



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ,

KATEDRA TEXTILNÍCH A JEDNOÚČELOVÝCH STROJŮ

Hálkova 6, Liberec 1, 461 17, tel. 485353418, fax. 485353514, www.kts.tul.cz

Ing. Šimon Kovář

**ANALÝZA UCHYCENÍ NITĚNKY
V BRDOVÉM LISTU**

DOKTORSKÁ DISERTAČNÍ PRÁCE

Studijní program: P2302 Stroje a zařízení

Studijní obor: 2302V010 Konstrukce strojů a zařízení

Školitel : Doc. Ing. Jiří Mrázek, CSc.

Použité označení:

symbol	popis	jednotka
b_n	koeficient tlumení náhradní nitěnky	$[N \cdot m^{-1} \cdot s]$
$b_{sh\check{c}}$	redukovaný koeficient tlumení postranice, spoje postranice s čínkem a prvního úseku činku na horní čínek	$[N \cdot m^{-1} \cdot s]$
$b_{sd\check{c}}$	redukovaný koeficient tlumení spoje postranice s čínkem a prvního úseku dolního činku na dolní čínek	$[N \cdot m^{-1} \cdot s]$
$b_{ih\check{c}}$ pro $i = 1 - 6$	koeficient tlumení části horního činku mezi náhradními nitěnkami	$[N \cdot m^{-1} \cdot s]$
$b_{id\check{c}}$ pro $i = 1 - 6$	koeficient tlumení části dolního činku mezi náhradními nitěnkami	$[N \cdot m^{-1} \cdot s]$
b_U	poměrný útlum	-
F_o	síly vyvozené tahem v osnově	$[N]$
F_D	dynamická síla nitěnky	$[N]$
F_G	gravitační síla	$[N]$
F_{Oz}	osová síla v osnovní niti	$[N]$
K	celková kinetická energie soustavy	$[J]$
k_n	tuhost závěsu náhradní nitěnky	$[N \cdot m^{-1}]$
$k_{sh\check{c}}$	redukovaná tuhost postranice, spoje postranice s čínkem a prvního úseku činku na horní čínek	$[N \cdot m^{-1}]$
$k_{sd\check{c}}$	redukovaná tuhost spoje postranice s čínkem a prvního úseku dolního činku na dolní čínek	$[N \cdot m^{-1}]$
$k_{ih\check{c}}$ pro $i = 1 - 5$	tuhost segmentu horního činku	$[N \cdot m^{-1}]$
$k_{id\check{c}}$ pro $i = 1 - 5$	tuhost segmentu dolního činku	$[N \cdot m^{-1}]$

k_o	tuhost osnovy ve směru pohybu rámu listu	$[\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$
k_t	tažná tuhost segmentu nosníku	$[\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$
k_φ	torzní tuhost segmentu nosníku	$[\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$
k_p	tuhost osnovní nitě mezi brdovým listem a čelem tkaniny	$[\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$
k_{ti}	torzní tuhost	$[\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$
k_{oz}	osová tuhost osnovní nitě	$[\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$
$m_{hč}$	hmotnost segmentu horního činku mezi náhradními nitěnkami	$[\text{kg}]$
$m_{dč}$	hmotnost segmentu dolního činku mezi náhradními nitěnkami	$[\text{kg}]$
m_b	hmotnost postranice	$[\text{kg}]$
m_n	hmotnost náhradní nitěnky	$[\text{kg}]$
M_i	okrajový moment	$[\text{N} \cdot \text{m}]$
p	celkový počet segmentů činku	-
r	celkový počet náhradních nitěnek	-
Q_i	obecná síla	$[\text{N}]$
q_i	obecná souřadnice	-
R	Rayleighova disipativní funkce	$[\text{J}]$
R_n	výslednice sil nitěnky	$[\text{N}]$
U	celková potenciální energie soustavy	$[\text{J}]$
$y, \dot{y}, \ddot{y}$	vstupní kinematické závislosti v závěsu listu	$[\text{m}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$
$y_{ih}, \dot{y}_{ih}, \ddot{y}_{ih}$ pro $i = 1 - 6$	kinematické závislosti segmentu horního činku	$[\text{m}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$

$y_{id}, \dot{y}_{id}, \ddot{y}_{id}$ pro $i = 1 - 6$	kinematické závislosti segmentu dolního činku	$[m, m \cdot s^{-1}, m \cdot s^{-2}]$
$y_{in}, \dot{y}_{in}, \ddot{y}_{in}$ pro $i = 1 - 6$	kinematické závislosti náhradní nitěnky	$[m, m \cdot s^{-1}, m \cdot s^{-2}]$
δ_0	předpětí v nezatíženém stavu	$[m]$
δ_i	i – té předpětí dle polohy na brdovém listu	$[m]$
Δ	vůle v zavěšení nitěnek	$[m]$
Ω_n	vlastní frekvence náhradní nitěnky	$[rad \cdot s^{-1}]$
ϑ_φ	torzní natočení	$[rad]$
ϑ_i	posunutí	$[rad]$

Obsah:

1.	Úvod	6
1.1.	Popis prošlupního zařízení	8
1.2.	Popis brdového listu	9
2.	Cíl disertační práce	14
3.	Rozbor konstrukce a zatížení brdového listu	17
3.1.	Rozbor zatížení	17
3.2.	Rozbor pohybu nitěnek	18
3.3.	Rozbor vstupních kinematických veličin	18
3.4.	Rozbor používaných konstrukčních řešení ke snížení rázu od nitěnek	19
4.	Rozbor platných patentových ochran	21
5.	Sestavení matematického a výpočtového modelu brdového listu	25
5.1.	Matematický model rámu listu	26
5.2.	Schéma matematického modelu soustavy horní činek – nitěnka – dolní činek	33
5.3.	Matematický model – nitěnka s pružnými konci a vůlí	34
5.4.	Výpočtový model – rám listu bez nitěnek	35
5.5.	Výpočtový model – uchycení pružné nitěnky s vůlí	38
5.6.	Stanovení vstupních a počátečních parametrů výpočtu	44
6.	Ověření matematického modelu rámu listu na základě vlastních frekvencí dynamické soustavy	53
7.	Popis zkušebního zařízení pro testování brdových listů a prošlupních mechanismů	56
7.1.	Popis zařízení	56
7.2.	Rozbor prošlupního mechanismu	58
7.3.	Parametry zařízení	58
8.	Experimentální ověření matematického modelu nitěnky s pružným dopadem a vůlí	60
8.1.	Návrh metodiky experimentálního ověření soustavy nitěnka – brdový list	60
8.2.	Popis experimentálního modelu – odpružený dopad	61
8.3.	Vyhodnocení experimentu	62
8.4.	Experimentální porovnání pružného dopadu nitěnky s dopadem tvrdým	65

9.	Analýza a rozbor výsledků výpočtového modelu – nitěnka s vůlí a pružným dopadem	68
9.1.	Časové závislosti zrychlení nitěnky	69
9.2.	Analýza rázové síly	73
9.3.	Srovnání rázové síly mezi pružnou nitěnkou a klasickým řešením	74
9.4.	Analýza brdového listu s alternativním symetrickým závěsem	75
10.	Určení optimálních parametrů	76
11.	Předepjatá nitěnka	77
11.1.	Matematický model - předepjatá nitěnka	77
11.2.	Výpočtový model předepjaté nitěnky	78
11.3.	Experimentální analýza závislostí předepjatých nitěnek	82
12.	Analýza a rozbor výsledků výpočtového modelu – předepjatá nitěnka	92
12.1.	Návrh tuhosti a předpětí pružné části náhradní nitěnky	94
13.	Závěr	98
13.1.	Zhodnocení experimentu	98
13.2.	Zhodnocení výpočtového modelu	99
13.3.	Shrnutí základních výsledků	100
13.4.	Možnosti dalšího výzkumu	101
14.	Anotace	102
15.	Annotation	102
16.	Seznam použité literatury	103
17.	Přílohy	105

1. Úvod

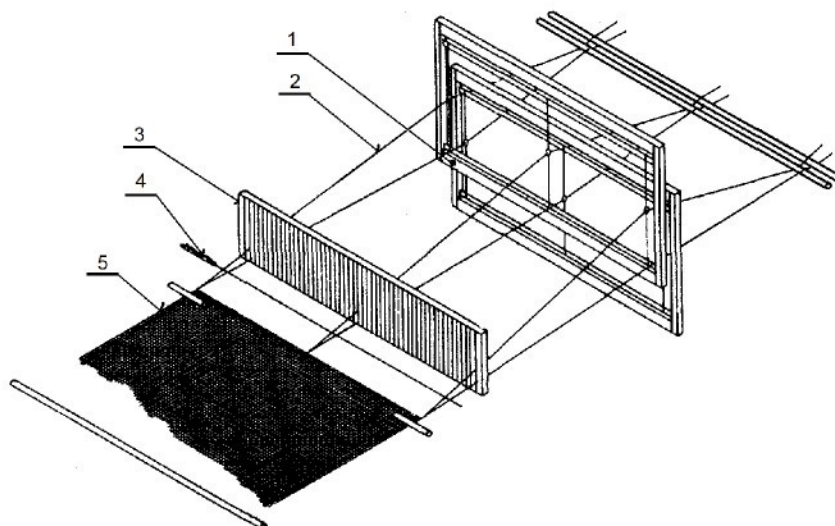
Tkaní je jednou z nejstarších technologií výroby plošné textilie. Základním principem tkaní je vytváření vazby mezi podélnou soustavou osnovních nití a příčným vkládáním útku. Popis principu tkaní je na *obr. 1*. Podélná soustava nití je ovládána pomocí prošlupního zařízení, které vratným pohybem vytváří klínovitý prostor. Tento prostor slouží pro zanesení útkové nitě a způsob jeho vytváření určuje typ vyráběné vazby. Základní princip vytváření tkané textilie se od starověku nezměnil. Zdlouhavým vývojem prošly způsoby vytváření prošlupu a zanášení útkové nitě. Především v době průmyslové revoluce docházelo zlomově ke zvyšování produktivity práce přechodem z ručního tkaní na strojní. Od manuálního ovládání jednotlivých funkčních částí se přecházelo na strojní, poloautomatické a v poslední době i k plnoautomatickému ovládání i podpůrných technologických operací, jako je navádění osnovy do brdových listů apod.

Tkací stroj lze rozdělit na několik funkčních částí, které ve vzájemné závislosti vytvářejí podmínky pro samotnou technologickou operaci. Základní tři operace jsou tvorba prošlupu, prohozu a přírazu. Tyto zajišťují vytvoření prošlupu pro zanesení útkové příze a její přiřazení do čela tkaniny. Potom to jsou podpůrné operace zajišťující především pohyb osnovy, tzv. osnovní regulátor a zboží (tkaniny) tzv. zboží regulátor.

Rozdělení tkacích strojů lze provést z hlediska způsobu prohozu útku, otvírání prošlupu popřípadě typu vazby. První prohozy útku byly prováděny ručně. Převratným vynálezem byl tzv. člunek, kterého bylo možno použít pro mechanizaci samotného prohozu. V dutině člunku dochází k odvíjení útku z výměnných cívek. Vzhledem k hmotě člunku a tím potřebné energie nutné k udělení hybnosti pro přelet napříč prošlupem, je frekvence do značné míry limitována. Z tohoto důvodu bylo nutno provést modifikaci tohoto způsobu na prohoz pomocí tzv. skřipce, nebo pomocí jehly. Prohoz skřipcem je alternativou prohozu člunkem (jsou to tzv. balistické prohozy), útková niť ovšem není odvíjena ze samotného skřipce, nýbrž je skřipcem při prohozu tažena ze stacionárního odvíječe. Druhou alternativou je protažení příze pomocí jehly, která vykonává vratný pohyb napříč prošlupem. Konstrukční provedení jehlového prohozu je buď pomocí jednostranné jehly, a to pevné nebo ohebné

(použitelné u malých tkacích šířek), nebo pomocí oboustranného prohozu, kde si jehly konec útku ve středu prohozu navzájem předávají. Poslední a nejnovější metodou prohozu je zanesení útku pomocí proudu vzduchu nebo vodního paprsku. Tento druh prohozu umožňuje největší výkony.

Další rozdělení tkacích strojů je podle způsobu vytváření prošlupu. Způsob vytváření prošlupu je dán přímo vazbou, která se na daném tkacím stroji produkuje. Obecně lze rozdělit druhy zboží na plátno (plátnová vazba), kepr (keprová vazba), atlas (atlasová vazba), popřípadě na žakárskou vazbu. Pro první tři vazby se používá klasický prošlup, kde díky periodickému střídání vazebních stříd jsou osnovní nitě navedeny do tzv. brdových listů a liší se pouze počtem listů a způsobem ovládání. Pro plátnovou vazbu se používá nejčastěji přímé ovládání listů pomocí tzv. prošlupního mechanismu, který může být klikový nebo vačkový. Pro zbylé dvě vazby se používá především tzv. listový stroj, který lze ovládat a programovat pomocí děrné karty, nebo pomocí elektroniky. Poslední je žakárová vazba, kde je každá osnovní nit' ovládána zvlášť pomocí tzv. žakáru. Žakár je programovatelné zařízení ovládané děrnou kartou, nebo též elektronicky.



Obr. 1 Schematické znázornění tkacího procesu

1. prošlup
2. osnova
3. paprsek
4. prohoz
5. tkanina

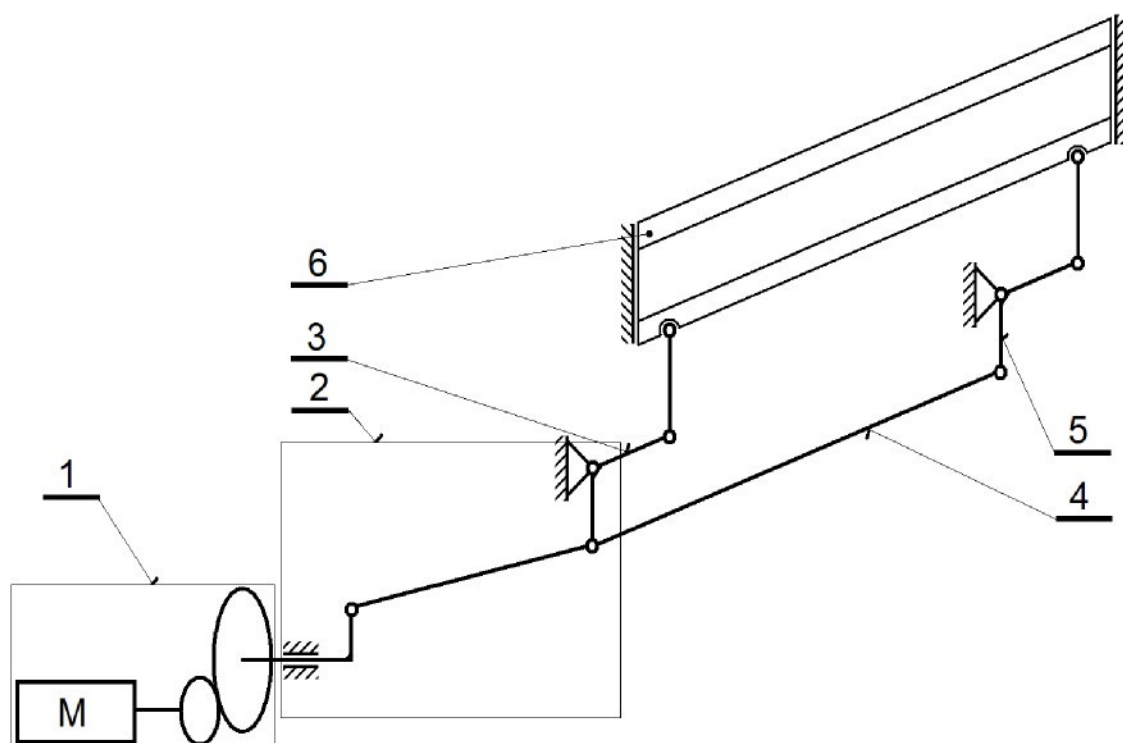
Tkací stroj zajišťuje následující technologické operace:

- prohoz útku – prohozní mechanismus
- otevírání prošlupu – prošlupní mechanismus
- příraz prohozeného útku do čela tkaniny – přírazový mechanismus
- pohyb osnovy a tkaniny – osnovní a zbožový regulátor

Vzhledem k náplni této práce je v následujících podkapitolách proveden pouze popis prošlupního zařízení a především brdového listu.

1.1. Popis prošlupního zařízení

Prošlupní zařízení jako takové má za úkol transformovat rotační pohyb od hlavní pohonné jednotky na přímočarý vratný pohyb brdového listu *obr. 2*, nebo nitového očka, jejímž prostřednictvím je ovládán pohyb jednotlivých osnovních nití. Hlavní pohonnou jednotkou je v případě tkacího stroje elektromotor (se spojkou). Tato soustava musí být navržena a dimenzována tak, aby bylo možno v případě chybového hlášení (přetržení osnovní nitě, nedolet útku) stroj zastavit při poměrně malém pootočení hlavního hřídele. Totéž platí pro náběh na pracovní otáčky. Zmenší se riziko snížení jakosti zboží a vzniku pruhovitosti. K transformaci pohybu dochází již na první části prošlupního mechanismu. Pomocí převodu ozubenými koly (ozubeným řemenem) z hlavního hřídele, který je s převodovým poměrem $1/2$ (na jeden dvouzdvih, čili jednu otáčku, prošlupního zařízení připadají dva prohozené útky), je převáděn rotační pohyb na klikovou hřídel, nebo na dvouvačku. To určuje výslednou charakteristiku zdvihu brdového listu. Dalším článkem prošlupního zařízení je řetězec, který slouží k přenášení pohybu na brdový list. Zpravidla jde o čtyřkloubový mechanismus (obecný nebo paralelogram). Brdový list je zavěšen na mechanismus pomocí dvou závěsů, u velkých tkacích šířek může být závěsů i více. Problematickou částí je spojovací táhlo mezi částmi mechanismu zajišťující pohyb brdového listu na stranách, popřípadě i na více místech. Toto táhlo bývá zpravidla dlouhé a s ohledem na konstrukci prošlupu s nízkou příčnou tuhostí. Proto musí být tato táhla vyztužena v kolmé rovině na směr pohybu v jedné ose pomocí kluzného vedení, a ve druhé ose pomocí podpůrných vahadélek.



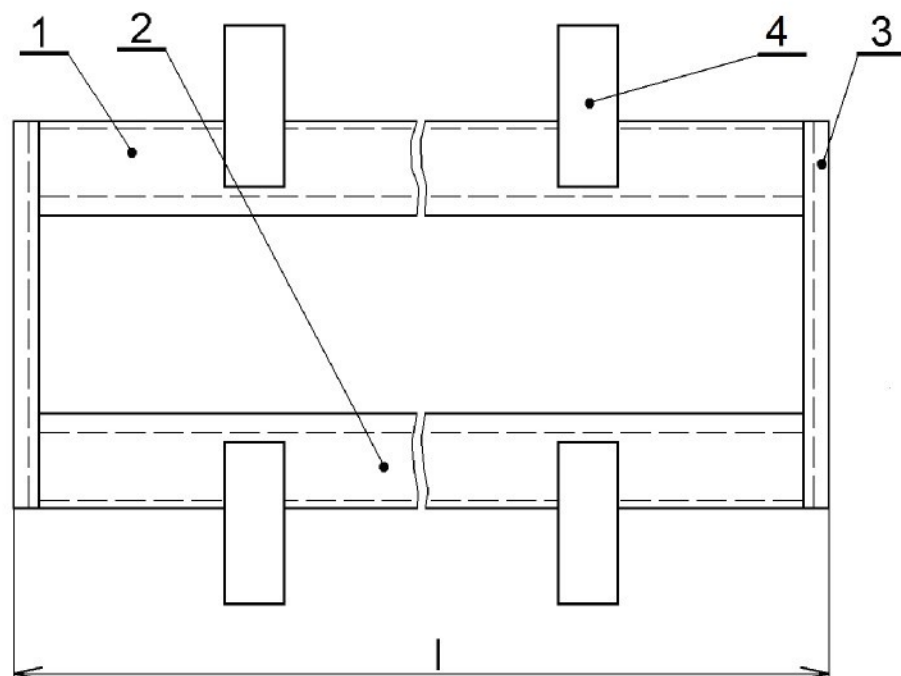
Obr. 2 Schéma prošlupního zařízení

- | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 1. elektromotor s převodem | 4. táhlo čtyřkolobového paralelogramu |
| 2. čtyřkloubový mechanismus s klikou | 5. pravé vahadlo paralelogramu |
| 3. levé vahadlo paralelogramu | 6. brdový list |

1.2. Popis brdového listu

Brdový list je specifickou součástí prošlupního mechanismu. Tvarem je to rám obdélníkového tvaru. Brdové listy sestávají obecně z horního a dolního činku 1, 2 a dvou postranic 3 obr. 3. Konstrukce brdového listu prošla dlouholetým vývojem. Z počátku bylo pro výrobu využíváno dřevěných materiálů, které ovšem se zvyšujícími se výkony pevnostně nevyhovovaly. V současné době jsou nejvíce využíváným materiálem, především pro výrobu činku, slitiny na bázi hliníku. Čínek je velice dynamicky zatěžovaným článkem brdového listu a jeho konstrukce musí být ve směru pohybu velice tuhá a zároveň málo hmotná. Postranice zajišťují vazbu mezi spodním a horním čínkem a v některých případech i přenos hybnosti mezi brdovým listem a prošlupním zařízením. Způsobů spojení postranice a činku je celá řada. Tuhost spoje spolu s tuhostí postranice má vliv na celkovou tuhost listu, a tím na celkové deformace během tkacího cyklu. Činky jsou opatřeny tzv. nosnými dráty, které slouží k zavěšení nitěnek. Samotné nitěnky jsou zavěšeny s nutnou

konstrukční vůlí mezi dvě nosné kolejničky. Nosná kolejnička je vyrobena z ušlechtilé oceli a s čínkem je spojena buď přímo nýtovým spojem, nebo pomocí závěsu.

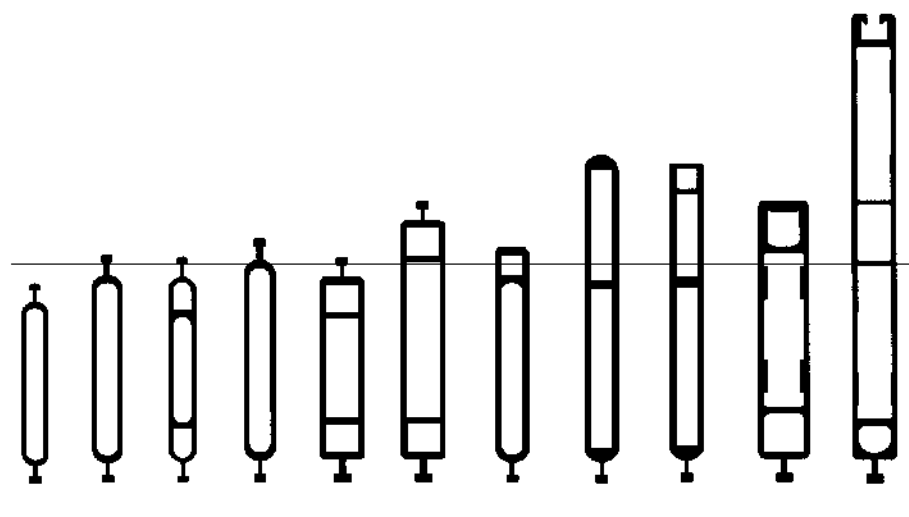


Obr. 3 Brdový list

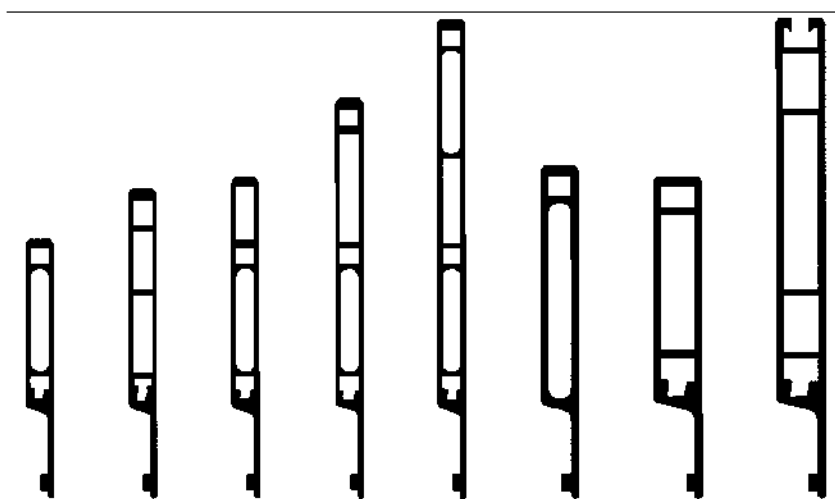
1. horní čínek, 2. dolní čínek, 3. postranice, 4. náběh

Čínek: Čínek je nejdůležitější a nejvíce namáhanou částí brdového listu. Snahou v konstrukci čínků je snižování hmotnosti a přitom zachování vysoké tuhosti. Nejčastěji používanými čínky jsou tenkostěnné duté extrudované profily ze slitin hliníku *obr. 4*. Ty se dají rozdělit na dvě skupiny, z nichž první jsou profily symetrické a druhé nesymetrické. Symetrické jsou na koncích průřezů (na jednom, nebo na obou koncích) osazeny výstupkem ve tvaru T, který slouží k uchycení závěsu nosného drátu. Nesymetrické průřezy jsou na jedné straně prodlouženy a opatřeny výstupkem pro nanýtování nosného drátu. Toto prodloužení má velký vliv na zvýšení ohybové tuhosti samotného čínku. I samotná nosná kolejnička k tomuto zvýšení napomáhá. Dutina může být vyplněná pěnovým materiálem pro lepší útlum vibrací, což vede také ke snížení hlučnosti. Novým trendem v konstrukci čínků je též využívání kompozitních materiálů na bázi uhlíkových vláken. Tento materiál vyniká velmi nízkou hmotností a vysokou tuhostí. Výrobou brdových listů s použitím čínků

vyrobených z kompozitních materiálů se zabývá firma Stäubli. Tyto brdové listy lze požit pro otáčky 1500 ot/min. Firma GROB, která se zabývá výrobou brdových listů a příslušenství, má pro špičkové výkony vyvinut činek, který je svařen z velmi tenkých plechů. Proti borcení profilu je dutina vyztužena jakousi mřížkou ve tvaru pravidelných šestibokých kvádrů. Tento brdový list je navržen pro špičkové výkony. Jeho cena je ovšem vysoká.



a. průřezy činků pro zavěšené nosné dráty

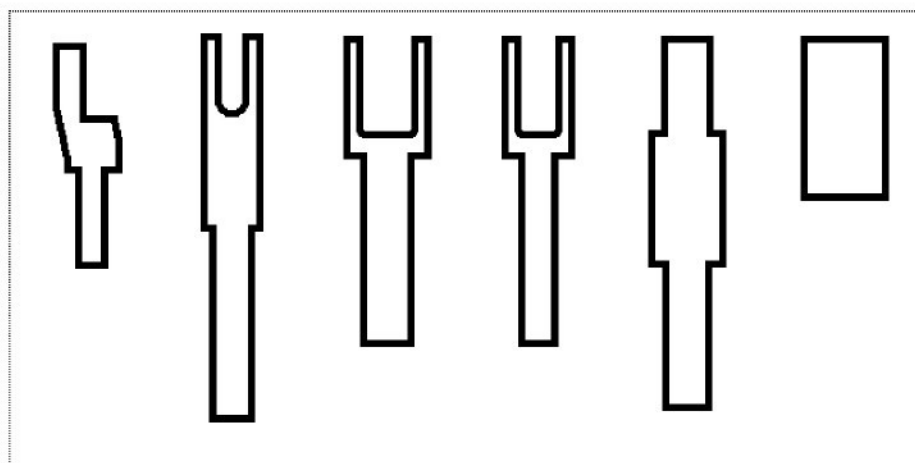


b. průřezy činků pro nanýťované nosné dráty

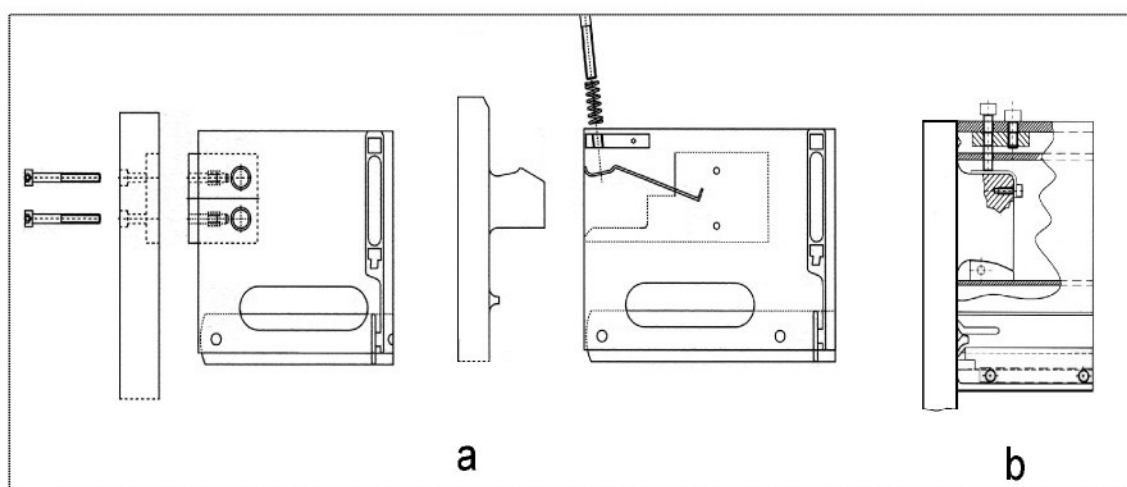
Obr. 4 Typy průřezů činků od firmy DERIX

Postranice: Postranice slouží ke spojení spodního a horního činku a také zajišťuje postranní vedení listů. Příklady různých průřezů postranic jsou zobrazeny na obr. 5. Velmi důležitým konstrukčním uzlem je spojení činku a

postranice. Ve světě je používána celá řada způsobů. Spoj by měl být poměrně tuhý a odolný vůči stálému dynamickému zatěžování a zároveň snadno demontovatelný. Na *obr. 6* jsou znázorněny některé používané způsoby spoje.

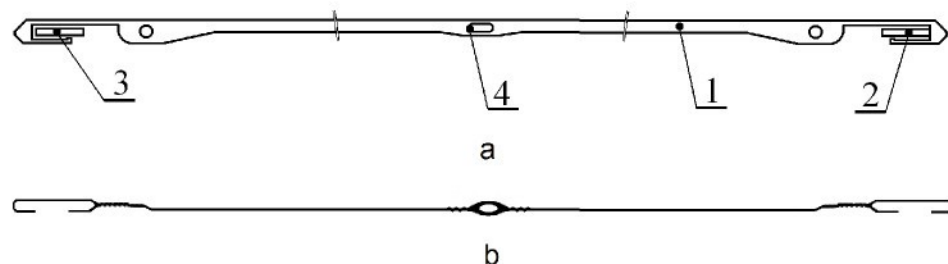


Obr. 5 Typy průřezů postranic (ITEMA GROUP)



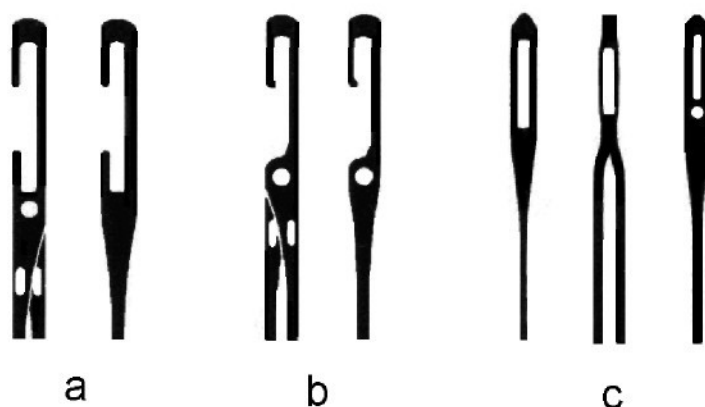
Obr.6 Spoj činek – a. postranice (DERIX), b. ITEMA GROUP,

Nitěnka: Nitěnka je posledním komponentem v transformaci pohybu a zajišťuje vazbu mezi prošlupným mechanismem a samotnou osnovou. Vyrábějí se buď ražením z tenkého plechu, nebo z drátu *obr. 7*. Tvary nitového oka a závěsných ok se liší podle konstrukce. V praxi se používají nejčastěji tři druhy závěsných ok. Jedná se o oka typu C, J a O *obr. 8*.



Obr. 7 Popis nitěnky

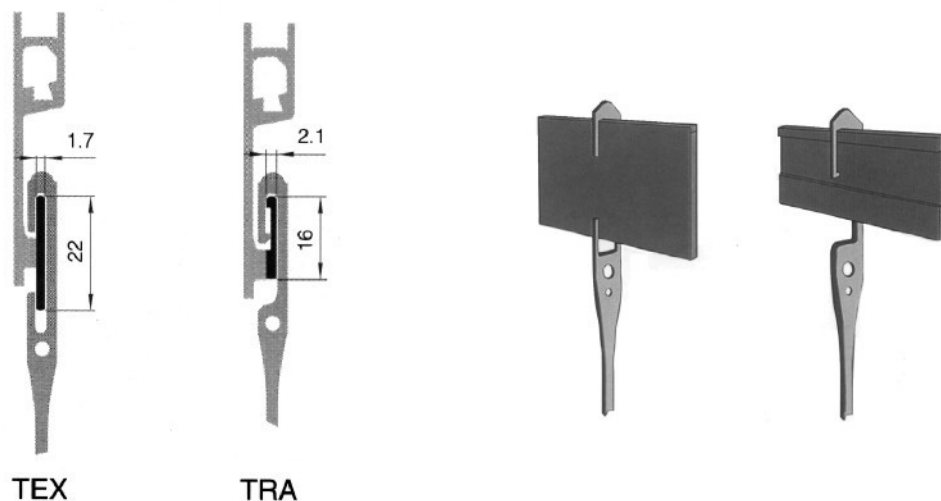
- | | | | |
|-------|-----------------------------------|----|--------------------------|
| a. | ražená nitěnka z ocelového plechu | b. | nitěnka vyrobená z drátu |
| 1. | tělo nitěnky | 4. | nit'ové očko |
| 2, 3. | závěsná oka na nosném drátu | | |



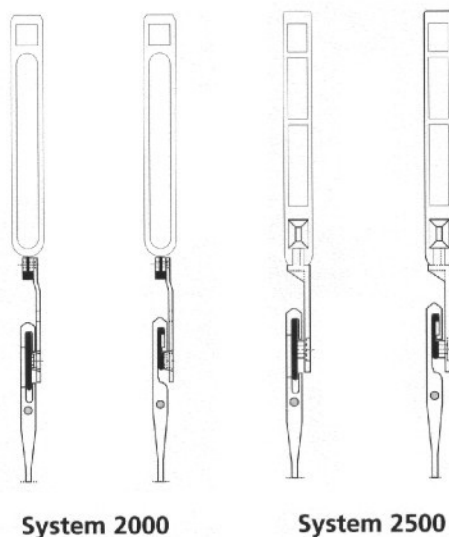
Obr. 8 Různé varianty závěsného oka – ražené nitěnky

- | | |
|----|--------------------|
| a. | závěsné oko typu C |
| b. | závěsné oko typu J |
| c. | závěsné oko typu O |

Nosná kolejnička: Nosná kolejnička slouží jako prostředek pro zavěšení nitěnky. Je součástí činku a je s ním pevně propojena. Jedná se o prizmatickou tyč obdélníkového průřezu, která je vyrobená z ušlechtilé oceli. Pro závěsná oka typu C a J je nosná kolejnička spojena s činkem v pravidelných roztečích pomocí nýtů. Dva typy závěsů od firmy GROB jsou znázorněny na obr. 9. Naproti tomu firma DERIX nabízí činky se zavěšenými nosnými dráty. Dva typy závěsů jsou znázorněny na obr. 10. Pro závěsná oka typu O je nosná kolejnička zavěšena v pravidelných roztečích na činek pomocí závěsů.



Obr. 9 Typy závěsů nitěnek se závěsným okem typu C a J od firmy GROB – nanýťovaná nosná kolejnička



Obr. 10 Typy závěsů nitěnek se závěsným okem typu C a J od firmy DERIX – zavěšená nosná kolejnička

2. Cíl disertační práce

Tato práce má za cíl analyzovat zdroje dynamických účinků prošlupního systému tkacího stroje. Základní funkcí tohoto systému je vytváření klínovitého prostoru pro zanesení útkové nitě s cílem vytvoření požadované vazby. Toto se děje prostřednictvím tzv. brdového listu, který zajišťuje vazbu mezi soustavou osnovních nití a zdvihovou funkcí prošlupního zařízení. Problematickou částí celého systému je právě brdový list.

Zdvihovou funkci brdového listu zajišťuje prošlupní zařízení. To má za úkol transformaci rotačního pohybu hlavního hřídele na vratný pohyb brdového listu. Hnací jednotkou rozumíme mechanismus primární transformace pohybu mezi hlavním hřídelem a prošlupním mechanismem. Nejčastěji používanou hnací jednotkou je klikový mechanismus, vačkový mechanismus a listový stroj. Tyto mechanismy se liší zdvihovou funkcí. Klikový mechanismus generuje přibližně sinusový průběh, listový stroj pracuje na principu excentru (klikového mechanismu) nebo vačky. Je-li požadavek klidového stavu během otáčky hlavního hřídele (rozevření prošlupu je během části otáčky v klidu), používáme vačkového mechanismu (dvouvačky), u kterého si můžeme definovat námi požadovanou zdvihovou závislost. Dalším blokem je samotný prošlupní mechanismus. Ve většině případů jde o paralelogram, který má za úkol přenášet pohyb do závěsů třetího bloku – brdového listu. Prošlupní mechanismus může také sloužit k transformaci přibližného sinusového průběhu hnacího mechanismu na námi požadovaný průběh zdvihové závislosti brdového listu. Přenos hybnosti mezi prošlupním mechanismem a brdovým listem se odehrává pomocí tzv. závěsu brdového listu, který je zkonstruován tak, aby byla možná záměna brdového listu při osazování tkacího stroje osnovou. Klasické tkací stroje s menší tkací šíří používají dvoubodový přenos, široké potom vícebodový, kde ovšem musí být brdový list opatřen výztuží tak, aby byl zajištěn přenos tuhosti mezi činky.

Při pohybu prošlupního mechanismu dochází k vratnému cyklickému pohybu poměrně velkých hmot. To má za následek vznik dynamických účinků od setrvačných sil. K tomu je nutno přidat dynamické účinky vznikající od rázů členů s vůlí v kinematické vazbě. Tyto vůle se vyskytují v rotačních vazbách a v případě prošlupního mechanismu je nutno zahrnout nutnou konstrukční vůli v kluzném vedení brdového listu a v závěsu nitěnky mezi nosné dráty. Vznik dynamického zatížení od vůlí ve vazbách prošlupního mechanismu je velký problém, kterému je potřeba věnovat patřičnou pozornost i vzhledem k charakteru vratného pohybu. Každá vůle přináší vznik rázů a tím i zvýšené namáhání dalších vazeb, které přináší zvýšené opotřebení a snížení životnosti všech komponentů.

Velkou pozornost vyžaduje konstrukční uspořádání brdového listu s ohledem na chování nitěnek. Konstrukční vůle v uchycení nitěnky je poměrně velkým problémem, který by bylo možné potlačit například minimalizací konstrukční vůle, nebo nahrazením vůle pružným členem. Pružný člen může za určitých podmínek odstranit nutnou konstrukční vůli, popřípadě umožnit snížení této vůle. Pokud by byl pružný člen integrován přímo v koncovém očku, mohl by umožnit (v závislosti na tuhosti a dynamických vlastnostech) až několikanásobné snížení rázové síly. Způsob řešení je do značné míry omezen technologií výroby tkaniny. Daná úprava musí umožnit veškeré technologické operace související se samotnou výrobou. Těmito operacemi je navádění osnovy do brdových listů, výměna poškozených nitěnek, odstraňování přetrhů, vystředování nitěnek během tkacího procesu atd. Ideálním případem by bylo použití nitěnek bez konstrukční vůle. To by znamenalo nahrazení vůle pružným členem, a navíc vyvolání minimálního předpětí, tak aby během pracovního cyklu nedošlo k odpoutání nitěnky od nosného drátu. Toto konstrukční řešení má vzhledem k technologickým nárokům omezené použití. Především jde o ztížené navádění osnovy a odstraňování přetrhů. To použití tohoto řešení ve většině případů vylučuje (alespoň k dnešnímu stavu techniky a technologie). Přesto v některých případech výroby např. technických těžkých textilií to může mít velký význam při snižování dynamického zatěžování, hlučnosti a především opotřebení a tím zvýšení životnosti některých komponent. V ostatních případech by bylo doporučeno použít varianty se sníženou vůlí a pružným dopadem nitěnek na nosnou kolejničku. Efekt není takový, ale k výraznému zlepšení by za určitých podmínek dojít mělo.

Tato práce má za cíl tato řešení matematicky popsat a vytvořit vhodný analytický prostředek umožňující danou problematiku početně řešit. Toto řešení by mělo umožnit podrobnou studii problematiky brdového listu a dát tak možnost najít efektivní cestu k možným řešením. Nedílnou částí je i experimentální ověření matematického modelu. Práce nemá za cíl navržení konkrétního konstrukčního řešení, nýbrž specifikovat možné cesty k samotnému řešení.

3. Rozbor konstrukce a zatížení brdového listu

3.1. Rozbor zatížení

Brdový list tkacího stroje je zatížen především dynamickými silami vznikajícími při vratném pohybu. Velikost těchto sil je závislá na kinematických veličinách a na pohybujících se hmotách. Kinematické veličiny jsou určeny od zdvihových závislostí prošlupního mechanismu. V zásadě jsou používány dva druhy závislostí. Přibližně sinusová závislost klikového prošlupního mechanismu (excentrického mechanismu) a obecná závislost vačkového mechanismu. Vačkový mechanismus umožňuje optimálně definovat průběhy zrychlení především v oblastech změny smyslu tohoto zrychlení a tím snížit dynamické zatížení. To lze též snížit optimálním navržením brdového listu o co nejnižší hmotě.

Další zatížení brdového listu vzniká prostřednictvím nitěnek, které se pohybují zároveň s brdovým listem a přenášejí na prošlupní zařízení jak dynamickou sílu od vlastní hmoty, tak i sílu vyvozenou od tahu v osnově. Přestože mají samotné nitěnky malou hmotnost (řádově několik gramů), tak vzhledem k jejich množství není jimi vyvozená dynamická síla zanedbatelná. Nitěnky jsou navíc v brdovém listu zavěšeny s jistou nutnou konstrukční vůlí, která vnáší do celkového dynamického zatížení poměrně značnou dynamickou rázovou sílu. Ta je potom odvislá od kinematických veličin hnacího mechanismu, silového působení osnovních nití a schopnosti celkové konstrukce tuto sílu co nejvíce utlumit. Velikost rázové síly je přímo závislá na rozdílu rychlostí v momentě dopadu nitěnky na nosnou kolejničku. Tento rozdíl je závislý na celé řadě faktorů. V první řadě je to dáno velikostí vůle a kinematickými poměry na nitěnce. Celá tato záležitost je do značné míry zkomplikovaná poddajností brdového listu a jeho dynamického naladění. Při vratném pohybu je vlivem rázů od nitěnek rám rozkmitáván. K přenášení hybnosti z prošlupního mechanismu na brdový list dochází v závěsu listu, který bývá umístěn na kraji spodního činku. Tím pádem bývají tuhosti obou činků rozdílné a kmitají tedy i s rozdílnou frekvencí. Může se tedy stát, že k dopadu nitěnky na nosný drát dojde v protifázi (pohyb nitěnky jde proti pohybu činku).

Určení průběhů tahových sil v osnově je poměrně těžko definovatelnou záležitostí. Pro přiblížení lze nahradit osnovu nelineární pružinou, která je závislá na protažení příze – rozevření prošlupu.

V dynamickém zatížení se též projeví i další konstrukční vůle jak v uložení a kloubových spojích zdvihacího mechanismu, tak vůle ve vedení samotného brdového listu. Ten je veden ve dvou směrech kolmo na směr pohybu. Boční vedení zajišťuje přímočarý pohyb listu. Vůle zde musí být poměrně velká a to z důvodů zabránění přičení. Další boční vedení zabraňuje ohýbání listů ve směru nízké ohybové tuhosti činku a je provedeno pomocí dřevěných nebo plastových náběhů, které jsou nalepeny na činkách brdového listu. Krajiní jsou potom pevně spojeny s rámem tkacího stroje.

3.2. Rozbor pohybu nitěnek

Nitěnka koná spolu s brdovým listem cyklický přímočarý vratný pohyb, který je do značné míry zkomplikovaný momentem, kdy dochází ke změně vazby nitěnky na nosnou kolejničku (nitěnka přenáší pouze tahové síly). Po jistý časový interval nemá nitěnka vazbu s žádným z nosných drátů a její pohyb v prostoru je závislý od počátečních podmínek, které jsou dány v okamžiku odlepení nitěnky od nosného drátu, se kterým měla silovou vazbu. Dále závisí na hmotnosti nitěnky a na průběhu tahových sil v osnově a také na velikosti konstrukční vůle. Matematický model nitěnky je odvozen v kapitole 5. Dalším problémem při definování momentu dopadu je fakt, že zde dochází k několika odskokům a tedy ke vzniku jisté budící frekvence, která může mít při nesprávném naladění soustavy vliv na snížení životnosti jednotlivých částí brdového listu.

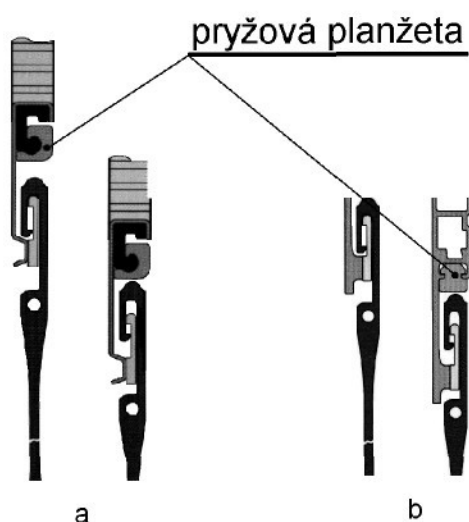
3.3. Rozbor vstupních kinematických veličin

Pohyb prošlupního mechanismu se odvíjí od kinematické závislosti hnací jednotky. Tkací stroj má jednu hlavní hnací jednotku (soustava elektromotor-spojka-setrvačnick), od které se odvíjejí jednotlivé pohyby hlavních funkčních celků. Jde o příraz, prošlup a prohoz. U vzduchových či hydraulických prohozů jde potom jen o příraz a prošlup. Na hnací člen jsou napojeny kinematické řetězce, které mají svou dynamiku, kterou musí hnací jednotka uvést do pohybu. U prošlupního a přírazového mechanismu jde o vratný pohyb, který

vyvolává dle typu těchto řetězců jistý průběh hnacího momentu. Ten má za následek kolísání otáček. Dochází zde tedy k určité změně vstupních kinematických průběhů na rozdíl od teoreticky vypočtených z konstantních otáček. V případě prošlupního mechanismu navazuje na hnací jednotku, popřípadě na hlavní hřídel mechanismu, který transformuje rotační pohyb na vratný pohyb samotného prošlupního zařízení. Tento mechanismus může být klikový nebo vačkový. Klikový mechanismus transformuje rotační pohyb přibližně na sinusový průběh natočení vahadla. Vačkový mechanismus, který je realizován pomocí dvouvačky, je rotační pohyb transformovaný na námi definovaný průběh. Na brdový list je pohyb přenášen pomocí prošlupního mechanismu, který má za úkol transformovat kývavý pohyb hnacího mechanismu na přímočarý pohyb brdového listu. Na přenosové cestě je poměrně značný počet kinematických vazeb, které vnášejí do soustavy další dynamické zatížení vlivem rázů vznikajících od montážních vůlí v kloubech, či vůlí vzniklých provozním opotřebením.

3.4. Rozbor používaných konstrukčních řešení ke snížení rázu od nitěnek

Světoví výrobci brdových listů [16] a komponentů pro brdové listy používají několik konstrukčních úprav pro snížení rázu při přeskupování nitěnek. Především jde o úpravy, které mají za cíl utlumit tento ráz. Firma GROB Horgen má vyvinuté pro špičkové výkony speciální brdové listy s minimální hmotností, vysokou tuhostí a úpravou pro utlumení rázu. Samotný činek je vyroben z tenkých ocelových plechů, spojených švovými svary. Dutina profilu je vyplněna příčně vloženou mřížkou ve tvaru pravidelných šestiúhelníků, která zajišťuje vysokou stabilitu profilu při vysokých otáčkách. Pro snížení rázu od nitěnek je na protilehlé straně od nosného drátu umístěna ve speciální drážce pryžová planžeta (*obr. 11*) dle patentu DE 102 06 130 A1 - 2003. Ta má za úkol utlumit při změně silové vazby ráz od nitěnky. Toto opatření firma GROB využívá i pro extrudované hliníkové profily. Tato úprava nevyžaduje v podstatě žádný zásah do konstrukce profilu a tudíž efekt takto upraveného činku je při malých finančních nákladech značný. Nedochozí zde ovšem k úplné eliminaci těchto rázů. Ty vznikají na protilehlé straně (druhá nosná kolejnička).

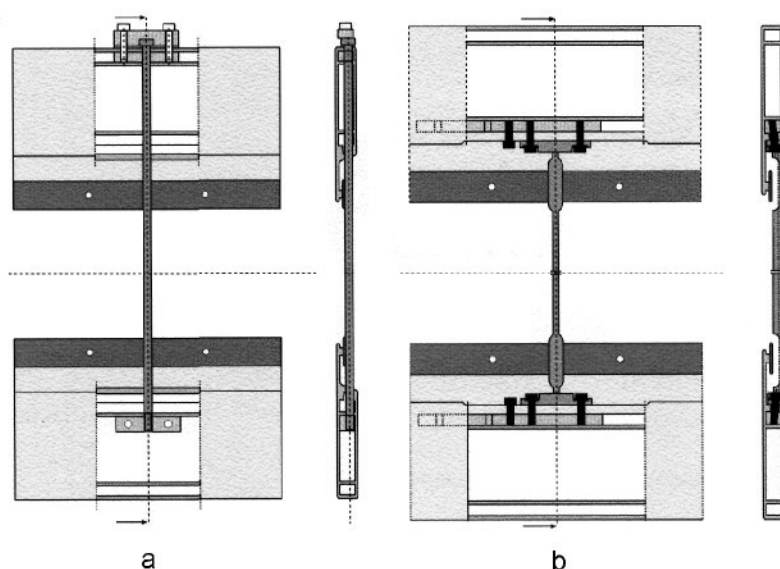


Obr. 11 Varianty tlumení rázu

- a. varianta pro ocelové činky
- b. varianta pro činky ze slitin hliníku

Jednou z dalších možností ke snížení dynamických účinků je úprava konstrukce brdového listu s cílem minimalizovat nutnou konstrukční vůli v uchycení nitěnky (obecně platí, že s velikostí vůle roste i rázová síla). Toho lze dosáhnout zvýšením tuhosti činků, nebo vhodným vyztužením brdového listu tak, aby dráha obou činků byla co nejvíce shodná. Firma DERIX má ve svém výrobním programu dvě varianty vyztužení brdového listu (obr. 12).

Při pohybu brdového listu u nesprávného naladění soustavy může dojít ke kmitání činku v protifázi, což vede k nutnosti instalace nitěnek se značnou vůlí. To vede poté při dopadu ke zvýšení rázové síly a v konečném důsledku ke snížení životnosti brdového listu, a také ke zvýšené únavové destrukci nitěnek.



Obr. 12 způsoby vyztužení brdového listu pro velké pracovní šířky

- a. varianta 1
- b. varianta 2

Další možností pro snížení, nebo úplnou eliminaci rázů při dopadu může být konstrukční úprava samotné nitěnky (závěsného oka). Na toto téma byla provedena řada patentových ochran, které řeší především buď utlumení rázu, nebo nahrazení vůle v závěsném oku pružným členem. Toto nahrazení lze provést s cílem úplné, nebo částečné eliminace vůle.

4. Rozbor platných patentových ochran

Problém uchycení nitěnky v brdovém listu je poměrně intenzivně řešenou záležitostí. Na toto téma byla za posledních deset let udělena celá řada patentních ochran [18]. Přesto nedošlo v aplikaci zatím k žádné velké změně a většina tkacích strojů je nadále osazována klasickým zavěšením nitěnek s vůlí. Způsob řešení lze rozdělit do tří základních oblastí:

1. Částečné, popřípadě úplné nahrazení vůle v závěsném oku pružným členem.
2. Utlumení rázu při dopadu nitěnky na nosnou kolejničku.
3. Eliminace vůle v jednom ze závěsných ok.

Značná část těchto variant znamená v určité fázi cyklu namáhání nitěnky na vzpěr. Použití v praxi brání vysoké náklady na výrobu a velká pracnost, popřípadě omezení v technologických operacích (odstraňování přetrhů osnovy, výměna poškozených nitěnek, problémy při navádění osnovy atd.).

Popis výběru patentových ochran:

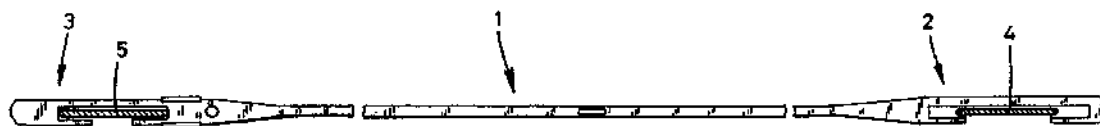
Poz. Jedná se o výběr některých udělených patentů. Ve většině případů jsou uděleny patentní ochrany ve více zemích a to buď formou evropského patentu EP, nebo některé i světového patentu WO.

EP 0 874 930 B1 - 1997:

Návrh je zaměřen na uchycení nitěnky tak, aby koncová oka měla jen malou, nebo žádnou vůli. Za tímto účelem bylo navrženo umístění roztažitelného prvku na nosný profilový úsek (nosná kolejnička) ve formě hadice, do které může být vháněna tekutina.

DE 195 48 176 - 1996:

Koncové očko nitěnky je přizpůsobeno tvarem nosnému drátu a je na něm umístěna bez vůle. Protilehlé očko obklopuje nosnou kolejničku s vůlí, která je přizpůsobena maximálnímu průhybu nosného drátu, *obr. 13*. Je obtížné stanovení maximálního průhybu. Ten je závislý na celé řadě faktorů.



Obr. 13 Způsob závěsu nitěnky – jedno koncové oko bez vůle, dle patentu DE 195 48 176

DE 29 35 5047 - 1980:

Jde o eliminaci vůle v závěsu oka. Za účelem kompenzování této vůle je na jednom koncovém oku uložena tlačná pružina, která je podepírána jedním koncem na koncovém oku a druhým koncem na nosném drátu. V důsledku toho tato tlačná pružina přitlačuje protilehlé očko na nosnou kolejničku.

WO 2004/057076 A1 – 2004, DE 102 60 024 A1 – 2004, CZ 2005 – 395 A3 – 2005,:

Nitěnka je na svém koncovém oku opatřena pružinovými prostředky, které podepírají koncové očko pružně poddajně alespoň v jednom směru na nosné kolejničce (drátu). Pružinové prostředky slouží pro odstranění vůle mezi nitěnkou a osnovním listem, čímž se zvyšuje provozní rychlost mechanických tkalcovských stavů. Výhodou tohoto řešení je, že není nutno provádět modifikaci mechanického tkalcovského stavu – osnovního listu.

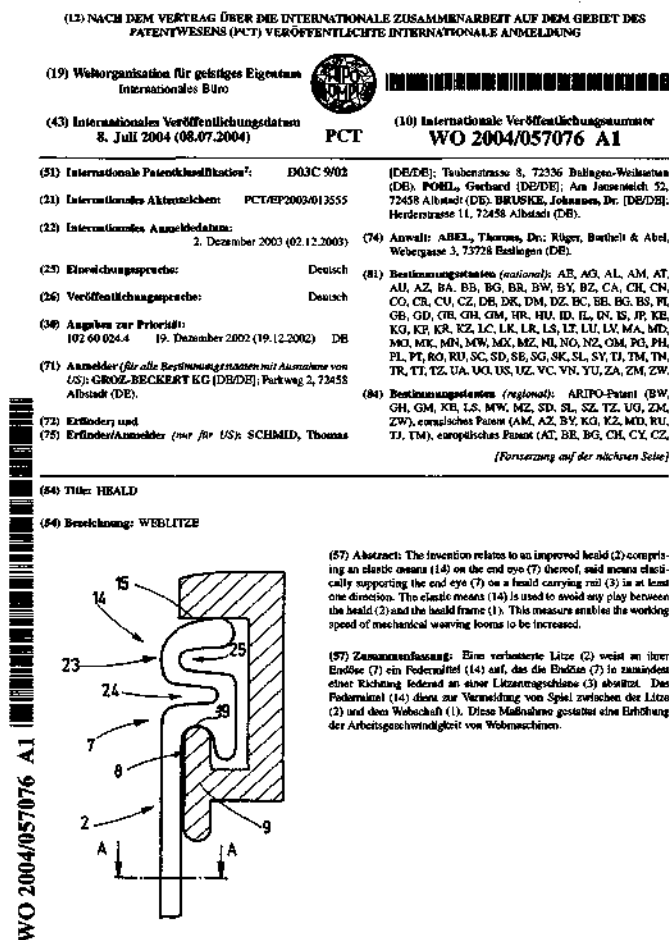
Pružinové prostředky jsou na koncovém oku, nebo integrálně s koncovým okem *obr. 15*. Umožňují nesení nitěnky bez vůle vzhledem ke směru pohybu. Pružinové prostředky také umožňují kompenzaci tolerancí, takže koncové očko může být udržováno v napjatém stavu mezi dvěma protilehlými plochami. Tím jsou vytvořeny předpoklady pro mechanické upínací ústrojí, u kterého jediný upínací člen nebo samostatná upínací kolejnička pevně uchycuje všechna koncová oka.

Pro vysokorychlostní tkalcovské stavy je pružnými prostředky vybaveno jen jedno koncové očko *obr. 16*. Druhý konec nitěnky je bez koncového oka.

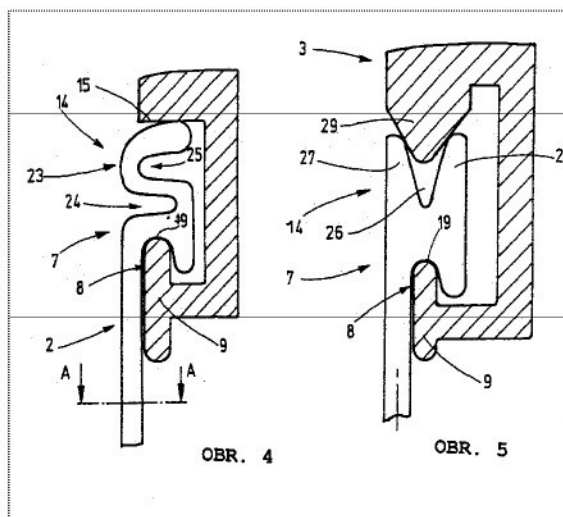
V takovém případě může být konec nitěnky uložen posuvně v osové směru ve vedení. V tomto případě musí být nitěnky odolné vůči vybočení a musí přenášet nejen tažné síly, ale i rovněž síly tlačné. Toho se dosáhne různým tvarováním průřezu těla nitěnky.

Koncová očka, opatřená pružinovými prostředky, umožňují pevné upnutí a to s pomocí upínacího ústrojí, uspořádaného na osnovním listu. Upínací ústrojí je s výhodou opatřeno tuhým upínacím kusem, který spolupracuje s pružinovými prostředky, přičemž může být ovládán mechanicky, např. s pomocí klínového upínacího ústrojí, nebo s pomocí prostředků ovládaných tekutinou.

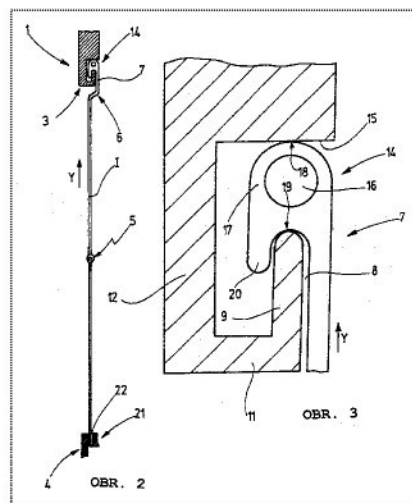
V souladu s dalším aspektem předmětu tohoto vynálezu byla rovněž vyvinuta nosná kolejnička pro uložení shora uvedené nitěnky obr. 15, 16. Ta má opěrnou plochu pro pružinové prostředky.



Obr. 14 Anotace patentu WO 2004/0570/076 A1



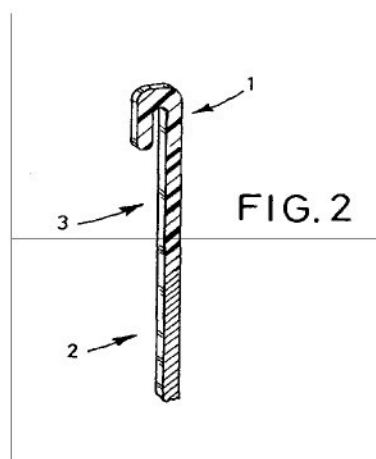
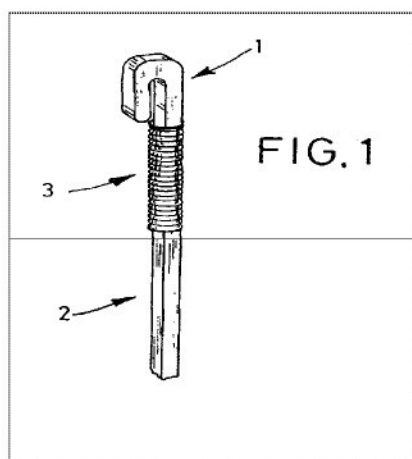
Obr. 15 Dvě možná konstrukční řešení závěsu koncového oka dle patentu WO 2004/0570/076 A1



Obr. 16 Další možná varianta pro vysokorychlostní tkalcovské stavy dle světového patentu WO 2004/0570/076 A1

EP 03 93 460 A2, DE 100 35 886 A1 - 2002:

Tento vynález se vztahuje na jednostranné pružné koncové oko , které fixuje druhé oko v pevné poloze. Pružný konec kompenzuje rozdíly vzdáleností mezi nosnými kolejničkami obr. 17.



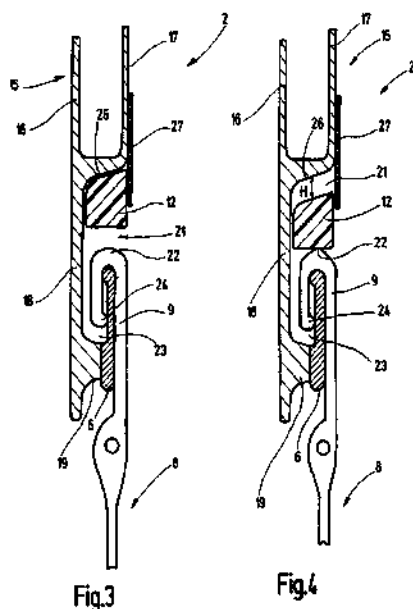
Obr. 17 Koncová oka opatřená pružinovými prostředky dle patentu DE 100 35 886 A1

WO 2005/001179 A1, DE 103 29 219 A1 - 2005:

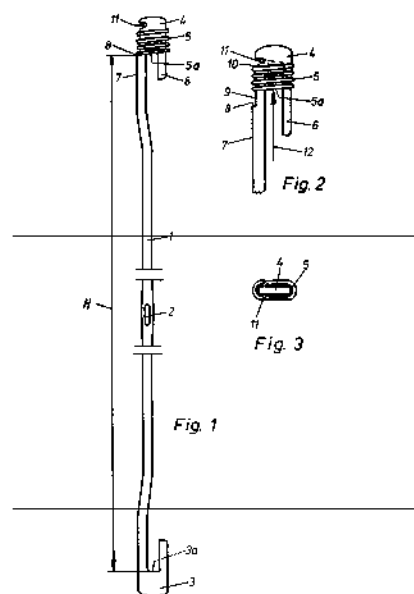
Koncové oko je při dopadu tlumeno pryžovou pružnou planžetou , která je délkově relativně stavitelná a tím umožňuje kompenzovat rozdíly průhybů podél rámu listu obr. 18.

EP 0 648 874 A1 - 1994:

Jedno koncové očko je opatřeno tlačnou pružinou *obr. 19*, která má za úkol eliminovat rozdíly odlehlosti mezi horní a spodní nosnou kolejničkou.



Obr. 18 Způsob tlumení rázu při dopadu nitěnky na nosnou kolejničku dle patentu DE 103 29 219 A1



Obr. 19 Konstrukční řešení EP 0 648 874 A1

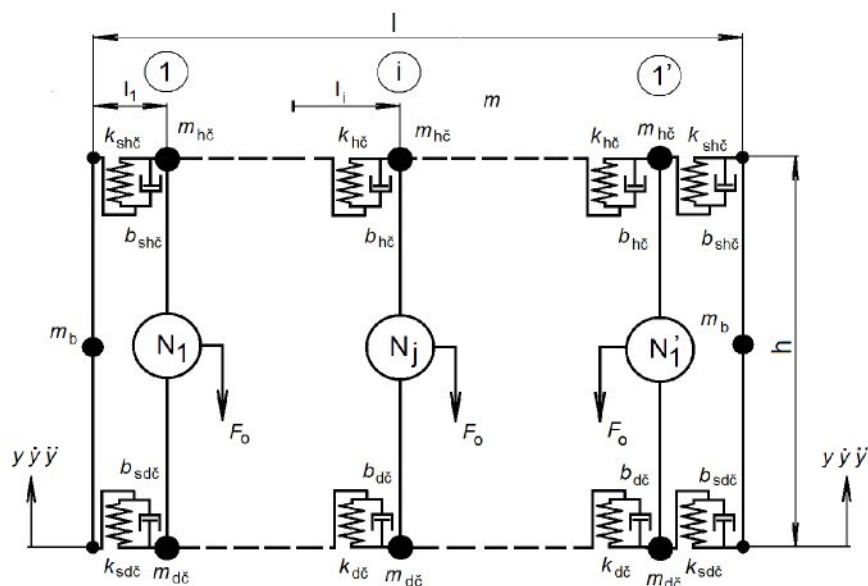
5. Sestavení matematického a výpočtového modelu brdového listu

V této kapitole je popsán matematický model rámu listu. Konstrukce brdových listů od různých výrobců je podobná, a je tedy možné sestavit obecný matematický model, který bude možné aplikovat na jakýkoliv brdový list. Při případném sestavování matematického modelu současného stavu konstrukce brdového listu narazíme v zásadě na dvě komplikace. Jednak je to nelinearita tahových sil v osnově, kterou lze těžko matematicky definovat, a o nelinearity vznikající na základě změn silových vazeb a vzniku rázů v uchycení nitěnek. Popis pohybu nitěnky není jednoduchou záležitostí. Tato vůle a její velikost má zásadní negativní účinek na dynamické zatížení brdového listu. Je to jeden z hlavních zdrojů rázů. Tvorba samotného modelu je rozdělena do několika kroků. Prvním krokem je matematický popis rámu listu bez nitěnek. Popis samotných nitěnek je proveden pro dvě varianty uchycení. První variantou je popis nitěnky s pružnými dosedacími konci a konstrukční vůlí. Tato varianta

umožní srovnávání chování nitěнки v závislosti na velikosti konstrukční vůle a tuhosti pružné části nitěнки. Druhou variantou je zavěšení nitěнки mezi nosné dráty pomocí pružného elementu s předpětím. Matematický a výpočtový model je navržen tak, aby bylo možno do stávajícího modelu rámu listu vložit jednu ze dvou variant modelu nitěnek. Model samotného rámu také poslouží pro srovnání s experimentem.

5.1. Matematický model rámu listu

Na obr. 20 je vyobrazen reologický model rámu listu. Nitěнки jsou zde zobrazeny pomocí bloku, který bude řešen dále. Činky brdového listu jsou nahrazeny soustavou pružných elementů s tlumením. Model vychází z nahrazení hmot hmotnými body a poddajnosti jednotlivých členů a segmentů viskoelastickými nehmotnými členy. Model je nutno opatřit i tlumením, které nahrazuje materiálové tlumení. Tuhost krajnice, spoje a prvního segmentu činky je redukováná do jedné tuhosti $k_{shč}$, $k_{sdč}$ a tlumení $b_{shč}$, $b_{sdč}$.



Obr. 20 Matematický model rámu listu – schématicky znázorněné bloky nitěnek

Jelikož se jedná o model symetrický, bylo by výhodné použít poloviční model. Tímto by stačil k popisu daného modelu poloviční počet rovnic. Problém nastane v okamžiku stanovení okrajových podmínek na rovině symetrie brdového listu. Tato varianta řešení nebyla nakonec použita, ale z úvahy o symetrii daného modelu vychází možnost řešení modelu jako celku.

Odvozený reologický model je na obr. 24, str. 38. Důležitým mezníkem je stanovení počtu náhradních nitěnek. Ten musí být takový, aby rovinu symetrie tvořila náhradní nitěnka. Počet nitěnek musí být tedy liché číslo. Pro matematický popis bylo použito 11 náhradních nitěnek. Budeme-li vycházet z předpokladu, že vstupní kinematické závislosti jsou totožné, tedy pohyb závěsů brdového listu na levé i pravé straně je stejný, a brdový list je osově symetrické těleso, potom můžeme uvažovat za stejné i kinematické závislosti osově symetrických hmotných bodů. Na základě této rovnosti bude počet rovnic redukovaný na polovinu. Shodnost veličin je podmíněna pomocí následujících vztahů:

$$\begin{aligned} y_{jh}, \dot{y}_{jh}, \ddot{y}_{jh} &= y_{(r+1-j)h}, \dot{y}_{(r+1-j)h}, \ddot{y}_{(r+1-j)h} \\ y_{jn}, \dot{y}_{jn}, \ddot{y}_{jn} &= y_{(r+1-j)n}, \dot{y}_{(r+1-j)n}, \ddot{y}_{(r+1-j)n} \\ y_{jd}, \dot{y}_{jd}, \ddot{y}_{jd} &= y_{(r+1-j)d}, \dot{y}_{(r+1-j)d}, \ddot{y}_{(r+1-j)d} \end{aligned} \quad (1)$$

kde $p = 10$ celkový počet segmentů činku (mimo krajních částí)

$r = 11$ celkový počet náhradních nitěnek

$i = 1 - 5$ i – tý segment činku (mimo krajních segmentů)

$j = 1 - 6$ j – tá nitěnka

$$k_{ih\check{c}} = k_{(p+1-i)h\check{c}}, \quad k_{id\check{c}} = k_{(p+1-i)d\check{c}}$$

$$b_{ih\check{c}} = b_{(p+1-i)h\check{c}}, \quad b_{id\check{c}} = b_{(p+1-i)d\check{c}}$$

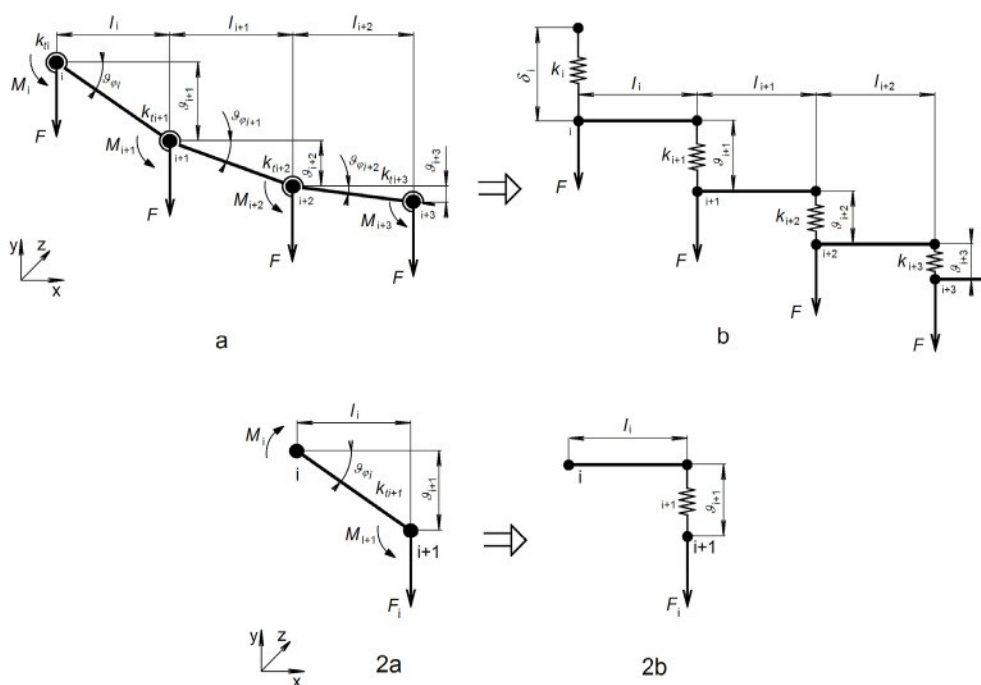
Poz. Činek je rozdělen na 10 stejných úseků a dva krajní, které mají poloviční délku a vlastnosti redukované spolu se spojem činku a postranice.

Před sestavením diferenciálních rovnic je potřeba se zamyslet nad způsobem namodelování činků (horního a dolního činku). Nosníky (činky) jsou vytvořeny jako soustava sériově zapojených pružin. Nabízí se otázka správnosti tohoto modelu. Ke správnému namodelování nosníku poslouží následující úvaha.

Vezmeme prizmatický nosník, který na koncích podepřeme a zatížíme jej deseti osamělými silami. Naproti tomu vytvoříme soustavu deseti sériově

zapojených pružin, které jsou v uzlových bodech rovněž zatíženy deseti osamělými silami. Ty musí mít takové vlastnosti, aby průhybová křivka, resp. posuvy uzlových bodů korespondovaly s posuvy prismatického reálného nosníku. Průhyb prismatického nosníku bude hladká křivka, naproti tomu průhyb náhradního nosníku bude lomená čára. Při analýze tohoto problému vycházíme z předpokladu, že dochází u daného modelu (vzhledem k malým deformacím) k posuvům jen ve směru osy y . Pružné části nosníku by se daly definovat jako zkrutná nebo ohybová pružina. Vzhledem k neznámým závislostem, které řeším v následujících kapitolách, bude výhodnější nahrazení pružné části dle *obr.21*. V zásadě jde o nahrazení tažnou pružinou deformovanou v námi požadovaném směru osy y .

Pro stanovení tuhostních parametrů by bylo možné také použít příčinkových činitelů a matice tuhostí. Nicméně vzhledem k zakomponování vlastností postranic do tuhostí činků byla aplikována výše uvedená analogie.



Obr. 21 Analogie nahrazení části pružného nosníku soustavou tažných pružin

a. reálný model b. náhradní model

U reálného modelu musí být splněna podmínka rovnováhy momentů. Tyto momenty spolu s okrajovými podmínkami jsou určující pro charakter průhybu daného nosníku. Model je řešen jako rovinná úloha. Pro i – tý segment platí následující rovnováha:

$$M_i - M_{i+1} + F_i \cdot l_i = M_i - M_{i+1} + k_{ti} \cdot \vartheta_i = 0 \quad (2)$$

kde k_{ti} je torzní tuhost nahrazující ohybovou tuhost segmentu nosníku
 F_i je celková síla působící na segment

Pro zjednodušení modelu je ohybová tuhost nosníku nahrazena torzní tuhostí k_{ti} , která je soustředěna do uzlového bodu. Průhybová křivka je potom aproximována lomenou čarou. V analogii s náhradním nosníkem je výhodné nahradit zkrutnou pružinu *obr. 21 a* tažnou pružinou *obr. 21 b* dle následujícího vztahu:

$$k_{ti} \cdot \vartheta_i = k_i \cdot \vartheta_i \cdot l_i \Rightarrow k_i = k_{ti} \cdot \frac{\vartheta_i}{\vartheta_i \cdot l_i} = k_{ti} \cdot \frac{1}{l_i^2} \quad (3)$$

potom

$$k_i = k_{ti} \cdot l_i^2$$

Z rovnováhy momentů vyjádříme tuhost náhradní pružiny k_i :

$$k_i = \frac{M_{i+1} - M_i}{l_i \cdot \vartheta_i} \quad (4)$$

Cílem analogie je navržení modelu rámu listu v co nejjednodušším tvaru. Činky brdového listu jsou vyrobeny z prizmatického nosníku o konstantních průřezových vlastnostech. Tuhost jednotlivých segmentů činku je závislá na relativním posunutí koncových bodů a na zatěžujících momentech od sousedních segmentů. Samotná tuhost jednoho segmentu, jedná-li se o stejné délky, je stejná, ovšem v modelu brdového listu je nutno započítat momenty, kterými na sebe působí jednotlivé segmenty. Tyto momenty můžeme eliminovat, pokud je započítáme přímo do tuhosti jednotlivých segmentů. Tuhost segmentů potom bude rozdílná.

Těchto tuhostí bude využito při sestavování modelu brdového listu. Otázkou zůstává, jak získat konkrétní hodnoty pro konkrétní brdový list. Jednou z možností je výpočet tuhostí z reálného nosníku zatíženého daným počtem osamělých sil. Z poměrů velikosti síly a relativního posunutí lze získat tuhost jednotlivých segmentů. Vycházíme z náhradního modelu činku dle *obr. 21 b*. Výsledku lze dosáhnout buď analytickým řešením, nebo jinou numerickou metodou. Podmínkou je, aby průhybová křivka reálného a náhradního nosníku byla shodná, resp. posunutí uzlových bodů souhlasilo s body na průhybové čáře reálného nosníku.

Poz. V této práci je pro získání posunutí uzlových bodů použito výpočtového modelu brdového listu s využitím programového prostředí Pro Engineer – mechanics structure pro analýzu metodou konečných prvků (kap. 5.6, str. 44). Výsledky z analýzy jsou srovnány s analytickým výpočtem. Metody konečných prvků bylo využito především z důvodů započítání vlivu bočnice brdového listu. Pro stanovení průhybu by se dalo použít také věty Maxwellovy.

Pro řešení daného modelu je využito Lagrangeovy rovnice druhého druhu, kterou lze napsat ve tvaru:

$$\frac{d}{dt} \cdot \left(\frac{dK}{d\dot{q}_i} \right) - \frac{\partial K}{\partial q_i} = Q - \frac{\partial U}{\partial q_i} - \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_i} \quad (5)$$

kde je: K	celková kinetická energie soustavy
U	celková potenciální energie soustavy
R	Rayleighova disipativní funkce
q_i	obecná souřadnice
Q	obecná síla

Model samotného rámu listu je výhodné sestavit s vazbami na náhradní nitěnky dle *obr. 20, str. 26*. Vůli neuvažujeme a pružné vazby bereme v předepjatém stavu, tj. se statickým předepnutím. Tímto způsobem vytvoříme vazby nitěnek na rám listu s možností napojení libovolné varianty závěsu nitěnky v brdovém listu.

Potom lze rovnice napsat ve tvaru:

- Celková kinetická energie

$$\begin{aligned}
 K = & m_b \cdot \dot{y}^2 + m_{h\delta} \cdot \dot{y}_{1h}^2 + m_{h\epsilon} \cdot \dot{y}_{2h}^2 + m_{h\epsilon} \cdot \dot{y}_{3h}^2 + m_{h\epsilon} \cdot \dot{y}_{4h}^2 + m_{h\epsilon} \cdot \dot{y}_{5h}^2 + \\
 & \frac{1}{2} \cdot m_{h\epsilon} \cdot \dot{y}_{6h}^2 + m_{d\delta} \cdot \dot{y}_{1d}^2 + m_{d\delta} \cdot \dot{y}_{2d}^2 + m_{d\delta} \cdot \dot{y}_{3d}^2 + m_{d\epsilon} \cdot \dot{y}_{4d}^2 + \\
 & m_{d\epsilon} \cdot \dot{y}_{5d}^2 + \frac{1}{2} \cdot m_{d\delta} \cdot \dot{y}_{6d}^2 + m_n \cdot \dot{y}_{1n}^2 + m_n \cdot \dot{y}_{2n}^2 + m_n \cdot \dot{y}_{3n}^2 + m_n \cdot \dot{y}_{4n}^2 + \\
 & m_n \cdot \dot{y}_{5n}^2 + \frac{1}{2} \cdot m_n \cdot \dot{y}_{6n}^2
 \end{aligned} \tag{6}$$

- Celková potenciální energie

$$\begin{aligned}
 U = & k_{sh\epsilon} \cdot (y - y_{1h})^2 + k_{h\epsilon 1} \cdot (y_{1h} - y_{2h})^2 + k_{h\epsilon 2} \cdot (y_{2h} - y_{3h})^2 + k_{h\epsilon 3} \cdot (y_{3h} - y_{4h})^2 + \\
 & k_{h\epsilon 4} \cdot (y_{4h} - y_{5h})^2 + k_{h\epsilon 5} \cdot (y_{5h} - y_{6h})^2 + k_{sd\epsilon} \cdot (y - y_{1d})^2 + k_{d\epsilon 1} \cdot (y_{1d} - y_{2d})^2 + \\
 & k_{d\epsilon 2} \cdot (y_{2d} - y_{3d})^2 + k_{d\epsilon 3} \cdot (y_{3d} - y_{4d})^2 + k_{d\epsilon 4} \cdot (y_{4d} - y_{5d})^2 + k_{d\epsilon 5} \cdot (y_{5d} - y_{6d})^2 + \\
 & k_n \cdot (y_{1h} - y_{1n} + \delta_{1h})^2 + k_n \cdot (y_{2h} - y_{2n} + \delta_{2h})^2 + k_n \cdot (y_{3h} - y_{3n} + \delta_{3h})^2 + \\
 & k_n \cdot (y_{4h} - y_{4n} + \delta_{4h})^2 + k_n \cdot (y_{5h} - y_{5n} + \delta_{5h})^2 + \frac{1}{2} \cdot k_n \cdot (y_{6h} - y_{6n} + \delta_{6h})^2 + \\
 & k_n \cdot (y_{1n} - y_{1d} + \delta_{1d})^2 + k_n \cdot (y_{2n} - y_{2d} + \delta_{2d})^2 + k_n \cdot (y_{3n} - y_{3d} + \delta_{3d})^2 + \\
 & k_n \cdot (y_{4n} - y_{4d} + \delta_{4d})^2 + k_n \cdot (y_{5n} - y_{5d} + \delta_{5d})^2 + \frac{1}{2} \cdot k_n \cdot (y_{6n} - y_{6d} + \delta_{6d})^2
 \end{aligned} \tag{7}$$

- Rayleigho disipativní funkce

$$\begin{aligned}
 R = & b_{sh\epsilon} \cdot (\dot{y} - \dot{y}_{1h})^2 + b_{h\epsilon 1} \cdot (\dot{y}_{1h} - \dot{y}_{2h})^2 + b_{h\epsilon 2} \cdot (\dot{y}_{2h} - \dot{y}_{3h})^2 + \\
 & b_{h\epsilon 3} \cdot (\dot{y}_{3h} - \dot{y}_{4h})^2 + b_{h\epsilon 4} \cdot (\dot{y}_{4h} - \dot{y}_{5h})^2 + b_{h\epsilon 5} \cdot (\dot{y}_{5h} - \dot{y}_{6h})^2 + \\
 & b_{sd\delta} \cdot (\dot{y} - \dot{y}_{1d})^2 + b_{d\delta 1} \cdot (\dot{y}_{1d} - \dot{y}_{2d})^2 + b_{d\delta 2} \cdot (\dot{y}_{2d} - \dot{y}_{3d})^2 + \\
 & b_{d\delta 3} \cdot (\dot{y}_{3d} - \dot{y}_{4d})^2 + b_{d\delta 4} \cdot (\dot{y}_{4d} - \dot{y}_{5d})^2 + b_{d\delta 5} \cdot (\dot{y}_{5d} - \dot{y}_{6d})^2 + \\
 & b_n \cdot (\dot{y}_{1h} - \dot{y}_{1n})^2 + b_n \cdot (\dot{y}_{2h} - \dot{y}_{2n})^2 + b_n \cdot (\dot{y}_{3h} - \dot{y}_{3n})^2 + \\
 & b_n \cdot (\dot{y}_{4h} - \dot{y}_{4n})^2 + b_n \cdot (\dot{y}_{5h} - \dot{y}_{5n})^2 + \frac{1}{2} \cdot b_n \cdot (\dot{y}_{6h} - \dot{y}_{6n})^2 + \\
 & b_n \cdot (\dot{y}_{1n} - \dot{y}_{1d})^2 + b_n \cdot (\dot{y}_{2n} - \dot{y}_{2d})^2 + b_n \cdot (\dot{y}_{3n} - \dot{y}_{3d})^2 + \\
 & b_n \cdot (\dot{y}_{4n} - \dot{y}_{4d})^2 + b_n \cdot (\dot{y}_{5n} - \dot{y}_{5d})^2 + \frac{1}{2} \cdot b_n \cdot (\dot{y}_{6n} - \dot{y}_{6d})^2
 \end{aligned} \tag{8}$$

- Celková zatěžující síla

$$Q = 2 \cdot k_o \cdot y_m + k_o \cdot y_{6n} + F_G \quad (9)$$

pro $i = 1 - 5$

Po dosazení příslušných derivací do Lagrangeovy rovnice dostaneme soustavu následujících 12-ti rovnic ve tvaru:

$$m_b \cdot \ddot{y} = -k_{sh\check{e}} \cdot (y - y_{1h}) - k_{sd\check{e}} \cdot (y - y_{1d}) - b_{sh\check{e}} \cdot (\dot{y} - \dot{y}_{1h}) - b_{sd\check{e}} \cdot (\dot{y} - \dot{y}_{1d}) \quad (10)$$

Poz. Tuto rovnici pro další výpočet neuvažují. Model byl zvolen tak, že tuhost postranice je zanesena do tuhosti prvního úseku činku brdového listu. Hmotá postranice koná pohyb shodný se vstupní kinematickou závislostí a tedy na chování brdového listu nemá vliv.

- Rovnice (11,12) popisují dynamické chování soustavy horní činek–nitěnka–dolní činek. Náhradní nitěnka č. 1.

$$m_{h\check{o}} \cdot \ddot{y}_{1h} = k_{sh\check{o}} \cdot (y - y_{1h}) - k_{h\check{o}1} \cdot (y_{1h} - y_{2h}) - k_n \cdot (y_{1h} - y_{1n} + \{\delta_{1h}\}) + b_{sh\check{o}} \cdot (\dot{y} - \dot{y}_{1h}) - b_{h\check{o}1} \cdot (\dot{y}_{1h} - \dot{y}_{2h}) - b_n \cdot (\dot{y}_{1h} - \dot{y}_{1n}) - m_{h\check{o}} \cdot g \quad (11)$$

$$m_{d\check{o}} \cdot \ddot{y}_{1d} = k_{sd\check{o}} \cdot (y - y_{1d}) - k_{d\check{o}1} \cdot (y_{1d} - y_{2d}) + k_n \cdot (y_{1n} - y_{1d} + \{\delta_{1d}\}) + b_{sd\check{o}} \cdot (\dot{y} - \dot{y}_{1d}) - b_{d\check{o}1} \cdot (\dot{y}_{1d} - \dot{y}_{2d}) + b_n \cdot (\dot{y}_{1n} - \dot{y}_{1d}) - m_{d\check{o}} \cdot g \quad (12)$$

- Rovnice (13,14) popisují dynamické chování soustavy horní činek–nitěnka–dolní činek. Kde $i = 2 - 5$. - Rovnice platí pro náhradní nitěnky s č. 2 – 5.

$$m_{h\check{e}} \cdot \ddot{y}_{ih} = k_{h\check{e}(i-1)} \cdot (y_{(i-1)h} - y_{ih}) - k_{h\check{e}i} \cdot (y_{ih} - y_{(i+1)h}) - k_n \cdot (y_{ih} - y_{in} + \{\delta_{ih}\}) + b_{h\check{e}(i-1)} \cdot (\dot{y}_{(i-1)h} - \dot{y}_{ih}) - b_{h\check{e}i} \cdot (\dot{y}_{ih} - \dot{y}_{(i+1)h}) - b_n \cdot (\dot{y}_{ih} - \dot{y}_{in}) - m_{h\check{e}} \cdot g \quad (13)$$

$$m_{d\check{e}} \cdot \ddot{y}_{id} = k_{d\check{e}(i-1)} \cdot (y_{(i-1)d} - y_{id}) - k_{d\check{e}i} \cdot (y_{id} - y_{(i+1)d}) + k_n \cdot (y_{in} - y_{id} + \{\delta_{id}\}) + b_{d\check{e}(i-1)} \cdot (\dot{y}_{(i-1)d} - \dot{y}_{id}) - b_{d\check{e}i} \cdot (\dot{y}_{id} - \dot{y}_{(i+1)d}) - b_n \cdot (\dot{y}_{ih} - \dot{y}_{in}) - m_{d\check{e}} \cdot g \quad (14)$$

- Rovnice (15,16) popisují dynamické chování soustavy horní činek–nitěnka–dolní činek. Náhradní nitěnka č.6.

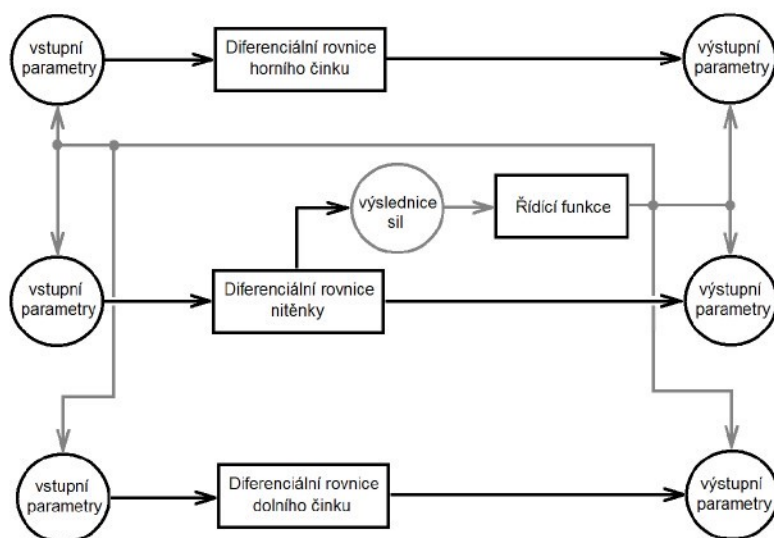
$$m_{hc} \cdot \ddot{y}_{6h} = 2 \cdot k_{hc5} \cdot (y_{5h} - y_{6h}) - k_n \cdot (y_{6h} - y_{6n} + \{\delta_{6h}\}) + 2 \cdot b_{hc5} \cdot (\dot{y}_{5h} - \dot{y}_{6h}) - b_n \cdot (\dot{y}_{6h} - \dot{y}_{6n}) - m_{hc} \cdot g \quad (15)$$

$$m_{dc} \cdot \ddot{y}_{6d} = 2 \cdot k_{dc5} \cdot (y_{5d} - y_{6d}) + k_n \cdot (y_{6n} - y_{6d} + \{\delta_{5d}\}) + b_{dc5} \cdot (\dot{y}_{5d} - \dot{y}_{6d}) + b_n \cdot (\dot{y}_{6n} - \dot{y}_{6d}) - m_{dc} \cdot g \quad (16)$$

Poz. Hodnoty statického předpětí δ_{ih} a δ_{id} platí pouze pro model s předepjatými nitěnkami. Pro symetrický prošlup je $\delta_{ih} = \delta_{id}$.

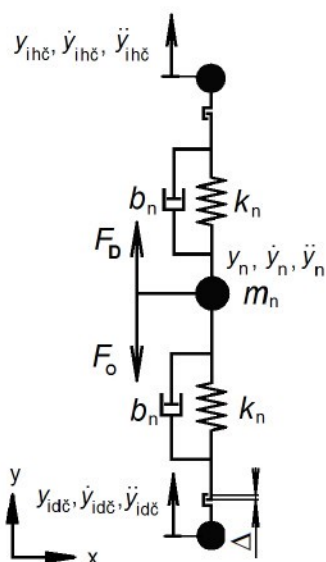
5.2. Schéma matematického modelu soustavy horní činek – nitěnka – dolní činek s vůlí

Na obr. 22 je navrženo výpočtové schéma jedné soustavy horní činek - náhradní nitěnky – dolní činek. Jedná se o řešení soustavy tří diferenciálních rovnic druhého řádu. Stejné schéma platí jak pro předepnutou nitěnku, tak pro nitěnku s vůlí. Ze schématu jsou patrné vazby samotné soustavy náhradní nitěnky.



Obr. 22 Schéma výpočtového modelu

5.3. Matematický model – nitěnka s pružnými konci a vůlí



Obr. 23 Reologický model jednohmotové pružné nitěnky s vůlí v závěsu

Na obr. 23 je vyobrazen reologický model uchycení nitěnky s vůlí, kde hmotnost nitěnky m_n je soustředěna do místa nitového oka. Model nitěnky je brán také jako jednohmotová soustava. Nitěnka je těleso absolutně tuhé s pružnými částmi. Silový účinek od osnovy F_o působí rovněž na nitové oko. Tělo nitěnky je modelováno jako soustava pružina – tlumič o tuhosti k_n a tlumení b_n . Kinematické závislosti horního a dolního činku se liší navzájem v závislosti na poloze náhradní nitěnky na brdovém listu.

V matematickém popisu je vůle v nitěnce definovaná rozdílem drah horního a dolního činku. Vycházíme z předpokladu pohybu nitěnky kolem rovnovážné polohy, kde vůle v závěsném oku je vytvořena posuvem horního a dolního činku o $\Delta/2$. Směr posuvu je dán geometrií vzniku vůle.

Matematický popis modelu je nutno opatřit podmínkou pro závislost silové vazby nitěnky a nosného drátu. Při pohybu brdového listu dochází vlivem nutné konstrukční vůle ke dvěma zatěžujícím stavům. Nitěnka má silovou vazbu buď s horním, nebo dolním nosným drátem. Podmínky pro tuto závislost jsou definovány v rovnostech (22).

Dynamická rovnice nitěnky:

$$m_n \cdot \ddot{y}_n + b_o \cdot \dot{y}_n + k_o \cdot y_n + m_n \cdot g = R_n \quad (17)$$

kde

$$R_n = k_n \cdot (y_{ihc} - y_n) + b_n \cdot (\dot{y}_{ihc} - \dot{y}_n) - k_n \cdot (y_n - y_{idc}) - b_n \cdot (\dot{y}_n - \dot{y}_{idc}) \quad (18)$$

Vazební podmínky

$R_n + = 0$	přelet nitěnky mezi horním a spodním čínkem
$R_n - = 0$	přelet nitěnky mezi dolním a horním čínkem
$R_n > 0$	vazba na horní čínek
$R_n < 0$	vazba na dolní čínek

Obecná rovnice pohybu nitěnky:

$$m_n \cdot \ddot{y}_n = k_o \cdot y_n + m_n \cdot g + b_o \cdot \dot{y}_n + k_n \cdot (y_h - y_n) - k_n \cdot (y_n - y_d) + b_n \cdot (\dot{y}_h - \dot{y}_n) - b_n \cdot (\dot{y}_n - \dot{y}_d) \quad (19)$$

$$\ddot{y}_n = y_n \cdot \frac{k_o}{m_n} + \dot{y}_n \cdot \frac{b_o}{m_n} + g + \frac{1}{m_n} \cdot \left[k_n \cdot (y_h - y_n) - k_n \cdot (y_n - y_d) + b_n \cdot (\dot{y}_h - \dot{y}_n) - b_n \cdot (\dot{y}_n - \dot{y}_d) \right] \quad (20)$$

Podmínky řízení výpočtového schématu:

1. nitěnka s vazbou na oba čínky

$$y_H - y_D \geq \Delta \quad (21)$$

2. pohyb s vůlí

$$y_H - y_D \leq \Delta$$

$R_n = 0$	moment odpoutání	
$R_n +$	vazba na horní čínek	
$R_n -$	vazba na dolní čínek	(22)
$R_n = 0 \uparrow$	odpoutání nitěnky od horního čínku	
$R_n = 0 \downarrow$	odpoutání nitěnky od dolního čínku	

Jelikož brdový list je osazen velkým množstvím nitěnek, je nutné daný model zjednodušit a určitý počet nitěnek nahradit jednou adekvátní náhradní nitěnkou. Ta bude reprezentovat na určitém úseku daný počet nitěnek.

5.4. Výpočtový model – rám listu bez nitěnek

Pro řešení matematického modelu je zvolen program pro matematické operace MATLAB – Simulink. Zde je možno pomocí schématu řešit soustavu n

diferenciálních rovnic o n neznámých. V našem případě jsou neznámou kinematické závislosti hmotných bodů. Pro samotné programování je potřeba soustavu rovnic (11-16) upravit do následujícího tvaru (23-28):

- Rovnice (23, 24) popisují dynamické chování soustavy horní čínek–dolní čínek. Segment č. 1.

$$\ddot{y}_{1h} = \dot{y} \cdot \frac{b_{shc}}{m_{hc}} - \dot{y}_{1h} \cdot \frac{b_{shc} + b_{h\delta 1} + \{b_n\}}{m_{hc}} + \dot{y}_{2h} \cdot \frac{b_{h\delta 1}}{m_{hc}} + \left\{ \dot{y}_{1n} \cdot \frac{b_n}{m_{hc}} \right\} -$$

$$y_{1h} \cdot \frac{k_{shc} + k_{h\delta 1} + \{k_n\}}{m_{hc}} + y_{2h} \cdot \frac{k_{h\delta 1}}{m_{hc}} + \left\{ y_{1n} \cdot \frac{k_n}{m_{hc}} \right\} + y \cdot \frac{k_{shc}}{m_{hc}} - \left\{ \frac{k_n \cdot \delta_{1h}}{m_{hc}} \right\} - g \quad (23)$$

$$\ddot{y}_{1d} = \dot{y} \cdot \frac{b_{sd\delta}}{m_{d\delta}} - \dot{y}_{1d} \cdot \frac{b_{sd\delta} + b_{d\delta 1} + \{b_n\}}{m_{d\delta}} + \dot{y}_{2d} \cdot \frac{b_{d\delta 1}}{m_{d\delta}} + \left\{ \dot{y}_{1n} \cdot \frac{b_n}{m_{d\delta}} \right\} -$$

$$y_{1d} \cdot \frac{k_{sd\delta} + k_{d\delta 1} + \{k_n\}}{m_{d\delta}} + y_{2d} \cdot \frac{k_{d\delta 1}}{m_{d\delta}} + \left\{ y_{1n} \cdot \frac{k_n}{m_{d\delta}} \right\} + y \cdot \frac{k_{sd\delta}}{m_{d\delta}} + \left\{ \frac{k_n \cdot \delta_{1d}}{m_{d\delta}} \right\} - g \quad (24)$$

- Rovnice (25, 26) popisují dynamické chování soustavy horní čínek–dolní čínek. Kde $i = 2 - 5$. - Rovnice platí pro segmenty s č. 2 – 5.

$$\ddot{y}_{ih} = \dot{y}_{(i-1)h} \cdot \frac{b_{hc(i-1)}}{m_{hc}} - \dot{y}_{ih} \cdot \frac{b_{hc(i-1)} + b_{h\delta i} + \{b_n\}}{m_{hc}} + \dot{y}_{(i+1)h} \cdot \frac{b_{h\delta i}}{m_{hc}} + \left\{ \dot{y}_{in} \cdot \frac{b_n}{m_{hc}} \right\} +$$

$$y_{(i-1)h} \cdot \frac{k_{hc(i-1)}}{m_{hc}} - y_{ih} \cdot \frac{k_{hc(i-1)} + k_{h\delta i} + \{k_n\}}{m_{hc}} + y_{(i+1)h} \cdot \frac{k_{h\delta i}}{m_{hc}} + \left\{ y_{in} \cdot \frac{k_n}{m_{hc}} \right\} -$$

$$\left\{ \frac{k_n \cdot \delta_{ih}}{m_{d\delta}} \right\} - g \quad (25)$$

$$\ddot{y}_{id} = \dot{y}_{(i-1)d} \cdot \frac{b_{d\delta(i-1)}}{m_{d\delta}} - \dot{y}_{id} \cdot \frac{b_{d\delta(i-1)} + b_{d\delta i} + \{b_n\}}{m_{d\delta}} + \dot{y}_{(i+1)d} \cdot \frac{b_{d\delta i}}{m_{d\delta}} + \left\{ \dot{y}_{in} \cdot \frac{b_n}{m_{d\delta}} \right\} +$$

$$y_{(i-1)d} \cdot \frac{k_{d\delta(i-1)}}{m_{d\delta}} - y_{id} \cdot \frac{k_{d\delta(i-1)} + k_{d\delta i} + \{k_n\}}{m_{d\delta}} + y_{(i+1)d} \cdot \frac{k_{d\delta i}}{m_{d\delta}} + \left\{ y_{in} \cdot \frac{k_n}{m_{d\delta}} \right\} +$$

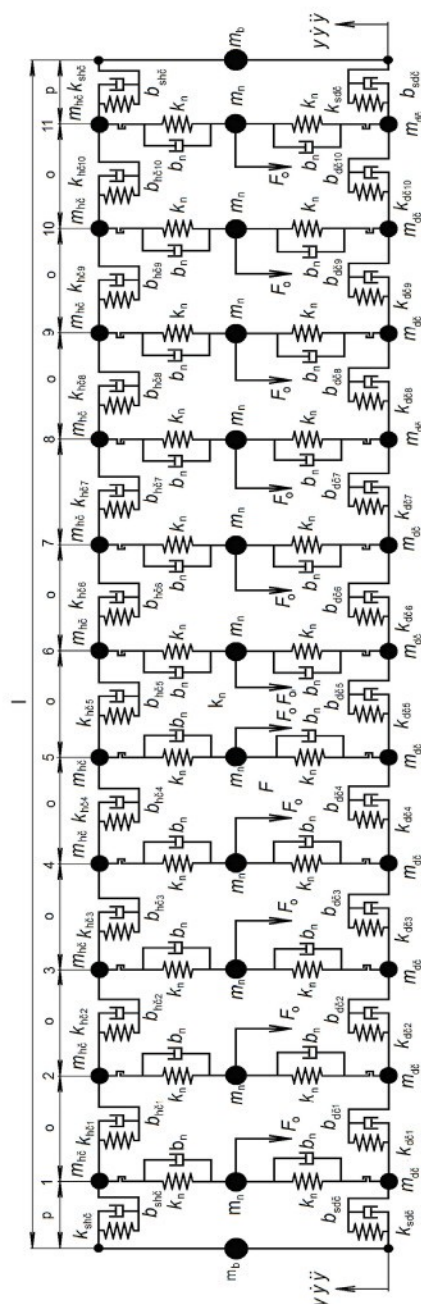
$$\left\{ \frac{k_n \cdot \delta_{id}}{m_{d\delta}} \right\} - g \quad (26)$$

- Rovnice (27, 28) popisují dynamické chování soustavy horní činek–dolní činek. Segment č.6.

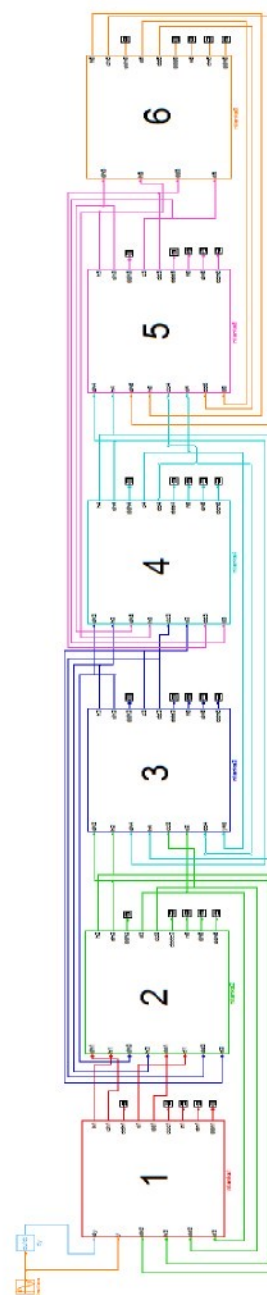
$$\ddot{y}_{6h} = \dot{y}_{5h} \cdot \frac{2 \cdot b_{h5}}{m_{h5}} - \dot{y}_{6h} \cdot \frac{2 \cdot b_{h5} + \{b_n\}}{m_{h5}} + \left\{ \dot{y}_{6n} \cdot \frac{b_n}{m_{h5}} \right\} + y_{5h} \cdot \frac{2 \cdot k_{h5}}{m_{h5}} - y_{6h} \cdot \frac{2 \cdot k_{h5} + \{k_n\}}{m_{h5}} + \left\{ y_{6n} \cdot \frac{k_n}{m_{h5}} \right\} - \left\{ \frac{k_n \cdot \delta_{6h}}{m_{d5}} \right\} - g \quad (27)$$

$$\ddot{y}_{6d} = \dot{y}_{5d} \cdot \frac{2 \cdot b_{d5}}{m_{d5}} - \dot{y}_{6d} \cdot \frac{2 \cdot b_{d5} + \{b_n\}}{m_{d5}} + \left\{ \dot{y}_{6n} \cdot \frac{b_n}{m_{d5}} \right\} + y_{5d} \cdot \frac{2 \cdot k_{d5}}{m_{d5}} - y_{6d} \cdot \frac{2 \cdot k_{d5} + \{k_n\}}{m_{d5}} + \left\{ y_{6n} \cdot \frac{k_n}{m_{d5}} \right\} + \left\{ \frac{k_n \cdot \delta_{6d}}{m_{d5}} \right\} - g \quad (28)$$

Na základě takto odvozených matematických vztahů byl sestaven v programovém prostředí MATLABU – Simulingu [13] výpočtový model pro řešení soustavy diferenciálních rovnic. Program lze modifikovat podle potřeby konkrétního zadání. Na obr. 25 je znázorněna první úroveň schématu výpočtového modelu. Z důvodu přehlednosti modelu byl volen několika úrovňový model. V první úrovni obr. 25 je model rozdělen na 6 bloků, kde každý blok symbolizuje jednu náhradní nitěnku - segment s příslušnými částmi horního a dolního činku. Ve schématu jsou patrné vzájemné vazby mezi jednotlivými bloky. Každý tento blok má na druhé úrovni tři podbloky (obr. 27, str. 43). Tyto podbloky spadají do třetí a poslední úrovně (obr. 28,29, str. 43, 44). Jde o řešení jednotlivých diferenciálních rovnic. Je zde řešena pohybová rovnice segmentu horního a spodního činku a náhradní nitěnky. Výpočtový model je vyhotoven ve dvou variantách. První varianta nezahrnuje zatížení od osnovních nití a slouží ke srovnání s experimentální analýzou, tedy k ověření matematického modelu. Druhá varianta zahrnuje zatížení od osnovních nití. Skutečný průběh sil v osnově je nahrazen nelineární pružinou. Tyto dvě varianty lze modifikovat zadáváním různých zdvihových závislostí. První možností je sinusová zdvihová závislost. Druhou variantou je definování obecné závislosti pomocí diskretní veličiny a to formou tabulky, kde času je přiřazen zdvih. Tímto způsobem lze použít i reálně naměřenou závislost, a tím se přiblížit skutečnému chování. Tuto modifikaci je možné aplikovat i na průběh zatížení nitěnek od osnovy.



Obr. 24 Reologický model celého brdového listu



Obr. 25 Výpočtový model – první úroveň

Výstupními veličinami jsou primárně kinematické závislosti jednotlivých segmentů modelu (hmotných bodů). Sekundárně jsou dopočítávány silové závislosti v pružných závěsech náhradních nitěnek. Ty jsou důležité pro sledování podmínky silové vazby na nosné dráty činků brdového listu.

5.5. Výpočtový model – uchycení pružné nitěanky s vůlí

Sestavení výpočtového modelu nitěanky zavěšené s vůlí je klíčovou záležitostí. Na základě odvozeného matematického popisu (17 – 22) je třeba

sestavit výpočtové schéma nitěnky. Je zde nutno vyřešit několik stavů, ke kterým během pohybu dochází. Na základě podmínek odvozených v kap. 5.3. dochází během pracovního cyklu ke změnám tvaru rovnice (18). Model řeší celkem 5 stavů, ke kterým během vratného pohybu dochází, nebo za určitých podmínek dojít může viz. *tab. 1, str. 41*. Obecně lze napsat tyto rovnice v následujícím tvaru:

- Rovnice (29, 30, 31) popisují dynamické chování soustavy horní činek–nitěnka-dolní činek. Náhradní nitěnka č.1.

$$\ddot{y}_{1h} = \dot{y} \cdot \frac{b_{shc}}{m_{hc}} - \dot{y}_{1h} \cdot \frac{b_{shc} + b_{hc1}}{m_{hc}} - \left\{ \dot{y}_{1h} \cdot \frac{b_n}{m_{hc}} \right\} + \dot{y}_{2h} \cdot \frac{b_{hc1}}{m_{hc}} + \left\{ \dot{y}_{1n} \cdot \frac{b_n}{m_{hc}} \right\} -$$

$$y_{1h} \cdot \frac{k_{shc} + k_{hc1}}{m_{hc}} - \left\{ y_{1h} \cdot \frac{k_n}{m_{hc}} \right\} + y_{2h} \cdot \frac{k_{hc1}}{m_{hc}} + \left\{ y_{1n} \cdot \frac{k_n}{m_{hc}} \right\} + y \cdot \frac{k_{shc}}{m_{hc}} - g$$
(29)

$$\ddot{y}_{1n} = -\dot{y}_{1n} \cdot \frac{2 \cdot b_n}{m_n} + \dot{y}_{1h} \cdot \frac{b_n}{m_n} + \dot{y}_{1d} \cdot \frac{b_n}{m_n} - y_{1n} \cdot \frac{2 \cdot k_n}{m_n} + y_{1h} \cdot \frac{k_n}{m_n} +$$

$$y_{1d} \cdot \frac{k_n}{m_n} + y_{1n} \cdot \frac{k_o}{m_n} - g$$
(30)

$$\ddot{y}_{1d} = \dot{y} \cdot \frac{b_{sd\dot{c}}}{m_{d\dot{c}}} - \dot{y}_{1d} \cdot \frac{b_{sd\dot{c}} + b_{d\dot{c}1}}{m_{d\dot{c}}} - \left\{ \dot{y}_{1d} \cdot \frac{b_n}{m_{d\dot{c}}} \right\} + \dot{y}_{2d} \cdot \frac{b_{d\dot{c}1}}{m_{d\dot{c}}} + \left\{ \dot{y}_{1n} \cdot \frac{b_n}{m_{d\dot{c}}} \right\} -$$

$$y_{1d} \cdot \frac{k_{sd\dot{c}} + k_{d\dot{c}1}}{m_{d\dot{c}}} - \left\{ y_{1d} \cdot \frac{k_n}{m_{d\dot{c}}} \right\} + y_{2d} \cdot \frac{k_{d\dot{c}1}}{m_{d\dot{c}}} + \left\{ y_{1n} \cdot \frac{k_n}{m_{d\dot{c}}} \right\} + y \cdot \frac{k_{sd\dot{c}}}{m_{d\dot{c}}} - g$$
(31)

- Rovnice (32, 33, 34) popisují dynamické chování soustavy horní činek–nitěnka–dolní činek. Kde $i = 2 - 5$. - Rovnice platí pro náhradní nitěnky s č. 2 – 5. Model lze snadno rozšířit na libovolný počet náhradních nitěnek dle potřeby.

$$\ddot{y}_{ih} = \dot{y}_{(i-1)h} \cdot \frac{b_{h\dot{c}(i-1)}}{m_{h\dot{c}}} - \dot{y}_{ih} \cdot \frac{b_{h\dot{c}(i-1)} + b_{h\dot{c}i}}{m_{h\dot{c}}} - \left\{ \dot{y}_{ih} \cdot \frac{b_n}{m_{h\dot{c}}} \right\} + \dot{y}_{(i+1)h} \cdot \frac{b_{h\dot{c}i}}{m_{h\dot{c}}} + \left\{ \dot{y}_{in} \cdot \frac{b_n}{m_{h\dot{c}}} \right\} +$$

$$y_{(i-1)h} \cdot \frac{k_{h\dot{c}(i-1)}}{m_{h\dot{c}}} - y_{ih} \cdot \frac{k_{h\dot{c}(i-1)} + k_{h\dot{c}i}}{m_{h\dot{c}}} - \left\{ y_{ih} \cdot \frac{k_n}{m_{h\dot{c}}} \right\} + y_{(i+1)h} \cdot \frac{k_{h\dot{c}i}}{m_{h\dot{c}}} + \left\{ y_{in} \cdot \frac{k_n}{m_{h\dot{c}}} \right\} - g$$
(32)

$$\ddot{y}_m = -\dot{y}_{(i+1)n} \cdot \frac{2 \cdot b_n}{m_n} + \dot{y}_{ih} \cdot \frac{b_n}{m_n} + \dot{y}_{id} \cdot \frac{b_n}{m_n} - y_{(i+1)n} \cdot \frac{2 \cdot k_n}{m_n} + y_{ih} \cdot \frac{k_n}{m_n} + y_{(i+1)d} \cdot \frac{k_n}{m_n} + y_m \cdot \frac{k_o}{m_n} - g \quad (33)$$

$$\ddot{y}_{2d} = \dot{y}_{(i-1)d} \cdot \frac{b_{d\hat{e}(i-1)}}{m_{d\hat{e}}} - \dot{y}_{id} \cdot \frac{b_{d\hat{e}(i-1)} + b_{d\hat{e}i}}{m_{d\hat{e}}} - \left\{ \dot{y}_{id} \cdot \frac{b_n}{m_{d\hat{e}}} \right\} + \dot{y}_{(i+1)d} \cdot \frac{b_{d\hat{o}i}}{m_{d\hat{e}}} + \left\{ \dot{y}_{in} \cdot \frac{b_n}{m_{d\hat{e}}} \right\} + y_{(i-1)d} \cdot \frac{k_{d\hat{e}(i-1)}}{m_{d\hat{o}}} - y_{id} \cdot \frac{k_{d\hat{e}(i-1)} + k_{d\hat{e}i}}{m_{d\hat{o}}} - \left\{ y_{id} \cdot \frac{k_n}{m_{d\hat{e}}} \right\} + y_{(i+1)d} \cdot \frac{k_{d\hat{e}i}}{m_{d\hat{o}}} + \left\{ y_{in} \cdot \frac{k_n}{m_{d\hat{o}}} \right\} - g \quad (34)$$

- Rovnice (35, 36, 37) popisují dynamické chování soustavy horní činek–nitěnka–dolní činek. Náhradní nitěnka č.6.

$$\ddot{y}_{6h} = \dot{y}_{5h} \cdot \frac{2 \cdot b_{h\hat{e}5}}{m_{h\hat{e}}} - \dot{y}_{6h} \cdot \frac{2 \cdot b_{h\hat{e}5}}{m_{h\hat{e}}} - \left\{ \dot{y}_{6h} \cdot \frac{b_n}{m_{h\hat{e}}} \right\} + \left\{ \dot{y}_{6n} \cdot \frac{b_n}{m_{h\hat{e}}} \right\} + y_{5h} \cdot \frac{2 \cdot k_{h\hat{e}5}}{m_{h\hat{o}}} - y_{6h} \cdot \frac{2 \cdot k_{h\hat{e}5}}{m_{h\hat{o}}} - \left\{ y_{6h} \cdot \frac{k_n}{m_{h\hat{o}}} \right\} + \left\{ y_{6n} \cdot \frac{k_n}{m_{h\hat{o}}} \right\} - g \quad (35)$$

$$\ddot{y}_{6n} = -\dot{y}_{6n} \cdot \frac{2 \cdot b_n}{m_n} + \dot{y}_{6h} \cdot \frac{b_n}{m_n} + \dot{y}_{6d} \cdot \frac{b_n}{m_n} - y_{6n} \cdot \frac{2 \cdot k_n}{m_n} + y_{6h} \cdot \frac{k_n}{m_n} + y_{6d} \cdot \frac{k_n}{m_n} + y_6 \cdot \frac{k_o}{m_n} - g \quad (36)$$

$$\ddot{y}_{6d} = \dot{y}_{5d} \cdot \frac{2 \cdot b_{d\hat{o}5}}{m_{d\hat{o}}} - \dot{y}_{6d} \cdot \frac{2 \cdot b_{d\hat{o}5}}{m_{d\hat{o}}} - \left\{ \dot{y}_{6d} \cdot \frac{b_n}{m_{d\hat{e}}} \right\} + \left\{ \dot{y}_{6n} \cdot \frac{b_n}{m_{d\hat{e}}} \right\} + y_{5d} \cdot \frac{2 \cdot k_{d\hat{o}5}}{m_{d\hat{o}}} - y_{6d} \cdot \frac{2 \cdot k_{d\hat{o}5}}{m_{d\hat{o}}} - \left\{ y_{6d} \cdot \frac{k_n}{m_{d\hat{e}}} \right\} + \left\{ y_{6n} \cdot \frac{k_n}{m_{d\hat{e}}} \right\} - g \quad (37)$$

Výše uvedené rovnice popisují model jednotlivých částí brdového listu v soustavě horní činek – nitěnka – dolní činek. Členy rovnic popisující chování horního a dolního činku, které jsou uvedené v závorkách, jsou do výpočtu zahrnuty jen při dodržení podmínek vycházejících z průběhu řídicí funkce obr. 26. Řízení výpočtu rovnice nitěnky je odvozeno kompletně od řídicí funkce.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	$-\dot{y}_n \cdot \frac{b_n}{m_n}$	$\dot{y}_n \cdot \frac{b_O}{m_n}$	$\dot{y}_d \cdot \frac{b_n}{m_n}$	-	$y_n \cdot \frac{k_O}{m_n}$	g	$-y_n \cdot \frac{k_n}{m_n}$	$y_d \cdot \frac{k_n}{m_n}$	-
2.	$-\dot{y}_n \cdot \frac{b_n}{m_n}$	$\dot{y}_n \cdot \frac{b_O}{m_n}$	-	$\dot{y}_h \cdot \frac{b_n}{m_n}$	$y_n \cdot \frac{k_O}{m_n}$	g	$-y_n \cdot \frac{k_n}{m_n}$	-	$y_h \frac{k_n}{m_n}$
3.	-	$\dot{y}_n \cdot \frac{b_O}{m_n}$	-	-	$y_n \cdot \frac{k_O}{m_n}$	g	-	-	-
4.	-	$\dot{y}_n \cdot \frac{b_O}{m_n}$	-	-	$y_n \cdot \frac{k_O}{m_n}$	g	-	-	-
5.	$-2 \cdot \dot{y}_n \cdot \frac{b_n}{m_n}$	$2 \cdot \dot{y}_n \cdot \frac{b_O}{m_n}$	$\dot{y}_d \cdot \frac{b_n}{m_n}$	$\dot{y}_h \cdot \frac{b_n}{m_n}$	$y_n \cdot \frac{k_O}{m_n}$	g	$-y_n \cdot \frac{k_n}{m_n}$	$y_d \cdot \frac{k_n}{m_n}$	$y_h \frac{k_n}{m_n}$

Tab. 1 Matematický popis nitěnky – pružná nitěnka s vůlí

1. Vazba na dolní čínek

$$\ddot{y}_n = -\dot{y}_n \cdot \frac{b_n}{m_n} + \dot{y}_n \cdot \frac{b_O}{m_n} + \dot{y}_d \cdot \frac{b_n}{m_n} + y_n \cdot \frac{k_O}{m_n} - y_n \cdot \frac{k_n}{m_n} + y_d \cdot \frac{k_n}{m_n} + g \quad (38)$$

2. Vazba na horní čínek

$$\ddot{y}_n = -\dot{y}_n \cdot \frac{b_n}{m_n} + \dot{y}_n \cdot \frac{b_O}{m_n} + \dot{y}_h \cdot \frac{b_n}{m_n} + y_n \cdot \frac{k_O}{m_n} - y_n \cdot \frac{k_n}{m_n} + y_h \cdot \frac{k_n}{m_n} + g \quad (39)$$

3. Volný let nitěnky z horního čínku na dolní

$$\ddot{y}_n = -\dot{y}_n \cdot \frac{b_n}{m_n} + \dot{y}_n \cdot \frac{b_O}{m_n} + y_n \cdot \frac{k_O}{m_n} - y_n \cdot \frac{k_n}{m_n} + g \quad (40)$$

Podmínka odpoutání: $m_n \cdot \ddot{y}_n - b_O \cdot \dot{y}_n - k_O \cdot y_n - m_n \cdot g = 0$

Podmínka dopadu: $y_n - y_{d\dot{z}} = 0$

4. Volný přelet nitěnky z dolního činku na horní

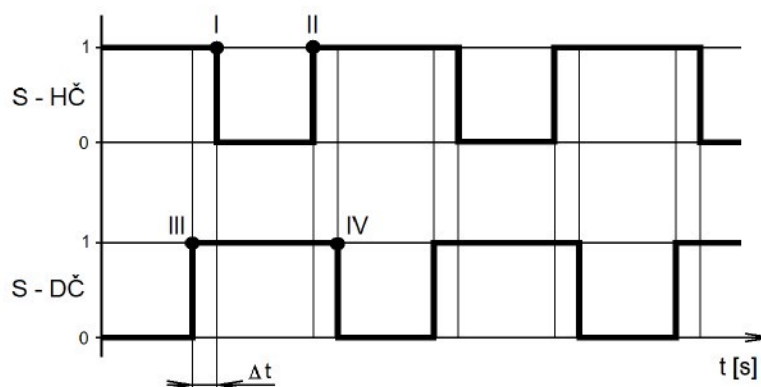
$$\ddot{y}_n = -\dot{y}_n \cdot \frac{b_n}{m_n} + \dot{y}_n \cdot \frac{b_o}{m_n} + y_n \cdot \frac{k_o}{m_n} - y_n \cdot \frac{k_n}{m_n} + g \quad (41)$$

Podmínka odpoutání: $m_n \cdot \ddot{y}_n - b_o \cdot \dot{y}_n - k_o \cdot y_n - m_n \cdot g = 0$

Podmínka dopadu: $y_n - y_{h\check{c}i} = 0$

5. Vazba na oba nosné dráty

V tomto případě jsou aktivní všechny členy rovnice.

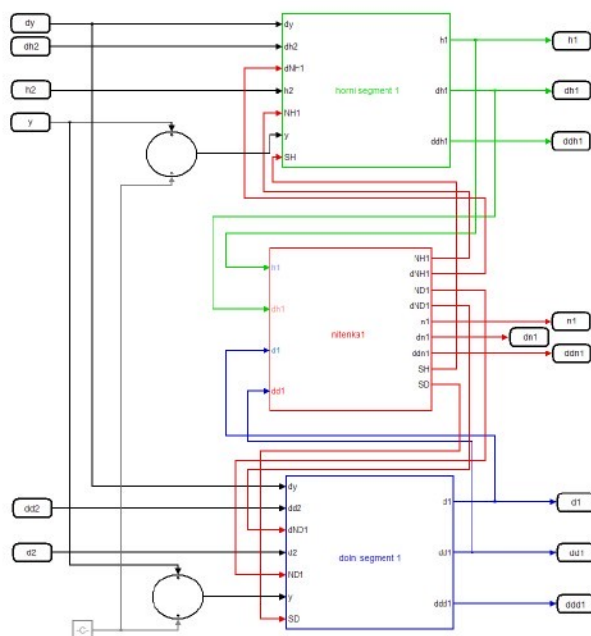


Obr. 26 Průběh řídicí funkce

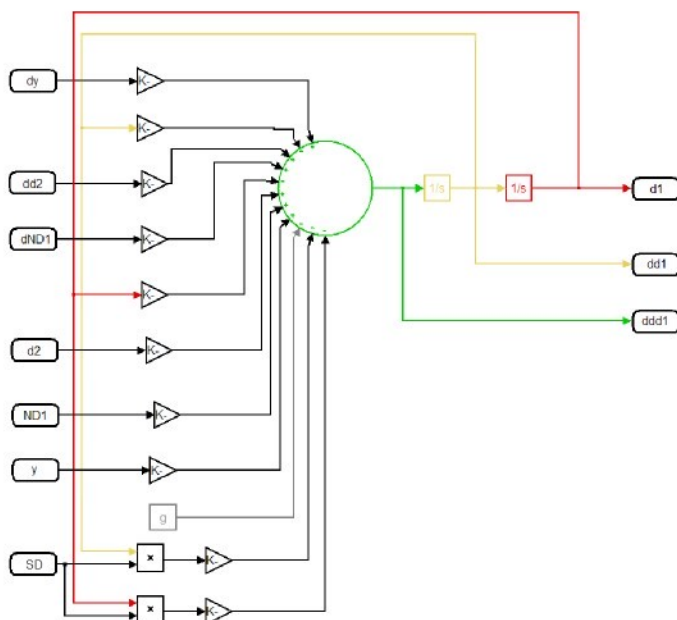
Na obr. 26 je znázorněn obecný (ideální) průběh řídicí funkce. Řídicí funkce jsou dvě. Každá ovládá jednu vazbu horní činek – nitěnka $S-H\check{C}$ a dolní činek – nitěnka $S-D\check{C}$. Tyto funkce určují tvar rovnic (38 – 41). Hodnotě “1” přísluší stav ve kterém je přerušena silová vazba., naproti tomu stav “0” určuje vazbu silovou. Sestupné hrany (bod I, IV) jsou určeny změnou znaménka výsledné síly na nitěnku. V tento moment dochází k odpoutání nitěnky z nosné kolejničky a k jejímu přeletu na protilehlou kolejničku - Δt . Dopadu odpovídají vzestupné hrany v řídicí funkci (bod II, III), které jsou určeny změnou znaménka průběhu rozdílu drah mezi nitěnkou a nosnými kolejničkami.

Realizace v modelu: Vůle je zakomponována do pohybu horního a dolního činku. Nitěnka se pohybuje kolem rovnovážné polohy (0). Výpočtový model je složen z modelu samotného rámu listu s možností závěsu náhradních nitěnek. Náhradní nitěnka nahrazuje n -reálných nitěnek. Model náhradní nitěnky je koncipován na základě 5-ti stavů, které během pohybu nastávají, nebo mohou nastat.

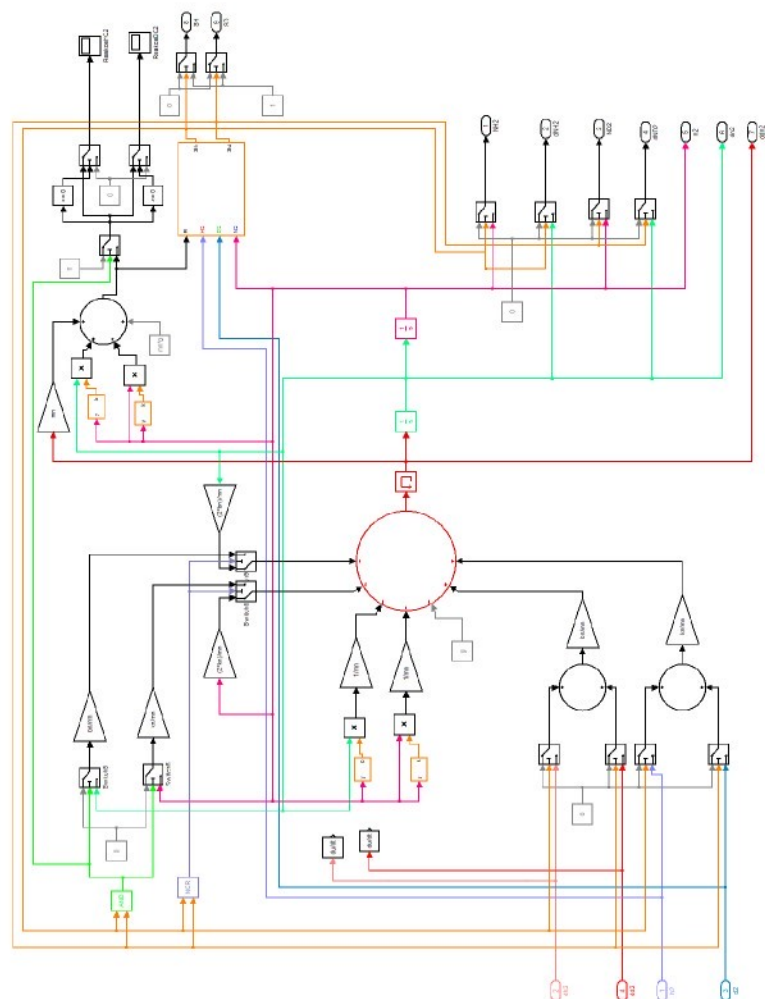
Na obr. 27 je druhá úroveň výpočtového modelu se vzájemnými vazbami v soustavě horní činek – nitěnka – dolní činek. Obr. 28 zobrazuje třetí úroveň výpočtového modelu – dolního činku. Je zde patrný vstup řídicí funkce. Ta v moment letu a vazby na horní nosnou kolejničku nuluje zpětné vazby.



Obr. 27 Výpočtový model – druhá úroveň (soustava nitěnka – horní – dolní činek č. 1)



Obr. 28 Výpočtový model – třetí úroveň (dolní činek č. 1)



Obr. 29 Výpočtový model – třetí úroveň (nitěnka č. 1)

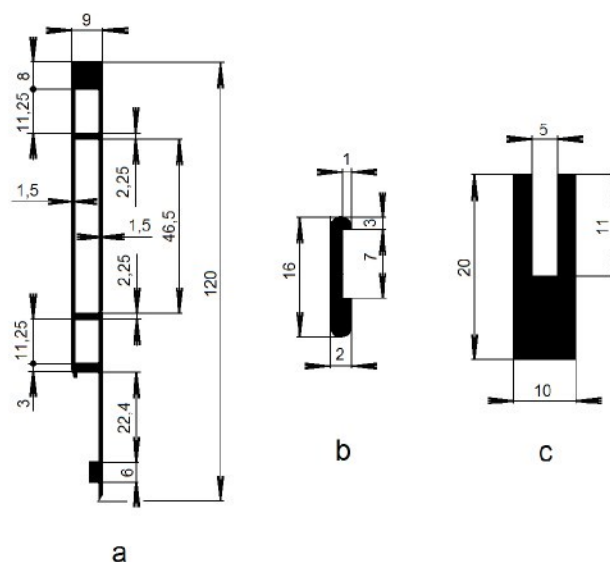
Na obr. 29 je třetí úroveň výpočtového modelu – model nitěnky. Schéma obsahuje řešení dynamické rovnice nitěnky s generováním řídicí funkce. Ta určuje tvar řešení rovnice v čase. Samotné numerické řešení je provedeno pomocí metody Runge – Kutta.

5.6. Stanovení vstupních a počátečních parametrů výpočtu

Pro možnost ověření takto navrženého a matematicky popsaného modelu brdového listu je nutné porovnat model s realitou. Srovnání je provedeno na konkrétním brdovém listu, kterým je osazeno zkušební zařízení, které bylo vyvinuto pro testování brdových listů. Popis tohoto zařízení je v kapitole 7, str. 56.

Pro potřebu konkrétní aplikace výpočtového modelu je třeba stanovit celou řadu vstupních a počátečních parametrů. V první řadě jde o stanovení výchozího stavu brdového listu. Ten byl zvolen v momentu zástupu listů, tedy

v momentu, ve kterém dochází ke změně znaménka zrychlení. V *tabulkách 2,3* jsou stanoveny číselné hodnoty parametrů daného brdového listu, který byl zvolen pro účely experimentálního ověření matematického modelu. Jde o brdový list české výroby. Čínek brdového listu je vyroben z hliníkového extrudovaného profilu vyrobeného firmou ALUMINIUM DĚČÍN. Postranice je vyrobena z plného profilu ze slitiny hliníku. Profil činku (a), nosného drátu (b) a postranice (c) s rozměry je znázorněn na *obr. 30*.

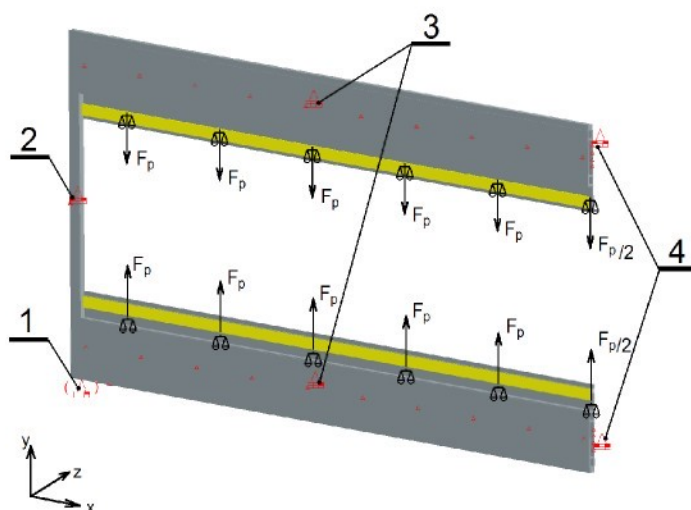


Obr. 30 Průřez činku, nosného drátu a postranice

- **Stanovení redukované tuhosti elementů horního a dolního činku**

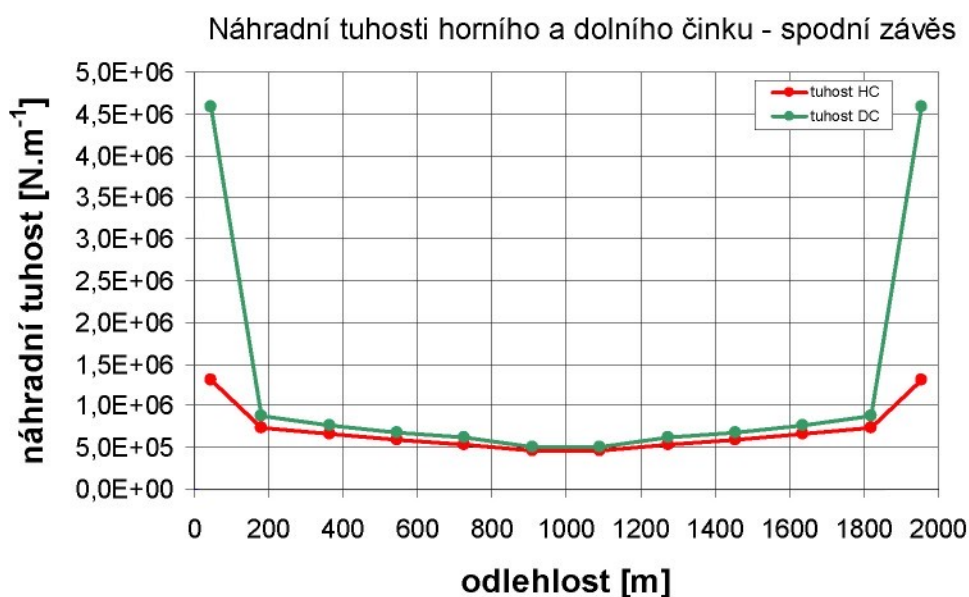
Konstrukce konkrétního brdového listu je určující pro stanovení veškerých parametrů potřebných pro výpočet. Těmito parametry jsou především tuhosti všech členů *grafy 1, 2, tab. 2, 3*. Stanovení tuhostí jednotlivých segmentů horního a dolního činku vychází z již popsané analogie. Určujícím parametrem je průhybová křivka zatíženého nosníku. Stanovení průhybové křivky lze provést různými způsoby. Pro tuto aplikaci bylo využito výpočtového modelu řešeného metodou konečných prvků. Model je kombinovaný ze dvou typů elementů (brick – plate) *obr. 31*, opatřený příslušnými okrajovými podmínkami a zatížen 11-ti osamělými silami v místech umístění náhradních nitěnek. Velikost osamělých sil je zvolena. Relativní posunutí jednotlivých uzlových bodů a celková síla v daném uzlovém bodě je určující pro výpočet redukované tuhosti. Výsledné redukované tuhosti horního činku jsou v *tab.2, 3, str. 47, 48*. Okrajové

podmínky jsou označeny (1 – 4) na *obr. 31*. 1 a 2 jsou dvě varianty závěsu listu (napojení na prošlupní mechanismus). Pozice 1 je spodní závěs listu – používaný v průmyslu. 2 jsou varianty symetrického závěsu ve středu postranice. 3 zajišťuje vedení brdového listu (nahrazuje náběhy viz. *obr. 3*). Poslední okrajovou podmínkou je 4, která ošetřuje plochu řezu tak, aby byla splněna podmínka symetrie modelu.



Obr. 31 Model MKP pro analýzu redukovaných tuhostí a tlumení jednotlivých segmentů rámu listu

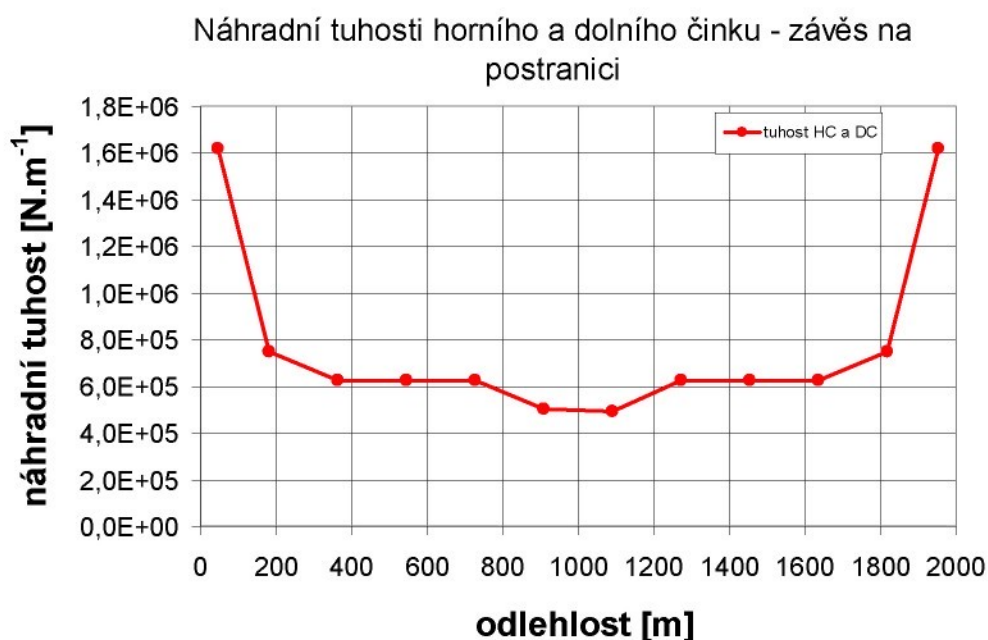
$$k_{ni} = \frac{\sum_{p=i}^n F_p}{\delta_{i+1} - \delta_i} \quad (42)$$



Graf 1 Závislost redukované tuhosti činků – spodní závěs

i –tý Segment	Odlehlost [mm]	Redukovaná tuhost HC [N.m ⁻¹]	Redukovaná tuhost DC [N.m ⁻¹]	Redukované tlumení HC [N.m ⁻¹ s]	Redukované tlumení DC [N.m ⁻¹ s]
1	90	1 309 524	4 583 333	104	194
2	272	725 806	82 353	77	85
3	454	660 377	760 870	74	79
4	636	595 238	675 676	70	75
5	818	535 714	625 000	66	72
6	1000	454 545	500 000	61	64
7	1182	454 545	500 000	61	64
8	1364	535 714	625 000	66	72
9	1546	595 238	675 676	70	75
10	1728	660 377	760 870	74	79
11	1910	725 806	882 353	77	85
12	2000	1 309 524	4 583 333	104	194

Tab. 2 Redukovaná tuhost a tlumení nesymetricky zavěšeného rámu listu



Graf 2 Závislost redukované tuhosti činků – závěs listu ve středu postranice

<i>i</i> –tý Segment	Odlehlost [mm]	Redukovaná tuhost HC a DC [N.m ⁻¹]	Redukované tlumení HC a DC [N.m ⁻¹ s]
1	90	1 617 647	115
2	272	750 000	79
3	454	625 000	72
4	636	625 000	72
5	818	625 000	72
6	1000	500000	64
7	1182	500 000	64
8	1364	625 000	72
9	1546	625 000	72
10	1728	625 000	72
11	1910	750 000	79
12	2000	1 617 647	115

Tab. 3 Redukovaná tuhost a tlumení symetricky zavěšeného rámu listu

- **Stanovení redukovaného tlumení elementů horního a dolního činku**

Při obecném pohybu soustav těles dochází vlivem dynamických účinků k pružným deformacím elastických částí této soustavy. Žádné reálné těleso není dokonale pružné, tj. energii, kterou dodáme pružnému tělesu, nedostaneme při zpětném odlehčení všechnu nazpět. Pro daný model je zapotřebí stanovit koeficienty tlumení jednotlivých pružných elementů. Pro výpočet tlumení je využito vztahu (43). Výsledné hodnoty pro testované činky brdového listu jsou v tab. 2,3.

$$b = \frac{\ln 2}{\pi} \cdot \sqrt{k \cdot m} \cdot \sqrt{1 - b_v} \quad (43)$$

Neznámou zůstává b_U poměrný útlum. Ten získáme na základě vztahu (44). Měření spočívá v analýze časového průběhu dozvuku vibrací vybuzených rázem na čínek brdového listu. Pro určení nám poslouží tři hodnoty odečtené z grafu. Je to amplituda výchylky v čase t , $t+T$ a perioda T . Pro získání těchto hodnot poslouží měření provedené v kap. 6, str. 53. Pro horní čínek je poměrný útlum $b_U = 0,01$, potom lze rovnici (43) zjednodušit a zanedbat poslední člen.

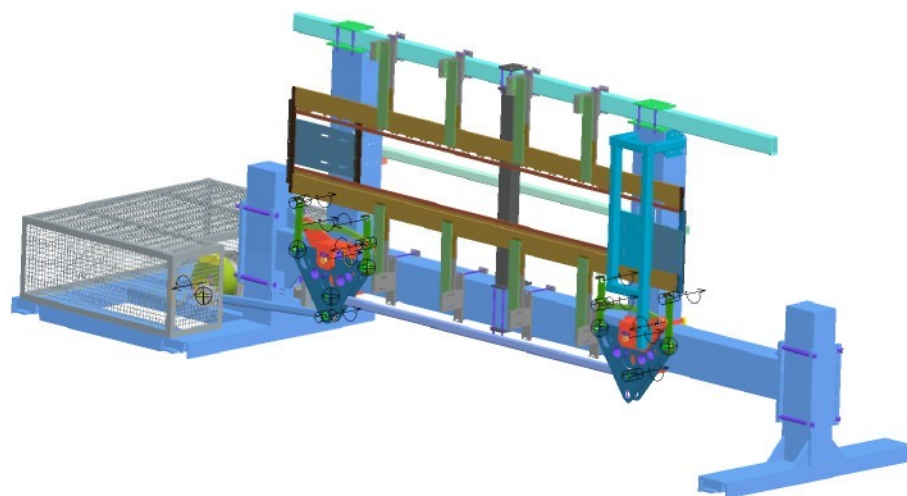
$$b_U \cdot T = \ln \frac{x_t}{x_{t+T}} \quad (44)$$

- **Stanovení zdvihové závislosti brdového listu**

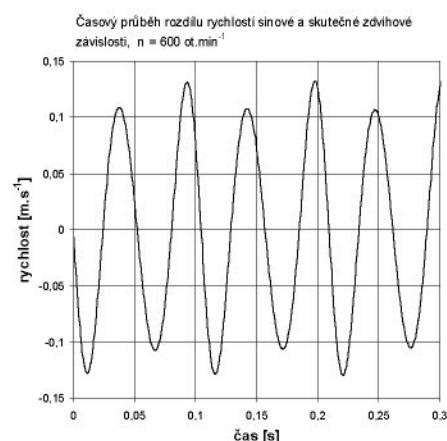
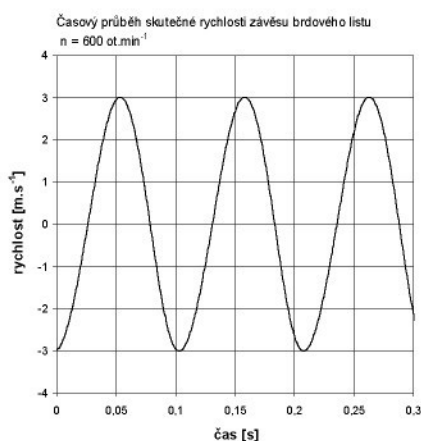
Zdvihové závislosti prošlupního mechanismu jsou rozličné. Z tohoto důvodu je vhodné zadávání parametrů pomocí tabulkové závislosti. Tímto řešením můžeme definovat jakoukoliv zdvihovou závislost, dokonce i reálně naměřenou. Nicméně pro ověření stávajícího modelu je nutné využít zdvihové závislosti prošlupního mechanismu zkušební stolice. Ten se velice blíží sinové charakteristice. Pro výpočet zdvihové závislosti bylo využito nadstavby systému PRO Engineer – PRO Mechanism pro modelování mechanických soustav. Celá zkušební stolice byla namodelována za účelem výkresové dokumentace a dalších analýz v tomto systému a lze s výhodou využít tohoto modelu pro získání kinematických závislostí *obr. 32*. Jedná se samozřejmě o ideální stav, který nepočítá s poddajností celé soustavy a s vůlemi v kinematických vazbách. Pro účely matematického modelování brdového listu by to mohlo být postačující. Důležitým faktorem je odchylka sinové zdvihové (45) závislosti od skutečné zjednodušené závislosti zkušebního zařízení.

$$y = y_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (45)$$

Analýzou závislosti dráhy a rychlosti závěsu brdového listu *graf 3* byly zjištěny odchylky reálného zdvihu od teoretické sinové zdvihové závislosti. Tyto odchylky činí maximálně 3,7 % u dráhy a 3,3 % u rychlosti *graf. 3*. Vstupními parametry matematického modelu brdového listu jsou dráha a zrychlení, z tohoto důvodu nebyl analyzován průběh zrychlení.



Obr.32 Model prošlupního mechanismu v programovém prostředí PROMechanism



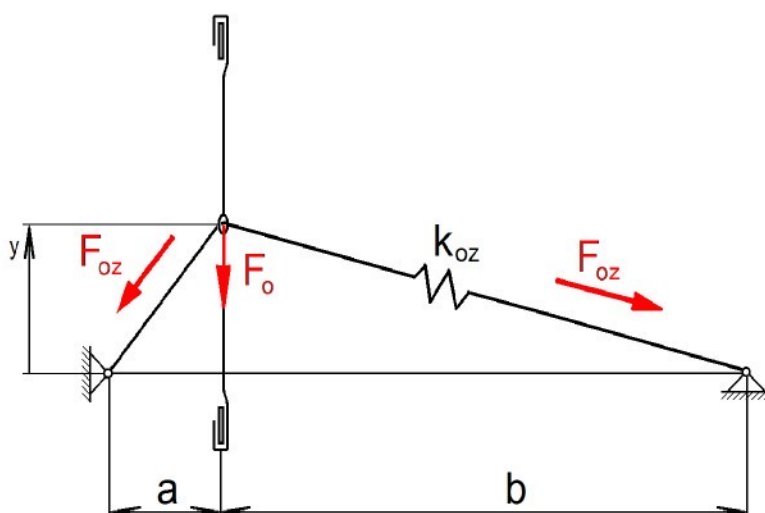
Graf 3 Porovnání skutečné a sinové závislosti rychlosti závěsu brdového listu

Na závěr lze konstatovat akceptovatelnou shodu reálné a sinové zdvihové závislosti. Pro matematickou analýzu brdového listu může být použita sinová závislost.

Poz. Pracovní frekvence prošlupního mechanismu je poloviční nežli pracovní otáčky tkacího stroje. Tedy jedna otáčka prošlupního mechanismu znamená dva prohozené útky. Pracovní frekvence běžně používaných tkacích strojů se pohybují od 600 ot/min do 1000 ot/min, tedy 300 ot/min až 500 ot/min prošlupního mechanismu.

- **Stanovení způsobu zadávání síly působící od osnovy**

Do matematického modelu je třeba zahrnout tahovou sílu a předpětí od osnovy. Ta má na chování samotných nitěnek zásadní vliv. Pro analýzu tahové síly působící na nitěnku byl sestaven matematický model *obr. 33* s následujícími zjednodušenými: neuvažuje vliv osnovní svůrky – svůrka není pohyblivá, příze je brána jako lineární pružina (na základě výsledků řešeného grantu GAČR 101/03/0990 na Textilní fakultě), neuvažujeme tření nitě v nitovém očku.



Obr.33 Zjednodušený matematický model osnovy (osnovní nitě)

Rovnice (46 a 48) popisují závislost síly F_O působící na nitěnku. V grafu 4 jsou znázorněny závislosti tahové síly v osnově a síly působící na nitěnku v závislosti na rozevření prošlupu. Tato síla má progresivní charakter.

$$F_{oz} = F_0 + F_{TO} \quad \text{kde} \quad F_0 \dots \text{předpětí osnovy v zástupu listů}$$

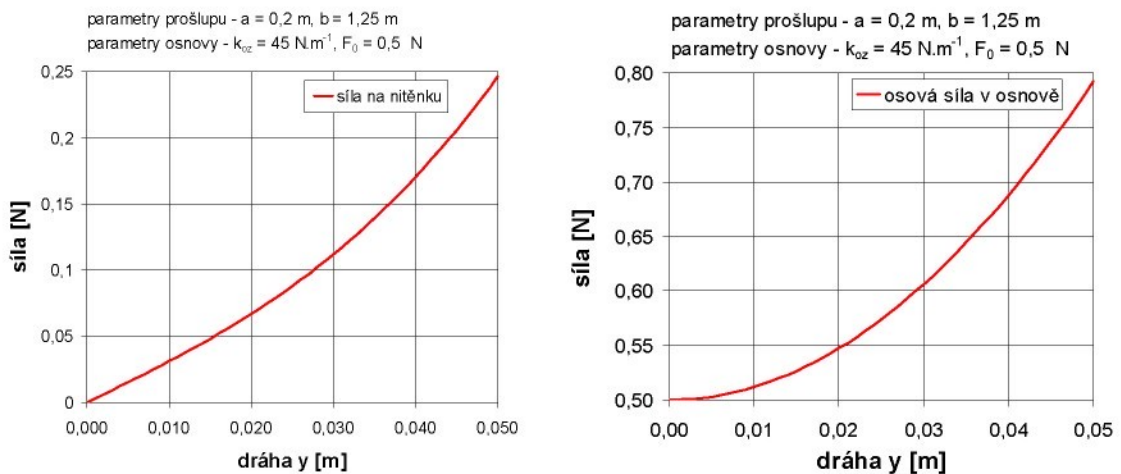
F_{TO} tahová síla v osnově generovaná rozevíráním prošlupu

$$F_{oz}(y) = F_0 + k_{oz} \cdot (\sqrt{y^2 + b^2} + \sqrt{y^2 + a^2} - b - a) \quad (46)$$

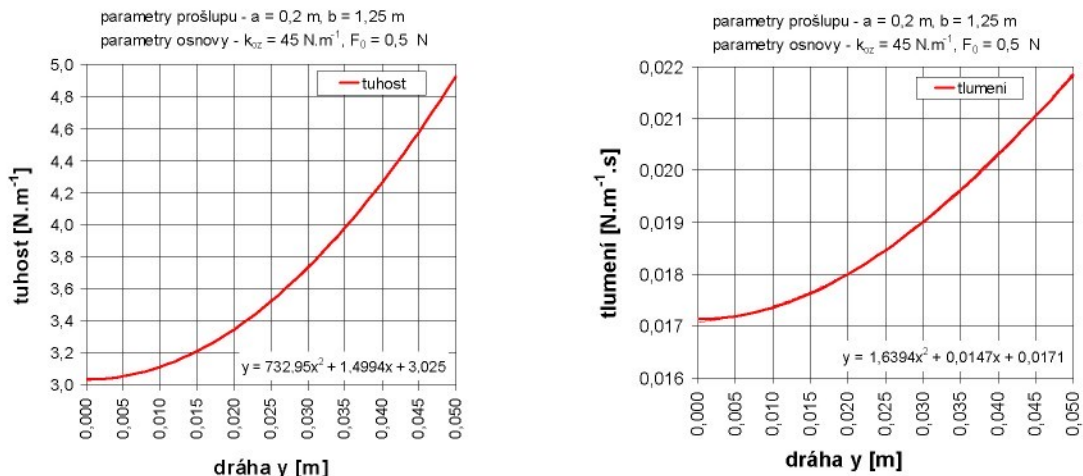
$$F_o(y) = F_{oz} \cdot \sin\left[\arctg \frac{y}{a}\right] + F_{oz} \cdot \sin\left[\arctg \frac{y}{b}\right] \quad (47)$$

$$F_o(y) = k(y) \cdot y \Rightarrow k(y) = \frac{F(y)}{y} \quad (48)$$

Ve výpočtovém modelu je třeba tuto sílu definovat pomocí tuhosti náhradní pružiny, která nemá lineární charakter. Na základě vztahu (47) a (48) je definován vztah pro tuhost v závislosti na rozevření prošlupu. Stejného vzorce je použito pro výpočet koeficientu tlumení (43). Ve výpočtovém modelu je tento průběh nahrazen polynomem druhého řádu *grafy 5*. Časová závislost síly působící na nitěnku pro použitou zdvihovou závislost je v *grafu 6*.



Graf 4 Příklad závislostí silového zatížení nitěnky pro vybrané parametry



Graf 5 Příklad závislosti tuhosti a tlumení osnovy transformované na tažnou pružinu ve směru pohybu jedné reálné nitěnky pro vybrané parametry

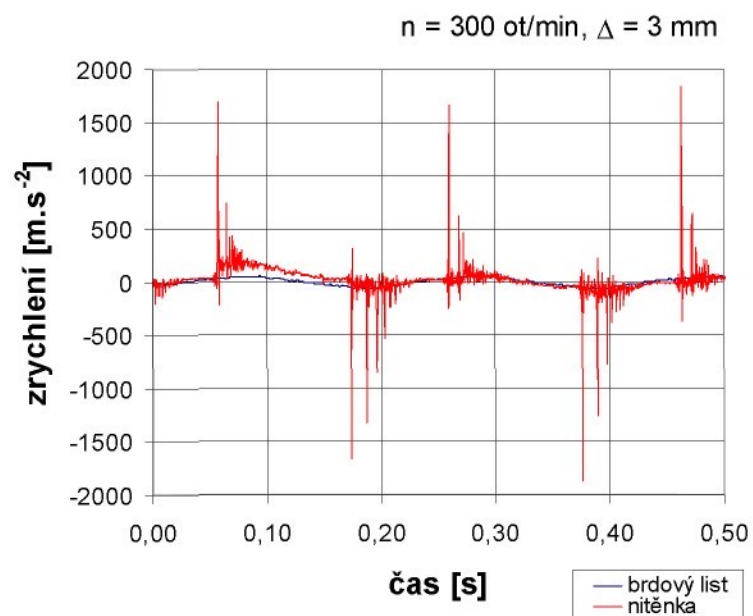
SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1:** Vyhodnocení experimentu – přelet nitěnky analýza odskoku.
Analýza odskoku klasické nitěnky – porovnání experimentu s teoretickou analýzou.
- Příloha 2:** Ukázka kinematických závislostí pro dané parametry.
Nitěnka s pružným dopadem – tři oblasti.
- Příloha 3:** Ukázka kinematických závislostí pro dané parametry.
Pevná nitěnka – tři oblasti.
- Příloha 4:** Kombinovaná nitěnka – experiment.
Kombinace tuhého a pružného dopadu.
- Příloha 5:** Tabulka statického předpětí pro vybrané koeficienty.
Předepjatá nitěnka.
- Příloha 6:** FFT analýza vybraných časových průběhů.
Předepjatá nitěnka.

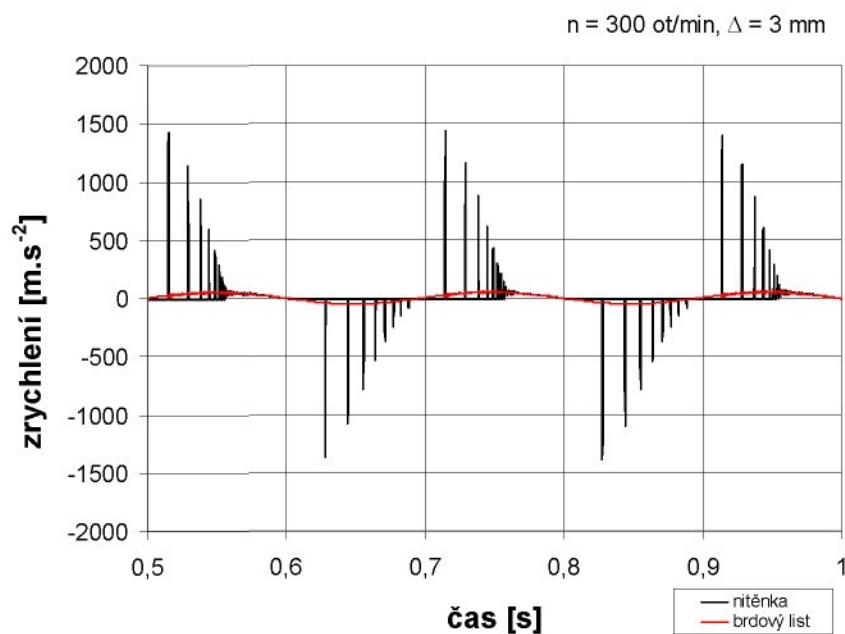
Příloha 1

Vyhodnocení experimentu – přelet nitěnky analýza odskoku

Analýza odskoku klasické nitěnky – porovnání experimentu s teoretickou
analýzou

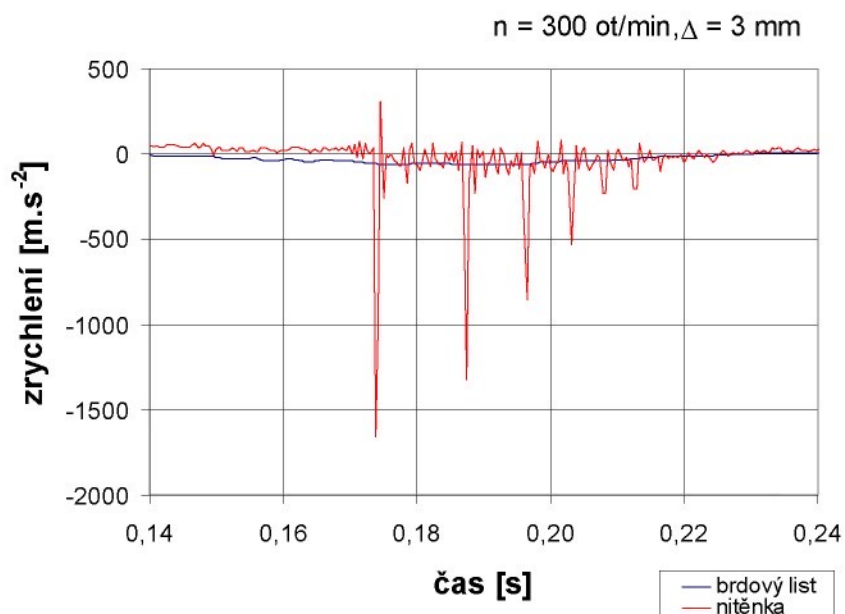


Graf 1p Naměřený průběh zrychlení nitěnky

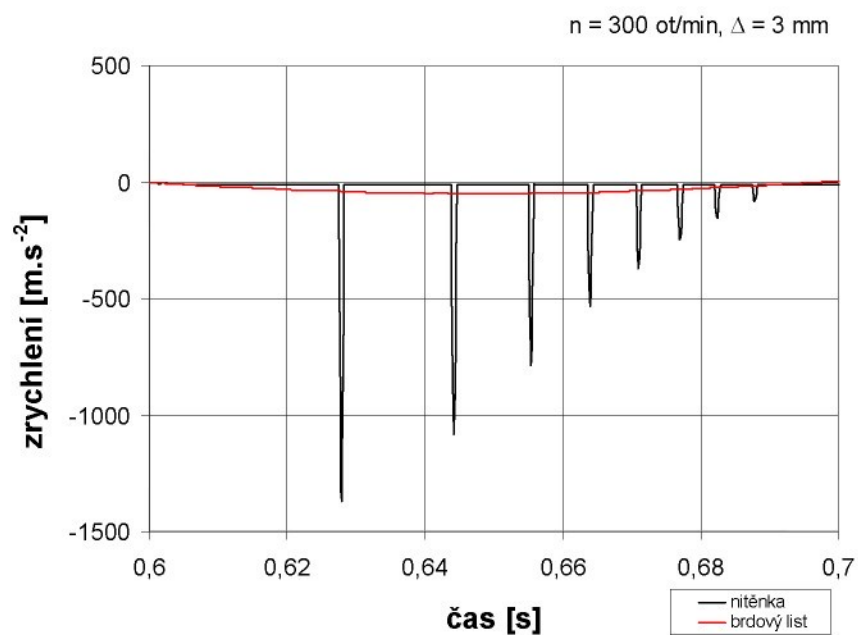


Graf 2p Vypočtený průběh zrychlení nitěnky

V grafech 1p, 2p jsou zobrazeny časové závislosti naměřeného a vypočteného zrychlení nitěnky pro jmenovité otáčky $n = 300 \text{ ot.min}^{-1}$. U těchto otáček se projevuje poměrně významný vliv gravitačního zrychlení. Doby přeletu nitěnky na horní a dolní nosnou kolejničku jsou rozdílné.



Graf 3p Naměřený detail letu nitěnky a jednotlivých odskoků při jednom dopadu nitěnky na nosnou kolejničku



Graf 4p Vypočtený detail letu nitěnky a jednotlivých odskoků při jednom dopadu nitěnky na nosnou kolejničku

V grafech 3p, 4p je zobrazen detail jednoho dopadu a následných odskoků pro jmenovité otáčky $n = 300 \text{ ot.min}^{-1}$.

V *tabulce 1p* jsou porovnán průměrný naměřený čas přeletu nitěnky mezi nosnými kolejničkami a průměrné hodnoty časů odskoků nitěnky od nosné kolejničky. Lze konstatovat shodu v době přeletu.

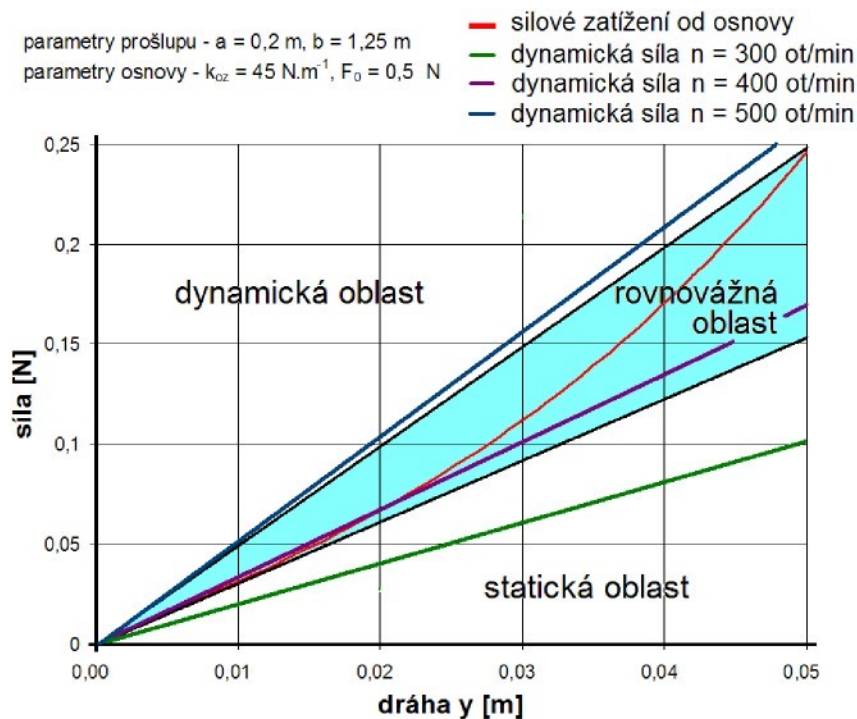
$\Delta = 1 \text{ mm}$ $n = 500 \text{ ot.min}^{-1}$	Teoretické hodnoty	Naměřené hodnoty
Doba letu [ms]	24	24
Doba odskoku č. 1 [ms]	16	14
Doba odskoku č. 2 [ms]	10	9
Doba odskoku č. 3 [ms]	9	7

Tab. 1p Srovnání doby letu a odskoků nitěnky

Příloha 2

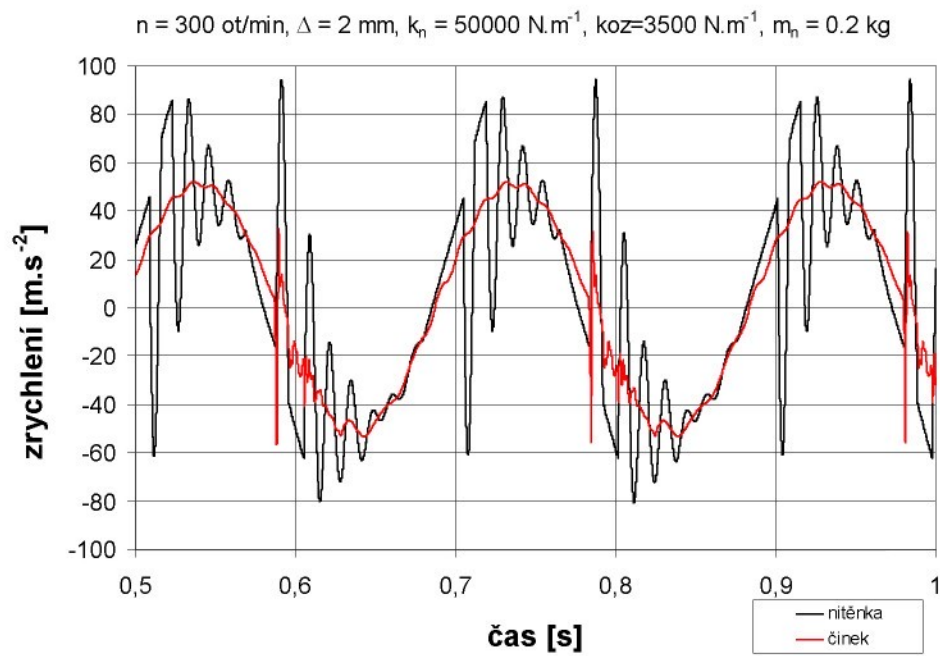
Ukázka kinematických závislostí pro dané parametry

Nitěnka s pružným dopadem – tři oblasti

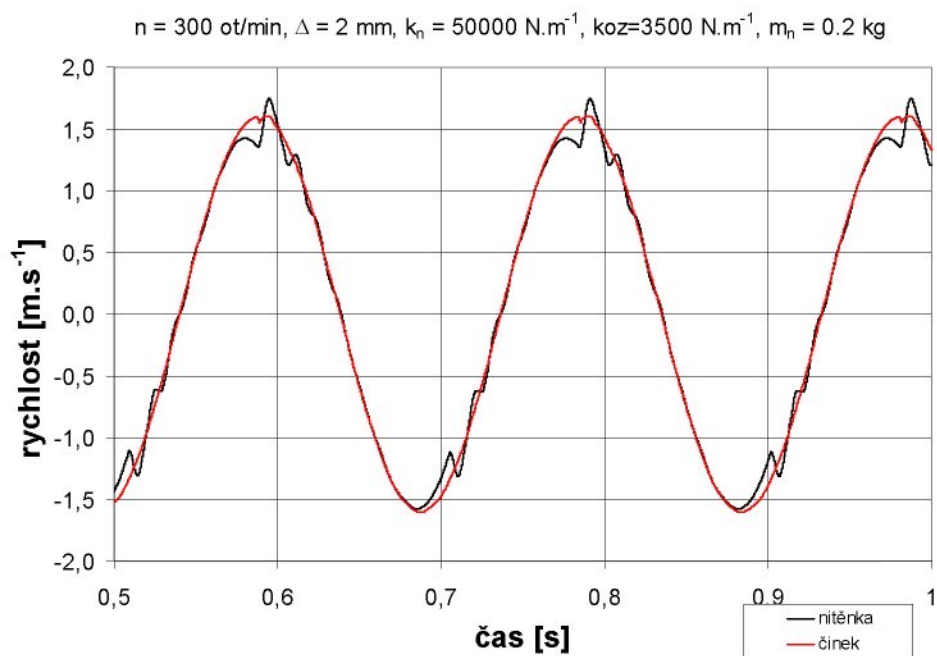


Graf 5p Rozdělení provozních stavů do tří oblastí – pro zadané parametry
Hodnoty platí pro jednu osnovní nit – reálnou nitěnku

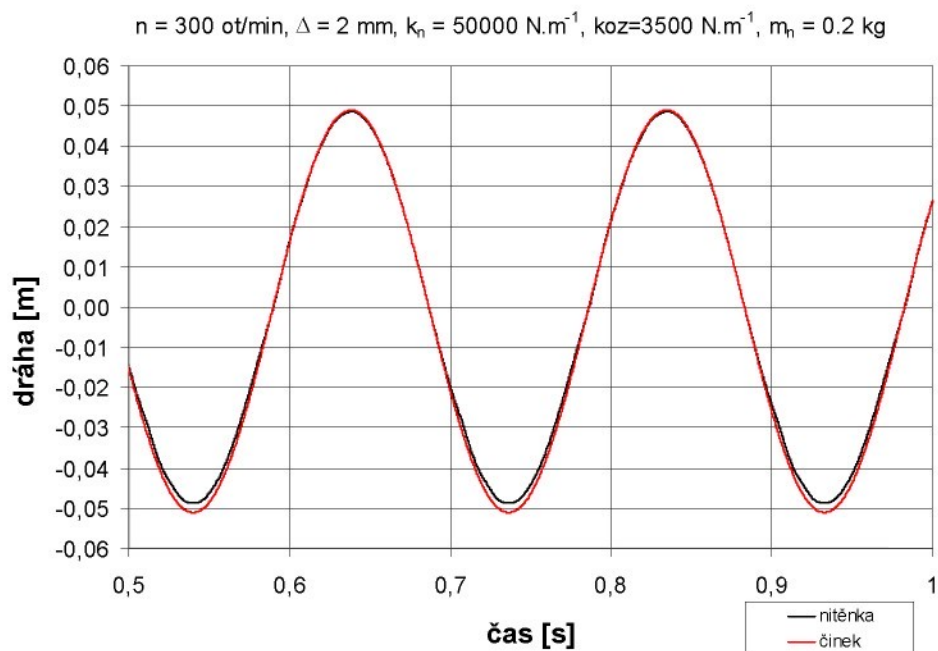
Grafy 6p – 14p zobrazují časové průběhy kinematických veličin soustavy nitěnka – rám listu. Pro zadané parametry jsou vyobrazeny tři pracovní oblasti. V Graf 5p jsou zobrazeny pracovní oblasti pro zadané parametry prošlupu se závislostmi dynamické síly pro tři pracovní frekvence. Závislost pro $n = 300 \text{ ot/min}$ se nachází ve statické oblasti, $n = 400 \text{ ot/min}$ v rovnovážné oblasti a $n = 500 \text{ ot/min}$ v oblasti dynamické.



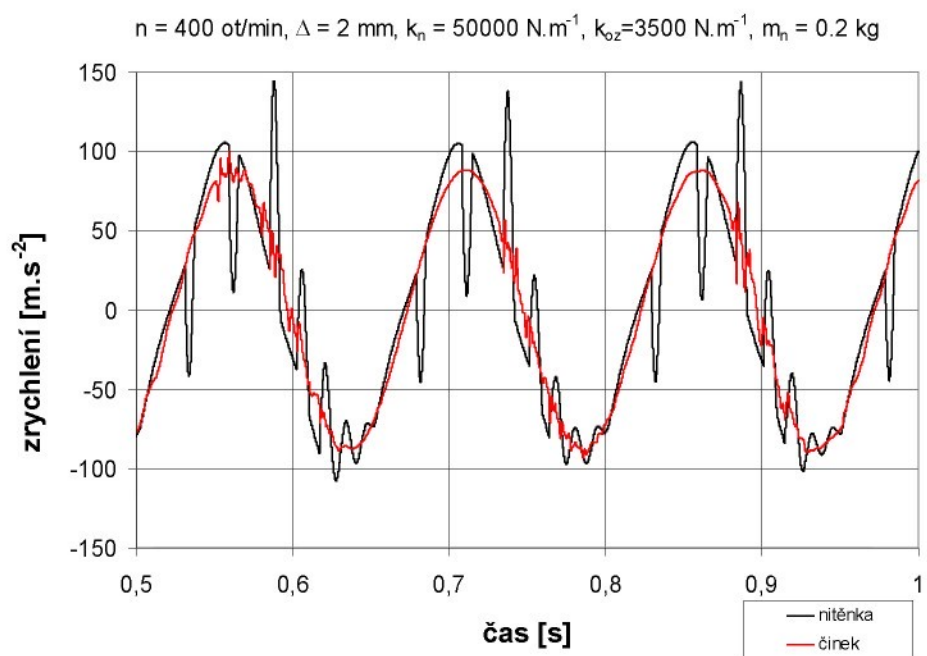
Graf 6p Časová závislost zrychlení nitěnky č. 1 – horní činek č. 1
statická oblast



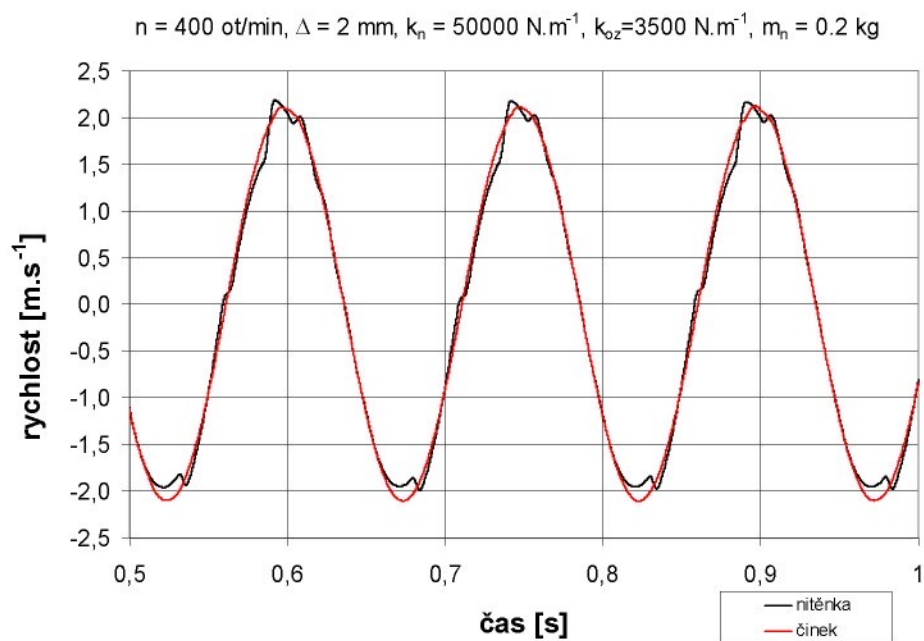
Graf 7p Časová závislost rychlosti nitěnky č. 1 – horní činek č. 1
statická oblast



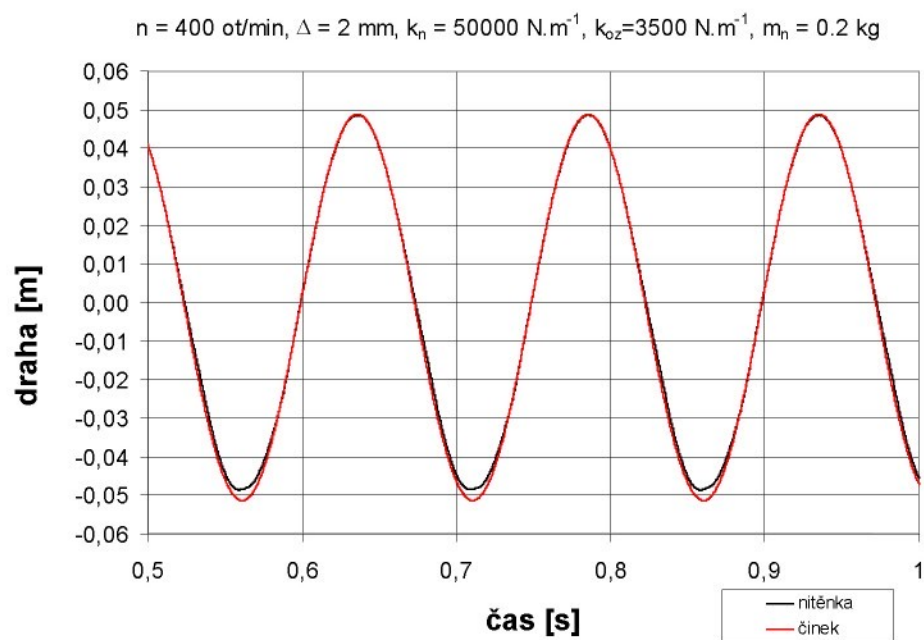
Graf 8p Časová závislost dráhy nitěnky č.1 – horní činek č.1
statická oblast



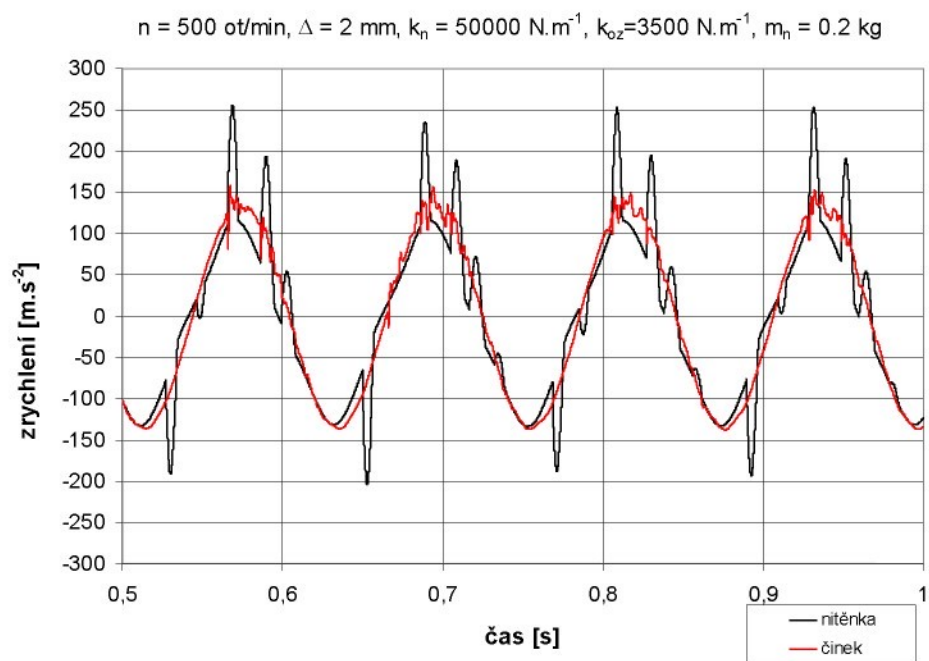
Graf 9p Časová závislost zrychlení nitěnky č.1 – horní činek č.1
rovnovážná oblast



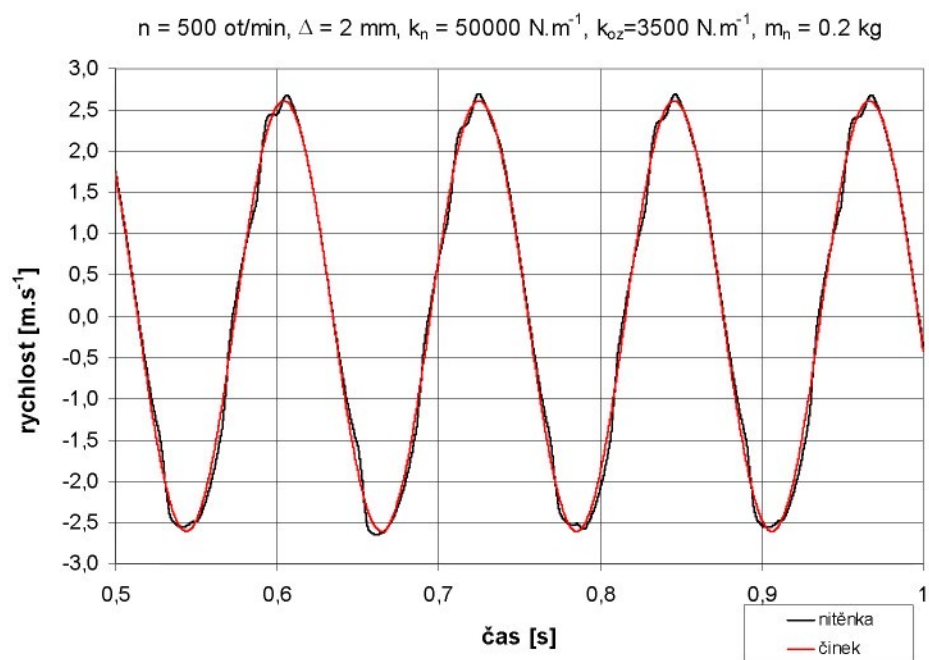
Graf 10p Časová závislost rychlosti nitěnky č.1 – horní činek č.1 rovnovážná oblast



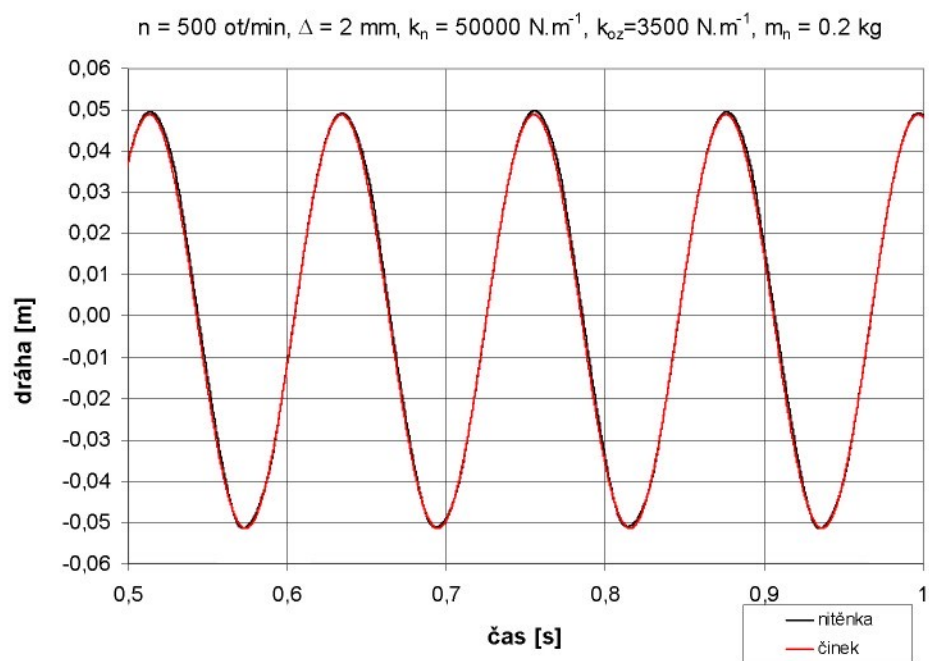
Graf 11p Časová závislost dráhy nitěnky č.1 – horní činek č.1 rovnovážná oblast



Graf 12p Časová závislost zrychlení nitěnky č.1 – horní činek č.1
dynamická oblast



Graf 13p Časová závislost rychlosti nitěnky č.1 – horní činek č.1
dynamická oblast



Graf 14p Časová závislost dráhy nitěnky č.1 – horní činek č.1
dynamická oblast

Příloha 3

Ukázka kinematických závislostí pro dané parametry

Pevná nitěnka – tři oblasti

Recenzenti: Prof. Ing. Vladimír Prášil, DrSc.
Doc. Ing. Jaroslav Zapoměl, DrSc.
Doc. Ing. Josef Dvořák, CSc.

Termín a místo obhajoby:

ISBN 80-7372-016-7

Obsah:

1.	Úvod	2
2.	Cíl disertační práce	2
3.	Rozbor	2
4.	Matematický popis	3
4.1.	Matematický model - rám listu	4
4.2.	Matematický model - uchycení pružných nitěnek s vůlí	5
4.3.	Matematický model - předepjatá nitěnka	7
5.	Analýza a rozbor výsledků výpočtového modelu – nitěnka s vůlí a pružným dopadem	8
6.	Analýza a rozbor výsledků výpočtového modelu – předepjatá nitěnka	9
7.	Experimentální analýza - ověření	11
7.1.	Ověření matematického modelu rámu listu na základě vlastních frekvencí dynamické soustavy	11
7.2.	Experimentální ověření matematického modelu nitěnky	12
7.3.	Experimentální vyhodnocení přínosu modelu s předepjatými nitěnkami	12
8.	Závěr a zhodnocení	13
8.1.	Zhodnocení výpočtového modelu	13
8.2.	Shrnutí základních výsledků	14
8.3.	Možnosti dalšího výzkumu	14
9.	Abstrakt	15
10.	Abstract	16
11.	Literatura	16

1. Úvod

Výroba textilních produktů patří odnepaměti k základním činnostem lidské společnosti. Mezi velmi používané produkty textilní výroby patří výroba plošných textilií tkaním, a to jak pro oděvní použití, tak pro celou řadu technického použití. Tkanina je plošný útvar, který vzniká vytvářením vazby mezi příčně zanášeným útkem a podélnou soustavou osnovních nití. Vazba mezi osnovou a útkem je odvislá od způsobu ovládání osnovních nití. Tkací stroj jako takový, je poměrně složité zařízení, které prochází neustálým vývojem a zdokonalováním s cílem zvýšení produktivity, spolehlivosti a životnosti. V systému tkacího stroje je celá řada subsystémů, které jsou zdrojem dynamického zatížení. Mezi takovýto subsystém patří prošlupní zařízení, které má na tkacím stroji funkci vytváření vazby mezi soustavou osnovních nití a zdvihovou závislostí. Významným zdrojem dynamického zatížení soustavy jsou také vůle ve vazbách mezi jednotlivými členy prošlupního mechanismu, které lze odstranit vhodnou volbou uložení. Dalším výrazným zdrojem dynamického zatížení a nežádoucího hluku jsou vůle v závěsu nitěnky mezi nosnými dráty. Tato vůle je nutná s ohledem na namáhání nitěnky.

2. Cíl disertační práce

Cílem práce je sestavení a ověření matematického popisu daného problému. Matematický popis je proveden na základě sestaveného matematického modelu brdového listu, kde veškeré hmoty jsou nahrazeny hmotnými body a veškeré pružné členy soustavami pružina – tlumič. Hlavním cílem je popis alternativní možnosti vazby mezi nitěnkou a nosnými dráty. Jde o aplikování pružného členu do místa vůle s cílem částečného, nebo úplného odstranění této vůle. Tímto způsobem dojde ke snížení, nebo k úplné eliminaci rázových účinků. Ty mají velký vliv na životnost nejen nitěnek, ale také celého brdového listu a prošlupního zařízení. Také dojde ke snížení hlučnosti při chodu stroje. Podrobný matematický popis, ale především jeho numerické řešení, není jednoduchou záležitostí. Pro numerické řešení bylo použito programového prostředí MATLAB – Simulink.

3. Rozbor

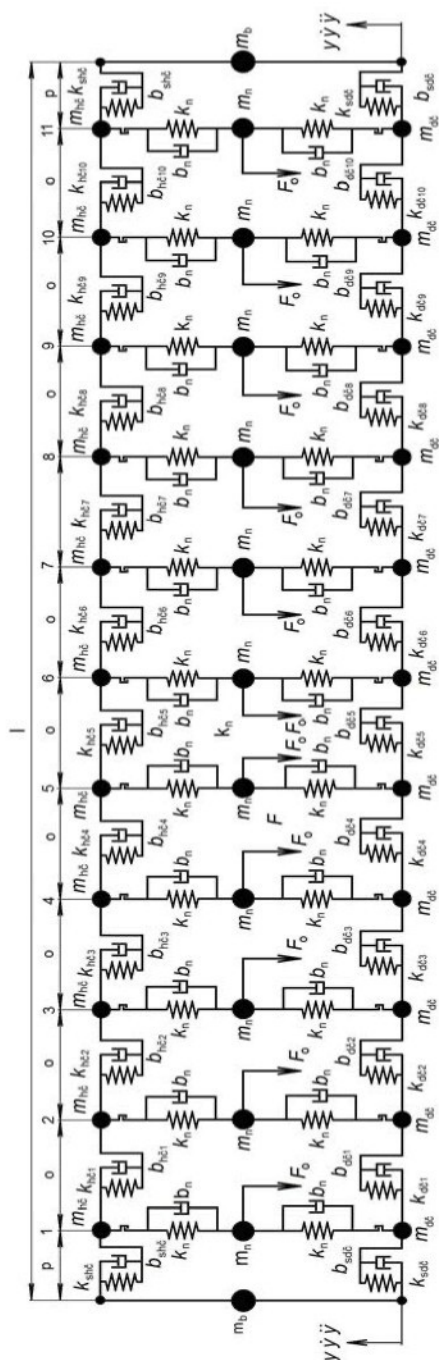
Na základě dané analýzy problému byl sestaven reologický model *obr. 1*. Pro zjednodušení popisu soustavy je provedeno nahrazení n - nitěnek jednou náhradní nitěnkou. Počet náhradních nitěnek je stanoven na 11 kusů, tedy lichý počet. Důvodem je zachování symetričnosti modelu pro zjednodušení matematického popisu. Zjednodušujícím předpokladem je stejná zdvihová závislost v obou krajních závěsech brdového listu. Potom můžeme uvažovat za stejné i kinematické závislosti jednotlivých osově symetrických hmotných bodů. Matematický model je navržen a sestaven jako jednodimenzionální úloha. To s sebou přineslo velké zjednodušení matematického popisu, ale také nutnost nahrazení konstant vstupujících do výpočtu. Jde o jednotlivé tuhosti segmentů horního a spodního činku a jim přidružené koeficienty tlumení. Jelikož jde o 1D úlohu, musí být do tuhostí zahrnuty momenty na hranách jednotlivých segmentů a posouvající síly, které vytvářejí silovou a momentovou rovnováhu. To vede ke zjištění, že náhradní tuhost jednotlivých segmentů není konstantní, přestože se jedná o prizmatický nosník. Totéž platí i pro koeficienty tlumení. Koncepce modelu je vytvořena tak, aby byla snadná verifikace s ohledem na aplikace různých typů nitěnek v rámu listu.

4. Matematický popis

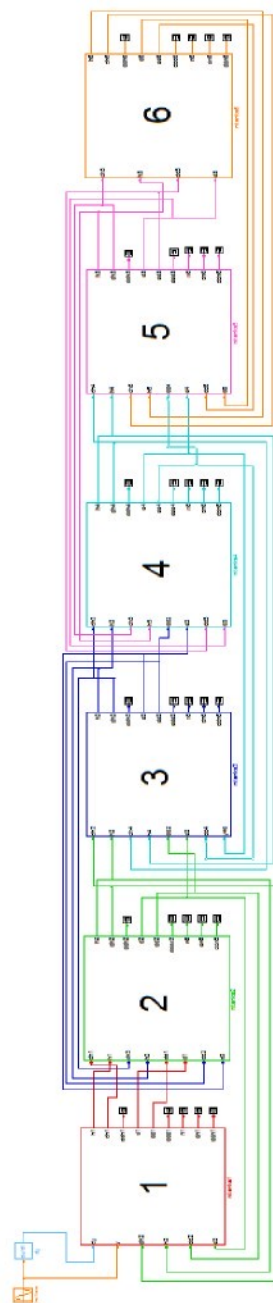
Matematický popis je odvozen od reologického modelu *obr. 1*. Pro zjednodušení samotného řešení je ve výpočtu uvažován pouze pohyb ve směru osy y . Jde tedy pouze o jednoosý pohyb. Pohybové rovnice byly sestaveny na základě Lagrangeovy rovnice druhého druhu (1).

$$\frac{d}{dt} \cdot \left(\frac{dK}{dq_i} \right) - \frac{\partial K}{\partial q_i} = Q - \frac{\partial U}{\partial q_i} - \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_i} \quad (1)$$

kde :	K	celková kinetická energie soustavy
	U	celková potenciální energie soustavy
	R	Rayleighova disipativní funkce
	q_i	obecná souřadnice
	Q	obecná síla



Obr. 1 Reologický model celého brdového listu



Obr. 2 Výpočtový model – první úroveň

4.1. Matematický model – rám listu

Rovnice (2-7) popisují dynamické chování rámu listu s vazbami na podbloky nitěnek. Rovnice (2, 3) popisují soustavu horní čínek č. 1 – dolní čínek č. 1, rovnice (4, 5) obecně soustavu horní čínek č. 2 - 5 – dolní čínek č. 2 – 5 a rovnice (6, 7) soustavu horní čínek č. 6 – dolní čínek č. 6.

$$m_{hc} \cdot \ddot{y}_{1h} = k_{shc} \cdot (y - y_{1h}) - k_{hc1} \cdot (y_{1h} - y_{2h}) - k_n \cdot (y_{1h} - y_{1n} + \delta_{1h}) + b_{shc} \cdot (\dot{y} - \dot{y}_{1h}) - b_{hc1} \cdot (\dot{y}_{1h} - \dot{y}_{2h}) - b_n \cdot (\dot{y}_{1h} - \dot{y}_{1n}) - m_{hc} \cdot g \quad (2)$$

$$m_{dc} \cdot \ddot{y}_{1d} = k_{sdc} \cdot (y - y_{1d}) - k_{dc1} \cdot (y_{1d} - y_{2d}) + k_n \cdot (y_{1n} - y_{1d} + \delta_{1d}) + b_{sdc} \cdot (\dot{y} - \dot{y}_{1d}) - b_{dc1} \cdot (\dot{y}_{1d} - \dot{y}_{2d}) + b_n \cdot (\dot{y}_{1n} - \dot{y}_{1d}) - m_{dc} \cdot g \quad (3)$$

$$m_{hc} \cdot \ddot{y}_{ih} = k_{hc(i-1)} \cdot (y_{(i-1)h} - y_{ih}) - k_{hci} \cdot (y_{ih} - y_{(i+1)h}) - k_n \cdot (y_{ih} - y_{in} + \delta_{ih}) + b_{hc(i-1)} \cdot (\dot{y}_{(i-1)h} - \dot{y}_{ih}) - b_{hci} \cdot (\dot{y}_{ih} - \dot{y}_{(i+1)h}) - b_n \cdot (\dot{y}_{ih} - \dot{y}_{in}) - m_{hc} \cdot g \quad (4)$$

$$m_{dc} \cdot \ddot{y}_{id} = k_{dc(i-1)} \cdot (y_{(i-1)d} - y_{id}) - k_{dci} \cdot (y_{id} - y_{(i+1)d}) + k_n \cdot (y_{in} - y_{id} + \delta_{id}) + b_{dc(i-1)} \cdot (\dot{y}_{(i-1)d} - \dot{y}_{id}) - b_{dci} \cdot (\dot{y}_{id} - \dot{y}_{(i+1)d}) - b_n \cdot (\dot{y}_{id} - \dot{y}_{in}) - m_{dc} \cdot g \quad (5)$$

$$m_{hc} \cdot \ddot{y}_{6h} = 2 \cdot k_{hc5} \cdot (y_{5h} - y_{6h}) - k_n \cdot (y_{6h} - y_{6n} + \delta_{6h}) + 2 \cdot b_{hc5} \cdot (\dot{y}_{5h} - \dot{y}_{6h}) - b_n \cdot (\dot{y}_{6h} - \dot{y}_{6n}) - m_{hc} \cdot g \quad (6)$$

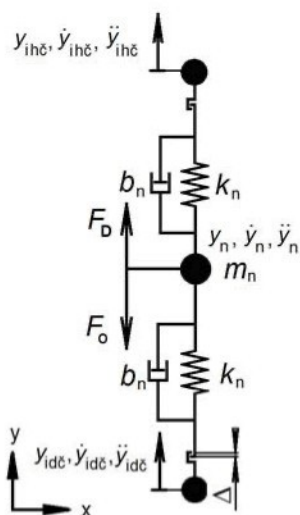
$$m_{dc} \cdot \ddot{y}_{6d} = 2 \cdot k_{dc5} \cdot (y_{5d} - y_{6d}) + k_n \cdot (y_{6n} - y_{6d} + \delta_{5d}) + b_{dc5} \cdot (\dot{y}_{5d} - \dot{y}_{6d}) + b_n \cdot (\dot{y}_{6n} - \dot{y}_{6d}) - m_{dc} \cdot g \quad (7)$$

Rovnice jsou sepsané ve formě, kterou lze použít jak pro alternativní zavěšení s vůlí, tak pro předepjatou nitěнку. V případě závěsu s vůlí z rovnic vypadne statické předpětí.

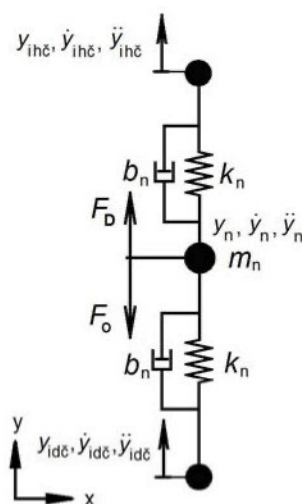
4.2. Matematický model – uchycení pružných nitěnek s vůlí

Na *obr. 3* je vyobrazen matematický model uchycení nitěinky s vůlí, kde hmotnost nitěinky m_n je soustředěna do místa nitového oka. Model nitěinky je brán také jako jednohmotová soustava. Nitěinka je brána jako absolutně tuhé těleso s pružnými částmi. Silový účinek od osnovy F_o působí rovněž na nitové oko. Tělo nitěinky je modelováno jako soustava pružina – tlumič o tuhosti k_n a tlumení b_n . Kinematické závislosti horního a dolního činku se liší navzájem v závislosti na poloze náhradní nitěinky na brdovém listu. V matematickém popisu je vůle v nitěnce

definovaná rozdílem drah horního a dolního činku. Vycházíme z předpokladu pohybu nitěнки kolem rovnovážné polohy, kde vůle v závěsném oku je vytvořena posuvem horního a dolního činku o $\Delta/2$. Směr posuvu je dán geometrií vzniku vůle.



Obr. 3 Reologický model jednohmotové pružné nitěнки s vůlí v závěsu



Obr. 4 Reologický model jednohmotové pružné nitěнки s předpětím

Matematický popis modelu (12, 13) je nutno opatřit podmínkou pro závislost silové vazby nitěнки a nosného drátu. Při pohybu brdového listu dochází vlivem nutné konstrukční vůle ke dvěma zatěžujícím stavům. Nitěнка má silovou vazbu buď s horní, nebo dolní nosnou kolejničkou. Podmínka pro tuto závislost vychází z (8, 9, 10, 11). Dále dochází k přeletu (přeskupení) nitěnek mezi nosnými kolejničkami. Výpočtový model je ošetřen i pro případ, kdy relativní vzdálenost mezi nosnými kolejničkami je větší než statická vůle. Zde dochází k silové vazbě na obě nosné kolejničky. Zatížení nitěнки od tahových sil v osnově je provedeno pomocí nelineárního viskoelastického členu, který se deformuje ve směru pohybu. Koeficienty tuhosti a tlumení jsou závislé na rozevření prošlupu. Konkrétní závislost byla získána na základě měření reálné bavlněné příze a parametrech prošlupu.

Dynamická rovnice nitěнки:

$$m_n \cdot \ddot{y}_n + b_o \cdot \dot{y}_n + k_o \cdot y_n + m_n \cdot g = R \quad (8)$$

kde

$$R = k_n \cdot (y_{ihč} - y_n) + b_n \cdot (\dot{y}_{ihč} - \dot{y}_n) - k_n \cdot (y_n - y_{idč}) - b_n \cdot (\dot{y}_n - \dot{y}_{idč}) \quad (9)$$

Podmínky řízení výpočtového schématu:

1. nitěnka s vazbou na oba činky

$$y_H - y_D \geq \Delta \quad (10)$$

2. pohyb s vůlí

$$y_H - y_D \leq \Delta$$

$R_n=0$	moment odpoutání	
R_n+	vazba na horní činek	
R_n-	vazba na dolní činek	(11)
$R_n=0 \uparrow$	odpoutání nitěnky od horního činku	
$R_n=0 \downarrow$	odpoutání nitěnky od dolního činku	

Obecná rovnice pohybu nitěnky:

$$m_n \cdot \ddot{y}_n = k_o \cdot y_n + m_n \cdot g + b_o \cdot \dot{y}_n + k_n \cdot (y_h - y_n) - k_n \cdot (y_n - y_d) + b_n \cdot (\dot{y}_h - \dot{y}_n) - b_n \cdot (\dot{y}_n - \dot{y}_d) \quad (12)$$

$$\ddot{y}_n = y_n \cdot \frac{k_o}{m_n} + \dot{y}_n \cdot \frac{b_o}{m_n} + g + \frac{1}{m_n} \cdot \left[k_n \cdot (y_h - y_n) - k_n \cdot (y_n - y_d) + b_n \cdot (\dot{y}_h - \dot{y}_n) - b_n \cdot (\dot{y}_n - \dot{y}_d) \right] \quad (13)$$

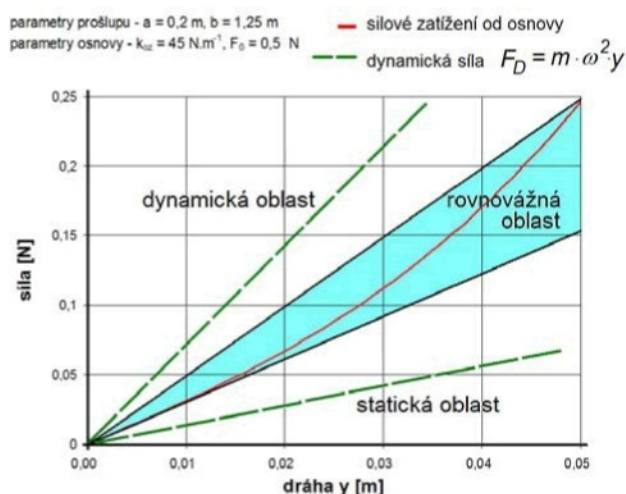
4.3. Matematický model - předepjatá nitěnka

U brdového listu s předepnutými nitěnkami stačí model rámu listu doplnit o dynamickou rovnici nitěnky (14), *obr. 4*. Model nitěnky je brán jako jednohmotová soustava. Nitěnka je brána jako absolutně tuhá s pružnými částmi v místě silové vazby na rám brdového listu. Rovnici je navíc nutno rozšířit o předpětí, resp. sílu vyvolanou předpětím v nitěnce. Ta má za následek také statické prohnutí činků rámu listu. S tímto jevem je nutné počítat do okrajových podmínek.

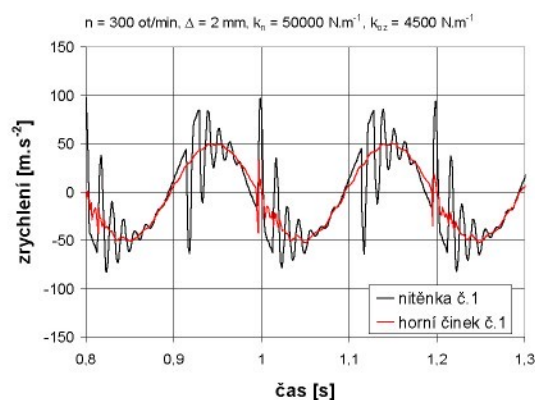
$$m_n \cdot \ddot{y}_n = k_n \cdot (y_{ih} - y_{in} + \delta_{ih}) - k_n \cdot (y_{in} - y_{id} + \delta_{id}) - k_o \cdot y_{in} + b_n \cdot (\dot{y}_{ih} - \dot{y}_{in}) - b_n \cdot (\dot{y}_{in} - \dot{y}_{id}) - b_o \cdot \dot{y}_{in} - m_n \cdot g \quad (14)$$

5. Analýza a rozbor výsledků výpočtového modelu – nitěnka s vůlí a pružným dopadem

Ze silových poměrů na nitěnce vyplývají tři možné stavy, ve kterých se může nitěnka během pracovních cyklů nacházet *graf 1*. Jde o vzájemný poměr tahové síly od osnovy a dynamické síly na nitěnce. V této práci nazývám tyto stavy oblastí statickou a dynamickou. Přechodová oblast je potom oblastí rovnovážnou. Každá oblast se vyznačuje charakteristickým chováním *grafy 2, 3, 4*. Pro obecné určení oblastí je využito závislosti silových účinků na rozevření prošlupu *graf 1*. Na základě závislosti silového zatížení nitěnky od osnovy, které má nelineární charakter, je možné pro dané otáčky vymezit rovnovážnou oblast. Závislost dynamického zatížení od hmotnosti nitěnky má ve zdvihové oblasti lineární charakter a její směrnice je dána pracovní frekvencí.

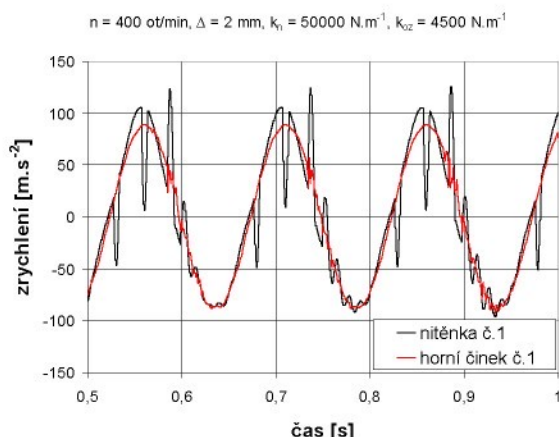


Graf 1 Rozdělení provozních stavů do tří oblastí reálné nitěnky – pro zadané parametry

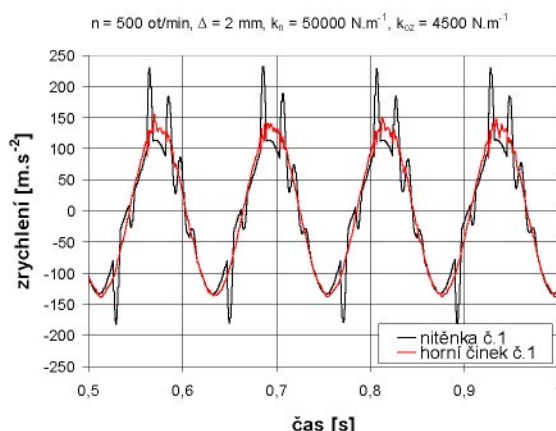


Graf 2 Závislost zrychlení náhradní nitěnky ve statické oblasti - charakter

Ve statické oblasti je určující pro chování nitěnky tah v osnově *graf 2*. Ten převažuje nad dynamickou silou a má za následek poměrně rychlé přeskupení nitěnek. Rovnovážná oblast se vyznačuje snížením rázové síly (rázem) *graf 3*, ale také vykazuje nestabilitu. Jedná se o neustálený stav, ovšem vykazující lokální minimum rázové síly. Rovněž zde dochází k vyrovnání rozdílů rázových sil po délce brdového listu. V dynamické oblasti určuje chování nitěnky dynamická síla *graf 4*. Při odpoutání nitěnky dochází k přeletu nitěnky mezi nosnými kolejničkami. Nitěnka se vlivem tahu v osnově zpomaluje do momentu dopadu na protilehlou nosnou kolejničku.

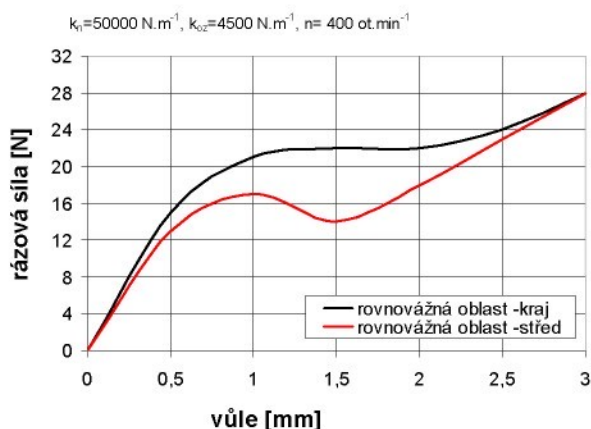


Graf 3 Závislost zrychlení náhradní nitěnky v rovnovážné oblasti - charakter

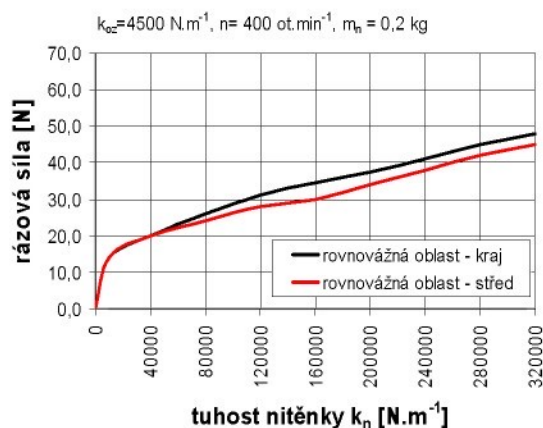


Graf 4 Závislost zrychlení náhradní nitěnky v dynamické oblasti - charakter

Graf 5 zobrazuje závislost rázové síly na konstrukční vůli. S velikostí vůle roste i velikost rázové síly. Nejprogresivnější je to pro dané parametry a statickou oblast do $\Delta = 1 \text{ mm}$. V grafu je také patrný rozdíl v rázové síle mezi krajem brdového listu a středem. *Graf 6* zobrazuje závislost rázové síly na tuhosti pružného konce nitěnky. Zde by se dalo konstatovat, že rázová síla roste přibližně lineárně s tuhostí pružného konce nitěnky.



Graf 5 Závislost rázové síly na konstrukční vůli – rovnovážná oblast

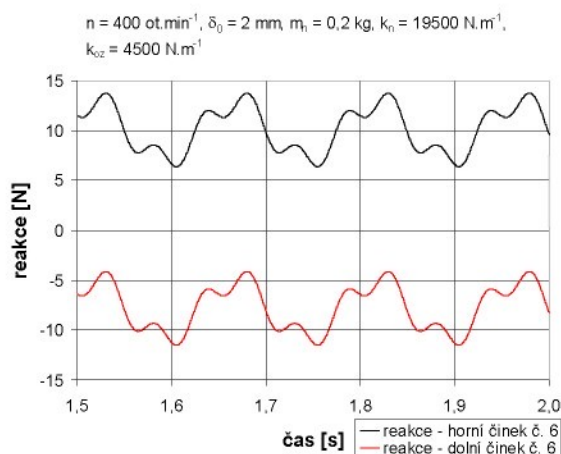


Graf 6 Závislost rázové síly na konstrukční vůli – rovnovážná oblast

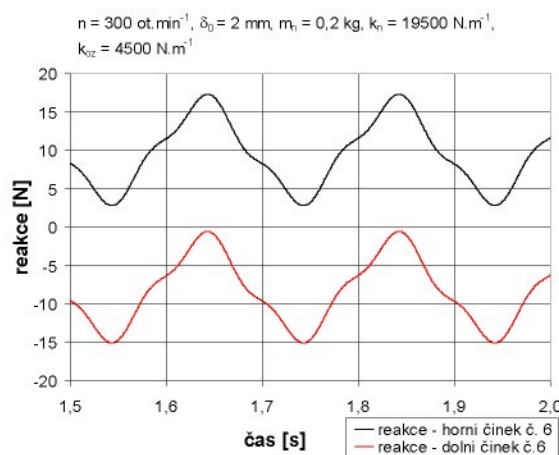
6. Analýza a rozbor výsledků výpočtového modelu – předepjatá nitěnka

Významnou úlohu zde opět hraje dynamické naladění soustavy horní čínek - nitěnka – dolní čínek, respektive vzájemný poměr dynamické síly od nitěnky a tahem v osnovních nitích. Důležitým mezníkem je rovnováha těchto dvou sil. Rovnovážná

oblast má za následek snížení zatížení rámu listu, resp. reakce nitěny na nosnou kolejničku nabývají minimálních hodnot. Zde platí rozdělení do tří oblastí viz. *kap. 5, graf 1*. V rovnovážné oblasti je průběh reakcí na nosnou kolejničku deformován rovnováhou sil *graf 7*. *Graf 8* zobrazuje časovou závislost reakce ve statické oblasti. Zde je velikost reakce dána především tahem v osnově. V dynamické oblasti má významnější vliv dynamická síla.

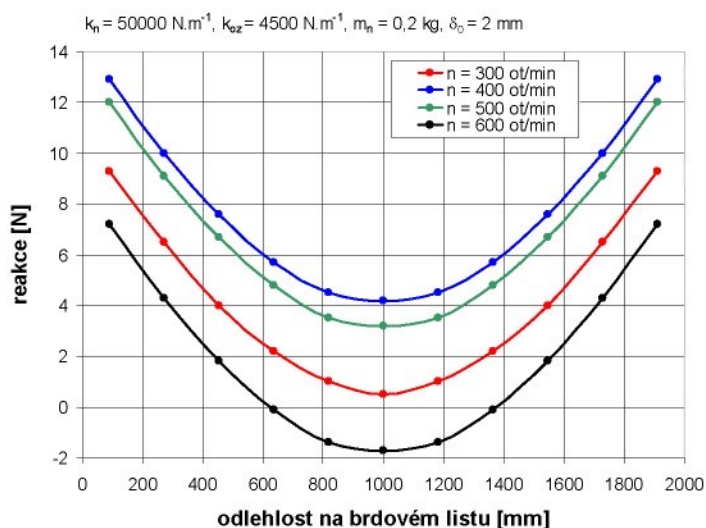


Graf 7 Časový průběh reakcí náhradní nitěny na nosnou kolejničku – rovnovážná oblast



Graf 8 Časový průběh reakcí náhradní nitěny na nosnou kolejničku – statická oblast

V grafu 9 jsou znázorněny časové průběhy reakcí v závislosti na poloze náhradní nitěny na brdovém listu s tuhostí osnovy $k_{OZ} = 4500 \text{ N.m}^{-1}$.

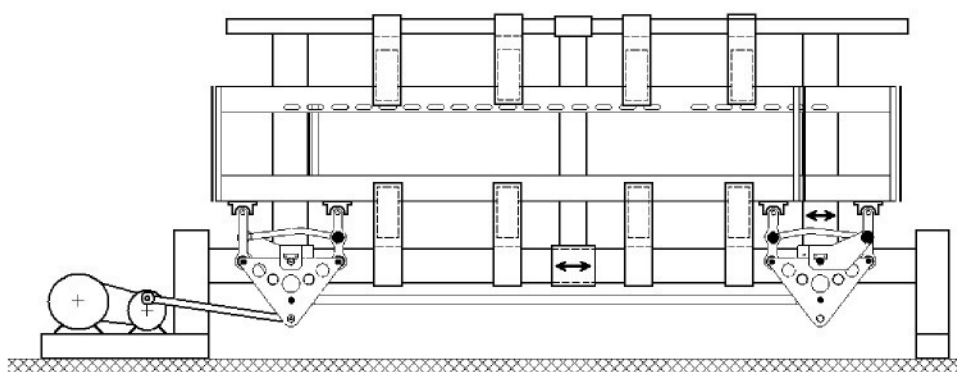


Graf 9 Průběhy minimálních hodnot reakcí na nosnou kolejničku horního čínku

Výsledky jsou zpracovány formou obálkových křivek absolutních minimálních hodnot reakcí oka na nosné kolejničky. Takto zpracované grafy dávají jasnou představu o chování nitěnek po délce brdového listu. Tam kde dojde ke změně znaménka reakce, oproti znaménku předpětí, se silová vazba přeruší.

7. Experimentální analýza - ověření

Experimentální analýza je provedena na zkušebním zařízení obr. 3, které bylo zkonstruováno a vyvinuto pro účely testování prošlupných zařízení a brdových listů [1, 2, 5]. Pro účely ověření matematického modelu bylo potřeba provést srovnávací měření mezi reálně rozmístěnými nitěnkami a náhradním modelem. Při experimentu nebyla uvažována síla od osnovních nití. Výsledky měření prokázaly shodu mezi volně rozloženými nitěnkami a nitěnkami náhradními. Lze tedy konstatovat správnost nahrazení.



Obr. 3 Schéma zkušebního zařízení

7.1. Ověření matematického modelu rámu listu na základě vlastních frekvencí dynamické soustavy

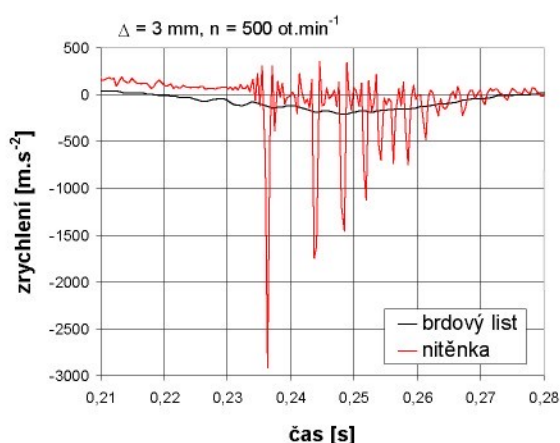
Na základě vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitů lze korektně posoudit vlastnosti matematického modelu a reálné soustavy. Pro ověření modelu rámu listu byly porovnány první vlastní frekvence reálné soustavy a matematického modelu. Vyhodnocení experimentu a matematického modelu je provedeno v *tab. 1*. Pro porovnání jsou zde uvedeny výsledky získané na základě výpočtu modelu rámu listu metodou MKP v systému Pro Engineer.

	Vlastní frekvence Ω [Hz]		
	Měření	Výpočet – S imulink	Výpočet – Pro Engineer
Horní čínek	72	74	70
Dolní čínek	89	86	90

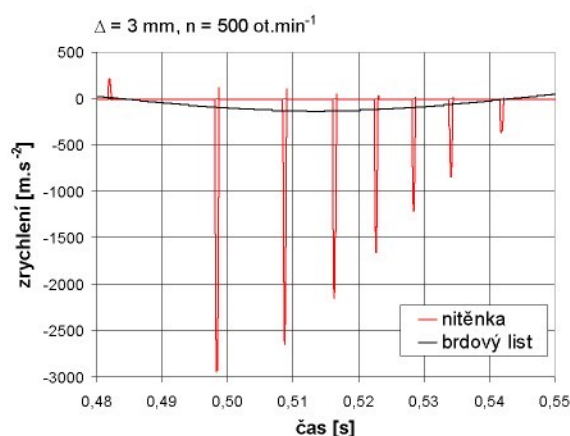
Tab. 1 Srovnání vlastních frekvencí

7.2. Experimentální ověření matematického modelu nitěnky

Experiment byl proveden na jedné upravené nitěnce. Ta byla opatřena mikrosnímačem zrychlení, který umožnil získání časového záznamu zrychlení. To porovnáme s teoretickou závislostí. *Graf 10* je detail jednoho reálného dopadu a následných odskoků a *graf 11* teoreticky vypočtená závislost. Srovnání je v *tab. 2*. Doba letu je v obou případech srovnatelná. Doby odskoků se do jisté míry liší. Tento rozdíl je dán nepřesně specifikovaným rázem.



Graf 10 Naměřený detail letu nitěnky a jednotlivých odskoků při jednom dopadu nitěnky na nosnou kolejničku



Graf 11 Vypočtený detail letu nitěnky a jednotlivých odskoků při jednom dopadu nitěnky na nosnou kolejničku

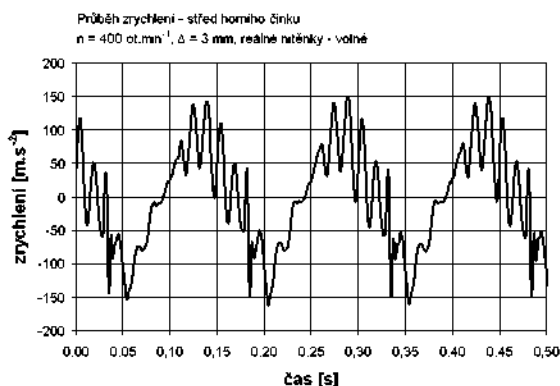
$\delta = 1 \text{ mm}$ $n = 500 \text{ ot.min}^{-1}$	Teoretické hodnoty	Naměřené hodnoty
Doba letu [ms]	15,5	16,0
Doba odskoku č. 1 [ms]	10,4	8,0
Doba odskoku č. 2 [ms]	7,5	4,4
Doba odskoku č. 3 [ms]	6,4	3,6

Tab. 2 Srovnání doby letu a odskoků nitěnky

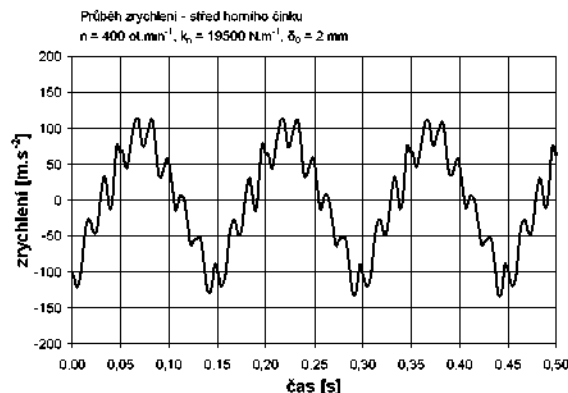
7.3. Experimentální vyhodnocení přínosu modelu s předepjatými nitěnkami

Další část experimentu se týkala vyhodnocení rozdílu chování nitěnek s vůlí a nitěnek předepjatých *graf 12, 13*. Došlo zde k eliminaci rázu a ke snížení amplitudy vyšších harmonických složek. Na základě provedeného měření lze prokazatelně

demonstrovat snížení dynamických účinků při použití alternativního zavěšení nitěnek a celkové zvýšení tuhosti brdového listu.



Graf 12 Časový průběh zrychlení středu horního činku – reálné nitěanky



Graf 13 Časový průběh zrychlení středu horního činku – předepjaté nitěanky

8. Závěr a zhodnocení

Hlavním výsledkem této práce je sestavený a ověřený matematický model popisující dynamické chování brdového listu s volně zavěšenými nitěnkami alternativní konstrukce, popřípadě s nitěnkami předepjatými. Obě alternativy mají za cíl snížit, nebo úplně eliminovat rázy při dopadu nitěnky na nosnou kolejničku. Součástí vyhodnocení je porovnání experimentálně získaných závislostí na reálné soustavě mezi pružně uchycenými nitěnkami a nitěnkami zavěšenými s vůlí. Velmi důležité je experimentální ověření matematického modelu s pružně uchycenými nitěnkami. Je možné konstatovat potřebnou shodu matematického modelu a chování reálně posuzované soustavy.

8.1. Zhodnocení výpočtového modelu

Výpočtový model je vytvořen na základě nahrazení reálného brdového listu soustavou pružných elementů, které tvoří vazbu mezi hmotnými body *obr. 1*. Vzhledem k charakteru jednoosého vratného pohybu listu je i model koncipován jako jednoosá úloha. Na základě provedeného měření lze konstatovat, že matematický model koresponduje se skutečností.

Výpočtový model je sestaven na základě matematického popisu modelu brdového listu. V základním provedení figurují jako vstupní parametry veškeré konstanty, které je možné měnit dle požadavku konkrétní aplikace. Další vstupní

veličinou je zdvihová závislost prošlupního mechanismu, která může být definována jako funkce v čase, nebo formou tabulky. Primárními výstupními závislostmi jsou kinematické charakteristiky jednotlivých hmotných bodů (tedy dráha, rychlost a zrychlení). Sekundárně potom lze dopočítat závislosti reakcí na nosnou kolejničku (kolejničky).

Koncepce výpočtového modelu je určena tak, aby byla možná variabilita v systému horní činek – nitěnka – dolní činek. Takto koncipovaný model umožní osazení různými typy nitěnek. V tomto případě nitěnkou předepnutou a nitěnkou s pružnými dosedacími koncovými oky.

8.2. Shrnutí základních výsledků:

- Provedení experimentální analýzy chování brdového listu pro dvě alternativy uchycení nitěnek, navržení metodiky experimentu.
- Sestavení a experimentální ověření matematického modelu popisujícího dynamické chování brdového listu s alternativním uchycením nitěnek. Model umožňuje analytický rozbor chování brdového listu.
- Experimentální analýza potvrdila v případě předepjatých nitěnek úplnou eliminaci rázu a celkové snížení amplitud vyšších harmonických složek kmitů, a v případě snížené vůle značný pokles rázové síly a snížení, nebo úplnou eliminaci odskoků po přeletu nitěnky. To vede k celkovému snížení dynamického zatížení a uklidnění chodu prošlupního zařízení.
- Sestavený výpočtový model umožňuje pro zadané podmínky určit optimální parametry soustavy nitěnka – brdový list. Těmito parametry rozumíme především tuhost pružných částí nitěnky, hmotnost nitěnky a tah v osnově.
- Chování brdového listu je ovlivněno chováním samotného rámu listu. Dalo by se říci, že se jedná o velice poddajnou soustavu (průhyb ve středu rámu listu dosahuje několika milimetrů). Navíc rám listu se při pohybu vlivem rázů rozkmitává. V praxi používané brdové listy jsou podélně nesymetrické. To vede k rozdílnému chování horní a dolní části rámu listu. Model reflektuje i tyto vlastnosti.

8.3. Možnosti dalšího výzkumu:

Tato práce měla za cíl popsat chování brdového listu s alternativním zavěšením nitěnek. Rozbor dané problematiky popsal přínosy pružného dopadu, popřípadě předeplatných nitěnek. Vzhledem ke složitosti dané problematiky není možné vyvodit jednoznačné univerzální závěry platné pro veškeré používané brdové listy. Lze ovšem tohoto nástroje použít pro optimální řešení konkrétního zadání s použitím optimálně navržených parametrů.

Možnosti dalšího výzkumu lze rozdělit na čtyři základní proudy:

1. Výzkum a vývoj alternativního uchycení nitěnky v rámu listu s viskoelastickým dopadem koncového oka. Možná řešení jsou věci zpracovávající patentové přihlášky.
2. Zdokonalení výpočtového modelu z hlediska vstupních parametrů a tím zpřesnění získaných výsledků. Především se jedná o zdvihovou závislost a zatížení nitěnek od osnovních nití. Dále potom zpřesnění definice elastického rázu při dopadu nitěnky na nosnou kolejničku – případná experimentální analýza.
3. Prověření možnosti nahrazení volně zavěšených nitěnek nitěnkami předeplatnými a jejich dopad na textilně technologické operace.
4. Výzkum alternativního neviskoelastického dopadu nitěnky na nosnou kolejničku, popřípadě kombinací viskoelastického s neviskoelastickým dopadem. Experimentální ověření této možnosti a úprava stávajícího modelu nitěnky.

9. Abstrakt

Práce je zaměřena na snížení dynamického zatížení prošlupního zařízení. Cílem je analyzování alternativního uchycení nitěnek v brdovém listu. Klasické zavěšení s vůlí zde bylo nahrazeno pružnou vazbou na nosné dráty s minimalizací, nebo úplným odstraněním konstrukční vůle. Pro tuto alternativu je sestaven náhradní matematický model, který umožňuje pro různé zatěžující stavy a vstupní parametry simulovat reálný jev. Matematický popis byl proveden pomocí Lagrangeových rovnic druhého druhu na jejichž základě byl vytvořen výpočtový program pro řešení

diferenciálních rovnic druhého řádu. Ověření matematického modelu bylo provedeno na základě měření v reálných podmínkách pomocí zkušebního zařízení.

Na základě vytvořeného matematického modelu lze sledovat chování brdového listu při různých zatěžujících a pracovních podmínkách. Důraz je kladen především v oblasti alternativního závěsu se sníženou konstrukční vůlí a pružným dopadem závěsného oka na nosnou kolejničku, popřípadě předeprnutými nitěnkami. Zde je možno sledovat vliv tuhosti, hmotnosti nitěnek a tlumících účinků pružného dopadu na chování nitěnek a jejich vlivu na chování rámu brdového listu.

10. Abstract

The theses deal reduction of dynamic load of a shedding mechanism. The aim is to analyse an alternative embedding of the healds in heald shaft. Classic mounting was replaced by elastic attachment on healds on supporting wires. It leads to reduction or complete removing of clearance between heald and wire. Mathematic model, which enables to simulate real behaviour of the mechanism under different conditions, was designed. Mathematical description was made using Lagrange equations of second type. To solve these equations, computer program for second grade differential equations solution was created. Verification of the model was carried on special testing equipment simulation real conditions.

Mentioned mathematical model enables to observe behaviour of the heald shaft in different conditions of load. The stress is put on alternative embedding with reduced clearance and with elastic drop of the heald on supporting wire or with pre-tensioned healds. It is possible to follow influence of stiffness, mass and damping of the system on behaviour of the healds and its impact on behaviour of the heald shaft.

11. Literatura

- [1] BÍLEK, M. – KOVÁŘ, Š.: Record of the movement of heald in the weaving loom. IX. International Conference on the Theory of Machines and Mechanism in association with the II. CEACM Conferernce on Computational Mechanics 2004. s. 87-92, Liberec, Czech Republic, ISBN 80-7083-847-7.
- [2] BÍLEK, M. – KOVÁŘ, Š. – MRÁZEK, J.: Testing equipment for analysis of deformation of the frame of heald shaft of weaving looms. TRANSFER 2004. s. 58-61, Trenčín, Slovak Republic. ISBN 80-8075-030-0.

- [3] BÍLEK, M. - KOVÁŘ, Š.: Analysis heald on textil loom motion. In. XIV Mezinárodní vědecké sympozium TU Dresden, TU Dresden, Německo (pp. 50-55), ISBN 3-86005-371-X
- [4] BÍLEK, M. – KOVÁŘ, Š.: Pohyb nitěnky během procesu tkaní. APPLIED MECHANICS 2004. s. 31-36, Kočovce, Slovak Republic. ISBN 80-227-2030-5.
- [5] BÍLEK, M. – KOVÁŘ, Š. – MRÁZEK, J.: Návrh a realizace zkušebního zařízení pro analýzu dynamických vlastností rámců listů tkacích strojů, prošlupných zařízení a listových strojů. . Odborná konference Výzkumného centra Textil 2000-2004. s. 5-12. Liberec 2004. ISBN 80-7083-899-X.
- [6] BÍLEK, M. – KOVÁŘ, Š.: Possibility of decrease of healdshaft deflection, Numerical simulation of the shedding mechanism, The 2nd international symposium of theoretical and applied mechanics, Iasi, Romania 2005,
- [7] BÍLEK, M. – KOVÁŘ, Š.: Analysis of a Play-Free Fastening of a Heald, 7th International scientific conference Applied mechanics 2005, s 7-8. Hrotovice 2005, Czech republic, ISBN 80-214-2373-0.
- [8] BÍLEK, M.: Analýza brdového listu tkacího stroje. Doktorská disertační práce. TU Liberec 1999.
- [9] BÍLEK, M. – KOVÁŘ, Š.: Possibility of decrease of healdshaft deflection, Numerical simulation of the shedding mechanism, The 2nd international symposium of theoretical and applied mechanics, October 28-30, 2005, s 177 – 184, Technical University IASI, Romania, ISSN 1011-2855.
- [10] BÍLEK, M. – KOVÁŘ, Š.: Verifications of the mathematical model of the heald of weaving loom, TRANSFER 2006., Trenčín, Slovak Republic. (konference se konala po odevzdání této práce)
- [11] BRÁT, V. - JÁČ, V. - ROSENBERG, J.: Kinematika. SNTL Praha 1987
- [12] CHARVÁT, J.: Teorie mechanismů. Vybrané stati. /Skripta VŠST/. Liberec, VŠST 1980.
- [13] Manuál pro Simulink
- [14] Manuál pro Pro/Engineer
- [15] Manuál pro Pro/Mechanica
- [16] Prospektový materiál firem DERIX, GROB – Horgen, F.I.R.S.T. S.p.A, Stäubli.
- [17] Poznámky z mezinárodní výstavy ITMA, Birmingham 2003.