiny. Snížením počtu akumulátorů v systému by bylo možné předpokládat nedostatečnou akumulaci a nárůst síly v RT v důsledku převažující složky dynamické síly v RT při vysokých rychlostech rozvádění. Výsledky provedených analýz RT s 20-ti sekcemi však ukázaly, že do rychlosti 225 zzpm jsou maximální síly v RT při použití polovičního počtu akumulátorů nižší. Snížením počtu akumulátorů navíc nedošlo k výraznému nárůstu maximální odchylky polohy úvratě při rychlostech rozvádění 200 a 225 zzpm. Tento jev souvisí s hmotností magnetů RT přidaných do systému, kdy v určité fázi vliv přidané hmotnosti převáží vliv působící magnetické síly. Nalezení optimálního počtu akumulátorů není zcela jednoznačné, neboť lze očekávat že kromě samotného počtu akumulátorů na RT bude rozhodující také jejich rozmístění podél RT. Pro přesnější naladění systému je nezbytné provést další analýzy doplněné o experimenty, které by potvrdily výše uvedené závěry. Vytvořený matematický model v této souvislosti představuje vhodný nástroj umožňující snadnou modifikaci systému podle požadavků na délku stroje a provozní rychlosti.

Výsledky analýzy systému RT s 30-ti sekcemi prověřily potenciál zařízení i pro moderní stroje s delší RT. V rozsahu analyzovaných rychlostí se v případě systému s akumulátory pohybuje síla v RT bezpečně pod hranicí dovoleného namáhání  $F_d=1000 N$ . Pro předpokládané provozní rychlosti od 150 do 200 zzpm síla v RT nepřekračuje hodnotu 600 N. Hodnota maximální odchylky polohy úvratě je pak 3,2 mm a rozdíl odchylky při rozmazávání krajů dosahuje hodnoty maximálně 2 mm.

## 7 Závěr

Studie problematiky rozváděcího systému rotorových dopřádacích strojů ukazuje pokračující trend ve zvyšování výkonu strojů s centrálním systémem rozvádění. Výsledky provedené rešerše známých řešení umožňujících snížení dynamických účinků RT při přímočarém vratném pohybu s proměnnou polohou úvratě ukazují, že problematika systému RT byla a stále je předmětem řady výzkumných prací. Z výsledků studie je evidentní, že pro využití současné koncepce centrálního rozváděcího systému na moderních strojích s vyšším výkonem je nezbytná další optimalizace systému RT. Výsledkem této práce je kompletní návrh řešení, které umožňuje snížit dynamické namáhání RT při rozváděcím pohybu s proměnnou polohou úvratě a zvýšit přesnost rozvádění u centrálního systému RT.

Pro podrobný popis systému RT byl vytvořen matematický model v programovém prostředí softwaru MSC.Adams. K popisu systému RT byly využity prvky diskrétních pružných nosníků, pomocí nichž byla vytvořena potřebná soustava elementů. Parametry RTS použité v matematickém popisu byly zjištěny experimentálně. Výsledky modelu byly ověřeny verifikačním měřením odpovídajícího systému na zkušebním zařízení.

Z výsledků dynamické analýzy systému RT byly stanoveny základní parametry nového zařízení pro akumulaci kinetické energie v úvratích rozváděcího pohybu. Na základě těchto parametrů byl navržen magneto-mechanický akumulátor umožňující bezkontaktně akumulovat kinetickou energii RT v úvratích pohybu do potenciální energie magnetického pole a do potenciální energie mechanické pružiny. Princip tohoto akumulátoru spočívá v transformaci progresivní charakteristiky odpudivé síly magnetické pružiny do lineární charakteristiky vinuté tlačné pružiny. Tímto způsobem je zohledněna proměnná poloha úvratě rozváděcího pohybu.

V rámci návrhu zařízení byla analyzována silová závislost magnetické pružiny akumulátoru v programu FEMM 4.2. V návaznosti na výsledky provedené analýzy byly vypočítány parametry vinuté válcové tlačné pružiny a navržena konstrukce akumulátoru.

Rozměry navrženého akumulátoru umožňují implementaci do současných strojů s průběžnou RT prakticky bez konstrukčních zásahů. Výhodou tohoto řešení je jeho konstrukční jednoduchost a funkce bez jakýchkoliv přídavných pohonů. Celkovou míru akumulované energie lze měnit počtem použitých akumulátorů. Kromě toho lze

v případě potřeby změnit také maximální vyvozenou sílu pomocí záměny tlačné pružiny s odpovídající tuhostí.

Za účelem ověření funkčnosti návrhu akumulátoru byl jeho 3D-model analyzován v matematickém modelu. Výsledky analýzy byly ověřeny při testovacím měření na krátkém zkušebním zařízení. Následně byl ověřen celý systém RT s použitými akumulátory na dlouhém zkušebním zařízení s dlouhou RT odpovídající stroji s 20-ti sekcemi.

Výsledky měření RT s akumulátory použitými na každé sekci potvrdily přínos navrženého řešení. Použitím akumulátorů na každé sekci RT došlo ke snížení maximálního namáhání RT o přibližně *30*% a maximální odchylky polohy úvratě o *44*%. Snížení maximální síly v RT představuje nižší nároky na pohon rozváděcího mechanismu a tím také nižší pořizovací a provozní náklady stroje.

Následné části práce byly zaměřeny na modifikaci systému RT. V této části byl popsán a analyzován systém RT s 20-ti sekcemi a polovičním počtem akumulátorů. Zde se podařilo ověřit trend ve snížení rozdílu odchylky polohy úvratě při rozmazávání krajů. Použitím polovičního počtu akumulátorů bylo dosaženo snížení hodnoty rozdílu odchylky polohy úvratě z původních 2,9 mm pod hladinu 1 mm.

Dále byla provedena analýza systému RT s 30-ti sekcemi, která měla ověřit potenciál navrženého řešení i pro moderní stroje s delší RT. Tento systém byl analyzován pro rychlosti od 50 zzpm do maximální potenciální provozní rychlosti 200 zzpm. Výsledky ukázaly, že bez použití akumulátorů není možné v daném rozsahu rychlostí provozovat systém pod hranicí dovoleného namáhání. Naproti tomu systém s akumulátory zajišťuje rozvádění bezpečně pod touto hranicí. Nezanedbatelný rozdíl odchylky polohy úvratě v rámci rozmazávání krajů však vyžaduje další optimalizaci systému delší RT spojenou s počtem a rozmístěním akumulátorů po délce RT. Matematický model RT představuje v této souvislosti silný nástroj umožňující simulaci systému v různých konfiguracích. Kromě optimalizace počtu akumulátorů a jejich rozmístění na RT zde lze také snadno optimalizovat parametry akumulátorů, např. předpětí pružiny, či počáteční vzdálenost magnetů.

Vyvinutý systém na akumulaci kinetické energie v úvratích pohybu RT je patentově chráněn. V současnosti je navržené řešení testováno u firmy působící v oboru rotorových dopřádacích strojů.

#### Literatura

- [1] RIKIPEDIA [on-line], URL:<http://www.rieter.com/en/rikipedia/navelements/mainpage/> [cit. 2013-07-04].
- [2] ROHLENA, V. a kolektiv. *Bezvřetenové předení*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1974. č.p. 04-823-74.
- [3] BERTHELSEN, S. E. Improved Method and Means for the Centrifugal Spinning of Fibrous Material. [London]:1937. Patentový spis. GB477259 (A).
- [4] MEIMBERG, J. Spinnvorrichtung. Deutsches patentamt: 1957. Patentový spis. DE963400 (C).
- [5] YARN MANUFACTURING BLOG History of Open End Spinning [on-line], URL:<http://yarnmanufacturing.blogspot.cz> [cit.2013-08-22].
- [6] TAVALÁŠEK, O., PLÍŠTIL, J. *Příprava materiálu ke tkaní.* 1. vydání. Praha: SNTL, 1984. č.p. 04-808-84.
- [7] HUBÁLEK, M. Nový systém rozvádění příze na rotorových dopřádacích strojích s využitím servopohonů. Liberec, 2006. 98s. Doktorská práce na Strojní fakultě Technické univerzity v Liberci na Katedře textilních a jednoúčelových strojů.
- [8] SCHLAFHORST-SAURER. Autocoro 8 The High-tech Revolution in Rotor Spinning. [on-line], URL:<http://schlafhorst.saurer.com > [cit.2013-08-24].
- [9] BERAN, J., VALTERA, J., ŽABKA, P.: New Trends in Yarn Distribution Systems on Spinning Machines. The 15-th International Conference STRUTEX 2008: Research Centre Textile II. Liberec, Technical University of Liberec and Czech Section of Textile Institute Manchester, Faculty of Textile Engineering, 2008. ISBN 978-80-7372-418-4. s. 579-584.
- [10] HULL, D., CLYNE, T. W. An Introduction to Composite Materials. Second edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. ISBN 0-521-38855-4.
- [11] MALLICK, P. K. Fibre-reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design. Department of Mechanical Engineering, University of Michigan-Dearbon. Third edition. CRC Press, 2008. ISBN 0-8493-4205-8.
- [12] KUMAR, A., BERAN, J. The Traversing Mechanism of Yarn for a Group of Winding Units. In Mladí vědci 2010: sborník 4. Mezinárodní konference studentů vysokých škol v Euroregionu Nisa. 2010 Jelenia Góra. Unvwersytet Ekonomiczny we Wroclawiju, 2010. ISBN 978-83-617-19-86-1.
- [13] BERAN, J., VALTERA, J., et al.: Rozváděcí mechanismus Záznamy měření zrychlení rozváděcí tyče na zkušebním standu dlouhého stroje. V Liberci 01.09. 2009, ISRN TUL - KTS/TZ/ZZ - 09/06/CZ + Měření zrychlení.
- [14] BUTSCHKO, S. Cross-winding Device for a Textile Machine Which Produces Crosswound Bobbins. OERLIKON TEXTILE GMBH & CO KG, Butschko, S. 2008. Patentový spis. WO2008058605 (A1).
- [15] LEINVEBER, J., VÁVRA, P. *Strojnické tabulky*. Druhé doplněné vydání. Úvaly, Albra, 2005. ISBN 80-7361-011-6.
- [16] MIT Calc Návrh Pružin [on-line], URL:<http://www.mitcalc.com/cz/pr\_sprcomp.htm> [cit.2013-08-23].

- [17] SCHMID, R. *Thread-traversing apparatus*. SCHLAFHORST & CO W, Deutsches patentamt: 1989. Patentový spis. DE3810734 (A1).
- [18] STAHLECKER, G. Yarn Traversing Device on Textile Machines Producing Cross-wound Packages. NOVIBRA GmbH, United States Patent: 2000. Patentový spis. US006027065 (A).
- [19] FOUNE, F., et al. *Device for Traversing of Yarn Wound-up on the Bobbin*. VUTS a.s., RIETER CZ s.r.o. European patent office: 2012 Patentový spis. EP2562112 (A1).
- [20] FOUNE, F., et al. The Influence of Magnetic Accumulators Equipped with Permanent Magnets on the Drive of a Mechanical System with the Periodical Reciprocating Movement and Its Behaviour. In Vibration Problems ICOVP 2011: Proceedings of the 10th international Conference of Vibration Problems, 2011 Prague. NÁPRSTEK, J., et al. London. SPRINGER, 2011. s. 101-106. (Springer Proceeding in Physics 139, ISBN 978-94-007-2068-8).
- [21] BERAN, J., VALTERA, J., et al.: Výzkum a optimalizace rozváděcích mechanismů textilních uzlů. Průběžná zpráva o realizaci projektu za rok 2007. Vydáno v rámci projektu 1M0553 Výzkumné centrum "Textil II". V Liberci 30.11. 2007, ISRN TUL - VCT2/A(TS)--07/05/CZ+Navíjecí systémy.
- [22] ADAMS/VIEW HELP MSC Adams 2011 [on-line], URL:<http://simcompanion.mscsoftware.com/infocenter/> [cit. 2013-09-03].
- [23] PEŠINA, E., REIF, P., VALENTA, F.: *Sbírka příkladů z pružnosti a pevnosti.* SNTL Praha 1964, č.p. 04-039-64.
- [24] ČERNOCH, S., *Strojně technická příručka 1*. 12. Přepracované vydání. SNTL, Praha 1968, č.p. 04-224-68.
- [25] HOLZWESSIG, F., DRESIG, H.: Dynamics of Machinery Theory and Applications. Verlag, Springer, 2010. ISBN 978-3-540-89939-6.
- [26] VALTERA, J.: Rozváděcí mechanismus Zpráva z měření materiálových vlastností rozváděcí tyče. V Liberci 24.7. 2009, ISRN TUL - KTS/TZ/ZZ - - 09/07/CZ + Měření RT.
- [27] MEAD, J. M.: The measurement of the loss factor of beams and plates with constrained and unconstrained damping layers: A critical assessment. Elsevier *Journal of Sound and Vibration* 300 (2007) 744-762.
- [28] HALF-POWER BANDWIDTH METHOD VIBRATIONDATA [on-line], URL:<http://www.ordpress.com>[cit. 2013-12-06].
- [29] ŽABKA, P., VALTERA, J., BERAN, J.: Dynamic Properties of Traversing Rod. In Advances in Mechanisms Design: Proceedings of TMM 2012, Liberec. CECARELLI, M., et al. London. SPRINGER, 2012. s. 469-474. (Springer Mechanisms and Machine Science, Volume 8, ISBN 978-94-007-5124-8.
- [30] VALTERA, J., ŽABKA, P., BERAN, J.: Rozváděcí mechanismus Měření zrychlení rozváděcí tyče na dlouhém zkušebním zařízení. V Liberci 01.07. 2009, ISRN TUL - KTS/TZ/ZZ - 09/04/CZ + Měření zrychlení.
- [31] SAVIO. Automatic Rotor Spinning Frame FLEXIROTORS3000. [on-line], URL:< http://www.saviotechnologies.com/savio/en/Products/Rotor-Spinning-Frame/Pages/Flexy-Rotors-3000.aspx > [cit.2013-10-22].

- [32] BREPTA, R., et al.: *Mechanické kmitání*. Vydání první, Sobotáles, Praha, 1994. ISBN 80-901684-8-5.
- [33] BERAN, J., VALTERA, J.: Způsob a zařízení k rozvádění příze na textilních strojích. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI, RIETER CZ s.r.o. UPV 2011 Patentový spis. č. 303167.
- [34] SINOMAG Magnety a Teorie [on-line], URL:<http://www.sinomag.cz>[cit. 2013-12-16].
- [35] RABINOVIC, Yu., M. et al: Physical and Mechanical Properties of Sintered Nd-Fe-B Type Permanent Magnets. *Elsevier - Intermetallics* 4, April 1996, p 641-645. 0966-9795/96.
- [36] HAAVISTO, M. et al.: Temperature Stability and Flux Losses Over Time in Sintered Nd-Fe-B Permanent Magnets. *Magnetics, IEEE Transactions, Volume:45, Issue:12.* Dec. 2009, p5277-5280, ISSN: 0018-9464.
- [37] NOVÁK, M., ČERNOHORSKÝ, J., KOŠEK, M.: Detailed Measurement and Simulation of FeNdB Permanent Magnet Used for Magnetic Spring - In proceedings of EPE/PEMC 2012 ECCE Europe -15th International Power Electronics and Motion Control Conference. Novi Sad, Serbia. ISBN: 978-1-4673-1971-3.
- [38] MEEKER, D., C.: Finite Element Method Magnetics, Version 4.2. [on-line], URL:< http>//www.fem.info.> [cit. 2013-11-27].
- [39] PolyPlasty s.r.o., Informace o materiálu POM-C. [on-line], URL:< http://www.polyplasty.cz/index.php?page=polyacetal-pom> [cit. 2013-11-28].
- [40] BERAN, J., VALTERA, J., et al.: Výzkumná zpráva z měření provozních veličin klikového rozváděcího systému rotorového dopřádacího stroje. Vydáno v rámci projektu 1M0553 Výzkumné centrum "Textil II". V Liberci 30.09. 2011, ISRN TUL - VCT2(TS)-11/01/CZ+Systém rozvádění.
- [41] VALTERA, J., ŽABKA, P., et al.: Výzkumná zpráva z měření provozních veličin rozváděcího systému rotorového dopřádacího stroje s kombinovanými akumulátory energie v úvratích pohybu. Vydáno v rámci projektu TIP MPO 1726. V Liberci 16.7. 2012, ISRN TUL-MPO1726--12/01/CZ.
- [42] ALCOMEX Návrh a výpočet pružin [on-line], URL:<http://www.alcomex.cz/Vypocet\_pruzin/vypocet\_pruzin.php> [cit. 2013-12-15].
- [43] JULIŠ, K., BREPTA, A., et al.: Technický průvodce 66 MECHANIKA, II.díl Dynamika. SNTL 1987. Praha 04-220-87.
- [44] MACUR, M. et al.: Úvod do analytické mechaniky a mechaniky kontinua. Vysoké učení technické v Brně – Nakladatelství VUTIUM. ISBN 978-80-214-3944-3.
- [45] KUBEŠ, M. Konstrukce zařízení pro navíjení kuželové cívky na rotorovém dopřádacím stroji. Liberec, 2005. 70s. Diplomová práce na Strojní fakultě Technické univerzity v Liberci na Katedře textilních a jednoúčelových strojů.
- [46] VALTERA, J., BERAN, J.: Magnetic-Mechanical Accumulator of Kinetic Energy. *AUTEX Research Journal*, 2014, vol. 14, no 1. [v tisku].

### Publikace autora

- BERAN, J., VALTERA, J.: Dynamics Analysis of the Distribution Rod on the Rotor Spinning Machine. In *Proceedings of the XIIIth Romanian Textile And Leather Conference CORTEP 2007*, Romania, Iasi: "Gh. Asachi" Technical University, Faculty of Textile and Leather Engineering, 2007. s. 367-374. ISSN 1582-6392.
- BERAN, J., VALTERA, J.: Optimisation of the Distribution Mechanism on the Rotor Spinning Machine. In *Proceedings of the 14th International Conference STRUTEX 2007: Research Centre Textile II.* Liberec, Technical University of Liberec and Czech Section of Textile Institute Manchester, Faculty of Textile Engineering, 2007. s. 291-297. ISBN 978-80-7372-271-5.
- KUMAR, A., VALTERA, J., BERAN, J.: Dynamic Analysis of the Traversing System on the Rotor Spinning Machine. In *10th International Scientific Conference TRANSFER* 2008. Slovakia, Trenčín: Trenčianská univerzita Alexandra Dubčeka, Fakulta Špeciálnej Techniky, 2008. s. 47-53. ISSN 1336-9695. ISBN 978-80-8075-357-3.
- BERAN, J., VALTERA, J., ŽABKA, P.: New Trends in Yarn Distribution Systems on Spinning Machines. In *Proceedings of 15th International Conference STRUTEX 2008: Research Centre Textile II.* Liberec, Technical University of Liberec and Czech Section of Textile Institute Manchester, Faculty of Textile Engineering, 2008. s. 579-584. ISBN 978-80-7372-418-4.
- VALTERA, J.: Analysis of Vibration of the Traversing Rod on the Rotor Spinning Machine. *Mezinárodní konference studentů vysokých škol v Euroregionu Nisa*, Jelenia Góra. 14. 15. 5. 2009, Poland: ISBN 978-83-61719-28-1.
- VALTERA, J., BERAN, J.: Analysis of Vibration of the Traversing Rod on the Rotor Spinning Machine. In 1st International Summer School on Mechatronic Systems: Transfer of Innovation to the Interdisciplinary Teaching of Mechatronics for the Advanced Technology Needs, Wisla, 27.9. - 2.10. 2009, Poland, s. 389 - 402. ISBN 978-83-60691-56-4.
- GHAZIHESAMI, R., VERDEGUER, J., JESHANI, S., HALAI, A., GOWREE, E., VALTERA, J., KOVACEVIC, A.: Use of a structured engineering design process in expanding markets of SME's. *International Conference on Engineering and Product Design Education*, 2. 3.11. 2010, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, Published by the IED and Design Society, 2010, ISBN 78-1-904670-19-3.
- GHAZIHESAMI, R., VERDEGUER, J., JESHANI, S., HALAI, A., GOWREE, E., VALTERA, J., KOVACEVIC, A.: Challenges in conceptual design of fencing systems, students view. *International Conference on Engineering and Product Design Education* 2. 3.11. 2010, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, Published by the IED and Design Society, 2010, ISBN 978-1-904670-19-3.
- VALTERA, J., BERAN, J.: Mathematical Model of the Long Traversing Rod With a Discrete Flexible Link Utilization. In *12th International Scientific Conference TRANSFER 2011*, 23. - 24.11. 2011, Slovakia, Častá - Papiernička: Trenčianská univerzita Alexandra Dubčeka, Fakulta Špeciálnej Techniky. 2011. Proceedings of reviewed papers ISBN: 978-80-8075-454-9.

- ŽABKA, P., VALTERA, J., BERAN, J.: Dynamic Properties of Traversing Rod. Advances in Mechanisms Design, In *Proceedings of TMM2012*, Liberec: Technical University of Liberec, Department of Textile Machine Design. 3.-5. 9. 2012, s. 469-474, ISBN 978-94-007-5124-8.
- ELSNER, J., VALTERA, J., ŽABKA, P.: Conceptual Design of Multi-Thread Tensioner With Electronic Control, In *19th International Conference STRUTEX 2012, Section: Structure and Structural Mechanics of Textiles.* Liberec, Technical University of Liberec and Czech Section of Textile Institute Manchester, Faculty of Textile Engineering. ISBN 978-80-7372-913-4.
- VALTERA, J., BERAN, J.: Magnetic-Mechanical Accumulator of Kinetic Energy. *AUTEX Research Journal*, no 1/2014, vol. 14. [v tisku].

Technická Univerzita v Liberci Fakulta strojní Katedra textilních a jednoúčelových strojů Studentská 2 461 17 Liberec

Disertační práce je k dispozici v Univerzitní knihovně TUL Voroněžská1329/13, Liberec

Ing. Jan Valtera