

TEORETICKÝ ROZBOR VPLYVU TORZNÉHO KMITANIA NA NEROVNOMERNOSŤ DĹŽKY ŠTIEPKY

THEORETICAL ANALYSIS OF TORSIONAL VIBRATION ON WOODCHIP LEGNTH UNEVENESS

Peter Kaššay – Jaroslav Homišin – Robert Grega

ABSTRACT

The goal of this article is to examine the effect of woodchippers disc's torsional vibration on woodchip's length unevenness. The article contains a mathematical solution of this problem with proposal of one harmonic component of disc speed and uniform feed of chipped material. Presented solution is suitable to determine the length unevenness for known parameters of torsional vibration.

Key words: mathematical model, size distribution, torsional vibration, uneven chip length, woodchips.

ÚVOD

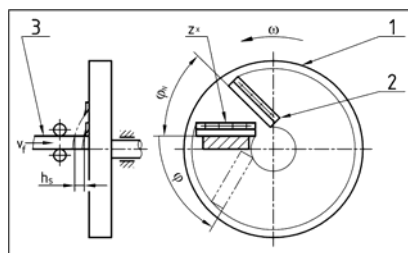
V súčasnosti rastie dopyt po využití obnoviteľných zdrojov energie ako je napríklad drevná štiepka. Jedným z dôležitých kvalitatívnych parametrov drevej štiepky je rozdelenie veľkosti štiepky. Z hľadiska využiteľnosti je dôležité dosiahnuť homogénne vlastnosti drevej štiepky, pretože rozdelenie rozmerov štiepky pôsobí napríklad na plnenie štiepky do kotlov (JENSEN *et al.* 2004), spaľovanie (PAULRUD, NILSSON 2004), skladovanie a sušenie štiepky (KRISTENSEN, KOFMAN 2000).

Nerovnomernosť môže vzniknúť, rozmerovými nepresnosťami v kotúčovej sekačke, nerovnomerným posuvom sekaného materiálu, ale na rovnomernosť dĺžky štiepky vplýva aj geometria rezného nástroja a vlastnosti sekaného materiálu (ABDALLAH *et al.* 2011).

Predpokladáme, že na nerovnomernosť dĺžky štiepky môže vplývať aj torzné kmitanie kotúča kotúčovej sekačky, hlavne pri nevhodnom dynamickom vyladení mechanickej sústavy kotúčovej sekačky. Cieľom tohto príspevku je matematicky vyjadriť vplyv torzného kmitania kotúča kotúčovej sekačky na nerovnomernosť dĺžky štiepky.

TORZNÉ KMITANIE KOTÚČA KOTÚČOVEJ SEKAČKY

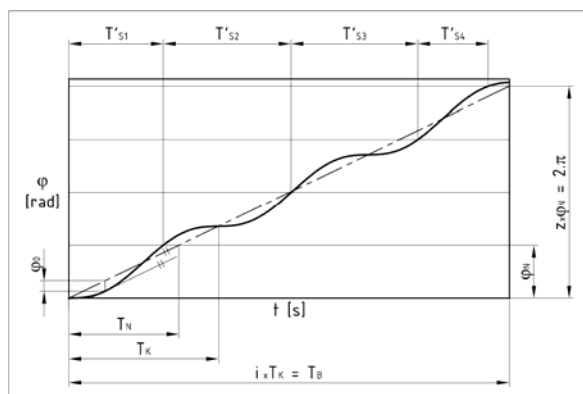
Torzné kmitanie kotúča sekacieho stroja je analyzované pre kotúčovú sekačku, princíp ktorej je znázornený na obr. 1.



Obr. 1 Schéma kotúčovej sekačky.
Fig. 1 Scheme of woodchipper.

Kotúč (1) sa otáča uhlovou rýchlosťou so strednou hodnotou ω . Nas čelnej ploche kotúča je rovnomerne rozložených z sekacích nožov (2). Všetky po sebe nasledujúce sekacie nože sú voči sebe otočené o rozstupový uhol sekacích nožov kotúčovej sekačky φ_N . Sekaný materiál konštantnej šírky (3) je posúvaný do záberu sekacích nožov rovnomernou rýchlosťou v_f , ktorej hodnota musí byť nastavená tak, aby k odseknutiu štiepky došlo ešte pred dotykom sekaného materiálu s čelom kotúča (ABDALLAH *et al.* 2011).

Dĺžka štiepky h_s potom bude závislá od otáčok kotúča, rýchlosti posuvu a počtu sekacích nožov kotúča. Okamžitý uhol pootočenia kotúča sa označí φ . Časový priebeh uhla pootočenia kotúča φ je znázornený na obr. 2. Kotúč rotuje strednou uhlovou rýchlosťou ω a súčasne vykonáva torzné kmitanie s harmonickým priebehom. Frekvencia torzného kmitania je i násobkom strednej uhlovej rýchlosti kotúča ω . Bude sa teda jednať o torzné kmitanie s jednou harmonickou zložkou rádu i .



Obr. 2 Časový priebeh okamžitého uhla pootočenia kotúča.
Fig. 2 Disc angle-time graph.

Uhol pootočenia kotúča sa potom na základe obr. 2 môže vyjadriť rovnicou:

$$\varphi = \omega \cdot t - \varphi_0 \cdot \sin(i \cdot \omega \cdot t - \gamma) \quad (1)$$

kde:

- t – čas [s],
- φ_0 – amplitúda uhla pootočenia kotúča [rad],
- i – rád harmonickej zložky frekvencie torzného kmitania [-],
- γ – fáza harmonickej zložky torzného kmitania.

Okamžitá uhlová rýchlosť kotúča sa vypočíta deriváciou rovnice uhla pootočenia (1) podľa času t :

$$\dot{\varphi} = \omega - \varphi_0 \cdot i \cdot \omega \cdot \cos(i \cdot \omega \cdot t - \gamma) \quad (2)$$

Z hľadiska veľkosti amplitúdy uhla pootočenia kotúča φ_0 sa bude považovať za krajný prípad, keď v určitom čase dôjde k zastaveniu kotúča. Tento prípad nastane v čase $t = 0$ a fáze $\gamma = 0$ pri medznej amplitúde torzného kmitania kotúča $\varphi_0 = \Phi_0$:

$$0 = \omega - \Phi_0 \cdot i \cdot \omega \quad (3)$$

$$\Phi_0 = \frac{1}{i} \quad (4)$$

Pri väčšej amplitúde uhla pootočenia kotúča by okamžitá uhlová rýchlosť kotúča dosahovala aj zápornú hodnotu a sekacie nože kotúčovej sekačky by teoreticky museli zaberat' aj v opačnom smere rotácie kotúča.

Veľkosť amplitúdy uhla pootočenia kotúča sa vyjadří pomocou pomeru amplitúdy φ_0 ku medznej amplitúde Φ_0 ako:

$$\varphi_0 = \frac{k}{i}; k \in \langle 0; 1 \rangle \quad (5)$$

$$k = \frac{\varphi_0}{\Phi_0} \quad (6)$$

kde k je pomerná veľkosť torzného kmitania [-].

URČENIE DĹŽKY ŠTIEPKY

Čas medzi začiatkom záberu dvoch po sebe nasledujúcich sekacií nožov T_S odpovedá pootočeniu kotúča o uhol φ_N (obr. 2). Keďže uhlová rýchlosť kotúča nie je konštantná, tak čas T_S tiež nebude konštantný. Tento čas sa bude nazývať nominálnym časom medzi začiatkom záberu dvoch po sebe nasledujúcich sekacií nožov T_N .

Dĺžka štiepky sa môže na základe týchto časov vyjadriť rovnicami:

$$h_S = T_S \cdot v_f \quad (7)$$

$$h_N = T_N \cdot v_f \quad (8)$$

kde:

- h_S – je dĺžka štiepky [mm],
- h_N – nominálna dĺžka štiepky [mm],
- v_f – rýchlosť posuvu [m.s⁻¹].

Z toho vyplýva, že dĺžka štiepky je priamo úmerná s časmi medzi začiatkom záberu sekacií nožov a konštantnej rýchlosti posuvu. Na základe tejto skutočnosti pre vyjadrenie dĺžky štiepky stačí uvažovať iba s časmi medzi začiatkom záberu sekacií nožov.

Na obr. 2 časy $\{T'_{S1}; \dots; T'_{S4}\}$ potom predstavujú dĺžku jednotlivých štiepok. Je zrejmé, že tieto dĺžky nie sú rovnaké, čiže sa môže konštatovať, že torzné kmitanie kotúča spôsobuje nerovnomernosť dĺžky štiepky.

VÝPOČET NEROVNOMERNOSTI DĹŽKY ŠTIEPKY

Nerovnomernosť dĺžky štiepky sa vyjadří pomocou pomeru dĺžky štiepky (7) k nominálnej dĺžke štiepky (8) a nazve sa pomernou dĺžkou štiepky ν :

$$\nu = \frac{T_S}{T_N} \quad (9)$$

Ďalej sa zavedie parameter η , ktorý bude vyjadrovať pomer medzi frekvenciou torzného kmitania a záberovou frekvenciou kotúča. Parameter η sa preto bude nazývať frekvenčným pomerom:

$$\eta = \frac{i}{z} \quad (10)$$

Pre krajné hodnoty pomernej dĺžky štiepky by sa vychádzajúc z *obr. 2* dalo odvodiť:

$$v_{1,2} = 1 + \delta_0 \cdot \xi_{1,2} \quad (11)$$

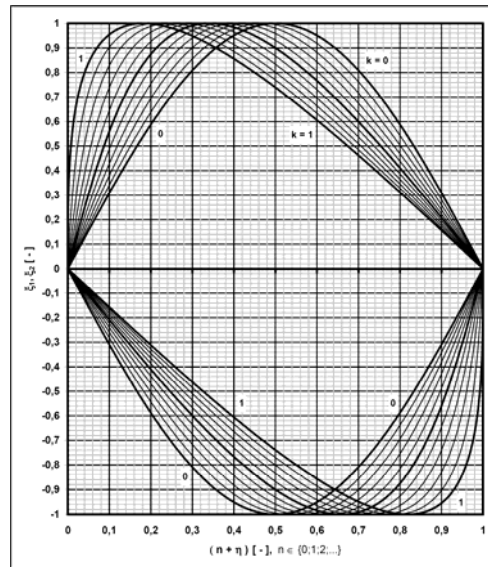
kde:

- δ_0 – je obálka krajnej pomernej odchýlky dĺžky štiepky [-],
- $\xi_{1,2}$ – krajné pomerné obáľkové odchýlky dĺžky štiepky [-].

Pre obálku krajnej pomernej odchýlky dĺžky štiepky platí:

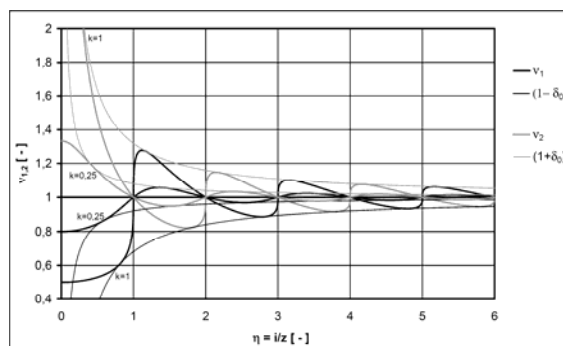
$$\delta_0 = \frac{k}{\pi \cdot \eta} \quad (12)$$

Funkcie $\xi_{1,2}$ budú periodické funkcie s periódou rovnou 2 a priebeh ich polperiódy je znázornený na *obr. 3*.



Obr. 3 Krajné pomerné obáľkové odchýlky dĺžky štiepky.
Fig. 3 Limit values of envelope proportional chip length.

Na *obr.4* je pre ilustráciu znázornená závislosť krajných pomerných dĺžok štiepky $v_{1,2}$ na frekvenčnom pomere η pre maximálnu hodnotu pomernej amplitúdy $k = 1$ a pre hodnotu $k = 0,25$.



Obr. 4 Priebeh krajnej pomernej dĺžky štiepky v závislosti na frekvenčnom pomere.
Fig. 4 Limit values of proportional chip length – frequency ratio graph.

DISKUSIA

Z uvedenej závislosti podľa obr. 4 sa môže konštatovať vplyv nasledovných parametrov torzného kmitania na nerovnomernosť dĺžky štiepky:

1) Frekvenčný pomer η

Ak pomer rádu harmonickej zložky i a počtu sekacích nožov kotúča z je celé číslo, tak nerovnomernosť dĺžky štiepky vzniknúť nemôže.

Je vhodné zabezpečiť, aby pomer frekvencií harmonických zložiek budenia od sústavy pohonu a počtu sekacích nožov bol celé číslo. To je možné zabezpečiť, ak sa použijú prevody s tvarovou väzbou (ozubené prevody, ozubený remeň). Pri použití klinových remeňov nie je kvôli sklzu možné túto podmienku splniť.

Na hodnota frekvenčného pomeru vplývajú nasledujúcich parametre:

1. a. Frekvencia torzného kmitania vybudeneho od kotúča kotúčovej sekačky

Frekvencie harmonických zložiek torzného kmitania vybudeneho kotúčom budú celočíselným násobkom počtu sekacích nožov (WILSON 1967). To znamená, že nerovnomernosť dĺžky štiepky vplyvom budenia torzného kmitania od záberovej frekvencie kotúča teoreticky vzniknúť nemôže.

1. b. Frekvencia torzného kmitania vybudená od sústavy pohonu kotúča

Patria sem frekvencie harmonických zložiek vybudene motorom (jedná sa hlavne piestové spaľovacie motory), prípadne kolísaním prevodového pomeru (napr. vplyvom Kardanovho kľbu, nesúosovosti hriadeľov, ...).

Pre tieto vplyvy je vhodné aby priebeh hnacieho momentu motora bol konštantný (použitie elektromotora), prípadne aby rád hlavnej harmonickej zložky hnacieho momentu motora bol čo najvyšší (voliť piestový motor s väčším počtom valcov).

1. c. Frekvencia samobudeného kmitania

Frekvencia samobudeného kmitania je blízka vlastnej frekvencii sústavy (BREPTA *et al.* 1996).

Z tohto hľadiska je výhodné aby bola frekvencia samobudeného torzného kmitania (vlastná frekvencia) čo najvyššia. V tomto prípade je nutné vyhnúť sa celočíselnému pomeru vlastnej frekvencie a zubovej frekvenciu, aby v sústave nedošlo k rezonancii (WILSON 1967).

1. d. Počet sekacích nožov kotúča

Odchýlky dĺžky štiepky sú najväčšie pre nízke hodnoty frekvenčného pomeru, čiže pri nízkej frekvencii torzného kmitania a veľkom počte sekacích nožov kotúča. Preto je vhodné voliť, čo najmenší počet sekacích nožov.

2) Veľkosť amplitúdy torzného kmitania

Odchýlky dĺžky štiepky stúpajú v závislosti na stúpajúcej amplitúde torzného kmitania.

Preto je potrebné aby amplitúda torzného kmitania kotúča kotúčovej sekačky bola čo najnižšia. Najvyššie hodnoty amplitúdy nastávajú ak sústava pracuje v rezonancii (HOMIŠIN 2002). Rezonancii nastáva v prípade ak niektorá z harmonických zložiek budenia je rovná vlastnej frekvencii sústavy. Preto je potrebné hodnotu vlastnej frekvencie sústavy vyladiť tak, aby tento prípad nenastal. Toto sa dá dosiahnuť úpravou dynamických vlastností sústavy (tuhostných, zotrvačných a tlmiacich).

Najjednoduchším spôsobom na vyladenie sústavy z hľadiska veľkosti torzného kmitania je výber pružnej hriadeľovej spojky s vhodnou dynamickou torznou tuhosťou (HOMIŠIN 2002, KAŠŠAY 2008). Veľkosť torzného kmitania kotúča je tiež možné znížiť napríklad použitím kotúča kotúčovej sekačky s čo najväčším hmotným momentom zotrvačnosti, prípadne pridaním vhodného zotrvačnika do sústavy.

ZÁVER

Metóda uvedená v príspevku je vhodná na určenie veľkosti nerovnomernosti dĺžky štiepky spôsobenú vplyvom torzného kmitania kotúča kotúčovej sekačky. Pre využitie tejto metódy je potrebné urobiť najprv dynamickú analýzu pohonu kotúčovej sekačky na získanie potrebných vstupných hodnôt.

V budúcnosti bude potrebné na základe dynamickej analýzy pracovného režimu v súčasnosti vyrábaných kotúčových sekačiek, preskúmať reálne dosiahnuteľný rozsah zníženia nerovnomernosti dĺžky štiepky spôsobenej torzným kmitaním.

LITERATÚRA

- ABDALLAH, R., AUCHET, S., MÉAUSOONE P. J. 2011. Experimental study about the effects of disc chipper settings on the distribution of wood chip size. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35(2): 843–852.
- BREPTA, R., PŮST, L., TUREK, F. 1996. *Mechanické kmitání*. Praha: Sobotáles, 1994. 592 s. ISBN: 80-901684-8-5.
- HOMIŠIN, J. 2002. *Nové typy pružných hriadeľových spojok, vývoj – výskum – aplikácia*. Košice: Viena, 2002. 124 s. ISBN 80-7099-834-2.
- JENSEN, P. D., MATTSSON, J. E., KOFMAN, P. D., KLAUSNER, A. 2004. Tendency of wood fuels from whole trees, logging residues and roundwood to bridge over openings. *Biomass and Bioenergy*, 2004, 26(2): 107–113.
- KAŠŠAY, P. 2008. *Optimalizácia torzne kmitajúcich mechanických sústav metódou extrémálnej regulácie*. Doktorandská dizertačná práca. Košice, 2008.
- KRISTENSEN, E. F., KOFMAN, P. D. 2000. Pressure resistance to air flow during ventilation of different types of wood fuel chip. *Biomass and Bioenergy*, 2000, 18(3): 175–180.
- PAULRUD, S., NILSSON, C. 2004. The effects of particle characteristics on emissions from burning wood fuel powder. *Fuel*, 2004; 83(7–8): 813–821.
- WILSON, W.K. 1967. *Practical solution of torsional vibration problems, volume 1*, London: Chapman & Hall ltd. 1967, 705 s.

Pod'akovanie (Acknowledgement)

Príspevok vznikol pri riešení grantového projektu VEGA 1/0304/09 – Ovládnutie nebezpečných vibrácií pohonu mechanických sústav.

Adresa autorov

Ing. Peter Kaššay, PhD.
prof. Ing. Jaroslav Homišin, CSc.
doc. Ing. Robert Grega, PhD.
Technická univerzita v Košiciach
Strojnícka fakulta
Katedra konštruovania dopravy a logistiky
Oddelenie konštruovania a častí strojov
Letná 9
042 00 Košice, Slovakia
e-mail: Peter.Kassay@tuke.sk
Jaroslav.Homisin@tuke.sk
Robert.Grega@tuke.sk