



# INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2005

NÁRODNÍ KONFERENCE

s mezinárodní účastí

Svratka, Česká republika, 9. - 12. května 2005

---

## MECHANICAL PROPERTIES OF A TEXTILE MATERIALS FROM THE POINT OF VIEW OF A WEAVING PROCESS

P. Tumajer<sup>1</sup>

**Summary:** *This paper deals with a theoretic and experimental analysis of the mechanical properties of the textile materials (warp threads) during the weaving process. The warp stress method in the weaving process is described here. The theoretical part includes the abstract of the different rheologic models of the threads as the viscoelastic material and their mathematical description – it is the expression of the response (tensile force) for the harmonic elongation (excitation function) and the expression of the frequency characteristic of the transfer “elongation to tensile force”. The experimental part describes the special testing equipment for simulation of the warp thread stress during the weaving process, has been devised in the Weaving Laboratory of the Technical University in Liberec. Further, the experimental part describes the method of experimental measurement on the special testing equipment and the measured values are represented graphically here. The measured values are utilised for the calculation of the rigidity modulus of the thread. The results of the experimental measurements and the results of the theoretical part are confronted in the conclusion of this paper.*

### 1. Úvod

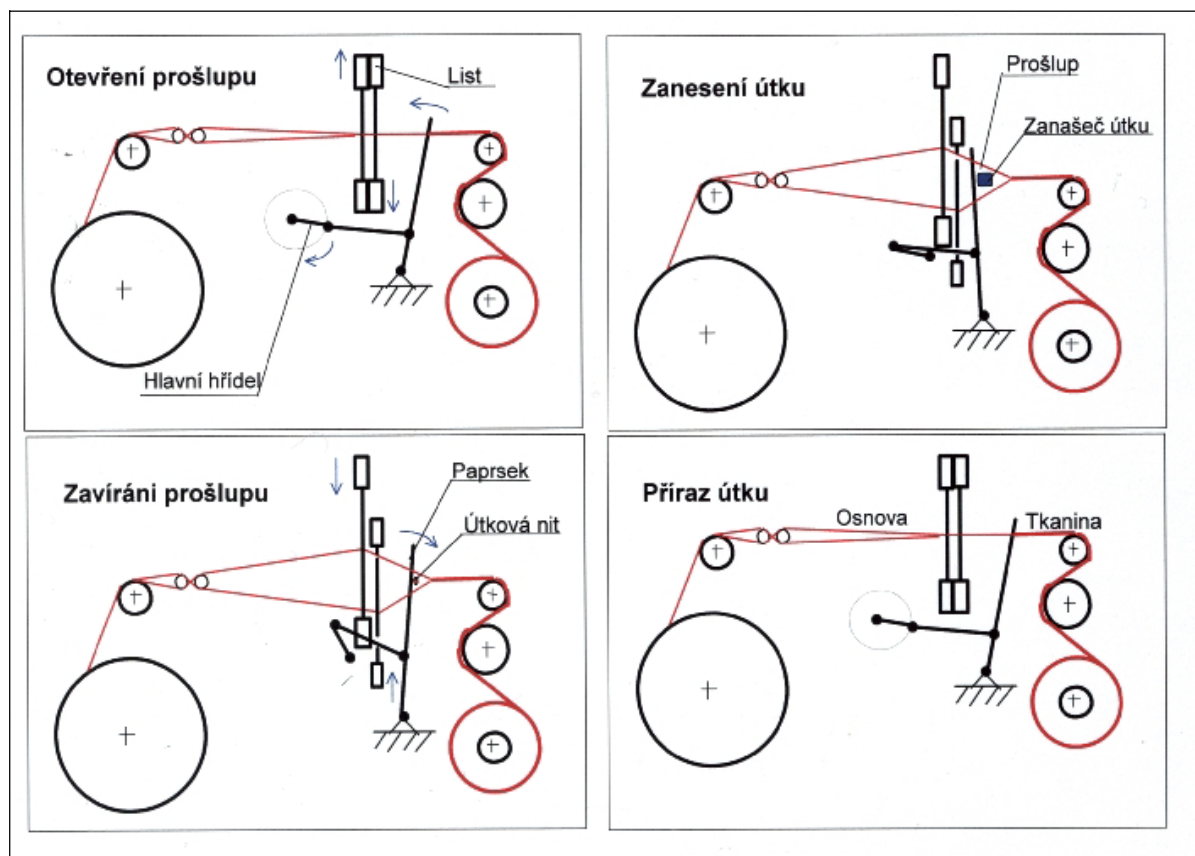
Příspěvek se zabývá teoretickou i experimentální analýzou mechanických vlastností textilních materiálů (osnovních nití) během tkacího procesu. Je zde popsán způsob namáhání osnovních nití během tkacího procesu. V teoretické části příspěvku je uveden přehled různých reologických modelů nití jako viskoelastických materiálů a jejich matematický popis – tj. vyjádření odezvy (tahové síly) pro harmonické protažení (budící funkce) a vyjádření frekvenčního přenosu mezi „protažením a tahovou silou“. Experimentální část příspěvku popisuje speciální zařízení pro simulaci namáhání osnovních nití během tkacího procesu, které bylo zkonstruováno v Tkalcovské laboratoři Technické univerzity Liberec. Je zde popsán způsob realizace měření a grafickou formou prezentována naměřená data. Naměřené hodnoty jsou využity pro výpočet modulu tuhosti nitě. V závěrečné části příspěvku jsou výsledky experimentálních měření konfrontovány s modely uvedenými v teoretické části.

---

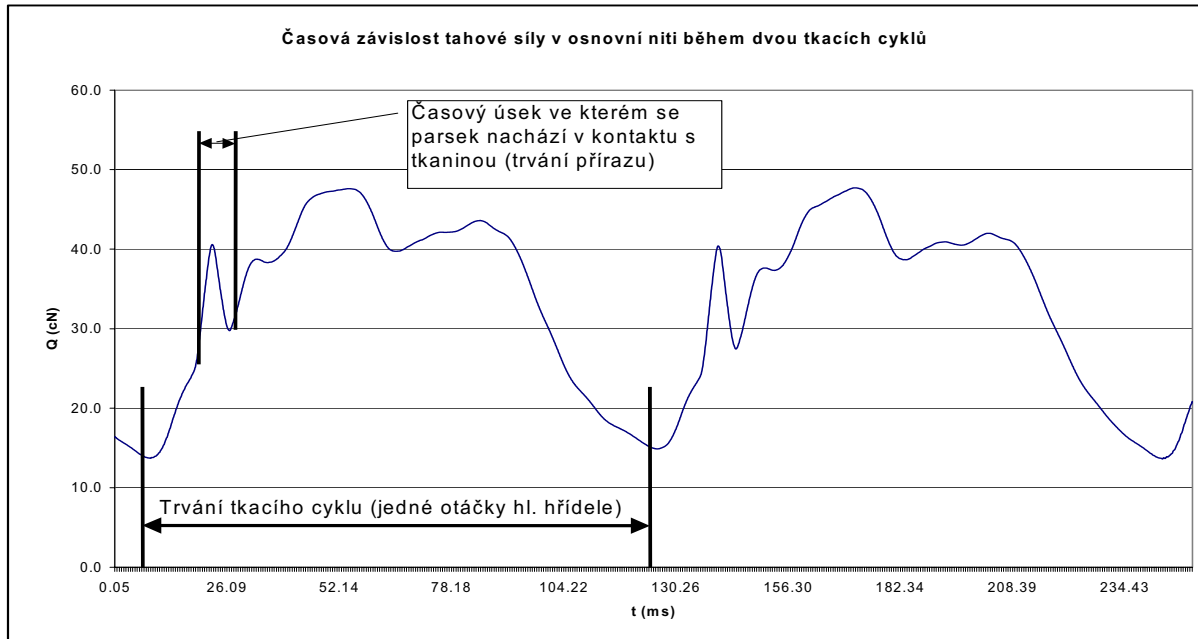
<sup>1</sup> Ing. Petr Tumajer, Ph.D., Technická univerzita v Liberci, Textilní fakulta, Katedra textilních technologií, Hálkova 6, 461 17 Liberec, Česká republika, Tel.: +420 485 353 259, Fax: +420 485 353 542, e-mail: petr.tumajer@vslib.cz

## 2. Způsob namáhání osnovních nití během tkacího procesu

Tkanina je plošná textilie, která vznikne provázáním dvou soustav délkových textilií (nití): osnovy a útku. Na tkacím stroji je tkanina tvořena ve čtyřech fázích (viz. obr. 1): otevření prošlupu, zanesení útku, příraz útku a zavření prošlupu. Vlivem otevření prošlupu a přírazu útku dochází k protažení osnovních nití a změně tahové síly v těchto nitech (viz. obr. 2). Osnovní nit je tedy během tkacího procesu namáhána v tahu, cyklicky s frekvencí určenou otáčkami hlavní hřídele. V běžném (dlouhodobém) provozu se tyto otáčky pohybují v hodnotách od cca. 400 ot./min až 800 ot./min, ale na výstavách textilních strojů (v krátkodobém provozu) jsou prezentovány tkací stroje s otáčkami až 2000 ot./min. Při tvorbě tkaniny v plátňové vazbě dojde v každém tkacím cyklu (tkací cyklus = jedna otáčka hlavní hřídele) ke zdvihu nebo stahu listu a jeho návratu do základní polohy. Frekvence protažení osnovních nití vlivem otevírání prošlupu je proto rovna frekvenci otáček hlavní hřídele. Po zanesení útkové nitě do prošlupu je tato nit dopravena paprskem k čelu tkaniny a potom je zatlačena do tkaniny. Během působení paprsku na čelo tkaniny dochází k protažení osnovních nití. Při výrobě běžných tkanin je paprsek v kontaktu s čelem tkaniny po dobu, jež odpovídá cca. 10% tkacího cyklu. Proto je i frekvence protažení osnovních nití vlivem přírazu cca. 10x vyšší než frekvence otáček hlavní hřídele. V experimentální části tohoto příspěvku se budeme zabývat analýzou deformačních vlastností osnovních nití z hlediska otevírání prošlupu.



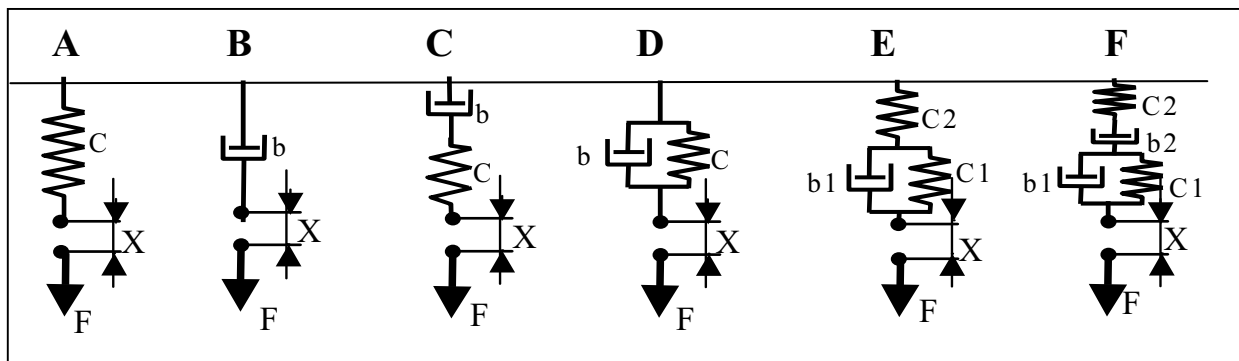
Obr. 1 Fáze tvorby tkaniny na tkacím stroji



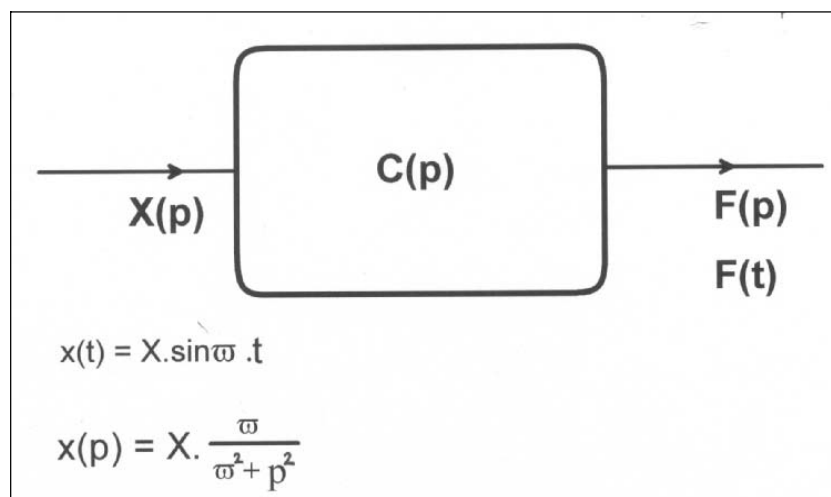
Obr. 2 Časová závislost tahové síly v osnovní niti během dvou tkacích cyklů. Tahová síla v osnovní niti byla měřena na tkacím stroji, jež pracuje s otáčkami 510 ot./min: frekvence protažení osnovních nití vlivem otevření prošlupu je 8,5 Hz a vlivem přírazu 111 Hz

### 3. Teoretická část

Délková textilie (nit) představuje viskoelastický materiál, jehož deformační vlastnosti je možné teoreticky analyzovat pomocí různých reologických modelů. Tyto modely (viz. obr. 3) jsou složeny z ideálních pružin (Hookův člen) a ideálních tlumičů (Newtonův člen). Vztah mezi protažením (budící funkcí) a tahovou silou (odezvou) je možné vyjádřit pomocí soustav lineárních diferenciálních rovnic prvního řádu a pro jejich řešení využít Laplaceovu transformaci. Potom je možné vyjádřit přenos daného reologického modelu  $C(p)$  a řešit jeho odezvu na určitý průběh protažení  $F(p) = C(p).X(p)$  (viz. obr 4). Vzhledem k tomu, že na tkacím stroji je osnovní nit protahována periodicky, je důležitým řešením odezva reologického modelu na harmonické protažení. Dále můžeme vyjádřit frekvenční přenos  $C(j.\omega) = F(j.\omega)/X(j.\omega)$ . Tento přenos vyjadřuje závislost modulu tuhosti na frekvenci.



Obr. 3 Reologické modely: A – ideální pružina (Hookův člen), B – ideální tlumič (Newtonův člen), C – sériové spojení (Maxwellův model), D - paralelní spojení (Voiglův model), E – tříčlankový model (Eyring), F – čtyřčlankový model



Obr. 4 Blokové schéma dynamické soustavy (reologického modelu)

Pro výše uvedené reologické modely byla vyjádřena odezva na harmonické protahování (závislost tahové síly na čase) a frekvenční přenos.

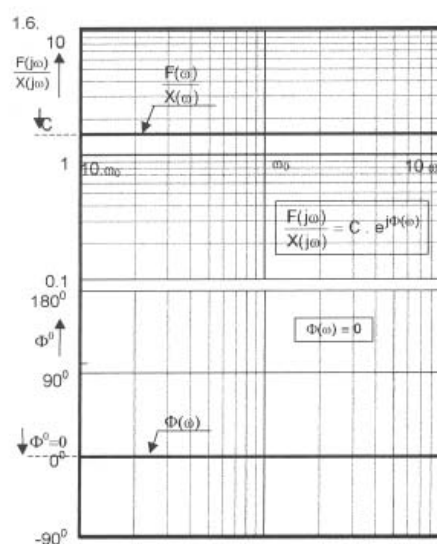
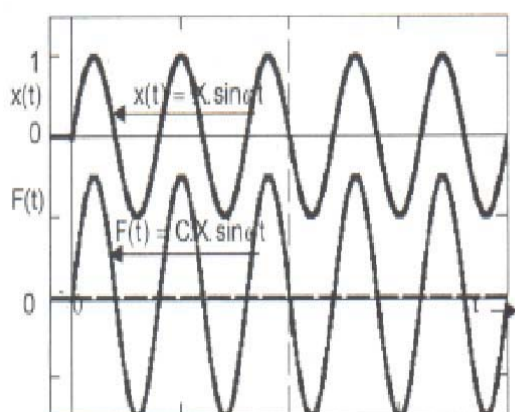
#### ad A: IDEÁLNÍ PRUŽINA (HOOKŮV ČLEN)

Odezva na harmonické protahování:

$$F(t) = C \cdot X \cdot \sin(\omega t)$$

Frekvenční přenos:

$$\frac{F(j\omega)}{X(j\omega)} = C = \left| \frac{F(j\omega)}{X(j\omega)} \right| e^{j\Phi(\omega)}, \left| \frac{F(j\omega)}{X(j\omega)} \right| \equiv \frac{F(\omega)}{X} = C, \Phi(\omega) = 0$$



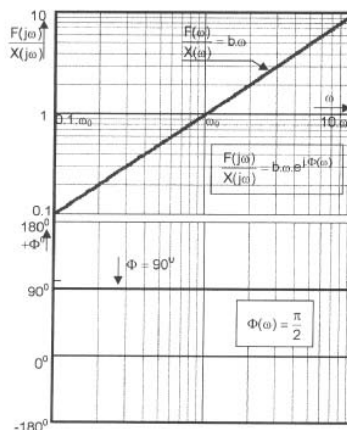
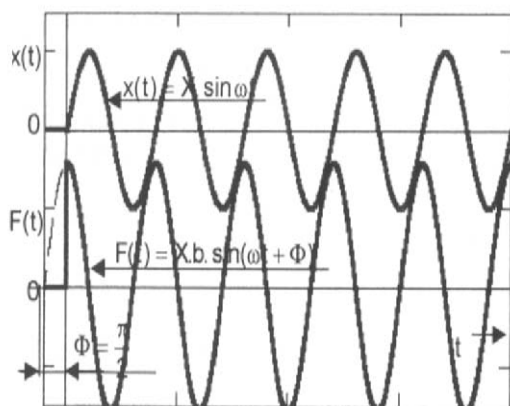
ad B: IDEÁLNÍ TLUMIČ (NEWTONŮV ČLEN)

Odezva na harmonické protahování:

$$F(t) = b \cdot X \cdot \omega \cdot \sin(\omega t + \Phi), \Phi = \pi / 2$$

Frekvenční přenos:

$$\frac{F(j\omega)}{X(j\omega)} = b \cdot j \cdot \omega = b \cdot \omega \cdot e^{j \frac{\pi}{2}} = \frac{F(\omega)}{X} \cdot e^{j \Phi(\omega)}, \frac{F(\omega)}{X} = b \cdot \omega, \Phi(\omega) = \pi / 2$$



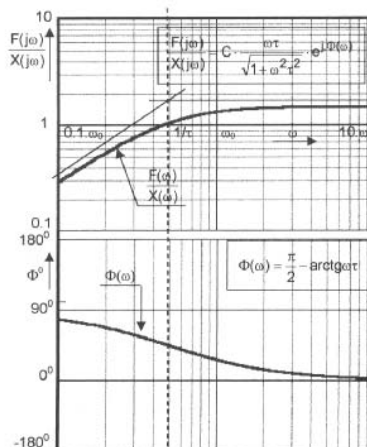
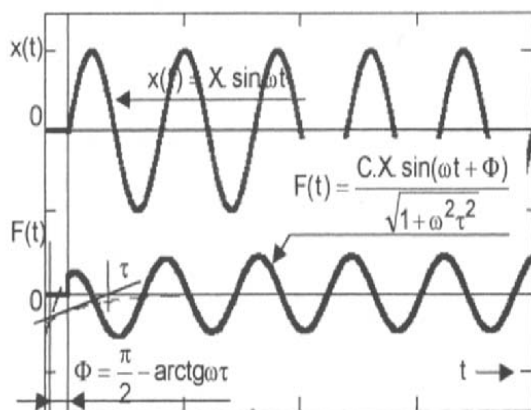
ad C: SÉRIOVÉ SPOJENÍ (MAXWELLŮV MODEL)

Odezva na harmonické protahování:

$$F(t) = C \cdot X \cdot \left[ -\frac{\omega \cdot \tau}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} \cdot e^{-t/\tau} + \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \cdot \tau^2}} \cdot \sin(\omega t + \Phi) \right], \tau = b / C, \Phi = \frac{\pi}{2} - \arctg(\omega \tau)$$

Frekvenční přenos:

$$\frac{F(j\omega)}{X(j\omega)} = C \cdot \frac{j \cdot \omega \cdot \tau}{1 + j \cdot \omega \cdot \tau} = C \cdot \frac{\omega \cdot \tau}{\sqrt{1 + \omega^2 \cdot \tau^2}} \cdot e^{j \left( \frac{\pi}{2} - \arctg \omega \tau \right)} = \frac{F(\omega)}{X} \cdot e^{j \Phi(\omega)}$$



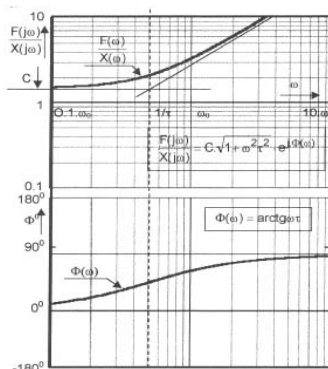
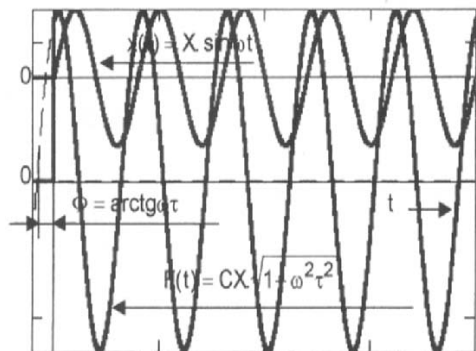
ad D: PARALELNÍ SPOJENÍ (VOIGLŮV MODEL)

Odezva na harmonické protahování:

$$F(t) = C \cdot X \cdot \sqrt{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} \sin(\omega t + \Phi), \tau = b / C, \Phi = \arctg(\omega \tau)$$

Frekvenční přenos:

$$\frac{F(j\omega)}{x(j\omega)} = C \cdot (1 + j\omega\tau) = C \cdot \sqrt{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} \cdot e^{j \cdot (\arctg \omega \tau)} = \frac{F(\omega)}{X} \cdot e^{j \cdot \Phi(\omega)}$$



ad E: TŘÍČLÁNKOVÝ MODEL (EYRING)

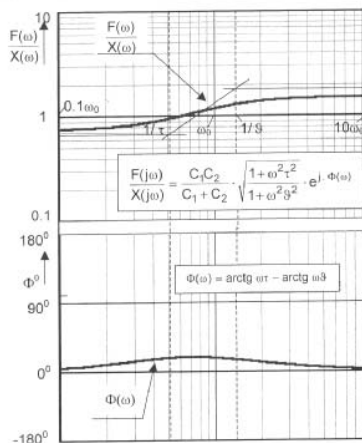
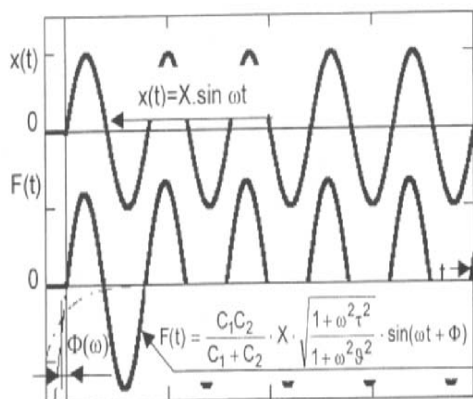
Odezva na harmonické protahování:

$$F(t) = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \cdot X \cdot \left[ \sqrt{\frac{1 + \omega^2 \cdot \tau^2}{1 + \omega^2 \cdot \vartheta^2}} \cdot \sin(\omega t + \Phi) - \frac{\omega \cdot (\tau - \vartheta)}{1 + \omega^2 \cdot \vartheta^2} \cdot e^{-t/\vartheta} \right],$$

$$\tau = \frac{b_1}{C_1}, \vartheta = \frac{b_1}{C_1 + C_2} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot \tau, \Phi(\omega) = \arctg \omega \tau - \arctg \omega \vartheta$$

Frekvenční přenos:

$$\frac{F(j\omega)}{x(j\omega)} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \cdot \frac{1 + j\omega\tau}{1 + j\omega\vartheta} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \cdot \sqrt{\frac{1 + \omega^2 \cdot \tau^2}{1 + \omega^2 \cdot \vartheta^2}} \cdot e^{j(\arctg \omega \tau - \arctg \omega \vartheta)} = \frac{F(\omega)}{X} \cdot e^{j \cdot \Phi(\omega)}$$



## ad F: ČTYŘČLÁNKOVÝ MODEL

Odezva na harmonické protahování:

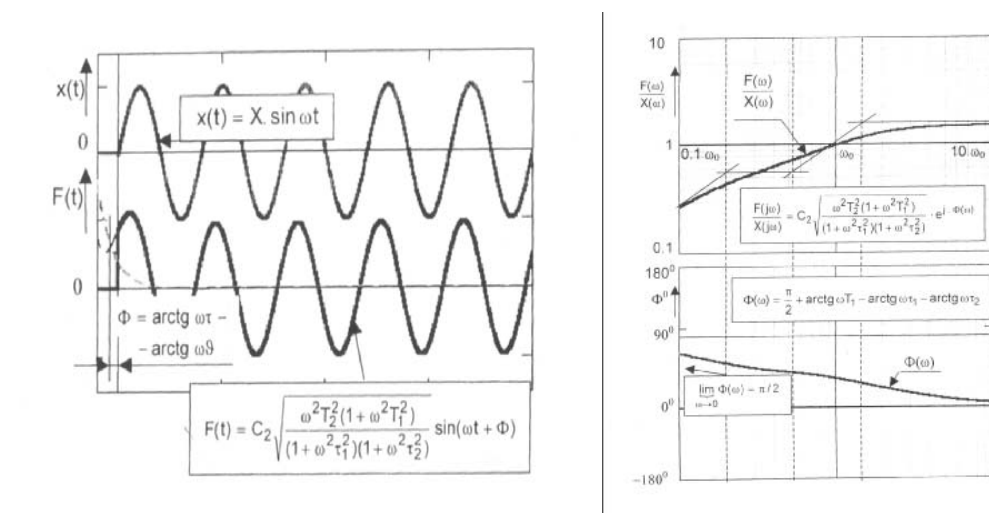
$$F(t) = C_2 \cdot X \cdot \omega^2 \cdot \left[ \frac{(\tau_1 - T_1)}{(\tau_2 - \tau_1)(1 + \omega^2 \tau_1^2)} \cdot e^{-t/\tau_1} + \frac{(\tau_2 - T_1)}{(\tau_2 - \tau_1)(1 + \omega^2 \tau_2^2)} \cdot e^{-t/\tau_2} \right] + \sqrt{\frac{1 + \omega^2 T_1^2}{(1 + \omega^2 \tau_1^2)(1 + \omega^2 \tau_2^2)}} \cdot \sin(\omega t + \Phi)$$

$$T_1 = \frac{b_1}{C_1}, T_2 = \frac{b_2}{C_2}, \tau_{1,2} = \frac{1}{2} \cdot \left[ T_1 + \frac{C_1 + C_2}{C_1} \cdot T_2 \pm \sqrt{\left( T_1 + \frac{C_1 + C_2}{C_1} \cdot T_2 \right)^2 - 4 \cdot T_1 \cdot T_2} \right]$$

$$\Phi(\omega) = \frac{\pi}{2} + \arctg \omega T_1 - \arctg \omega \tau_1 - \arctg \omega \tau_2$$

Frekvenční přenos:

$$\frac{F(j\omega)}{X(j\omega)} = C_2 \cdot \frac{j\omega T_2 (1 + j\omega T_1)}{(1 + j\omega \tau_1)(1 + j\omega \tau_2)} = C_2 \cdot \sqrt{\frac{\omega^2 T_2^2 (1 + \omega^2 T_1^2)}{(1 + \omega^2 \tau_1^2)(1 + \omega^2 \tau_2^2)}} \cdot e^{j\left(\frac{\pi}{2} + \arctg \omega T_1 - \arctg \omega \tau_1 - \arctg \omega \tau_2\right)} = \frac{F(\omega)}{X} \cdot e^{j\Phi(\omega)}$$

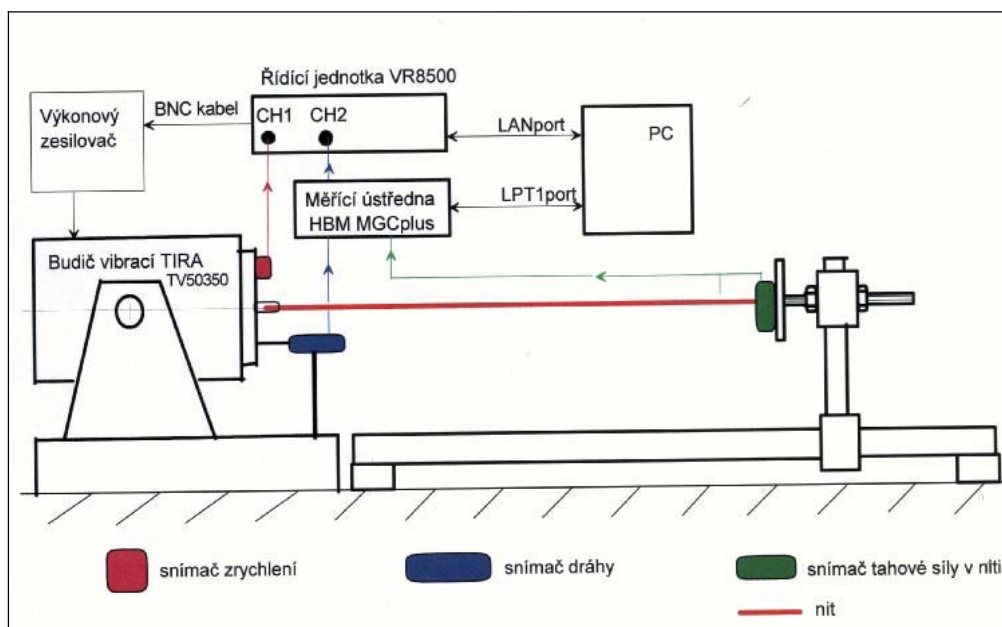


## 4. Experimentální část

Standardní zařízení pro stanovení mechanických vlastností textilních materiálů (dynamometry) neumožňují simulaci namáhání osnovních nití během tkacího procesu – nelze nastavit odpovídající upínací délku a časový průběh protažení. Proto bylo v Tkalcovské laboratoři TU-Liberec zkonstruováno speciální zařízení pro simulaci namáhání osnovních nití (viz. obr 5). Základ tohoto zařízení tvoří vibrační systém

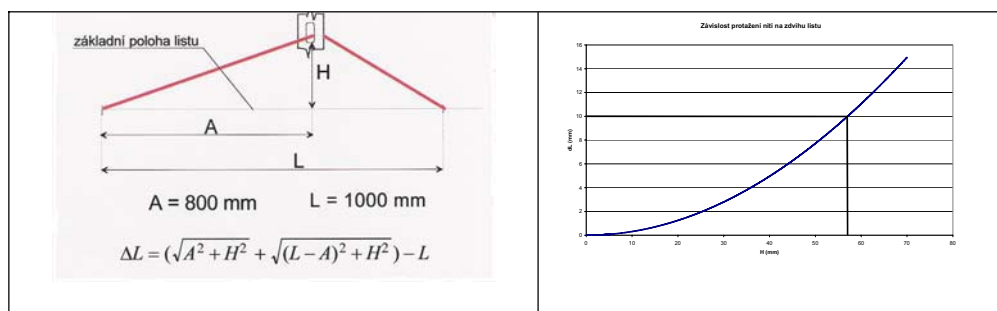
Popis zařízení: Nit je upevněna jedním koncem na budič vibrací a druhým koncem na pevný rám. Budič vibrací je řízen na základě požadovaného časového průběhu zrychlení. Proto je na budiči vibrací upevněn snímač zrychlení a signál z tohoto snímače je přiveden na první kanál řídicí jednotky. Tím je vytvořena zpětná vazba mezi budičem vibrací a řídicí

jednotkou. Řídící jednotka je připojena k počítači. Tento počítač je vybaven obslužným programem řídicí jednotky, který umožňuje zadat požadovaný časový průběh zrychlení. Dále je na budič vibrační připevněn indukční snímač dráhy. Signál z tohoto snímače je přiveden do měřicí ústředny a jeho časový průběh, který je možné zobrazit v obslužném programu měřicí ústředny, určuje časovou závislost protažení nitě (budící funkce). Tahová síla v niti (odezva) je měřena pomocí tenzometrického snímače tahové síly v niti. Signál z tohoto snímače je přiveden opět na měřicí ústřednu. Obslužný program měřicí ústředny tedy umožňuje zobrazit časovou závislost protažení niti (budící funkce) a tahové síly v niti (odezvy) a tyto hodnoty uložit do souborů.



Obr. 5 Schéma speciálního zařízení pro simulaci namáhání nití na tkacím stroji

Způsob realizace měření: Do zařízení byla upnuta nit (20 tex, 900Z, bavlna) o délce 2000 mm a v této niti bylo nastaveno předpětí 10 cN. Pomocí budiče vibrační byla nit protahována harmonicky s maximálním protažením 10 mm. Tato hodnota odpovídá maximálnímu protažení osnovních nití vlivem otevření prošlupu (viz. obr 6). Měření bylo provedeno pro tři různé frekvence protažení: 10 Hz, 20 Hz a 30 Hz. Popsaný experiment tedy odpovídá simulaci protažení osnovních nití vlivem otvírání prošlupu při těchto otáčkách hlavní hřídele tkacího stroje: 600 ot./min, 1200 ot./min a 1800 ot./min.



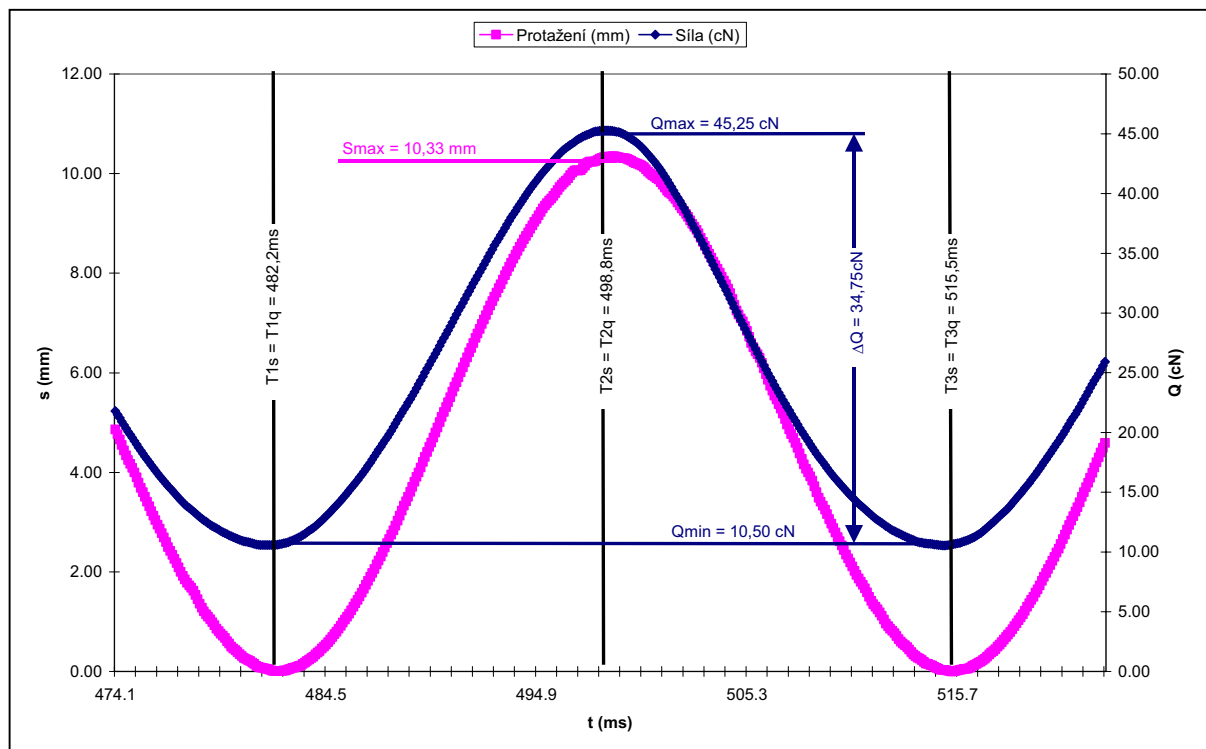
Obr. 6 Protažení osnovních nití při otevření prošlupu



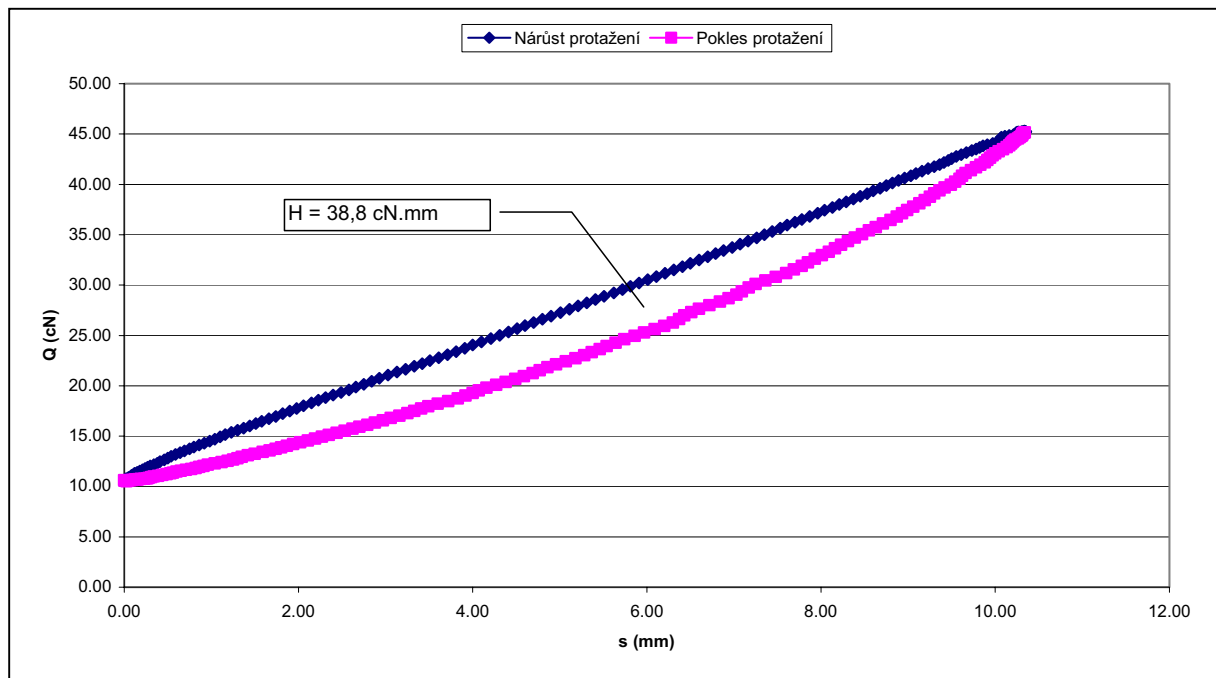
Na obrázku číslo 7 je ve společném souřadném systému znázorněn graf časové závislosti protažení nitě (budící funkce) a tahové síly v niti (odezvy) při protahování s frekvencí 30 Hz. Pomocí tohoto grafu lze určit fázové posunutí  $\Phi$  mezi budící funkcí a odezvou a určit modul tuhosti nitě jako poměr maximální změny tahové síly v niti  $\Delta Q$  a maximálního protažení  $s_{\max}$  :  $C = \Delta Q / s_{\max}$ . Na obrázku číslo 8 je graf který znázorňuje závislost tahové síly na protažení a to při nárůstu protažení i jeho poklesu. Pomocí tohoto grafu byla stanovena hysterese  $H = \int_0^{s_{\max}} F_N(s) ds - \int_0^{s_{\max}} F_P(s) ds$ , kde  $F_N(s)$  představuje sílu při nárůstu protažení,  $F_P(s)$  představuje sílu při poklesu protažení a symbol  $s$  představuje protažení nitě. Výše uvedené parametry byly stanoveny také pro frekvence protažení 20 Hz a 10 Hz a jejich hodnoty jsou uvedeny tabulce 1.

Tab. 1 Hodnoty modulu tuhosti  $C$  fázového posunutí  $\Phi$  a hysterese  $H$

frekvence (Hz)	$C$ (cN/mm)	$\Phi$ (rad)	$H$ (cN.mm)
10	3,04	0	34,7
20	3,37	0	38,7
30	3,36	0	38,8



Obr. 7 Časová závislost protažení a tahové síly při frekvenci 30 Hz. Z grafu je zřejmé, že fázové posunutí  $\Phi$  mezi budící funkcí (protažení) a odezvou (tahovou silou) má nulovou hodnotu.



Obr 8 Závislost tahové síly na protažení při frekvenci 30 Hz. Z grafu je zřejmé, že dochází k viskoelastické deformaci a závislost tahové síly na protažení je lineární (rovnice regresní přímky pro nárůst protažení:  $y_N = 3,31 \cdot s + 10,98$  a korelační koeficient  $R^2 = 0,9997$ , rovnice regresní přímky pro pokles protažení:  $y_P = 3,27 \cdot s + 8,16$  a korelační koeficient  $R^2 = 0,9779$ )

## 5. Závěr

Experimentálním měřením bylo zjištěno, že při otevírání prošlupu dochází k lineární viskoelastické deformaci daného materiálu (bavlněná nit, jemnost 20 tex, zákrut: 900 Z). Při všech výše uvedených tkacích frekvencích (tkací frekvence = frekvence protažení nití vlivem otevírání prošlupu) je fázové posunutí mezi protažením jako budící funkcí a tahovou silou jako odezvou nulové. Při změně tkací frekvence z 10 Hz na 20 Hz dojde ke zvýšení hodnoty modulu tuhosti  $C$  o 0,33 cN/mm, tj. o 9,79 % a hystereze o 4,0 cN.mm, tj. o 10,34 %. Při změně tkací frekvence z 20 Hz na 30 Hz prakticky ke změně těchto parametrů nedochází.

Pro teoretický popis deformačních vlastností dané osnovní nitě během otevírání prošlupu je možné zvolit reologický model (viz. kapitola 2) viskoelastického materiálu a to tak, aby tento model vykazoval pro výše uvedené frekvence nulové fázové posunutí mezi budící funkcí a odezvou. Mezi tyto modely patří například Voigtův a Eyringův model. U těchto modelů se v oblasti nižších frekvencí blíží fázové posunutí mezi budící funkcí a odezvou nule a zároveň v těchto oblastech může docházet k poměrně malým změnám hodnoty modulu tuhosti.

## 6. Poděkování

Tato práce vznikla s finanční podporou GAČR v rámci projektu s názvem „Harmonizace mechanických impedancí tkacího stroje a textilního obložení ke zvýšení výkonu a kvality výrobku“ (registrační číslo: 101/03/0990)

## 7. Literatura

Nosek S. (1988 – 89) Teorie tkaní I – III, Dům Techniky Pardubice

Tumajer, P., Cvrkal, A., Brotz, I. (2003) The mutual interaction between the weaving machine and the textile material, in: *Sborník konference Textile Science 2003*, p.p. 334-341

Bílek, M., Kovář, Š., Mrázek, J., Tumajer, P. (2004) Vibration system for simulation of stress upon the warp, in: *Sborník přednášek 6. mezinárodní konference TRANSFER 2004*, pp. 62-67

Grydil, V., Tumajer, P., Brotz, I. (2004) The methods of ascertaining the characteristic of the textile material by means of the vibration system, in: *Word Textile Conference: 4<sup>th</sup> AUTEX Conference*, publikováno na CD

Grydil, V., Tumajer, P., Brotz, I. (2004) Využití vibračního systému pro simulaci namáhání osnovy na tkacím stroji, in: *Sborník IX mezinárodní konference o teorii strojů a mechanismů*, pp. 315-320

Tumajer, P., Brotz, I., Cvrkal, A.: Experimentální měření na tkacím stroji, in: *Sborník 25. konference QUO VADIS TEXTRINUM*, pp. 107-119