

A **F** **T**
ACTA
FACULTATIS
TECHNICAE



TECHNICKÁ UNIVERZITA VO ZVOLENE

2

ROČNÍK: XV

ZVOLEN 2010

OBSAH

VEDECKÉ ČLÁNKY

GRANULOMETRICKÁ ANALÝZA VYBRANÝCH SYPKÝCH SUROVIN GRANULOMETRIC ANALYSE OF THE SELECTED LOOSE RAW MATERIALS	7
Petr Vaculík, Jan Malaťák, Josef Maloun, Marian Kučera	
MOŽNOSTI VYUŽITIA SKELETIZÁCIE PRI POROVNÁVANÍ OBRAZOV ODTLAČKOV PRSTOV POSSIBILITIES OF THINNING ALGORITHM APPLICATION IN FINGERPRINT IMAGES RECOGNITION	17
Pavol Koleda, Elena Pivarčiová	
MODELOVANIE ODPOROV PROTI POHYBU ROVINNÉHO MECHANIZMU MODELING OF PASSIVE RESISTANCES OF PLANAR MECHANISM.....	25
Peter Koleda, Ľubomír Naščák	
KOMPLEXNÝ NÁVRH ROBOTIZOVANÉHO ZVÁRACIEHO VÝROBNÉHO SYSTÉMU THE INTEGRATED PROPOSAL OF WELDING MANUFACTURING SYSTEM	35
Erika Sujová, Ľubomír Mesároš	
ZAPLNENIE LOŽISKOVEJ MEDZERY MAZACÍM OLEJOM FÜHLUNG VON LAGERSPALTE MIT DEM SCHMIERÖL	45
Mária Sedničková, Ján Sekereš	
VYUŽITIE INERCIÁLNYCH MEMS SENZOROV V ADAPTÍVNOM RIADENÍ KROKOVÝCH MOTOROV EXPLOATION OF INERTIAL MEMS SENSORS IN THE CONTROL OF STEPPINGS MOTORS.....	53
Marcel Bariak, Jozef Šuriansky	
VYUŽITÍ PRINCIPU MINIMAXU PŘI OPTIMALIZACI KONSTRUKCE A PROVOZU VÝROBNÍCH SYSTÉMŮ PŘI ROZPOJOVÁNÍ DŘEVA EXPLOITATION OF MINIMAX PRINCIPLE IN OPTIMIZING CONSTRUCTION AND PRODUCTION SYSTEMS IN SEPARATING WOOD	63
Adolf Janeček, Milan Mikleš	
K TEORETICKÝM ZÁKLADOM METÓDY OBRÁBANIA DREVA ELEKTRICKÝMI PRIERAZMI ON THEORETICAL FUNDAMENTALS OF WOODWORKING BY ELECTRIC BREAKDOWN METHOD	75
Ivan Makovíny	
OPOTREBOVANIE CHRBTÁ KOTÚČOVÉHO NOŽA PRI SÚSTRUŽENÍ DREVA ROTARY TOOL BACK WEARING IN GREENWOOD TURNING	83
Ľubomír Javorek, Jozef Hric	

URČOVANIE POSUVNEJ RÝCHLOSTI PÍLY PRI SKRACOVANÍ DREVA ŤAŽBOVÝM STROJOM	
DETERMINATION OF THE RATE OF SAW FEED DURING LOG CROSS-CUTTING BY A HARVESTER.....	91
Milan Mikleš	

MINIMALIZÁCIA SPOTREBY ENERGIE VÝROBNÝCH SYSTÉMOV V LESOPESTOVNEJ ČINNOSTI	
MINIMIZING OF ENERGY CONSUMPTION OF MANUFACTURING SYSTEMS IN FOREST PLANTING	99
Adolf Janeček, Ján Marko	

REFERÁT

VYVAŽOVANIE MONTÁŽNYCH LINIEK	
EINTAKTUNG DER MONTAGELINIEN	109
Vladimír Štollmann	

VEDECKÉ ČLÁNKY

GRANULOMETRICKÁ ANALÝZA VYBRANÝCH SYPKÝCH SUROVIN

GRANULOMETRIC ANALYSE OF THE SELECTED LOOSE RAW MATERIALS

Petr VACULÍK – Jan MALAŤÁK – Josef MALOUN – Marian KUČERA

ABSTRACT: This article deals with area of granulometric analyse constitution of the selected loose raw materials and related problems with check of feature of these materials. The grain size analysis as a simple and reliable method have been used and described in this article.

During experiments have been analysed five samples of the loose materials and its mechanic and physical properties. The samples have been tested from standpoint of fractional structure and poly-dispersion. After fulfilment of vibrating screen analysis of particular samples have been gained dates graphically processed namely by means of software named „The method of determination of dispersion and gentleness of crushed hard components of loose mixtures“. Rightness of developed software programme for determination dispersion of dry loose materials has been tested by means of reciprocal comparison of the values.

From measured values follows on that the time needed for screening of the assessed values depends on material and its sizes of sieve and it was not possible to determine the time for it. For tested materials is valid generally the Gaussian distribution with reserves incurred cumulation of elements of definite sizes, wrong sampling or insufficient adjustment of sample before own experiment. The RRSB linearization of frequency distribution of elements of definite sizes and its graphic formulation and following subtraction of medium-size particle was found in good accordance with calculated values.

Key words: loose raw materials, granulometric analyse, dispersion, Gaussian distribution

ABSTRAKT: Předkládaný článek se zabývá oblastí granulometrického složení vybraných sypkých surovin a souvisejícími problémy s kontrolou vlastností těchto látek. V článku je popsána a aplikovaná síťová analýza, jednoduchá, ale spolehlivá metoda pro určování granulometrického složení směsi.

V samotném článku bylo analyzováno šest vzorků sypkých látek s různými mechanicko-fyzikálními vlastnostmi. Vzorky byly testovány z hlediska frakčního složení a polydisperzity. Po provedení síťových analýz jednotlivých vzorků byla získaná data zpracována graficky a to pomocí softwaru nazvaného „Metoda určování disperzity a jemnosti drcených tvrdých složek sypkých směsí“. Validita vyvinutého softwarového programu pro určení disperzity suchých sypkých látek byla ověřena vzájemným porovnáním hodnot.

Z naměřených hodnot vyplynulo, že doba potřebná k prosetí je závislá na materiálu a velikosti sít a nelze ji nijak jednotně stanovit. Pro testované látky obecně platí Gaussovo rozdělení s výjimkami, způsobenými kumulací částic určité velikosti, špatným vzorkováním nebo nedostatečnou

přípravou vzorku před vlastním experimentem. Linearizace RRSB rozdělení četnosti částic určité velikosti, její grafické vyjádření a následné odečtení hodnoty střední velikosti částice je v dobré shodě s vypočítanými hodnotami.

Klíčová slova: sypké suroviny, granulometrická analýza, disperzita, Gaussovo rozdělení

1 ÚVOD

Znalost homogenity sypkých surovin má klíčový význam jak pro aplikaci, tak pro kontrolu obsahu specificky účinných látek. Volbou vhodné metody zkoumání homogenity sypkých látek lze např. testovat míchací zařízení. Podrobným měřením lze získat časové křivky pro mísení jednotlivých komponent a tím dosáhnout požadovaných časových úspor, které umožní výrobcům snížit provozní náklady, maximálně využít stroje a zařízení, tj. odpovídajícím způsobem zefektivnit produkci. Znalost homogenity může být tedy chápána i jako zpětná vazba na výrobce strojů a zařízení.

Znalost homogenity sypkých látek jako takových je nezbytná i ve zcela odlišných oblastech, jako je stavebnictví a farmaceutický průmysl, avšak základní metody zkoumání stupně promísení, zpracování výsledků a jejich interpretace jsou principiálně shodné.

Homogenita sypké suroviny (vhodné k výrobě např. sypké krmné směsi) může také posloužit v systému kontroly jakosti. Aby byly výsledky průkazné a jednoznačné, je nutné stanovit správný postup při vzorkování, měření a statistickém hodnocení.

Struktura směsi je charakterizována velikostí a tvarem jednotlivých částic:

- Práškovitá struktura vzniká mletím nebo sprejovým sušením. Částice jsou menší než 0,05 mm.
- Šrotky vznikají mletím nebo šrotováním zrnin, vločky vznikají mačkáním mezi válci. Částice hrubého šrotu mají velikost 1,8 až 2,6 mm, středního šrotu 1,0 až 1,8 mm a jemného šrotu 0,2 až 1,0 mm.
- Drť vzniká drcením lisovaných surovin.

Tvarované směsi vznikají lisováním obvykle do tvaru válečku, granule, pelety a to do průměru 16 mm, naopak brikety mají průměr nad 16 mm (Maloun 2001, Příkryl 1997 a Woodman 1994).

Sypká směs, složená ze dvou nebo více sypkých složek, je soustavou, která má zcela jiné vlastnosti než směsi kapalné nebo plynné. Vyplyvá to především z odlišné definice složky směsi. Klasickou termodynamickou definicí, podle níž je za složku směsi považován soubor částic shodného chemického složení, nelze použít v teorii sypké fáze, neboť zde elementární částicí není chemická částice, ale zrno, které může být konglomerátem několika chemických individuí.

Složka sypké směsi je soubor zrn, která se při dynamických operacích stejně chovají. Mezi vlastnostmi, jež určují chování zrna v dynamických operacích patří jeho rozměry, tvarový součinitel a vlastní hmotnost.

Rozdílnost vlastností jednotlivých složek, jako je distribuce velikosti částic, hustota, tvar a charakter povrchu, může být příčinou velmi obtížné mísitelnosti jednotlivých složek sypké směsi (Maloun 2000).

Všeobecně lze metody měření granulometrického složení dělit na přímé a nepřímé, tj. tedy na metody měření velikosti částic a měření velikostí měrného povrchu.

Při volbě měřicí metody, byla vzata v úvahu následující hlediska:

- Přesnost metody s ohledem na požadavky.
- Cena a dostupnost experimentálního zařízení.
- Časové a ekonomické otázky prováděného měření.
- Vhodnost metody s ohledem na vlastnosti měřeného materiálu.

Z nepřímých metod lze uvést např. sedimentační a konduktometrické metody. Jejich nevýhodou je zejména náročnost vybavení pracoviště, zkušenost pracovníka a v neposlední řadě dosahovaná přesnost a reprodukovatelnost výsledků. V případě organických materiálů mají sedimentační metody navíc nevýhodu v tom, že bude obtížné hledat kapalinu, v níž by tyto neměnily rozměry a hustotu.

Z hlediska přesnosti mají nesporné přednosti metody přímé, mikroskopování a síťování. Mikroskopování se považuje za jednu ze základních metod zkoumání disperzity částic menších 50 μm . V současné době mikroskopování provází rozmach, v důsledku rozšíření elektronkových mikroskopů vybavených vyhodnocovacím zařízením a softwarem.

Principiálně vychází metoda ze sledování a vyhodnocování buď suchého nebo ve vhodné kapalině dispergovaného vzorku. Zde se předpokládá, že jednotlivé částice zaujmou polohu maximální stability, a že tedy sledovaný průmět částice je reprezentativní pro určení její celkové velikosti. Pro stanovení třetího rozměru částice, její výšky, se užívá různých systémů šikmého osvětlení vzorků, stínování atd. Mikroskopování vyžaduje nákladnější vybavení pracoviště, avšak lze je provádět na přístrojích užívaných i k dalším účelům. Nevýhodou mikroskopování je i časová náročnost.

Prosévání představuje pravděpodobně vůbec nejužívanější metodu disperzního rozboru, která je nejméně náročná jak z hlediska přístrojového vybavení, tak vlastního provedení. Měření samo je však ovlivněno celou řadou faktorů, k nimž především patří:

- Rozdělení částic (frakční složení).
- Fyzikální vlastnosti částic (vlhkost, měrná hmotnost, povrchová drsnost, tvar atd.).
- Způsob prosévání.

Z výše uvedených faktů vyplývá, že pro zaručení reprodukovatelnosti a komparativnosti výsledků, je třeba tuto standardizovat. Z toho důvodu jsou podmínky síťování shrnuty v normách.

Mají-li být výsledky získané síťovou analýzou dostatečně přesné a reprodukovatelné, je třeba věnovat pozornost následujícím faktorům:

- Odběru reprezentativního vzorku z rozmělněného materiálu. Tento vzorek obvykle bývá větší, než jaký vyžaduje síťování.
- Stanovení optimálního počtu sít s ohledem na požadovanou přesnost a spotřebu času pro síťové analýzy.

Stanovení optimální frekvence otáčení síťového analyzátoru a jí odpovídající dostatečně dlouhé doby prosévání na sítěch různých velikostí k tomu, aby veškerý jemný produkt propadl nejjemnějším sítím dané sady (Maloun 2001, Přikryl 1997 a Woodman 1994).

2 VÝCHOZÍ PODMÍNKY

Sítová analýza je klasická metoda, při které je vzorek sypké polydisperzní látky proséván sadou sít s vhodně odstupňovanými otvory. Reprodukovatelnost výsledků síťové

analýzy závisí na řadě faktorů, zejména na kvalitě prosévacích sít a vlastního prosévacího zařízení, které určuje způsob pohybu částic po sítě.

Sítím, projdou teoreticky pouze ty částice, jejichž příčný rozměr je menší než rozměr otvoru síta. Četné experimenty potvrzují, že částice, které svým maximálním rozměrem dosahují 0,75 rozměru otvoru, procházejí sítím lehce. Částice, jejichž rozměr se blíží rozměru otvoru, nebo jejichž některý rozměr (u nekulových částic) je větší, procházejí velmi těžko otvory síta a často je i ucpávají.

Na prosévacím povrchu se částice nacházejí většinou v několika vrstvách nad sebou. Je tedy nezbytné, aby částice rozměru menších než je rozměr ok síta, měly příležitost náhodným pohybem dostat se do kontaktu s prosévacím povrchem, zaujmout vhodnou polohu a propadnout otvory.

Pak je ovšem zřejmé, že je třeba jisté doby, aby tyto děje mohly proběhnout a že rychlost prosévání je závislá na náhodných dějích a na vztahu mezi průměrem částice a velikostí hrany oka (Maloun 2000 a Anděl 1992).

Prosetím vzorku sypké látky soustavou n sít s rozměry otvorů x_1, x_2, \dots, x_n se původní vzorek rozdělí na $n + 1$ frakcí. Na jednotlivých sítích zůstanou hmotnostní zbytky $m_1, m_2, \dots, m_n, m_{n+1}$.

Celková hmotnost m_c

$$m_c = \sum_{i=1}^{n+1} m_i, \quad (\text{kg}) \quad /1/$$

Označí-li se soubor částic tvořících hmotnostní zbytek m_n , ležící na sítě s rozměrem x_n např. „A“. Částice tohoto souboru budou patřit do velikostního rozmezí určeného rozměry ok sít x_{n-1} a x_n tak, že

$$x_{n-1} > \text{„A“} \geq x_n, \quad (\text{mm}) \quad /2/$$

protože částice shodného rozměru s rozměrem oka sítím neprojde.

Relativní zbytek na i -tém sítě bude:

$$R_i = \frac{m_i}{m_c} \quad (\%) \quad i = 1, 2, \dots, n, n+1, (\%) \quad /3/$$

Na zjištěné hodnoty můžeme pohlížet jako na zbytky na sítích R nebo propady síty D . Přitom platí:

$$R + D = 100 \%. \quad /4/$$

Hodnoty kumulativního relativního zbytku, které lze využít k sestrojení distribuční funkce:

$$R(x_i) = \frac{1}{m_c} \sum_{i=1}^{n+1} m_i, \quad (\%) \quad /5/$$

Získané hodnoty úhrnných zbytků (propadů) jsou pak vynášeny do zvoleného souřadného systému na odpovídající velikosti ok sít x_i . Provedeme-li sčítání relativních zbytků od zbytku R_{n+1} získáme hodnoty pro sestrojení křivky úhrnného propadu D .

Sčítáme-li relativní zbytky na sítích od síta s největším rozměrem ok, získáme hodnoty pro sestavení distribuční funkce úhrnného zbytku R. Obě takto zkonstruované křivky jsou symetrické a protínají se v bodě $R = D = 50\%$.

Odběr reprezentativního vzorku z rozmělněného materiálu je záležitostí metodiky příslušných experimentů. Všeobecně je platná zásada, že jednotlivé oblasti z nichž jsou odebírány dílčí vzorky, mají reprezentovat stejný podíl z veškerého materiálu.

Za optimální velikost vzorku se považuje 100 g. Tato hodnota je doporučena i standardem ASAE S 319 (USA), proti dříve doporučované normě 250 g. Hodnotu 100 g je doporučeno zvýšit až na 150 g při prosévání jemných částic. Při malém vzorku je vysoká pravděpodobnost velkých relativních chyb právě v jemných frakcích.

Redukce vzorku na velikost vhodnou k síťování je třeba provést po nasypání celého odebraného vzorku na vodorovnou desku. Následně rozdělit násypný kužel na čtyři části vertikálními řezy. Protilehlé čtvrtiny opět smíchat a celou proceduru znovu opakovat, dokud nemá redukovaný vzorek potřebnou váhu. Takto lze odstranit chyby vzniklé separací jemnějších částic.

Frekvence otáčení je rovněž částečně závislá na velikostech sít. Pro hrubá síta do velikosti cca 1,4 mm činila cca 100 ot.min⁻¹, pro frakce do 0,16 mm cca 120 ot.min⁻¹ a pro nejjemnější síta cca 135–140 ot.min⁻¹.

Velikosti sít byly voleny tak, aby co nejjemněji a pokud možno rovnoměrně pokryly velikostní škálu částic. Při měření tedy byla použita síta s těmito rozměry ok: (5,000–4,000–3,800–2,500–2,000–1,600–1,400–1,250–1,000–0,800–0,630–0,500–0,400–0,315–0,250–0,200–0,160–0,125–0,090–0,063–0,045–0,015) mm.

Doby potřebné k odseparování frakcí byly stanoveny na základě měření časového průběhu množství materiálu prošlého na dno pod sadou sít při shora uvedených frekvencích otáčení a při váze vzorků 200 g. Tato hmotnost je vyšší než pro později měřené vzorky, takže takto stanovené doby, jsou pro další analýzy vzorků dostatečné. Propadlá množství byla měřena v časových intervalech (1–2–5–10–15–20–25–30–40–45) min.

Měření bylo provedeno pro pšeničný, ječný, kukuřičný, hrachový a sójový šrot sadou sít s výše uvedenými oky ve třech skupinách. První sada se sítí (5,000–1) mm, druhá sada se sítí (0,8–0,16) mm a poslední sada sít (0,125–0,015) mm. Výsledkem měření bylo zjištění, že u kukuřičného šrotu pro první sadu stačí 7 min., u dalších sad 40 a 35 min. U pšenice byly doby postačující postupně (5–40–45) min. Sójový šrot dal následující výsledky (27–30–20) min.

Doba potřebná k prosetí tedy závisí na materiálu a velikosti sít a nelze ji nijak jednotně stanovit. Například na sítě 0,045 mm se doby proti sítu 0,063 téměř zdvojnásobily. Na základě těchto předběžných měření byly stanoveny následné prosévací časy, viz. tab. 1.

Tab. 1 Časy prosévání

Sada sít	Doba prosévání	Frekvence otáčení
1. sada (síta s otvory 5,000–1,000 mm)	30 min.	100 ot.min ⁻¹
2. sada (síta s otvory 0,800–0,160 mm)	50 min.	120 ot.min ⁻¹
3. sada (síta s otvory 0,125–0,015 mm)	55 min.	135–140 ot.min ⁻¹

3 VÝSLEDNÉ HODNOTY

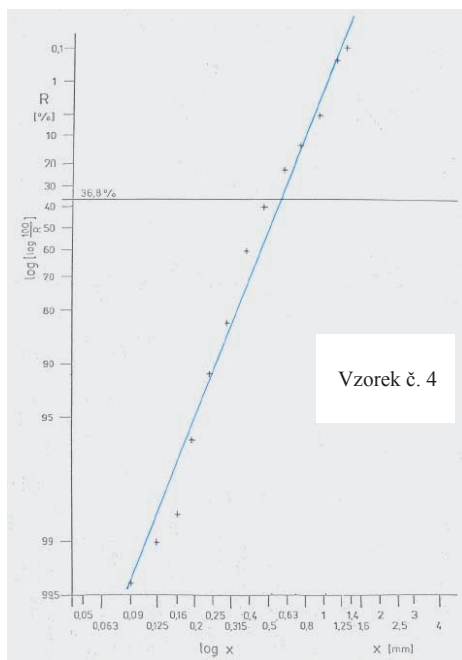
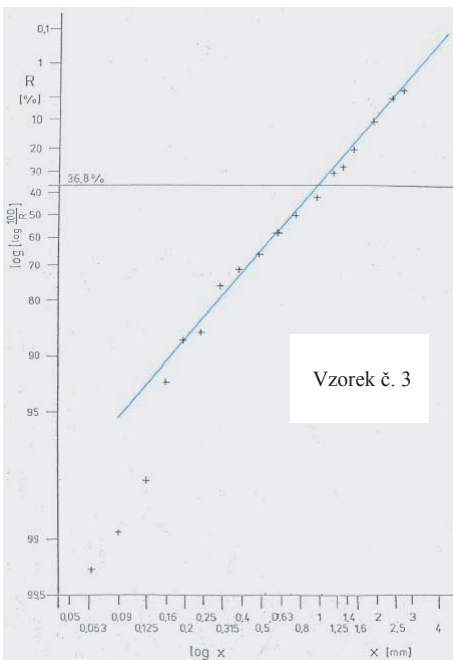
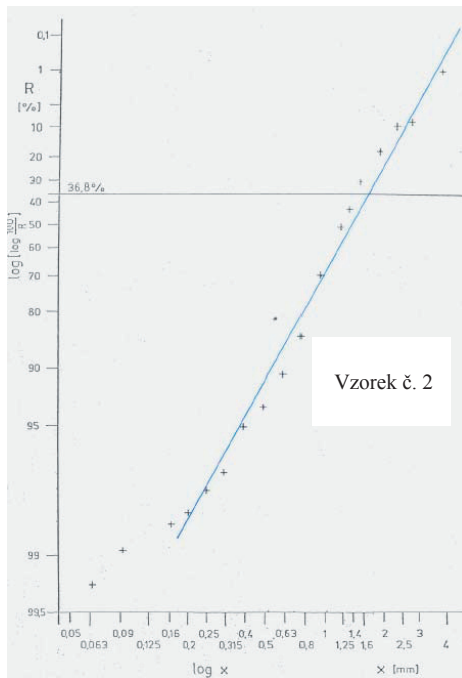
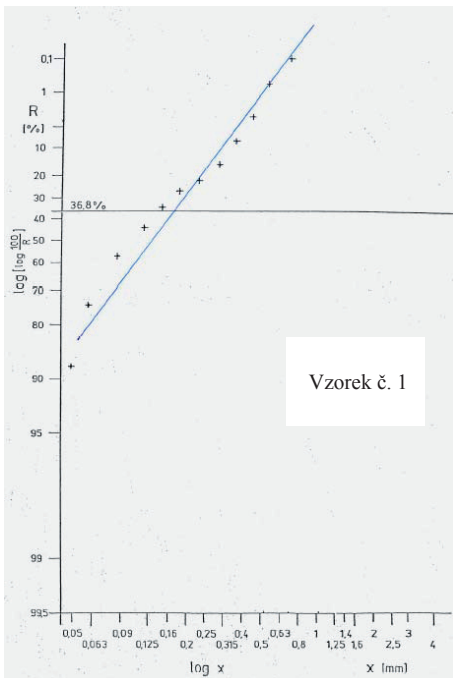
Pro vlastní měření byly testovány následující vzorky:

- Vzorek č. 1 – Premix threoninu 40 %, vlhkost $\varphi = 5\%$
- Vzorek č. 2 – Sójový šrot, vlhkost $\varphi = 6\%$
- Vzorek č. 3 – Kukuřičný šrot, vlhkost $\varphi = 8\%$
- Vzorek č. 4 – Premix Bioflor, vlhkost $\varphi = 4\%$
- Vzorek č. 5 – Premix, mikrokomponent lysin, vlhkost $\varphi = 1\%$

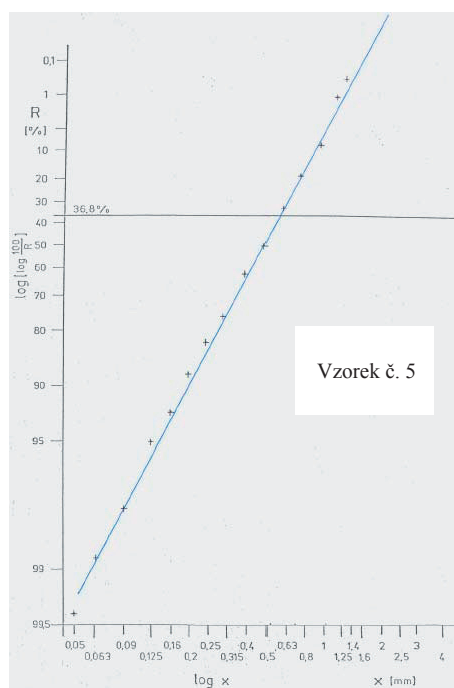
Pro vlastní měření bylo použito prosévací zařízení AP2 a váhy Rapido 754-05. Vzorky byly naváženy po 100 g. Pro vyhodnocení naměřených dat byl použit softwarový program nazvaný: „Metoda určování disperzity a jemnosti drcených tvrdých složek sypkých směsí“. Výsledné hodnoty sítové analýzy vzorků jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2 Výsledky sítové analýzy vzorků

Vzorek č. 1	
Rovnice regresní přímky spočítaná z 11 bodů	$y = 0,5439 + 1,2788 \cdot \log(x)$
Součinitel polydisperzity	1,278
Střední statistický rozměr částice [mm]	0,1956
Regresní koeficient	0,9801
Střední chyba průměru	0,31662
Vzorek č. 2	
Rovnice regresní přímky spočítaná z 19 bodů	$y = -0,8051 + 1,7459 \cdot \log(x)$
Součinitel polydisperzity	1,745
Střední statistický rozměr částice [mm]	1,793
Regresní koeficient	0,98752
Střední chyba průměru	0,17311
Vzorek č. 3	
Rovnice regresní přímky spočítaná z 18 bodů	$y = -0,413 + 1,5764 \cdot \log(x)$
Součinitel polydisperzity	1,576
Střední statistický rozměr částice [mm]	1,0767
Regresní koeficient	0,9737
Střední chyba průměru	0,18474
Vzorek č. 4	
Rovnice regresní přímky spočítaná z 14 bodů	$y = 0,2187 + 2,7869 \cdot \log(x)$
Součinitel polydisperzity	2,786
Střední statistický rozměr částice [mm]	0,6187
Regresní koeficient	0,99318
Střední chyba průměru	0,24658
Vzorek č. 5	
Rovnice regresní přímky spočítaná z 14 bodů	$y = 0,0685 + 2,0033 \cdot \log(x)$
Součinitel polydisperzity	2,003
Střední statistický rozměr částice [mm]	0,6093
Regresní koeficient	0,9993
Střední chyba průměru	0,24658



Obr. 1 Linearizovaná distribuční funkce vzorku č. 1 – č. 4



Obr. 2 Linearizovaná distribuční funkce vzorku č. 5

4 ZÁVĚR A DISKUSE

Výše uvedené vzorky byly prosévány podle uvedené metodiky pro síťovou analýzu. Grafické vyjádření distribučních funkcí vzorků a následná konstrukce regresních křivek sice dává představu o „chování“ vzorku, nicméně z grafů nelze odečíst střední rozměr částice. To umožňuje právě linearizace distribuční funkce RRSB rozdělením, kdy se z obecné křivky stává přímka, viz. obázek 1–2. Jednotlivé vzorky měly specifické průběhy distribučních funkcí a četností výskytu částic určité velikosti.

U vzorku č. 1 – premixu threoninu není z grafického zpracování naměřených hodnot zjištěn typický průběh hustoty pravděpodobnosti výskytu částice určité velikosti, sledující Gaussovo rozdělení.

Z obrázku č. 1 je patrné posunutí maxima křivky do oblasti malých částic. Tato oblast bývá zdrojem častých chyb. Premix threoninu je v tomto případě charakterizován součinitelem polydisperzity 1,278 a středním statistickým rozměrem částice 0,2 mm.

Vzorek č. 2 – sójový šrot je možné považovat za typickou ukázkou takřka ideálního průběhu hustoty pravděpodobnosti s posunutím maxima do oblasti velkých částic, přičemž střední statistický rozměr částice je 1,8 mm a součinitel polydisperzity 1,745.

Vzorek č. 3 – kukuřičný šrot má podobný průběh distribuční funkce i průběh hustoty pravděpodobnosti jako vzorek předešlý. Jinak symetrický průběh je narušen nerovnováhou v oblasti ok sít o velikosti 1,25 mm. Opět se pravděpodobně jedná o chybu

způsobenou vzorkováním (nedostatečná homogenizace vzorku před dodáním). Zanedbáme-li tuto naměřenou hodnotu, dostaneme klasický průběh hustoty pravděpodobnosti výskytu částice, sledující Gaussovo rozdělení. Střední statistický rozměr částice je 1,1 mm a součinitel polydisperzity 1,576.

Vzorek č. 4 – premix Bioflor je charakteristický posunutím maxima křivky průběhu hustoty pravděpodobnosti do oblasti menších částic o velikosti cca 0,3 mm. Střední statistický rozměr částice je 0,62 a součinitel polydisperzity 2,786.

Vzorek č. 5 – premix, mikrokomponent lysin představuje ukázkou klasického sypkého materiálu charakteristického Gaussovým rozdělením s rovnoměrným průběhem hustoty pravděpodobnosti výskytu částice určité velikosti. I v tomto případě je maximum křivky nevýznamně posunuto do oblasti menších částic, přičemž střední statistický rozměr částice je 0,6 mm a součinitel polydisperzity 2,003.

Z naměřených hodnot vyplývá, že doba potřebná k prosetí závisí na materiálu a velikosti sít a nelze ji nijak jednoduše stanovit. Výhodné je i před vlastním měřením provést několik předběžných měření ke stanovení nezbytných prosévacích časů pro každou sledovanou látku. To povede k úspoře času (viz. kukuřice/sója) a vyšší efektivitě měření.

Pro testování látky obecně platí Gaussovo rozdělení s výjimkami, způsobenými kumulací částic určité velikosti, špatným vzorkováním nebo nedostatečnou přípravou vzorku před vlastním experimentem.

Měření potvrdila správnost odhadu prosévacích časů. V některých případech byly nutné prosévací časy menší než předepsané. Naměřené hodnoty byly zpracovány softwarem nazvaným: „Metoda určování disperzity a jemnosti drcených tvrdých složek sypkých směsí“ a programy Microsoft Office 2005. Tento program umožňuje stanovit rovnice regresní přímky, součinitele polydisperzity, střední statistický rozměr částice, regresní koeficient a střední chybu průměru. Linearizace RRSB rozdělení četnosti částic určité velikosti, její grafické vyjádření a následně odečtení hodnoty střední velikosti částice je v dobré shodě s vypočítanými hodnotami.

Pro granulometrickou analýzu vybraných sypkých surovin je nezbytné dořešení techniky vzorkování v provozu. Současný stav je ve většině případů nevyhovující (nedodržení počtu vzorků, nedodržení časového odstupu, nevhodná místa odběru atd.). Řešením je zavedení automatických, programovatelných vzorkovačů ve větších výrobnách. Na základě experimentálních výsledků je doporučeno schéma vzorkování označované návrhem ČSN 01 5110 1c. Pro určení počtu dílčích vzorků se doporučuje mezinárodní norma ISO/DIS 6497 a samostatné analýzy jednotlivých dílčích vzorků (Halnan 1994).

Příspěvek vznikl v rámci řešení interních grantů IGA a CIGA na České zemědělské univerzitě v Praze.

LITERATURA

1. ANDĚL A.: Mechanické pochody, ČVUT, Praha, 1992.
2. ČSN 01 5110 Vzorkování materiálů – základní ustanovení, Praha 1975.
3. ČSN 01 5111 Vzorkování sypkých a zrnitých materiálů, Praha 1975.
4. HALNAN E. T.: Scientific Principles of Poultry Feeding, Bulletin nr. 7, H.M.S.O., Ministry of Agriculture-GB, 1994.

5. HOLLIGER A.: Die Muhle und Mischfutter Technik 3, Berlin, 1992.
6. MALOUN J.: Technologická zařízení a hlavní procesy při výrobě krmiv, TF VŠZ v Praze, Praha, 2001.
7. MALOUN J.: Významný fyzikální předpoklad homogenity vícesložkových směsí, Krmi-
vářství 5/2000, Praha, 2000.
8. PŘIKRYL M. a kol.: Technologická zařízení staveb živočišné výroby, Tempo Press, Praha,
1997.
9. WOODMAN H.E.: Rations for livestock, Bulletin nr. 48, H.M.S.O., Ministry of Agriculture-
-GB, 1994.

Kontaktní adresa:

Ing. Petr Vaculík, Ph.D, Ing. Jan Malat'ák, Ph.D., doc. Ing. Josef Maloun, CSc. Technická fakulta,
Česká zemědělská univerzita v Praze, Kamýcká 129, 16500 Praha 6-Suchbátov,
e-mail: vaculik@tf.czu.cz

doc. Ing. Marian Kučera, Ph.D., Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky, Technická univerzi-
ta vo Zvolene, Študentská 26, 960 53 Zvolen, Slovenská republika, e-mail: kucera@vsld.tuzvo.sk

MOŽNOSTI VYUŽITIA SKELETIZÁCIE PRI POROVNÁVANÍ OBRAZOV ODTLAČKOV PRSTOV

POSSIBILITIES OF THINNING ALGORITHM APPLICATION IN FINGERPRINT IMAGES RECOGNITION

Pavol KOLEDA – Elena PIVARČIOVÁ

ABSTRACT: The article describes possibilities of thinning algorithm application in fingerprint images processing. Thinning algorithm is necessary in fingerprint images recognition by method of significant points. In the article there number of thinning algorithm is compared.

Key words: fingerprints, image processing, thinning algorithm

ABSTRAKT: Príspevok popisuje možnosti využitia skeletizácie pri spracovaní obrazov odtlačkov prstov. Skeletizácia je nutná pri porovnávaní obrazov odtlačkov prstov pomocou významných bodov. V príspevku je porovnaných niekoľko skeletizačných metód.

Kľúčové slová: odtlačky prstov, spracovanie obrazov, skeletizácia

1 ÚVOD

Medzi klasické metódy porovnávania odtlačkov prstov patria metódy založené na porovnávaní významných bodov, v ktorých je šedotónový obraz odtlačku prsta najskôr predspracovaný (filtrácia, segmentácia, stenčovanie) a potom sú extrahované charakteristické znaky pre rozpoznávanie. Rozpoznávanie sa robí na základe informácií o polohe týchto znakov a ďalších informáciách získaných z upraveného obrazu (Dobeš, 2001).

2 SKELETIZÁCIA

Skeletizáciou sa rozumie odstránenie bodov alebo vrstiev pôvodného obrazu až kým nie sú všetky čiary v tomto obraze široké jeden obrazový bod (pixel). Výsledkom skeletizácie je súbor čiar, ktorý sa nazýva **skelet** alebo kostra obrazu.

Vstupom do skeletizačného algoritmu je binárny obraz s hodnotami jasu 0 alebo 1. Objekty sú reprezentované bodmi s hodnotou jasu 1. Body s hodnotou jasu 0 patria okoliu.

Pre skeletizačné algoritmy sa požaduje (Dobeš, 2008):

1. Zachovanie súvislosti oblastí. Počet objektov v obraze musí byť zachovaný – nemení sa počet objektov a dier. Táto vlastnosť sa nazýva **homotópia**.
2. Bod v obraze (s výnimkou okrajov obrazu) má 8 susedov. Osemokolie znamená, že existuje susedný pixel buď v smere diagonálnom, horizontálnom alebo vertikálnom.
3. Poloha koncových bodov objektu by mala ostať zachovaná.
4. Stenčený výsledok by mal vyjadrovať os objektu.
5. Mal by byť minimalizovaný vplyv výbežkov v obraze.

Pri skeletizácii sa postupne odstraňujú okraje oblastí obrazu, až kým nie sú tieto oblasti stenčené na čiary s hrúbkou jeden pixel. Na to je obvykle potrebných viac prechodov obrazom. Tieto prechody sa striedajú v dvoch smeroch, v párnom a v nepárnom smere, aby bola kostra oblastí správne centrovaná. V párných prechodoch je obraz stenčovaný napríklad z ľavého horného rohu obrazu do pravého dolného rohu, v nepárnych prechodoch opačne. Je zrejmé, že obraz nemôže byť stenčovaný súčasne v oboch smeroch, pretože čiara o šírke dvoch pixelov by bola odstránená. Na konci každého prechodu obrazom sú označení kandidáti odstránení. Prechody sú prevádzané tak dlho, kým už nie je možné odstrániť žiadny pixel.

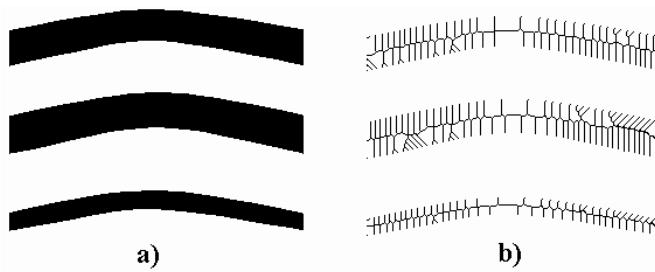
Pri každom opakovaní je každý pixel obrazu kontrolovaný, či daný bod nie je potrebný na udržanie kontinuity čiary kostry obrazu alebo či sa nejedná o hraničný bod. Ak sa nejedná o hraničný bod a ani sa neporuší kontinuita čiar, je daný bod vymazaný z obrazu a pridaný k okoliu. Táto kontrola sa obvyčajne robí tak, že sa okolo práve kontrolovaného bodu vytvorí okolie široké jeden pixel, takže vznikne mriežka 3×3 pixelov s daným bodom uprostred. Následne sa podľa daného algoritmu skeletizácie posudzuje kontinuita a ukončenie čiar podľa počtu bodov obrazu v okolí a ich rozmiestnenia.

Niektoré nové metódy skeletizácie boli navrhnuté na stenčovanie s pevným počtom krokov bez závislosti na maximálnej hrúbke čiar originálneho obrazu. Pre tieto neiteračné metódy sú body kostry odhadované zo vzdialeností bodov na opačných okrajoch oblastí obrazu. Takéto metódy majú malú opakovateľnosť.

2.1 Rekonštrukcia skeletu

Všetky algoritmy skeletizácie transformujú vstupný obraz odtlačku prsta do binárneho skeletu daného obrazu. Pôvodný obraz je však často zanesený šumom, ktorý i napriek množstvu princípov predspracovania nie je možné odstrániť. Tieto šumy môžu v obraze spôsobiť stratu informácií, ktoré majú pri identifikácii obrazu veľký význam.

Vzhľadom na to, že väčšina stenčovacích a skeletizačných algoritmov je závislá na šume vyskytujúcom sa v obraze, výsledný skelet nie je stopercentne rovný, vyskytujú sa v ňom rôzne záchvevy (Obr. 1 b), dokonca niektoré algoritmy môžu spôsobiť prerušenie línií. Takéto poruchy línií kazia požadovaný skelet a mohli by prekážať pri ďalšom vyhodnocovaní obrazu. Aby sa eliminovali tieto sprievodné javy, používajú sa na získanú kostru s možnými poruchami postupy vedúce k odstráneniu týchto porúch kontinuity, záchvevov a výbežkov.



Obr. 1 Stenčovanie metódou Stover-Iverson (Stover, Iverson, 1986)
a) pôvodný obraz, b) výsledný skelet

Jedna z metód odstránenia takýchto porúch skeletu je založená na porovnávaní jednotlivých bodov skeletu so sadou ôsmich masiek. Táto metóda je vhodná pre spojité skelety typu kružnice, napríklad skelet interferogramov alebo letokruhov stromu, kde je výsledok rekonštrukcie veľmi dobrý. Naopak pri nespojitých skeletoch dochádza k odstráneniu aj takých častí, ktoré patria ku skeletu.

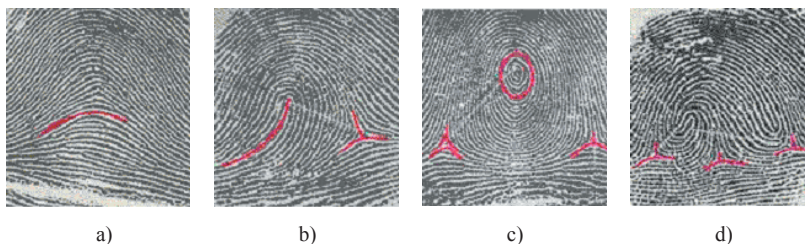
2.2 Spájanie prerušených čiar

Po skončení procesu skeletizácie sa často stáva, že výsledné čiary skeletu sú na niektorých miestach prerušené. Na odstránenie týchto prerušení bol navrhnutý postup, pri ktorom sa výsledný poškodený skelet porovnáva bod po bode s ôsmimi porovnávacími maskami. Tento algoritmus je schopný doplniť k neuzavretým čiaram ich nasledujúce body. Pretože porovnávacie masky majú rozmer 3×3 , je možné určiť smer dopĺňaných bodov iba v ôsmich smeroch.

3 VLASTNOSTI ODTLAČKOV PRSTOV

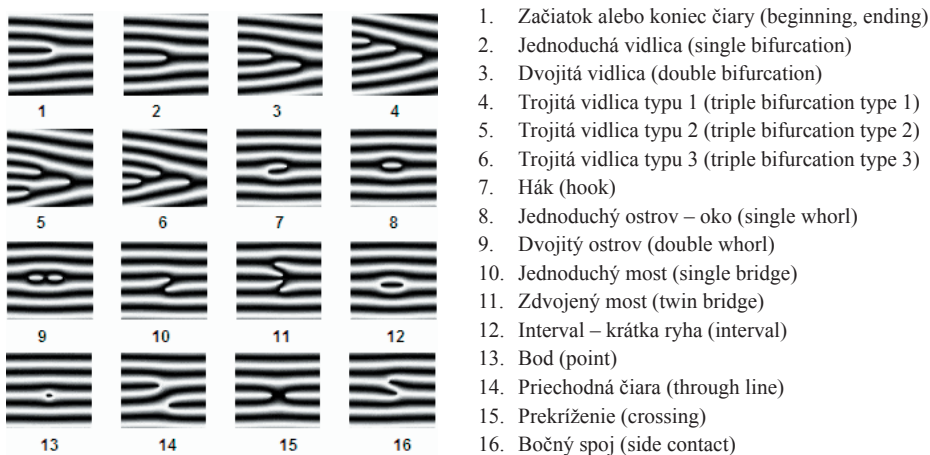
Vlastnosti odtlačkov prstov môžeme rozdeliť na (LEE, GAENSSLEN, 2001):

- **Globálne** – pre celý odtlačok existuje práve jedna takáto charakteristika, ktorá sa určí z celkového vzhľadu odtlačku. Jedná sa o obrazce tvorené súborom papilárnych čiar.



Obr. 2 Klasifikačné vzory (WikipediaSk, 2008)
a) Oblúk, b) Slučka, c) Závit (vír, špirála), d) Kompozícia

- **Lokálne** – pozostávajú z niekoľkých znakov získaných z určitej ohraničenej oblasti odtlačku. Jedná sa o špecifické znaky, ktoré je možné odhaliť pri podrobnejšom skúmaní papilárneho terénu. Tieto drobné nepravidelnosti v priebehu čiar, ich prerušenia, vetvenia a spájania, sa nazývajú **minúcie** (individuálne/významné znaky, details, markanty, identifikačné body). Sú rôzneho tvaru, podľa ktorého majú názov: začiatok/koniec čiary, oko, ostrov, vidlica, trojitá vidlica, hák, prekríženie, krátka ryha, a pod. (pozri Obr. 3).



Obr. 3 Príklady minúcií (Optel, 2003)

4 VYHODNOCOVANIE OBRAZOV ODTLAČKOV PRSTOV

Väčšina algoritmov využívajúcich metódu porovnávania odtlačkov prstov podľa významných bodov vychádza z postupu:

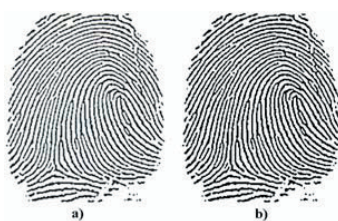
- Binarizácia obrazu: zvýraznenie hrebeňov čiernou farbou a priehlbín bielou.
- Prahovanie: vylúčenie oblastí s intenzitou nižšou ako nastavená prahová hodnota.
- Stenčenie hrebeňov: úprava šírky hrebeňov na jeden pixel.
- Hľadanie markantov v skelete odtlačku prsta.

4.1 Skeletizácia

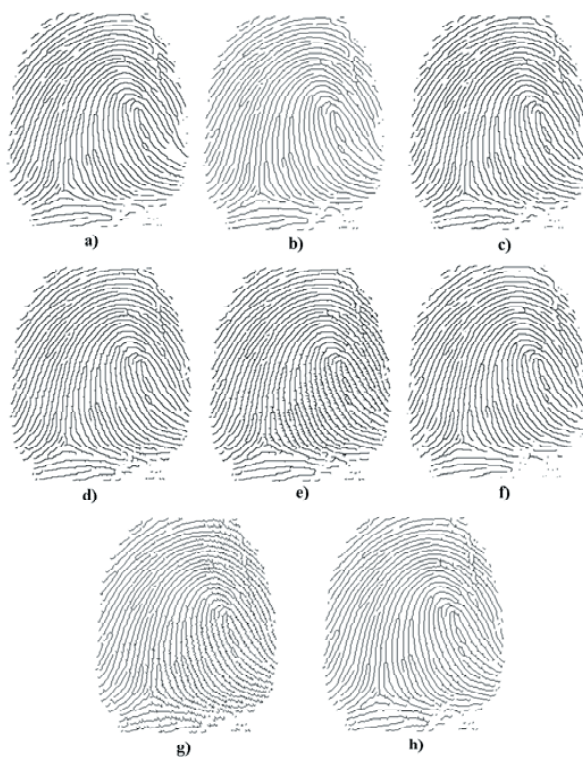
Pre nájdenie skeletu odtlačkov prstov boli použité algoritmy skeletizácie:

- a) Deutschov algoritmus (Dobeš, 2008)
- b) Deutschov modifikovaný algoritmus (Dobeš, 2008)
- c) Zhang-Suen algoritmus (Onat et al, 2006)
- d) Modifikovaný Zhang-Suen algoritmus (Kong, Rosenfeld, 1996)
- e) Guo & Hall algoritmus (Zhang et al., 2008)
- f) C. J. Hildish algoritmus (Yin, Narita, 2002)
- g) Stover-Iverson algoritmus (Stover, Iverson, 1986)
- h) Sekvenčný algoritmus s použitím štruktúrnych masiek (Šmat, 2002)

Na Obr. 4 a je ukážka odtlačku prsta, ktorý bol použitý na skeletizáciu.



Obr. 4 Odtlačok prsta
a) pôvodný obrázok, b) obrázok upravený prahovaním s prahom 200



Obr. 5 Porovnanie výsledkov jednotlivých skeletizačných algoritmov
a) Deutschov algoritmus, b) Deutschov modifikovaný algoritmus, c) Zhang-Suen algoritmus,
d) Zhang-Suen modifikovaný algoritmus, e) Guo-Hall algoritmus, f) Hilditchov algoritmus,
g) Stover-Iversonov algoritmus, h) stenčovanie štruktúrnymi elementmi

Na základe vykonaných testov bolo zistené, že na skeletizáciu odtlačku prsta sú najvhodnejšie algoritmy Deutschov modifikovaný algoritmus, Zhang-Suen modifikovaný algoritmus a stenčovanie štruktúrnymi elementmi, ktorých výsledný skelet neobsahuje

takmer žiadne výbežky spôsobené algoritmom. Algoritmus Guo-Hall vytvára množstvo výbežkov, ktoré je možné odstrániť ďalšími úpravami. Algoritmus Stover-Iversonov vytvára roztrásenú kostru, ktorá nie je vhodná pre ďalšie použitie.

4.2 Hľadanie markantov v skelete odtlačku prsta

Pri hľadaní markantov v skelete odtlačku prsta sa tento prehľadáva bod po bode. Skelet je binárny obraz, ktorého body majú hodnotu 1 (skelet) a 0 (pozadie). Pre každý bod P patriaci skeletu sa vypočíta prechodové číslo $X(P)$, ktoré udáva počet prechodov hodnôt susedov bodu P z 0 na 1 a z 1 na 0 pri obíhaní okolo bodu P . Toto číslo sa vypočíta podľa vzťahu (Dobeš, 2008):

$$X(P) = \sum_{i=1}^8 |q_{i+1} - q_i| = |q_2 - q_1| + |q_3 - q_2| + \dots + |q_8 - q_7| + |q_1 - q_8|,$$

kde q_i je i -ty bod z okolia bodu P (Obr. 6), pričom $q_9 = q_1$.

q_4	q_3	q_2
q_5	P	q_1
q_6	q_7	q_8

Obr. 6 Definované okolie pre pixel P (Dobeš, 2008 upr.)

Podľa zisteného prechodového čísla je možné zistiť, o aký markant sa jedná:

$X(P) = 0$ – izolovaný bod,

$X(P) = 2$ – zakončenie čiary,

$X(P) = 4$ – priebežný bod (čiara),

$X(P) = 6$ – vidlica,

$X(P) = 8$ – prekríženie čiar.

Pre rozpoznávanie markantov typu vidlica stačí, aby $X(P) = 6$. V skelete obrazu sa ale často vyskytujú aj falošné výbežky, ktoré bývajú nesprávne klasifikované ako vidlice. Čiastočným riešením tohto problému je použitie inej, väčšej masky (pozri Obr. 7).

q_{15}	q_{14}	q_{13}	q_{12}	q_{11}
q_{16}	q_4	q_3	q_2	q_{10}
q_{17}	q_5	P	q_1	q_9
q_{18}	q_6	q_7	q_8	q_{24}
q_{19}	q_{20}	q_{21}	q_{22}	q_{23}

Obr. 7 Použitá väčšia maska (Dobeš, 2008 upr.)

Overenie, či je daný bod správne identifikovaný ako vidlica, je možné pomocou ďalšieho prechodového čísla $X_2(P)$, kde sa skúmajú prechody v druhej vrstve susedných bodov okolo bodu P . Toto druhé prechodové číslo sa vypočíta podľa vzťahu (Dobeš, 2008):

$$X_2(P) = \sum_{k=9}^{24} |q_{i+1} - q_i|,$$

pričom sa predpokladá, že $q_{25} = q_9$.

Ak bod predstavuje markant typu vidlica, musí spĺňať dve podmienky: $X(P) = 6$ a $X_2(P) = 6$. Ukončenie čiary musí spĺňať podmienky: $X(P) = 2$ a $X_2(P) = 2$.

6 ZÁVER

Jednotlivé algoritmy skeletizácie majú individuálny prístup k stenčovaniu a preto sú výsledné skelety obrazov rôzne. Niektoré algoritmy vytvárajú nevhodnú kostru pre ďalšie spracovanie.

Získať ostrý obraz pre skeletizáciu je pri snímaní odtlačku prsta pomerne náročné vzhľadom na vplyvy mnohých rušivých elementov. Preto je nutné zvýšiť kvalitu takéhoto obrazu predspracovaním, počas ktorého sa zvýrazia objekty, ktoré chceme stenčovať a odstrániť sa nežiadúce vplyvy šumov.

Porovnávanie odtlačkov na základe významných bodov využíva robustný, jednoduchý a rýchly overovací algoritmus a minimálnu veľkosť predlohy.

Hlavnými nevýhodami sú však (MALTONI, CAPPELLI, 2008):

- Nutnosť nájsť dostatočný počet zhodných detailov.
- Náročné získavanie významných bodov z odtlačkov s nízkou kvalitou:
 - môže byť vytvorených veľa falošných detailov,
 - môže byť ignorovaných veľa pravých detailov,
 - môžu vzniknúť chyby v lokalizácii (umiestnenie, orientácia) detailov.
- Fyzikálne podmienky pri snímaní, napr. nečistoty, zrnká prachu na snímacom zariadení sa môžu prejaviť ako minúcie typu bod.
- Poškodenie prsta po úraze (škrabance, jazvy), môže spôsobiť vyhladenie detailov a prekaziť pozitívnu identifikáciu alebo môžu vzniknúť falošné detaily.
- Obraz odtlačku prsta môže byť voči vzoru natočený a posunutý.
- Deformácie spôsobené silou tlaku a elasticitou kože spôsobujú rôzne natiahnutia (zmena mierky) v rôznych častiach obrazu.

Uvedené nevýhody algoritmov založených na porovnávaní významných bodov viedli k hľadaniu iných špecifických prístupov na jednoznačné rozlíšenie odtlačkov prstov. Alternatívnym prístupom porovnávanie odtlačkov prstov sú metódy, ktoré nevyžadujú predspracovanie a vyhľadávajú významných bodov, napr. rozpoznávanie pomocou Fourier-Mellinovej transformácie (Csongrády, 2009).

LITERATÚRA

- CSONGRÁDY, T. (2009): Rozlíšenie obrazov a presnosť registrácie. In: Informatika a automatizácia v riadení procesov: Zborník referátov z vedeckej konferencie, Zvolene: Technická univerzita vo Zvolene, 2009. s. 27–36.
- DOBEŠ, M. (2008): Zpracování obrazu a algoritmy v C++. Praha: BEN – technická literatura, 2008. 144 s. ISBN 978-80-7300-233-6.
- KONG, T. Y. – ROSENFELD, A. (1996): Topological algorithms for digital image processing. Amsterdam: Elsevier Science B. V., 1996. 292 s. ISBN 0-444-89754-2.
- LEE, H. C. – GAENSSLEN, R. E. (2001): Advances in fingerprint technology. Boca Raton London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, 2001, 426 p. ISBN 0-8493-0923-9.
- MALTONI, D. – CAPPELLI, R. (2008): Fingerprint Recognition. In: Handbook of Biometrics. Springer Science + Business Media LLC, 2008. pp. 23–42.
- ONAT, A. – YILDIZ, F. – GÜNDÜZ, M. (2006): Ottoman Script Recognition Using Hidden Markov Model. Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology volume 14 August 2006. ISSN 1307-6884. Dostupné on-line: <<http://www.waset.org/pwaset/v14/v14-15.pdf>>.
- OPTEL (2003): New numerical methods of fingerprints' recognition based on mathematical description of arrangement of dermatoglyphics and creation of minutia. Dostupné on-line: <http://www.optel.com.pl/software/english/method.htm>.
- STOVER, D. L. – IVERSON, R. D. (1986): A One-Pass Thinning Algorithm and Its Parallel Implementation. Computer Vision, Graphics and Image Processing 40, 1986.
- ŠMAT, M. (2002): Metody digitální holografické interferometrie. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, 2002.
- WIKIPEDIASK (2008): Daktyloskopia. Dostupné on-line: <http://sk.wikipedia.org/wiki/Daktyloskopia>
- YIN, M. – NARITA, S. (2002): Speedup Method for Real-Time Thinning Algorithm. Dostupné on-line: http://www.aprs.org.au/dicta2002/dicta2002_proceedings/Yin258.pdf.
- ZHANG, F. – WANG, Y. – GAO, CH. – SI, S. – XU, J. (2008): An Improved paralel thinning algorithm with two subiterations. Dostupné on-line: <<http://www.springerlink.com/content/u84k0n10v8433045/fulltext.pdf>>.

Kontaktná adresa

Ing. Pavol Koleda – Mgr. Elena Pivarčiová, PhD.
pavol.koleda@zoznam.sk – epivarci@vsld.tuzvo.sk
Technická univerzita vo Zvolene
Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky
Katedra informatiky a automatizačnej techniky
Masarykova 24
960 53 Zvolen

MODELOVANIE ODPOROV PROTI POHYBU ROVINNÉHO MECHANIZMU

MODELING OF PASSIVE RESISTANCES OF PLANAR MECHANISM

Peter KOLEDA – Ľubomír NAŠČÁK

ABSTRACT: This paper describes the importance of selected mechanical parameters of mechatronic systems by the algorithms design to control the speed and position. Mechanical properties and passive resistance determine the dynamic parameters of the system, which should be considered especially by the parameterization of the action variables. The article shows the possibility of passive resistance modelling, which is demonstrating on a plane mechanism with two degrees of freedom in the module Simulink of software package Matlab.

Key words: friction, passive resistances, system dynamic

ABSTRAKT: Článok opisuje dôležitosť vybraných mechanických parametrov mechatronických systémov pri návrhu algoritmov pre riadenie rýchlosti a polohy. Mechanické vlastnosti a pasívne odpory určujú dynamické správanie sa systému, s ktorým by sa malo uvažovať najmä pri parametrizácii akčných veličín. V článku je uvedená možnosť modelovania pasívnych odporov, čo je demonštrované na rovinnom mechanizme s dvomi stupňami voľnosti v module Simulink programového balíka Matlab.

Kľúčové slová: trenie, pasívne odpory, dynamika systému

1. MODELOVANIE TRENIA

Telesá v priestorovom kinematickom reťazci majú po 6 stupňov voľnosti – môžu vykonávať translačný pohyb pozdĺž osí x , y , z a zároveň môžu okolo týchto osí rotovať. Definované kinematické väzby odoberajú telesám stupne voľnosti a ich výsledný pohyb je obmedzený. V rovine má teleso 3 stupne voľnosti: translačný pohyb pozdĺž osí x , y a rotáciu okolo osi z . Každé teleso v kinematickom reťazci predstavuje pre mechanizmus ďalšie tri stupne voľnosti, ktoré sú znovu obmedzené väzbami medzi telesami, príp. telesom a rámom.

V mieste styku dvoch hmotných objektov vznikajú reakčné sily, ktoré vytvárajú pasívne odpory voči pohybu: adhéziu a šmykové trenie pri posuvnom pohybe. Bez trecej sily, vyvolanej normálovou silou a závislej tiež od vektora rýchlosti telesa, by po udelení hybnosti telesu napr. vonkajším impulzom sily nebolo možné toto teleso zastaviť bez toho, aby naň nezačala pôsobiť vonkajšia sila opačne orientovaná ako prvotný silový impulz.

Súčinitele vyjadrujúce pomery medzi dotyčnicovými reakciami a normálovou silou môžeme zapísať nasledovnými vzťahmi:

$$f = \frac{F_t}{F_n}, \quad (1)$$

$$f_s = \frac{F_{Ts}}{F_n}, \quad (2)$$

f – koeficient šmykového trenia [-],

f_s – koeficient adhézie [-],

F_t – trecia sila [N],

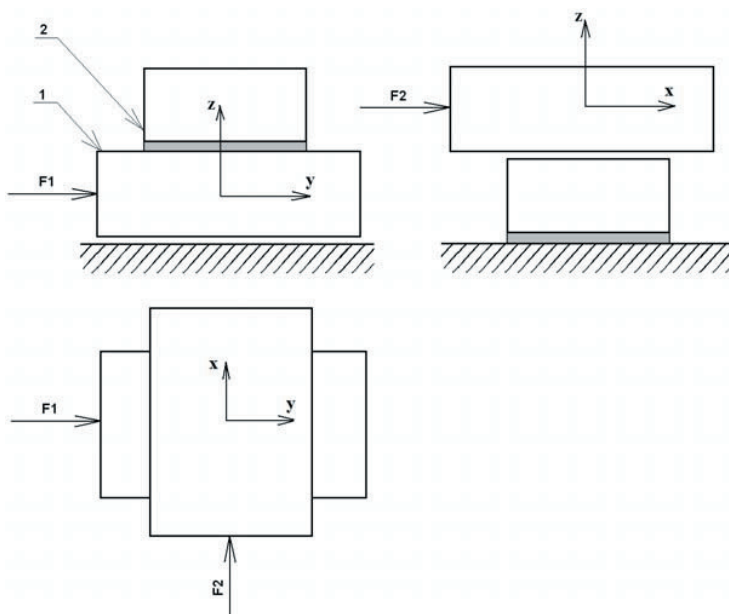
F_n – normálová sila [N],

F_{Ts} – statické trenie [N].

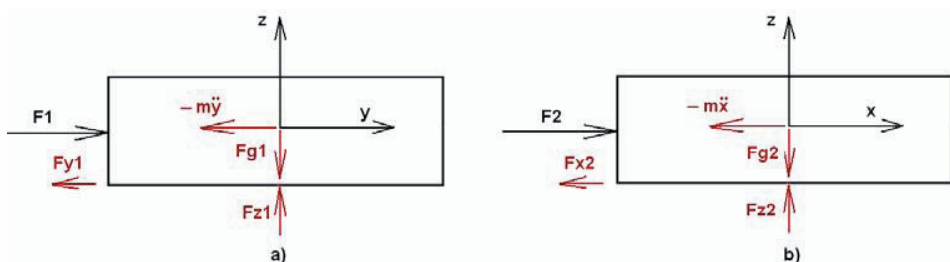
Pri uvádzaní telesa z pokojového stavu do pohybu je potrebné prekonať silu F_{Ts} , ktorá je vždy väčšia ako sila F_t . Počas translačného pohybu pôsobí proti pohybu trecia sila F_t .

1.1. Opis simulačného modelu

Pohyb bodu v rovine realizujú dva bloky – jeden umožňuje pohyb v smere osi y, druhý v smere osi x. Medzi rámom a blokom 1 existuje posuvná väzba, ktorá umožňuje pohyb v smere osi y, medzi blokom 1 a blokom 2 je definovaná posuvná väzba, ktorá umožňuje pohyb v smere osi x. Bod, ktorého pohyb simulujeme, je umiestnený na druhom bloku, pohybuje sa teda v rovine xy. Zjednodušený simulačný model ilustruje obr. 1.



Obrázok 1 Zjednodušený simulačný model: 1 – pohyb v smer osi y, 2 – pohyb v smere osi x



Obrázok 2 Uvoľnenie telies: a) teleso 1, b) teleso 2

Uvoľnením telies podľa obr. 2 môžeme napísať rovnice rovnováhy pre sily pôsobiace v osiach:

teleso 1:

$$\sum F_{ix} = 0: F_x = 0,$$

$$\sum F_{iy} = 0: -F_{y1} + F_1 - m\ddot{y} = 0,$$

$$\sum F_{iz} = 0: F_{z1} - F_{g1} = 0,$$

teleso 2:

$$\sum F_{ix} = 0: -F_{x2} + F_2 - m\ddot{x} = 0,$$

$$\sum F_{iy} = 0: F_y = 0,$$

$$\sum F_{iz} = 0: F_{z2} - F_{g2} = 0,$$

pričom

$$F_{g1} = (m_1 + m_2)g,$$

$$F_{g2} = m_2g,$$

m_1 – hmotnosť celého bloku 1,

m_2 – hmotnosť celého bloku 2.

Vzhľadom na rovnakú konštrukciu blokov predpokladáme, že $m_1 = m_2$.

1.2. Modelovanie trenia v prostredí Matlab

Pre modelovanie spomenutých síl je použitý blok Friction System (FS). V posuvnej väzbe vzniká tiažou telesa normálová reakcia, ktorá je vstupom do tohto bloku; výstupom z bloku je trecia sila, ktorá pôsobí v posuvnej väzbe, vytvára teda odpor voči pohybu.

Do bloku FS vstupuje aj externá sila, ktorá v našom prípade predstavuje silový účinok prenesený cez prevodový mechanizmus (skrutkovica a spojka) od motora až do pôsobiska na posuvnom bloku. Veľkosť externej sily nie je exaktne odvodená, je zvolená tak, aby predstavovala vhodnú veličinu pre simuláciu.

Na základe spomenutých vstupných síl je možné vypočítať kinetické trenie vzťahom

$$F_t = -\text{sgn}(v) f F_n \quad (3)$$

- v – rýchlosť bloku [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
- f – koeficient šmykového trenia [-],
- F_n – normálová sila vo väzbe [N].

Statické trenie je dané vzťahom

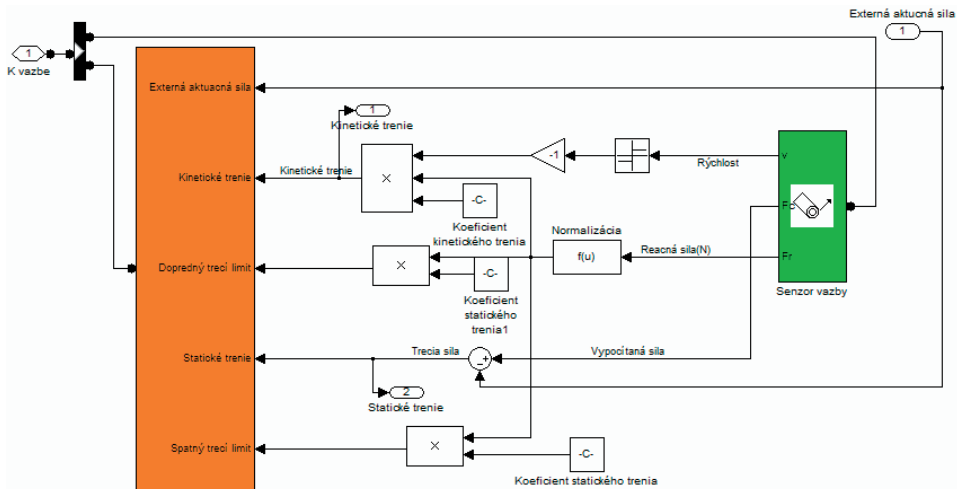
$$F_{Ts} = f_s F_n, \quad (4)$$

f_s – koeficient statického trenia [-].

Implementácia vzťahov (3) a (4) v prostredí Matlab je zobrazená na obr. 3. Senzorom väzby je vypočítaná posuvná rýchlosť, reakčné sily vo všetkých osiach a dynamická sila podľa Newtonovho zákona. Spomenuté premenné sa použijú pre určenie kinetického a statického trenia a tiež pre určenie limitnej hodnoty adhézie pri doprednom i spätnom pohybe. Výsledná reakčná sila je počítaná zo svojich zložiek:

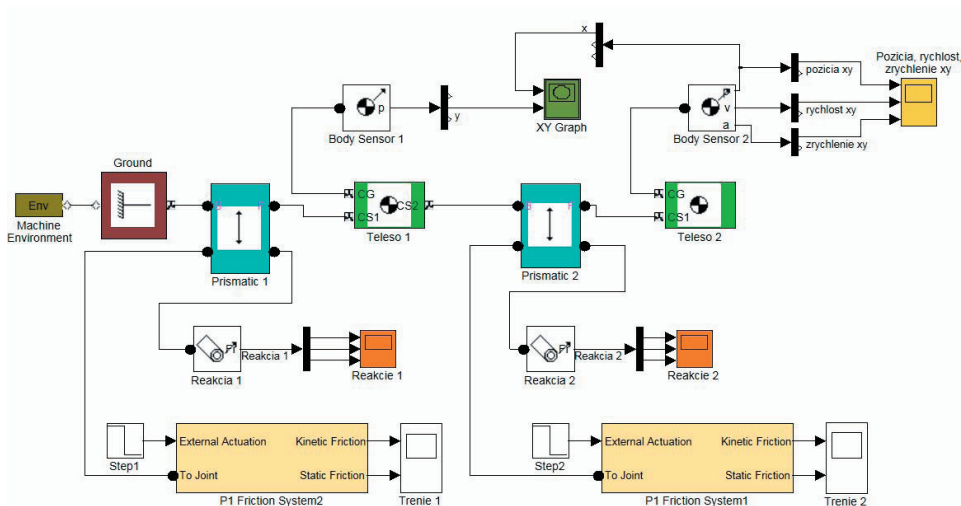
$$F_R = \sqrt{F_{Rx}^2 + F_{Ry}^2 + F_{Rz}^2}, \quad (5)$$

- F_{Rx} – zložka reakčnej sily v smere osi x [N],
- F_{Ry} – zložka reakčnej sily v smere osi y [N],
- F_{Rz} – zložka reakčnej sily v smere osi z [N].



Obrázok 3 Simulačná schéma bloku Friction System

Simulačný model je zobrazený na obr. 4. Teleso 1 je posuvnou väzbou 1 (Prismatic 1) uchytené k rámu, teleso 2 je posuvnou väzbou 2 (Prismatic 2) uchytené k telesu 1. Ťažiská telies a body, v ktorých sú uchytené lokálne súradnicové systémy sú modelované tak, aby zohľadňovali skutočné rozmery blokov. V posuvnej väzbe 1 je povolený len pohyb v smere osi y, v posuvnej väzbe 2 len pohyb v smere osi x, teleso 1 predstavuje teda spodný blok a teleso 2 blok horný.



Obrázok 4 Simulačná schéma v prostredí Matlab Simulink

2. VÝSLEDKY SIMULÁCIÍ

2.1. Simulácia 1

Externá sila vo väzbách má tvar skoku z hodnoty 500 N na 0 N v simulačnom čase $t = 2$ s, platí teda:

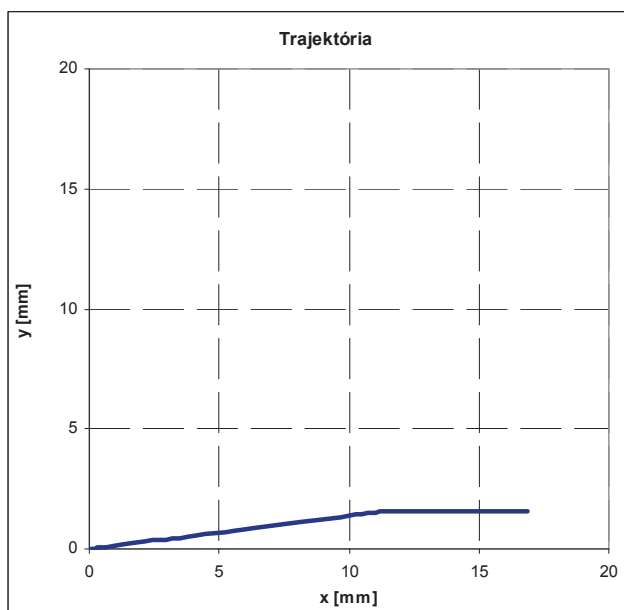
$$F_i = 500 \text{ N v čase } 0 \text{ s} < t < 2 \text{ s,}$$

$$F_i = 0 \text{ N v čase } 2 \text{ s} \leq t < 5 \text{ s, } i = 1, 2.$$

Vo väzbách sú merané reakčné sily F_x , F_y a F_z , na telesách sa meria ich posuv, zložky rýchlostí v_x , v_y a zložky zrýchlenia a_x , a_y telesa 2.

Na obr. 6 sú zobrazené závislosti trajektórie, rýchlosti a zrýchlenia sledovaného bodu z telesa 2. Namodelovaným silovým účinkom by teleso 2 dosiahlo za rovnaký čas väčšiu rýchlosť ako teleso 1, prešlo by teda aj väčšiu dráhu. Zapríčinili to reakčné sily a tiaž telies, keďže medzi telesom 1 a rámom pôsobí väčšia tiaž, ktorú spôsobuje súčet hmotností telesa 1 a 2, zatiaľ čo medzi telesom 2 a telesom 1 pôsobí len tiaž od hmotnosti telesa 2. Statické aj kinematické trecie sily závisia od normálovej sily, ktorú v tomto prípade

predstavuje tiaž v príslušných väzbách. Pri namodelovaných koeficientoch trenia sú trecie sily medzi telesom 1 a rámom väčšie a predstavujú väčší odpor voči pohybu. Predpokladali sme, že pôsobením rovnakých silových účinkov sa obidve telesá budú pohybovať po rovnako dlhej trajektórii, ktorá by v grafe závislosti trajektórie y od trajektórie x predstavovala priamku zvierajúcu s osou x uhol 45° . Trajektória telesa 2 je však dlhšia, čo zodpovedá väčšej vzdialenosti, ktorú tento blok prekonal (obr. 5).



Obrázok 5 Trajektória bloku 2 pri simulácii 1

2.2. Simulácia 2

Aby bola dráha oboch telies pri daných koeficientoch trenia rovnaká, museli by sme zvýšiť silový účinok vo väzbe 1 alebo predĺžiť dobu pôsobenia nezmenenej sily v tejto väzbe. Podmienky ďalšej simulácie sú nasledovné (obr. 7):

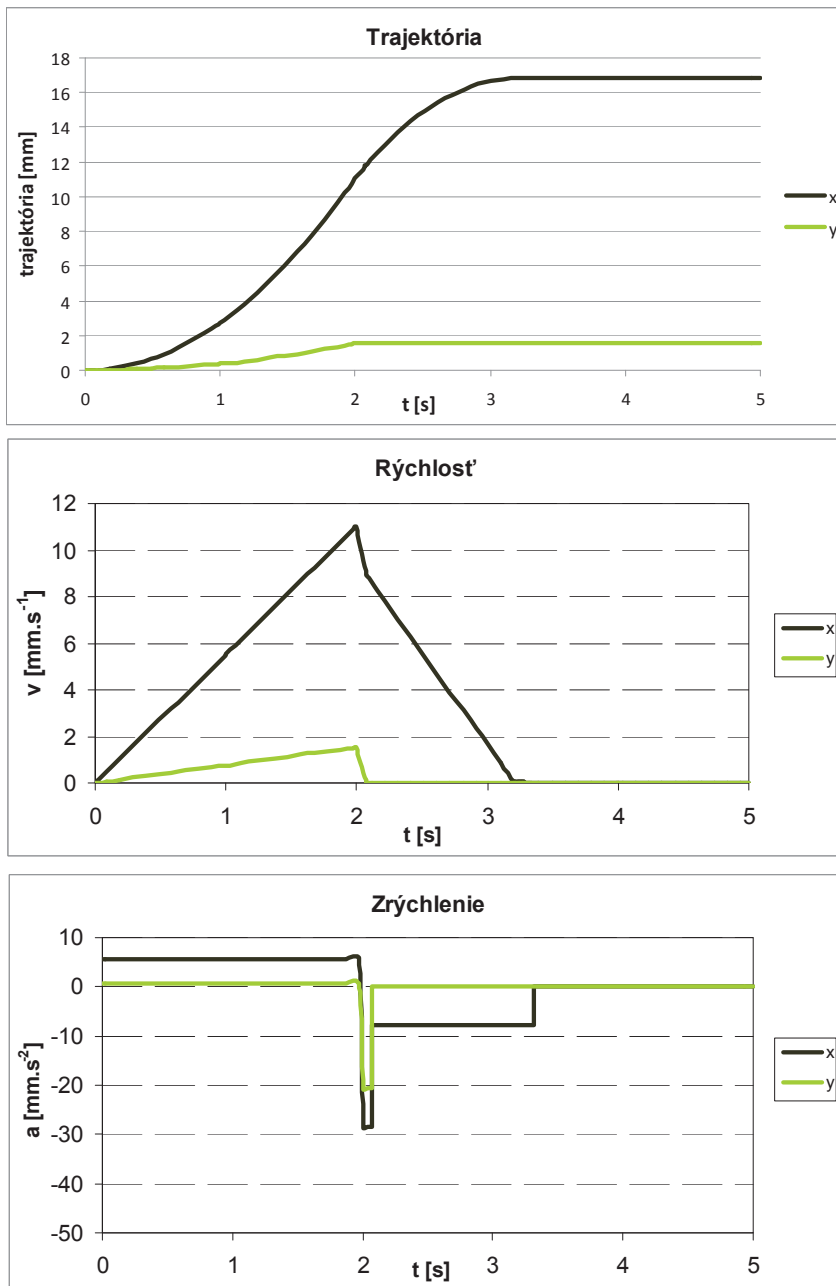
$$F_1 = 910 \text{ N v čase } 0 \text{ s} < t < 2 \text{ s,}$$

$$F_1 = 0 \text{ N v čase } 2 \text{ s} \leq t < 5 \text{ s,}$$

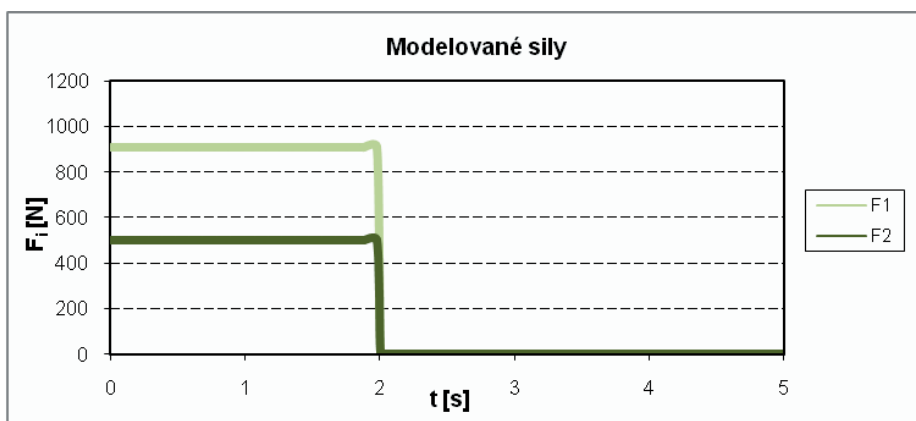
$$F_2 = 500 \text{ N v čase } 0 \text{ s} < t < 2 \text{ s,}$$

$$F_2 = 0 \text{ N v čase } 2 \text{ s} \leq t < 5 \text{ s.}$$

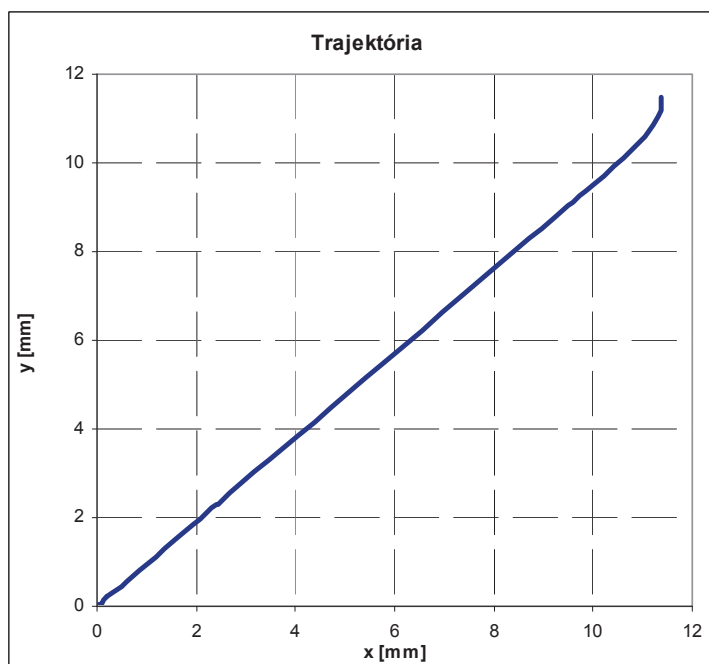
Čas, v ktorom prestanú obidve sily pôsobiť je rovnaký, zmenená je počiatočná hodnota sily F_1 na 910 N.



Obrázok 6 Trajektória, rýchlosť a zrýchlenie pri simulácii 1

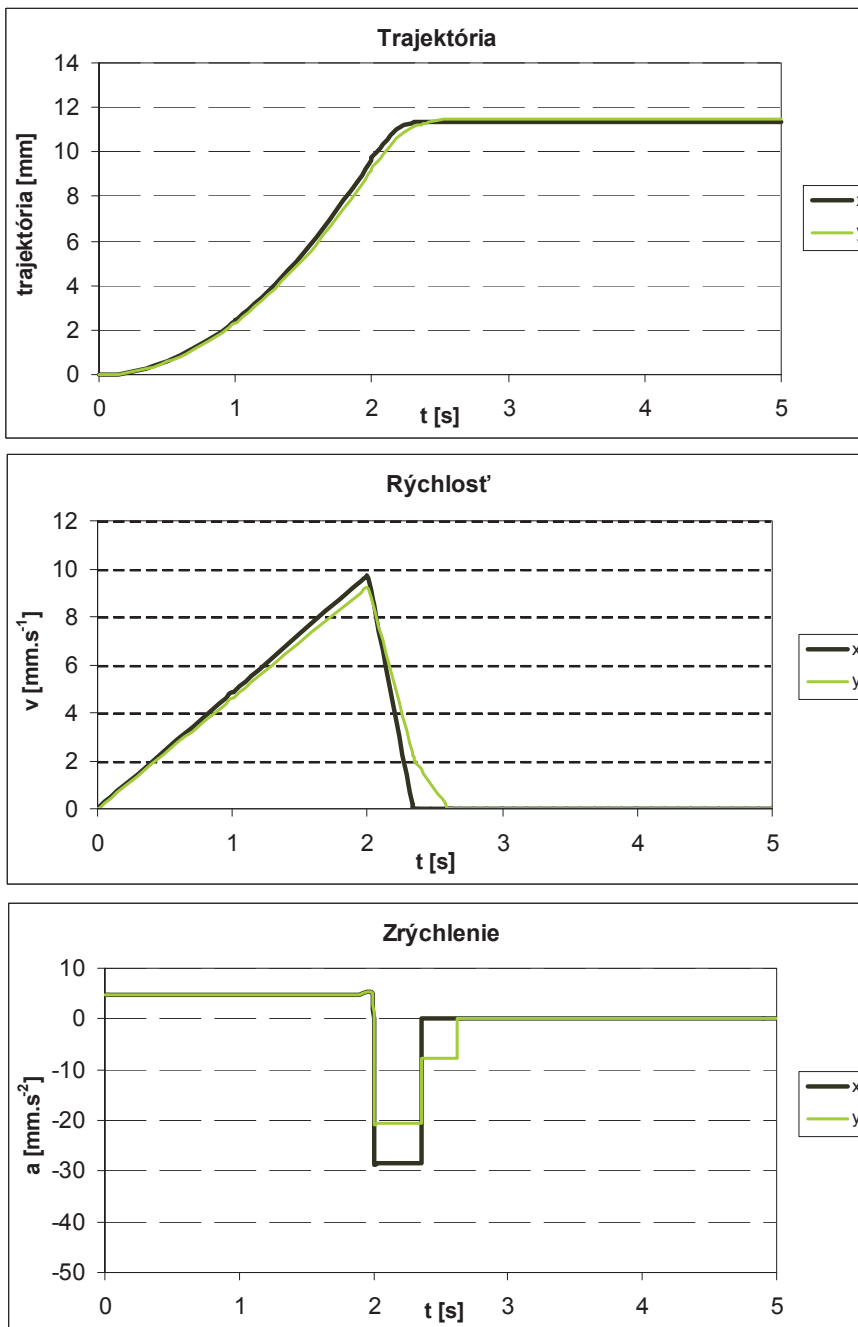


Obrázok 7 Priebeh modelovaných síl F_1 a F_2 pri simulácii 2



Obrázok 8 Trajektória bloku 2 pri simulácii 2

Rýchlosť telesa 2 má strmší nábeh, zapríčiňujú to znovu menšie trecie sily i napriek tomu, že silový účinok na teleso 1 je v tomto prípade väčší. Ak by podmienkou pre riadenie rýchlosti nebolo len dosiahnutie danej polohy, ale aj rozdiel medzi skutočnou a žiadanou polohou telies počas celého chodu, zabezpečili by sa priebehy prejdenej dráhy tak, aby bola splnená podmienka minimálneho rozdielu skutočnej a zvolenej trajektórie.



Obrázok 9 Trajektória, rýchlosť a zrýchlenie pri simulácii 2

3. ZÁVER

Pri parametrizácii akčných veličín počas riadenia pohybového systému má opodstatnenie uvažovať aj s pasívnymi odpormi vznikajúcimi vo väzbách medzi telesami. Normálová silá pôsobiaca v miestach styku dvoch telies a tiež mechanické vlastnosti stykových plôch determinujú pasívne odpory a teda aj odpor voči pohybu, čím sa ovplyvňuje správanie systému počas pôsobenia akčných síl.

Na základe simulácií pohybového systému s dvomi stupňami voľnosti je ukázaný priebeh trajektórie, rýchlosti a zrýchlenia bodu v osiach, v ktorých je umožnený pohyb. Tento pohyb je vyvolaný silou, ktorú vyvodzuje moment motora závislý od napájacieho napätia motora ako veličiny, ktorej veľkosť je možné regulovať. Poznaním aktuálnej polohy sledovaného bodu a riadením veľkosti napájacieho napätia sa dosiahne žiadaná trajektória tohto bodu. Pritom je však dôležité poznať dynamické vlastnosti systému a s ohľadom na ne voliť aj veľkosti akčných veličín.

LITERATÚRA

- [1] BODNÁR, F.: 2001. *Mechanika I. – Statika a kinematika*. Zvolene: Vydavateľstvo TU vo Zvolene, 2001, 319 strán. ISBN 80-228-0986-1.
- [2] GREPL, R.: 2007. *Modelování mechatronických systémů v Matlab SimMechanics*. Praha: Nakladatelství BEN – technická literatura, 2007, 152 strán. ISBN 978-80-7300-226-8.

*Vydanie článku je podporované riešením projektu **KEGA MŠ SR No. 3/7285/09**.*

Kontaktná adresa:

Ing. Peter Koleda
Katedra informatiky a automatizačnej techniky
Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky
Technická univerzita vo Zvolene
Študentská 26, 960 53 Zvolen
+421 455 206 637
xkoledap@is.tuzvo.sk

doc. Ing. Ľubomír Naščák, CSc.
Katedra informatiky a automatizačnej techniky
Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky
Technická univerzita vo Zvolene
Študentská 26, 960 53 Zvolen
+421 455 206 572
nas@vsld.tuzvo.sk

KOMPLEXNÝ NÁVRH ROBOTIZOVANÉHO ZVÁRACIEHO VÝROBNÉHO SYSTÉMU

THE INTEGRATED PROPOSAL OF WELDING MANUFACTURING SYSTEM

Erika SUJOVÁ – Lubomír MESÁROŠ

ABSTRACT: In the article is defined a concept „the integrated manufacturing system“ with all its components and relations. Complex manufacturing system integrates the basic modules of the manufacturing system that aggregates them around the transport system which integrates the modules and the storage node cells. In the following the article describes the methodical approach of the welding workplace proposal for specific case from practice. New workplace project has been caused by modernization of welding technology by using of industrial robot in the production plant. The aim was to design the layout of the workplace, where the industrial welding robot will be effectively integrated into existing facilities by using the original manipulating equipments.

Key words: welding, industrial robot, welding workplace

ABSTRAKT: V článku je definovaný pojem „komplexný výrobný systém“ so všetkými jeho prvkami a závislosťami. Komplexný výrobný systém integruje základné moduly výrobného systému tak, že ich zoskupuje okolo dopravného systému, ktorý prepája predmetné moduly a bunky so skladovacím uzlom. Ďalej článok uvádza metodický postup návrhu zváracieho pracoviska pre konkrétny prípad z praxe. Projekt nového pracoviska bol vyvolaný modernizáciou technológie zvarovania použitím priemyselného robota vo výrobnej prevádzke. Cieľom bolo navrhnúť také dispozičné riešenie pracoviska, v ktorom bude priemyselný zvárací robot efektívne zabudovaný do existujúcich priestorov s využitím rekonštruovaných pôvodne zabudovaných manipulačných zariadení.

Kľúčové slová: zvarovanie, priemyselný robot, zváracie pracovisko

1 ÚVOD

Súčasný trhový prostredie je charakterizované neustále sa zvyšujúcou konkurenciou. Rýchla reakcia podnikov na meniace sa požiadavky trhu je ovplyvnená flexibilitou výroby, t. j. správnym využitím kapacít a strojov, vekovou štruktúrou strojového parku a v neposlednom rade aj dynamicky navrhnutým výrobným systémom, ktorý komplexne integruje všetky jeho logistické, produkčné, manipulačné aj informačné prvky.

Aktuálne trendy zamerané na rozvoj a využívanie základných prostriedkov vedú k tomu, že treba hľadať riešenia s novým a vyšším účinkom. Tieto riešenia sú prevažne

spojené s úsilím o komplexné, koncentrované riešenie funkcií v rámci kompletu stroja, zariadenia a systému s rozširovaním vzájomne prepojených väzieb, vedúcich k nárastu a premene funkčnosti stavebných modulov a integrovaných zostáv strojových systémov. Vytvorenie zodpovedajúcich riešení je v súlade s potrebami priemyselnej praxe na inovačnú zmenu stratégie a reštrukturalizácie firemných systémov vzhľadom na trhovú adaptabilitu, efektívnosť výroby, konkurencieschopnosť a zvyšovanie úrovne poskytovaných služieb.

Problematika budovania automatizovaných výrobných systémov na seba viaže viac otázok, sú to najmä otázka technickej a realizačnej základne a jej integrácie, úroveň podnikovej prípravy výroby, konkurenčná pozícia výroby, prognózy vývoja, podniková kultúra, ale ani tie nedávajú vždy jednoznačnú odpoveď na vhodnosť tej-ktorej štruktúry (VALENČÍN, 2005; BUDA, KOVÁČ, 1985; KOŠTURIÁK, 2000). V článku je uvedený návrh komplexného výrobného systému zväracieho pracoviska, do ktorého bude v rámci inovácie výroby zabudovaný priemyselný zvärací robot. Cieľom bolo navrhnúť také dispozičné riešenie pracoviska, v ktorom bude priemyselný zvärací robot efektívne zabudovaný do existujúcich priestorov s využitím pôvodných manipulačných zariadení.

2 DEFINÍCIA KOMPLEXNÉHO VÝROBNÉHO SYSTÉMU

Výrobný systém je zoskupenie strojov za účelom výroby súčiastok. Úlohou výrobného systému je uskutočňovanie technologického procesu tak, aby z polotovaru vznikla súčiastka s predpísanými geometrickými a kvalitatívnymi vlastnosťami, ktoré sú dané technickou dokumentáciou.

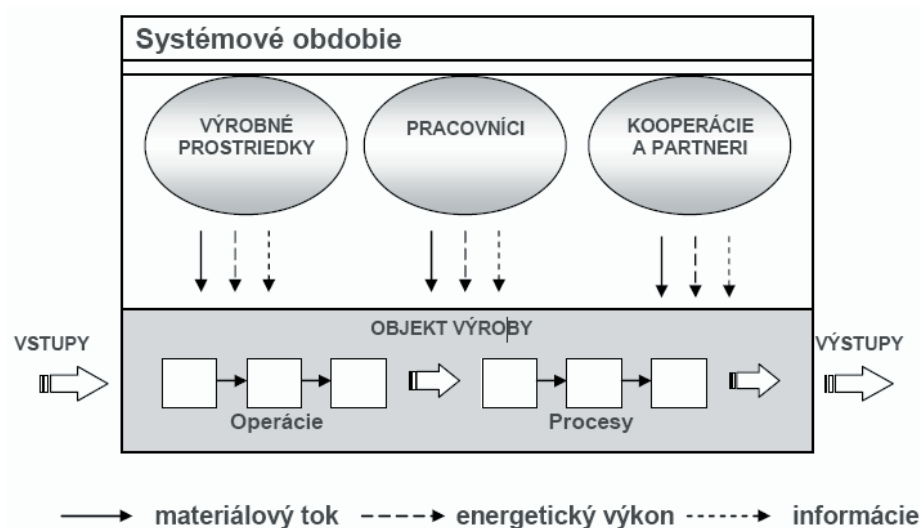
Hlavné zložky výrobného systému:

- objekty, na ktorých sa vykonávajú požadované transformácie (materiál, súčiastky, ...),
- aktívne činitele (operátory), ktoré vykonávajú transformácie, t. j. ľudia, stroje, prístroje, fyzikálne prostredie,
- procesy, prostredníctvom ktorých dochádza k zmenám tvaru, rozmerov, konfigurácie, miesta a pod.,
- vstupy a výstupy, t. j. zložky prepojenia s okolím,
- toky materiálu, energie a informácií, ktoré vytvárajú celkovú architektúru systému a spájajú jeho zložky do celku,
- pomocné zložky, ktoré sa priamo nepodieľajú na výstupoch, ale zabezpečujú ich,
- prevádzky schopnosť systému (údržba, náradie, ...),
- priestor a čas ako nevyhnutné atribúty každého systému (VILMANOVÁ, 2009).

Základné parametre výrobných systémov sú nasledovné:

- Výrobnosť – počet vyrobených objektov (vykonaných transformácií) za jednotku času. Najdôležitejší ukazovateľ výkonnosti produkčného systému.
- Produktivita – pomer medzi výstupmi produkcie a spotrebovanými vstupmi a vnútornými zdrojmi.
- Prieběžná doba – celkový čas od začatia operácií na vstupe až po kompletne ukončenie na výstupe.

- Pružnosť – schopnosť systému prechádzať na iné úlohy. Súvisí s vlastnosťou „prežiť zmeny“, t.j. prispôbovať sa novým podmienkam.
- Vyt’áženosť – pomer medzi potenciálnou a skutočnou kapacitou produkcie.
- Životnosť – časový interval do fyzického alebo morálneho opotrebenia produkčného systému.
- Spoľahlivosť – schopnosť plniť určené funkcie v priebehu požadovaného času pri zachovaní pracovných parametrov.



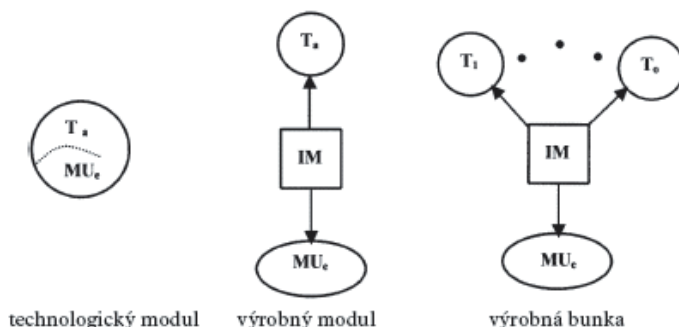
Obrázok 1 Model výrobného systému

Určujúce pre automatizované výrobné systémy je, že rozhodujúce činnosti materiálového, často aj informačného toku sa realizujú cez integračné zariadenia operačnej a medzioperačnej manipulácie (manipulátor, priemyselný robot) a dopravy (vozíkové a dopravníkové systémy), rozlišujúce sa podľa hierarchického stupňa. V prípade základného modelu výrobného systému (VS) možno symbolicky tieto skutočnosti vyjadriť vzťahom (VALENCÍN, 2005):

$$VS = [IM \xleftrightarrow{i,m} [\{T_a\}_{a=1,\dots,r}, \{MU_e\}_{e=1,\dots,p}]] \quad (1)$$

Kde: IM je integrujúce manipulačné zariadenie (manipulátor, priemyselný robot),
 T_a – technologické zariadenie (NC, CNC stroj),
 MU_e – manipulačný uzol (preberajúce a odovzdávajúce zariadenie objektov, palet),
 a – číslo technologického zariadenia,
 e – číslo manipulačného uzla,
 $\xleftrightarrow{i,m}$ – symbolické vyjadrenie informačnej a materiálovej komunikácie.

Týmto spôsobom boli zadané štandardné podoby základného modelu výrobného systému (obr. 2), formované úrovňou integrity informačných a materiálových väzieb v čase, napr. technologický modul (TM), výrobný modul (VM), výrobná bunka (VB).



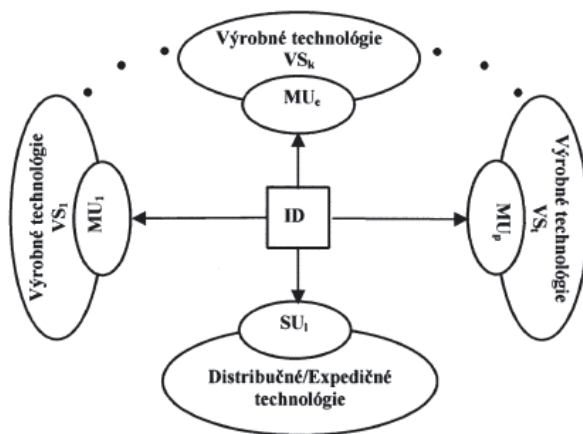
Obrázok 2 Podoby základného modelu výrobného systému (VALEŇČÍN, 2005)

Priblížiť širšie väzby informačného a materiálového toku možno až pri riešení komplexných výrobných systémov integrovaných a zoskupovaných formou prepájania základných modelov výrobných systémov a systému skladovania centrálnym systémom medzioperačnej dopravy a centrálnemu systému riadenia. Symbolicky možno štruktúru komplexného výrobného systému (KVS) vyjadriť vzťahom (VALEŇČÍN, 2005):

$$KVS = \left[ID \xleftrightarrow{i,m} \left[\{VS_k\}_{k=1,\dots,t}, \{SU_l\}_{l=1,\dots,s} \right] \right] \quad (2)$$

- Kde: ID – je integrujúci dopravný systém (vozíkový, dopravníkový),
 VS_k – základný model výrobného systému (technologický a výrobný modul, výrobná bunka),
 SU_l – skladovací uzol (medioperačný, centrálny vstupno-výstupný sklad),
 k – číslo výrobného systému,
 l – číslo skladovacieho uzla.

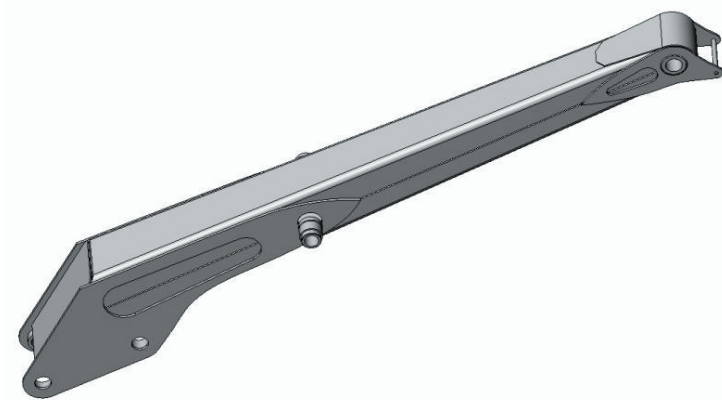
Komplexné výrobné systémy (obr. 3) rozširujú integráciu medzi základné modely výrobných systémov (technologický a výrobný modul, výrobná bunka) tak, že ich zoskupujú okolo dopravného systému, ktorý prepája predmetné moduly a bunky so skladovacím uzlom. Dopravný systém realizuje materiálový tok podľa situácie medzi skladovacím uzlom a technologickými a výrobnými modulmi, výrobnými bunkami, resp. medzi technologickými a výrobnými modulmi a výrobnými bunkami navzájom. Dosiahneme tým mnohoväzbové kombinované zlučovanie technológie a technologických profesií v podobe sériových, paralelných, sériovo-paralelných a vratných procesov.



Obrázok 3 Komplexný výrobný systém (VALENČÍN, 2005)

3 NÁVRH ZVÁRACIEHO PRACOVISKA S PRIEMYSELNÝM ROBOTOM

Požiadavkou strojárkej firmy zameranej na výrobu hydraulických žeriavov (obr. 4) bolo navrhnuť komplexný výrobný systém zváracieho pracoviska v zmenených výrobných podmienkach, vyvolaných modernizáciou technológie zváracím automatom. Modernizácia výrobného systému zváracieho pracoviska bola pre firmu nevyhnutná, pretože súčasný stav ručného zvárania je zastaraný, vykazuje nízku kvalitu zvarových spojov a nevyhovujúce pracovné prostredie (VILMANOVÁ, 2009).



Obrázok 4 Rameno hydraulického žeriava – príklad zváratej časti výrobku

K modernizácii zväracieho pracoviska bol zvolený zvärací robot ALMEGA AII-V6L výrobcu OTC DAIHEN Inc., ktorý je koncipovaný ako funkčný technologický celok spĺňajúci príslušné technické normy. Robot je montovaný na pojazdnú dráhu, polohovanie zvarov je zabezpečované použitím jedného jednoosého polohovadla s oporným koníkom a jedného dvojosého polohovadla na dvojstanicovom pracovisku. Robot pre zváranie elektrickým oblúkom je vhodný pre zváranie metódami MIG/MAG ako aj TIG. Rameno robota s dosahom až 2006 mm je veľmi efektívne pri zváraní veľkorozmerných zvarencov. Nový servokontrolný systém (NSCS) zabezpečuje rýchle reakcie robota a pohyby ramena robota, čím je dosiahnuté skrátenie pracovného cyklu.

Robot AII-V6L má na pohonoch každej osi integrované nárazové snímače, ktoré zabráňujú jeho poškodeniu v prípade kolíznej situácie. Nezávislé kĺby robota poskytujú v porovnaní s konvenčnými typmi robotov oveľa väčší pracovný rozsah. Robot tiež disponuje kompletne hermeticky uzavretou konštrukciou, čo zlepšuje jeho vodeodolnosť a prachuodolnosť. Riadiaci systém robota zabezpečuje koordináciu všetkých dostupných osí polohovadiel vrátane osí pojazdovej dráhy robota. (ROBOTEC, 2010).

Pri návrhu výrobného systému zväracieho pracoviska bolo nutné vychádzať z existujúcich prvkov: pôvodnej výrobnéj haly s určitými stavebnými prvkami a limitovanými možnosťami rekonštrukcie, v ktorej bol zabudovaný mostový žeriav pre manipuláciu so zvarcami. Inovovanému návrhu dispozičného riešenia zväracieho pracoviska (obr. 6) predchádzala analýza súčasného stavu výrobného systému. Návrh nového výrobného systému zahŕňa umiestnenie robotizovaného pracoviska do predtým nevyužívanej miestnosti výrobnéj haly, ktorá bude s pôvodnou halou prepojená zburaním priečky. Robotizované pracovisko v nej zaberie plochu 6 030 mm × 3 642 mm. Pracovisko s priemyselným robotom bude od ďalších priestorov haly oddelené priemyselnou žalúziou.

Hala bude disponovať už existujúcim mostovým žeriavom s dvoma priečnikmi, pričom bude nevyhnutné predĺžiť koľajové dráhy mostového žeriavu aj do novovzniknutej časti (obr. 6). Predĺžením dráhy pohybu mostového žeriavu z pôvodnej zvarovne aj do nového priestoru sa zabezpečí preprava zostehovaných dielov k robotu a aj dobrá manipulácia so zvarcami pri umiestňovaní do polohovadiel pred zváraním. Odkladacia zóna, situovaná vedľa zväracích pracovísk slúžiacich pre prípravu polovýrobov, slúži ako medzioperačný sklad pre zostehované diely postupujúce na robotizované pracovisko. Vedľa zväracieho pracoviska bola navrhnutá ďalšia odkladacia zóna pre konštrukcie zvarené priemyselným robotom. Po ukončení operácie zvárania bude zvarený hydraulický žeriav opäť za pomoci mostového žeriavu uložený na oceľovú paletu pre zvarené konštrukcie.

Vo vhodnom priestore v blízkosti vchodu do budovy bude umiestnené technologicko-návrhové pracovisko, kde budú pracovníci vytvárať riadiace programy pre priemyselný robot na PC. V ňom sa bude nachádzať aj riadiace centrum robota, priestor bude od ostatných priestorov haly oddelený čiastočne presklenou priečkou.

3.1 Prínosy návrhu pre súčasný výrobný systém

Návrh modernizácie prevádzky zvárania prinesie analyzovanej strojárskej firme mnoho zlepšení, týkajúcich sa hlavne organizácie a bezpečnosti práce, skvalitnenia procesu

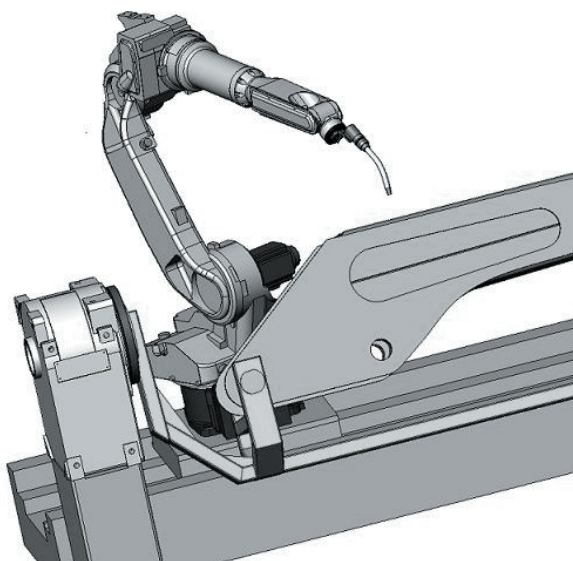
a zlepšenia pracovného prostredia. Aj keď počiatočná investícia do modernizácie prevádzky bude vysoká (presahuje 300 000 eur), podľa predbežných výpočtov sa predpokladá, že investičné náklady sa firme vrátia najneskôr do 4 rokov (VILMANOVÁ, 2009).

Použitím modernej technológie zvárania salepší kvalita zvarových spojov. Líniový upínací mechanizmus znižuje odchýlku posuvu zváracieho drôtu spôsobeného zmenami v polohe robota. Systém RS control dokáže zabezpečiť, že aj pri nepatrnom zhasnutí a opätovnom zapálení oblúka dôjde k optimálnemu pohybu zváracieho drôtu, čoho výsledkom je kvalitný zvarový spoj aj v extrémnych polohách zvárania. Optimálne parametre zvárania sú zabezpečené overeným riadiacim systémom robota, čo má vplyv na rýchlosť a kvalitu jednotlivých zvarových spojov.

Čas robotizovaného zvárania bude dvojnásobne kratší ako pri ručnom zváraní. Zmenšovaním rozlohy stehovacích pracovísk vznikne priestor pre umiestnenie technologického pracoviska priamo v hale, zväčšia sa skladovacie plochy pre stehované polovýrobky aj zvarence a zjednoduší sa manipulácia s nimi. Návrh umiestnenia ručných zváracích pracovísk umožní v nasledujúcom období ich postupnú automatizáciu bez stavebných úprav. Pri dispozičnom návrhu výrobného systému boli zohľadnené maximálne dosahy robota, ergonomické požiadavky na pracovisko z hľadiska obsluhy a aj bezpečnostné požiadavky na zváracie pracoviská (STN 05 0600 a i.).

Z hľadiska vplyvu na pracovné prostredie a obsluhu je technológia zvárania sprevádzaná vznikom fyzikálnych, chemických a iných škodlivých faktorov. V procese posudzovania rizík pôsobiacich na zvárača sú rozoznávané špecifické a nešpecifické rizikové faktory. Do skupiny špecifických rizikových faktorov patria predovšetkým: neionizujúce žiarenie, zváračské aerosóly, resp. dymy, hluk a vibrácie. Skupinu nešpecifických rizikových faktorov tvorí fyzická záťaž, psychická záťaž, pracovné polohy, mikroklima, hluk a osvetlenie (HNILICA, DADO, 2009). Použitím priemyselného robota v prevádzke budú faktory pôsobiace na zváračov čiastočne eliminované, čo vedie k zlepšeniu pracovného prostredia a znižovaniu rizík pri práci. V robotizovanom zváracom pracovisku bude možné vytvoriť efektívny odsávací systém, vedený pod úrovňou podlahy, ktorý zabezpečí odstránenie zváračských aerosólov z pracovného prostredia. Návrh vhodného odsávacieho systému vo výrobnej hale bude predmetom ďalšieho výskumu.

V rámci tvorby návrhu inovácie výrobného systému zváracieho pracoviska bol vytvorený aj 3D model dispozičného riešenia výrobnéj haly so zabudovaným priemyselným robotom v programe SolidWorks. Model môže slúžiť pre názornejšie zobrazenie haly s robotizovaným pracoviskom v rôznych smeroch pohľadu ako aj pre priestorové zobrazenie a detaily akéhokoľvek prvku výrobného systému (obr. 5). Ďalej je možné vytvoriť v ňom ďalšie simulácie procesu zvárania, ktoré môžu slúžiť aj ako vhodná didaktická pomôcka pre študentov. 3D model návrhu zváracieho pracoviska je možné si prezrieť na pracovisku autorov článku.

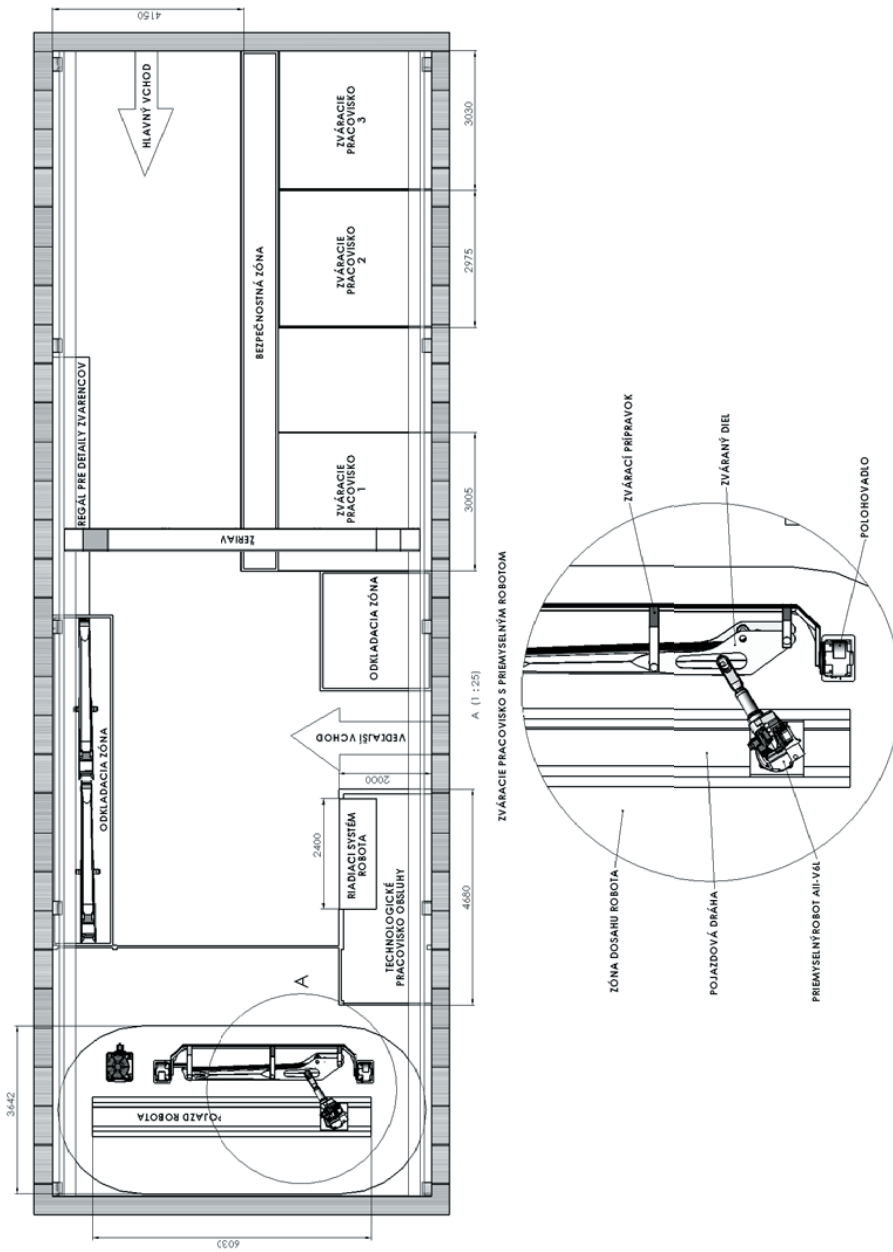


Obrázok 5 Detail zväracieho robota a upnutia obrobku

ZÁVER

V posledných desaťročiach došlo k významným zmenám v oblasti výrobných systémov, ktoré boli zásadne ovplyvňované predovšetkým zmenami na trhu. Výsledkom tohto vývoja bolo postupné znižovanie sériovosti výroby a zvyšovanie variantnosti a pružnosti výroby a postupný vývoj pružných výrobných systémov, pružných výrobných buniek a ďalších foriem výrobných systémov, ktoré boli schopné dosahovať vysokú pružnosť a produktivitu súčasne. Dnešný trh je stále viac dynamický a jeho vývoj diktuje zákazník, ktorého už neuspokojí hromadne vyrábaný výrobok. Výrobný podnik musí dnes konkurovať širokou škálou výrobkov. Rozmanitosť výrobného programu však výrazne zvyšuje zložitosť úloh projektovania a riadenia výroby. Splnenie požiadavky na skrátenie celkového výrobného cyklu výrobku, od jeho návrhu až po jeho dodávku k zákazníkovi s čo najmenšími nákladmi vo výrobe je najdôležitejší predpoklad úspechu podniku.

Článok priniesol návrh riešenia konkrétneho problému z praxe. Riešený bol návrh komplexného výrobného systému zväracieho pracoviska so zabudovaním priemyselného robota ALMEGA AII-V6L za predpokladu využitia existujúcich priestorov výrobnéj haly a manipulačných zariadení. Inovácia výrobnéj technológie prostredníctvom zakúpenia nového zväracieho robota a racionálna prestavba výrobnéj haly podľa požiadaviek zväracieho pracoviska prinesie firme okrem zvýšenia konkurencieschopnosti aj mnoho ďalších výhod: dosiahnutie zvýšenia kvality vyrábaných produktov, vyššiu flexibilitu na zmeny výrobného programu, vyššiu bezpečnosť a ochranu zdravia pri práci, zlepšenie pracovných podmienok, zníženie energetickej náročnosti a i.



Obrázok 6 Komplexný návrh zvaracieho výrobného systému s použitím priemyselného robota ALMEGO AII –V6L

Použitie novej technológie zvárania bude pre firmu znamenať v budúcom období aj možnosť prehodnotenia celej koncepcie výrobkov a to hlavne s ohľadom na ich konštrukčný návrh. Inovácia výrobkov s určitou prinesie prehodnotenie použitých výrobných technológií a vytvorí tlak na unifikáciu riešení z pohľadu celého výrobného sortimentu napríklad pri návrhu použitých materiálov, tvarovej zložitosti na úkor počtu dielov alebo zväracích prípravkov spoločných pre viac typových radov výrobkov. Uvedené skutočnosti určite prispievajú k skráteniu doby návratnosti investície.

LITERATÚRA

- AII-V6L. Robot pre zváranie elektrickým oblúkom. [online] [cit. 2010-05-19] Dostupné na internete: <http://www.robotec.sk/AII-V6L.html>
- BUDA, J., KOVÁČ, M. 1985. *Metodika projektovania výrobných procesov v strojárstve*. Bratislava: Alfa, 1985.
- HNILICA, R., DADO, M. 2009. Kumulatívne pôsobenie faktorov pracovného prostredia na zvärača. In *Aktuálne otázky bezpečnosti práce = New trends in safety and health : XXII. medzinárodná konferencia : Štrbské Pleso – Vysoké Tatry, 18.–20. 11. 2009*. Košice : Technická univerzita v Košiciach, 2009, s. 116–121. ISBN 978-80-553-0220-1.
- KOŠTURIAK, J. et al. 2000. *Projektovanie výrobných systémov pre 21. Storočie*. Žilina : ŽU, 2000.
- STN 05 0600 *Zváranie*. Bezpečnostné ustanovenie pre zváranie kovov. Projektovanie a príprava pracovísk.
- VALEČNÍK, Š. 2005. Logistika štruktúr výrobných systémov. In *AT&P journal 9/ 2005*, Dostupné na internete: <http://www.atjournal.sk/casopisy/atp_05/pdf/online11.pdf>
- VILMANOVÁ, V. 2009. *Návrh výrobného systému zväracieho pracoviska*. Diplomová práca. TU vo Zvolene, 2009. 75 s.

Kontaktné adresy:

Ing. Erika Sujová, PhD.

Katedra výrobných technológií a materiálov, Fakulta environmentálnej a výrobnej techniky
TU vo Zvolene, Študentská č. 26, 960 53 Zvolen, email: esujova@vsld.tuzvo.sk

Ing. Ľubomír Mesároš

Katedra výrobných technológií a materiálov, Fakulta environmentálnej a výrobnej techniky
TU vo Zvolene, Študentská č. 26, 960 53 Zvolen, email: mesaros@vsld.tuzvo.sk

ZAPLNENIE LOŽISKOVEJ MEDZERY MAZACÍM OLEJOM

FÜHLUNG VON LAGERSPALTE MIT DEM SCHMIERÖL

Mária SEDNIČKOVÁ – Ján SEKEREŠ

ABSTRACT: Der Absatz enthält Experiment- Festgestellte Werte von gefühlter Lagerspalte mit dem Schmieröl bei Hydrodynamischen Schmierung des Radial-Gleitlagers. Das Schmieröl ist zum Lager durch Einzelnen Öffnung unter 0° ab Resultante der Lagerbelastung zugeführt. Das Öl ist zum Lager unter Druck in Grenzgebiet von 0,1 bis 0,6 MPa zugeführt.

Schlussworte: Radial-Gleitlager, Flüssigkeitsreibung, Grenzreibung, Lagerspiel-Lagerspalt, Schmierfilm

ABSTRAKT: Článok obsahuje experimentálne zistené hodnoty zaplnenia ložiskovej vôle mazacím olejom pri hydrodynamickom mazaní radiálneho klzného ložiska. Mazací olej je privádzaný do ložiska osamelým otvorom pod uhlom $\gamma = 0^\circ$ od výslednice zaťaženia ložiska. Olej je do ložiska privádzaný pod tlakom v rozmedzí od 0,1 až 0,6 MPa.

Kľúčové slová: radiálne klzné ložisko, kvapalinové trenie, medzné trenie, ložisková vôľa, mazací film

ÚVOD

Strojové uzly, z ktorých sa skladajú lesné stroje a mechanizačné prostriedky, pozostávajú v niektorých prípadoch z klzného uloženia hriadeľa v radiálnom klznom ložisku. Úlohou hriadeľa je umožniť relatívny pohyb hriadeľa vzhľadom na rám stroja, pričom prenáša statické alebo dynamické zaťaženie.

Ak má klzné ložisko spĺňať uvedenú funkciu počas jeho životnosti, je ho potrebné správne konštrukčne navrhnuť. Z hľadiska rozmerov a správneho prevádzkovania je potrebné:

- určiť potrebné množstvo mazacieho oleja pre dostatočné mazanie
- potrebný prívodný tlak oleja a miesto vstupu oleja do ložiska vzhľadom na výslednicu zaťaženia ložiska pri statickom, respektíve kvázistatickom zaťažení.

Pre hydrodynamické mazanie klzného ložiska je potrebné, aby bola ložisková vôľa zaplnená mazacím olejom v tzv. tlakovej zóne, ktorá je na Obr. 1 ohraničená bodmi $A_1 - D$. Túto skutočnosť ovplyvňuje dopravované množstvo a tlak oleja.

V článku sú uvedené experimentálne namerané hodnoty zaplnenia ložiskovej vôle olejom. Pre statické zaťaženie ložiska s jednou polohou vstupu oleja do ložiska pod uhlom $\gamma = 0^\circ$ (vid. Obr. 1) a pre vstupný tlak oleja v rozmedzí $p_o = 0,1 \div 0,6 \text{ MPa}$.

1. TEORETICKY STANOVENÉ PRIETOKOVÉ MNOŽSTVO OLEJA PRE VZNIK HYDRODYNAMICKÉHO MAZANIA

Prietokové množstvo oleja, v ľubovoľnom mieste medzery, je stálou veličinou, ktorá je v ložisku jednotkovej šírky bez bočného úniku oleja daná [1] vzťahom:

$$Q_1 = \frac{u \cdot h}{2} - \frac{1}{2 \cdot \eta} \frac{dp}{dx} \frac{h_3}{6} \quad (1)$$

$$\text{kde: } u = r \cdot \omega \quad (2)$$

$$h = \Delta r + e \cdot \cos \varphi \quad (3)$$

Priebeh tlaku v medzere:

$$\frac{dp}{dx} = 6 \cdot \eta \cdot u \cdot \frac{h - h^*}{h^3} \quad (4)$$

Pre valcové ložisko:

$$dx = r \cdot d\varphi \quad (5)$$

po úprave

$$dp = \frac{6\eta\omega}{\varepsilon^2} \frac{(q + \cos\varphi) - (q + \cos\varphi^*)}{(q + \cos\varphi)^3} \cdot d\varphi \quad (6)$$

kde

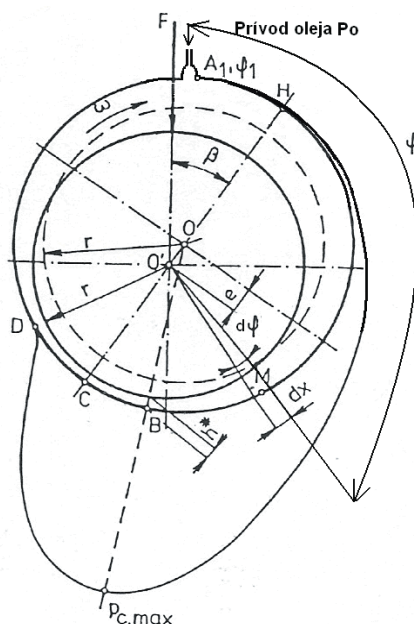
$$q = \frac{\varepsilon}{\psi} \quad (7)$$

$$\Delta r = \psi \cdot r \quad (8)$$

$$e = \varepsilon \cdot r \quad (9)$$

Prietokové množstvo oleja po integrovaní a dosadení pre polohu bodu A_1 (Obr. 1)

$$Q_1 = 0,5 \cdot \varepsilon \cdot r^2 \cdot \omega [(q + \cos\varphi) - (\cos\varphi_1 - \cos\varphi^*)] \quad (10)$$



Obr. 1 Rozloženie tlaku oleja

Ak má ložisko konečnú šírku l , pretečie potom bodom A_1 a všetkými ďalšími bodmi až po bod D (tlaková zóna) množstvo oleja.

$$Q = Q_1 \cdot l \quad (11)$$

po úprave

$$\frac{Q}{r^3 \varepsilon \omega} = \frac{1}{2r} (q + \cos \varphi^*) = \frac{1}{d} (q + \cos \varphi^*) \quad (12)$$

Spotreba mazacieho oleja podľa (12) platí pre ideálne ložisko bez bočného úniku oleja, šírky l a pri neustálom odvádzaní už opotrebovaného oleja, ktorý prešiel ložiskovou medzerou. Ak by sa olej neodvádzal (neopotreboval sa) stačilo by medzeru medzi puzdrom a čapom hriadeľa naplniť jednorazovo množstvom, ktoré by v medzere

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot l \cdot \varphi \quad (13)$$

trvale cirkulovalo bez jeho obnovovania. Tento prípad v technickej praxi nie je možný, pretože olej sa v priebehu prevádzky opotrebováva. Odvádza z ložiska vnútorné teplo a vyplavuje oterové častice.

2. LOŽISKO S BOČNÝM ÚNIKOM MAZACIEHO OLEJA

Matematické vzťahy pre spotrebu mazacieho oleja, ktoré sú uvedené v kapitole 1, platia v plnom rozsahu len pre ideálne ložisko jednotkovej, resp. konečnej šírky l , ale bez bočného úniku oleja na oboch koncoch šírky ložiska. Z dôvodu opotrebovania oleja, vyplavovania oterových častíc a odvádzania tepla, ktoré v ložisku vzniká v dôsledku trenia, pre prevádzku skutočného ložiska je potrebné počítať s bočným únikom oleja. To ale zmení vyšetrované pomery v ložisku. Predovšetkým klesne tlak v medzere, čo zapríčiňuje pokles nosnosti ložiska. Zmenia sa trecie pomery a zvýši sa potrebné množstvo mazacieho oleja. Zmeny budú tým väčšie, čím bude ložisko vzhľadom k svojmu priemeru užšie, vtedy čím menšia bude hodnota pomeru l/d , kde l je šírka ložiska a d je vnútorný priemer ložiska.

Prechod na skutočné ložisko s bočným únikom oleja je náročný, pretože chýbajú univerzálne použiteľné a presné podklady, ako sú pokles tlaku v medzere a zaplnenie medzery mazacím olejom v závislosti na tlaku dopravovaného oleja do ložiska. Práve experimentálne zistenie zaplnenia medzery mazacím olejom je cieľom riešenej úlohy.

3. EXPERIMENTÁLNE MERANIA NA ZISTENIE SKUTOČNÉHO ZAPLNENIA LOŽISKOVEJ MEDZERY MAZACÍM OLEJOM

Zistiť skutočné zaplnenie medzery olejom je náročné. Ako najjednoduchšie riešenie daného problému sa javí vyhotovenie ložiskového púzdra z priehľadného materiálu, čo umožňuje vizuálne zistiť rozsah zaplnenia a toto zaplnenie odmerať na obvode diery v púzdre.

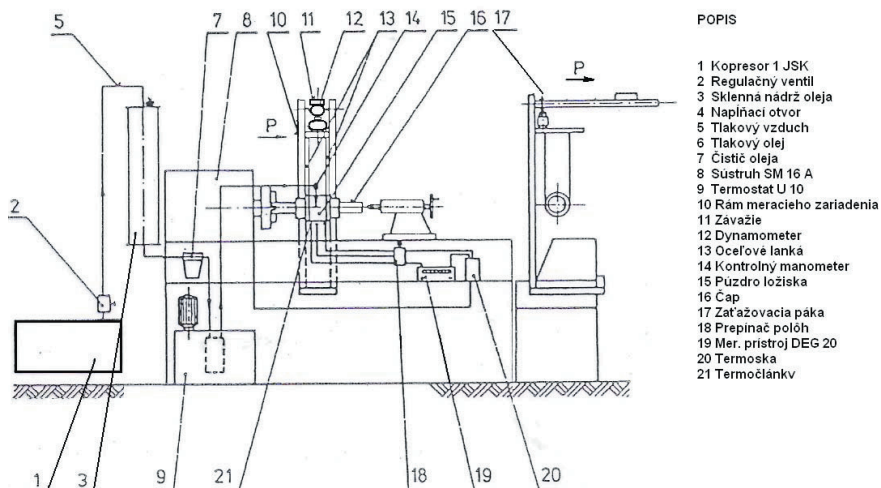
Na vyhotovenie prehľadného púzdra sme použili ako materiál plexisklo, ktorého vonkajší povrch i povrch diery púzdra leštením získal dostatočnú priehľadnosť pre vizuálne zistenie zaplnenia medzery Obr. 2.



Obr. 2 Ložisko z plexiskla

Rozmery púzdra:
vonkajší priemer: 118 mm
vnútorný priemer: 59 mm
šírka púzdra: 50 mm

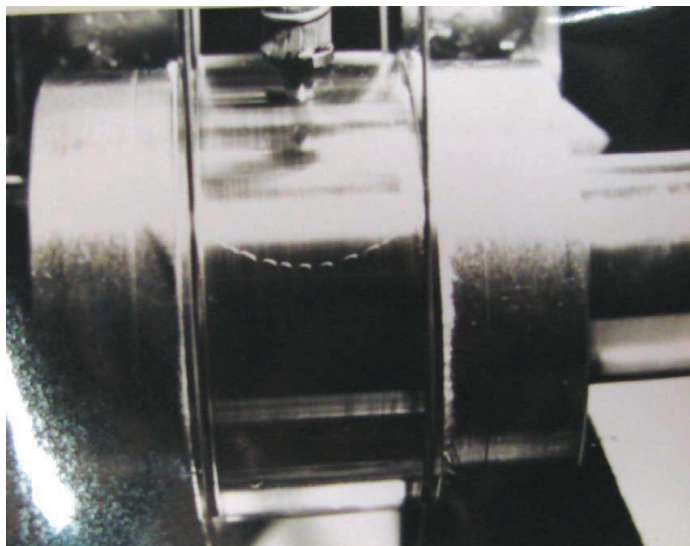
Púzdro ložiska sme zaťažovali pomocou dvoch oceľových laniek zaťažovacím závažím cez dynamometer, pomocou ktorého bolo ložisko zaťažené silou $F = 1\,000\text{ N}$. Schematické zobrazenie experimentálneho zariadenia je vidieť na Obr. 3.



Obr. 3 Schematicky zobrazené meracie zariadenie

Mazací olej bol do púzdra ložiska dopravovaný osamoteným otvorom, pod tlakmi $p_0 = 0,1\text{ MPa}, 0,2\text{ MPa}, 0,3\text{ MPa}, 0,4\text{ MPa}, 0,5\text{ MPa}$ a $0,6\text{ MPa}$.

Na fotografii Obr. 4 vidieť zaplnenie medzery mazacím olejom.



Obr. 4 Stav zaplnenia medzery olejom pri uhle $\gamma = 0^\circ$

4. METODIKA MERANIA ZAPLNIENIA MEDZERI OLEJOM

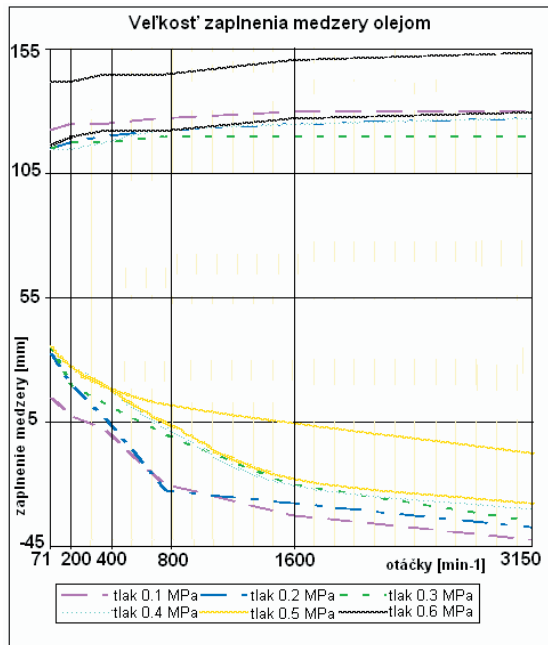
Po ustálení prietokových pomerov v medzere ložiska sme odmerali dĺžku oblúka zaplneného olejom na vonkajšom priemere púzdra. Tomu odpovedajúca dĺžka v ložiskovej medzere sa stanoví z pomeru vonkajšieho obvodu púzdra k vnútornému. V našom prípade je pomer $K1 = \frac{370,52}{185,3} = 2,0$.

Namerané hodnoty sú uvedené v nasledujúcej tabuľke.

Tabuľka 1 Namerané hodnoty

č. m.	otáčky – počet/min.	tlak 0,1 MPa	tlak 0,2 MPa	tlak 0,3 MPa	tlak 0,4 MPa	tlak 0,5 MPa	tlak 0,6 MPa
1	71	15/122,5	32,5/115	35/115	35/115	35/115,5	35/116
2	200	7,5/125	20/117,5	20/117,5	27,5/115	27,5/115,5	27,5/120
3	400	2,5/125	7,5/120	13/117,5	20/117,5	20/120	20/122,5
4	800	-20/127,5	-22,5/122,5	0/120	2,5/122,5	5/125	12,5/122,5
5	1600	-32,5/130	-27,5/125	-20/120	-20/125	-17,5/130	5/127,5
6	3150	-42,5/130	-37,5/127,5	-35/120	-30/127,5	-27,5/130	-7,5/130

Hodnoty z tabuľky sú vynesené do diagramu (Obr. 5), na ktorom sú na zvislej osi vynesené namerané hodnoty zaplnenia medzery olejom v mm. Kladné hodnoty predstavujú zaplnenia v pretlakovej zóne. Záporné hodnoty v podtlakovej zóne. Na vodorovnej osi sú vynesené otáčky čapu ložiska.



Obr. 5 Graf nameraných hodnôt

5. ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV

Z experimentálne zistených hodnôt dĺžky zaplnenia ložiskovej medzery je vidieť, že pri malých vstupných tlakoch $p_0 = 0,1 \div 0,3$ MPa (ktorými je mazací olej do ložiska dopravovaný) a vysokých obvodových rýchlostiach je zaplnenie v pretlakovej zóne (A_1 až D, Obr. 1) najmenšie. Olej je strhávaný aj do podtlakovej zóny (v tabuľke označené hodnoty so znamienkom $-$). Do podtlakovej zóny je olej strhávaný aj pri vyšších vstupných tlakoch $p_0 = 0,4 \div 0,6$ MPa a vysokých obvodových rýchlostiach. Optimálne zaplnenie bolo namerané pre tlaky $p_0 = 0,4 \div 0,6$ MPa a vyššie obvodové rýchlosti, odpovedajúce otáčkam čapu 800 až 3150 min^{-1} .

Z uvedeného rozboru je zrejmé, že pri nižších vstupných tlakoch $p_0 = 0,1 \div 0,3$ MPa pre celý rozsah meraných obvodových rýchlostí, dochádza k medznému mazaniu.

Pre bezpečnú prevádzku ložiska je preto potrebné do ložiska dopravovať olej pod tlakom $p_0 > 0,3$ MPa.

6. ZÁVER

Experimentálne zistené hodnoty zaplnenia zodpovedajú teoretickým predpokladom pri výpočte potrebného množstva oleja a vstupného tlaku pre mazanie radiálneho klzného ložiska, ktoré je staticky zaťažované pričom olej sa do neho dopravuje osamelým otvorom pod uhlom $\gamma = 0^\circ$ (vid. Obr. 1).

V budúcnosti by bolo potrebné vykonať experimenty i pre väčšie radiálne zaťaženia a pre rôzne uhly γ .

LITERATÚRA

- [1] LEYER, A.: 1962. *Theorie des Gleitlagers bei Vollschnierung*. Berlin, Verlag Technische Rundschau, 1962.
- [2] SIVÁK, M.: 1967. *Príspevok k hydrodynamickej teórii radiálnych klzných ložísk*. Zborník vedeckých prác Drevárskej fakulty VŠLD č. 2. Zvolen 1967.
- [3] SEKEREŠ, J.: 1999. *Problematika mazania klzných uložení*. Habilitačná práca, 75 strán, Zvolen, 1999.
- [4] GÖTTNER, G.H.: 1996. *Einführung in die Schmiertechnik*. Teil 2. Düsseldorf, Merklein – Veerlag, 1996.
- [5] STN 02 34 00.: 1987. *Výpočet staticky zaťažených a hydrodynamicky mazaných radiálnych klzných ložísk*. Praha, Vydavatelství ÚNM, 1987, 72 strán.

Článok vznikol na základe výskumného zámeru a riešenia vedeckého grantového projektu: VGP 1/0418/08 „Vplyv mazania na tribológiu radiálnych klzných ložísk pre lesné mechanizačné prostriedky“.

Kontaktná adresa:

Ing. Mária Sedničková, doc. Ing. Ján Sekereš, CSc.
Katedra mechaniky a strojnictva FEVT, Technická univerzita vo Zvolene
Študentská 26, 960 53 Zvolen

VYUŽITIE INERCIÁLNYCH MEMS SENZOROV V ADAPTÍVNOM RIADENÍ KROKOVÝCH MOTOROV

EXPLOATION OF INERTIAL MEMS SENSORS IN THE CONTROL OF STEPPINGS MOTORS

Marcel BARIAK – Jozef ŠURIANSKY

ABSTRACT: The article describes possibility of use of MEMS inertial sensors in stepping motor control and processing of measured signals in graphical background designed in Matlab. Analysis of signals is based on comparison of discrete function waveforms in dependence on shape of exciting current in time zone before and after filtering.

Key words: inertial sensor, Matlab, stepping motor, filter

ABSTRAKT: Článok popisuje možnosť využitia MEMS inerciálnych senzorov v riadení krokových motorov. Spracovanie nameraných signálov bolo realizované v grafickom prostredí navrhnutom v Matlabe. Použitá analýza signálov bola založená na porovnaní priebehov diskretných funkcií v závislosti od tvaru budiaceho prúdu v časovej oblasti pred a po odfiltrovaní.

Kľúčové slová: inerciálny senzor, Matlab, krokový motor, filter

1. ÚVOD

Vývojom inerciálnych senzorov a zmenou kardánových inerciálnych navigačných systémov na bezkardánové tzv. strap-down inerciálne navigačné systémy oblasť použitia MEMS inerciálnych senzorov výrazne zmenila. Cena inerciálnych MEMS senzorov je výrazne nižšia ako pri konvenčných inerciálnych navigačných systémoch, čím sa oblasť využitia rozšírila z oblasti predovšetkým letectva do oblastí:

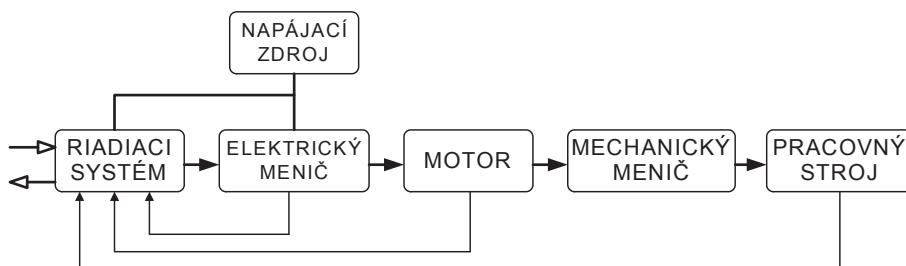
- regulácie a riadenia
- robotiky
- navigácie a stabilizácie telesa
- stabilizácie obrazu
- analýzy a riadenia pohybu
- inerciálnych meracích jednotiek
- všeobecnej navigácie

Predmetom článku je ukázať využitie inerciálneho MEMS senzora v aplikácii servopohonu s krokovým motorom (KM), ktorý je možné použiť pri polohových a rýchlostných

ervopohonoch. Použitím inerciálneho MEMS senzora v spätnej väzbe z pracovného stroja (Obrázok 1) resp. z posledného člena kinematického reťazca je možné analyzovať prejav budiaceho signálu na KM resp. na pracovný stroj alebo nástroj. Analýza nameraných signálov zahŕňa predovšetkým získanie charakteristickej zložky signálu, ktorá odpovedá tvaru budiaceho prúdu KM. Na základe analýzy signálu je potom možné meniť tvar prúdu tak, aby vyhovoval požiadavkám podľa aplikácie pre rýchlosť, plynulosť, polohu a moment KM. Spomínané požiadavky vychádzajú z momentovej charakteristiky danej KM a momentom zotrvačnosti.

1.1. Servopohon

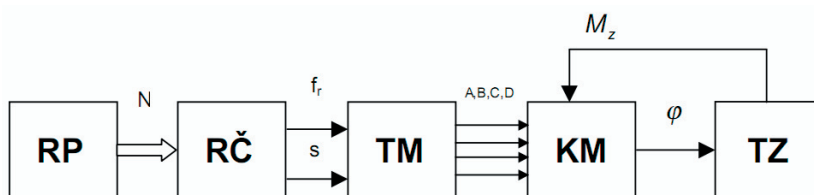
Servopohon je možné posudzovať ako systém s vnútorne usporiadanou kombináciou subsystémov. Počet a druh týchto subsystémov a ich usporiadanie závisí na konkrétnom type servopohonu. Typické usporiadanie jednomotorového servopohonu je na Obrázku 1 – (Žalman, 2003).



Obrázok 1 Základná štruktúra elektrického jednomotorového servopohonu – (Žalman, 2003)

1.2. Elektromagnetické krokové motory

Elektromagnetické krokové motory sú mnohopólové a mnohofázové synchronné motory. Predstavujú výkonový prevodník čísla – N na polohu – φ (Obrázok 2). Blokovaná schéma obsahuje: RP – Riadiaci počítač, RČ – Rozbehový člen, TM – tranzistorový člen, KM – krokový motor, TZ – technologické zariadenie – (Žalman, 2003).

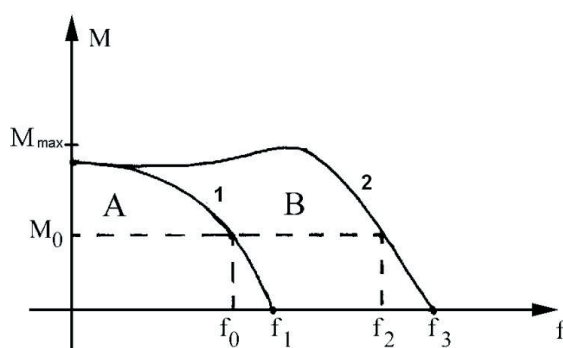


Obrázok 2 Blokovaná schéma číslicového otvoreného polohového servopohonu s krokovým motorom – (Žalman, 2003)

1.3. Momentová charakteristika

Momentová charakteristika KM je závislosť momentu M_z na kmitočte krokov f_k buďdeného motora, ktorý sa otáča a je zaťažovaný. Krivka 2 je tzv. **prevádzková charakteristika** KM. Krivka 1 je tzv. **rozbehová charakteristika** motora pre moment zotrvačnosti záťaže J_z . Pre momentové charakteristiky KM (Obrázku 3) je charakteristické rozdelenie na dve oblasti – (Pavelka, Čeřovský, Javůrek, 1999).

Oblasť A, označovaná štart/stop alebo rozbehová, zahŕňa dva stavy, do ktorých sa KM môže dostať z kľudu bez straty kroku. Napríklad pri zaťažovacom momente M_0 môžeme skokom priviesť riadiaci kmitočet f_0 . Riadiaci kmitočet f_1 môžeme priviesť len vtedy, keď KM pracuje naprázdno – (Pavelka, Čeřovský, Javůrek, 1999).

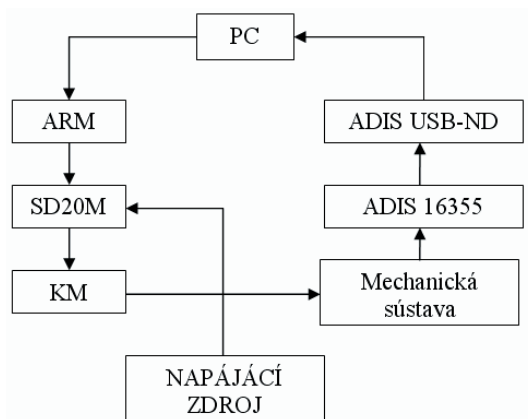


Obrázok 3 Momentová charakteristika krokového motora – (Pavelka, Čeřovský, Javůrek, 1999)

Oblasť B, je oblasť riadeného zrýchľovania KM, označovaná ako oblasť obmedzeného riadenia. V tejto oblasti je nutné plynulo (nie skokom) zvyšovať riadiaci kmitočet, aby nedochádzalo ku strate kroku. Napríklad pri zaťažovacom momente M_0 je možné pri plynulom zvyšovaní riadiaceho kmitočtu z hodnoty f_0 dosiahnuť až hodnotu f_2 . Kmitočet f_3 je najvyšší, prevádzkový riadiaci kmitočet, pri ktorom KM bez záťaže je schopný sa otáčať v jednom smere. Motor sa na tento kmitočet môže rozbehnúť alebo z neho zastaviť bez straty kroku. M_{max} je najvyšší prevádzkový moment, ktorým môže byť KM zaťažený – (Pavelka, Čeřovský, Javůrek, 1999).

2. MODEL MERANIA

Model je elektromechanický systém tvorený štvorfázovým KM, ktorý prostredníctvom riadiaceho systému SD20M MICROCON je ovládaný vývojovou doskou MCB-STM32C (ARM). Riadením a mechanickým usporiadaním sa dosiahol prevod riadiacich impulzov na lineárny periodický pohyb, ktorý je snímaný inerciálnym senzorom zrýchlenia. Bloková schéma modelu elektrického pohonu je zobrazená na Obrázku 4.



Obrázok 4 Bloková schéma modelu elektrického pohonu

2.1. Sequencer SQ1486

Doska SD20M obsahuje výkonovú časť pre bipolárne napájanie krokového motora s pulznou reguláciou prúdu a sequencer SQ1486 pre riadenie prúdu.

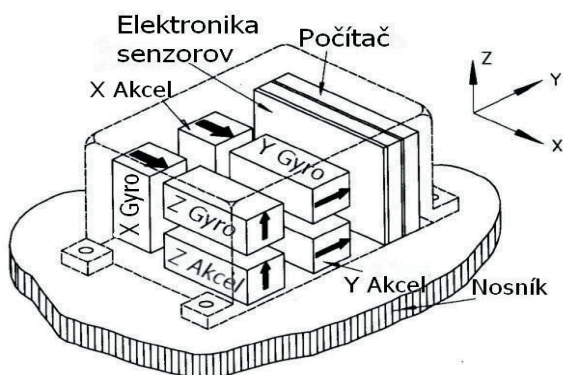
Rozdeľovač (sequencer) umožňuje nastaviť tvar prúdu vhodný pre jemnejší beh alebo statické polohovanie vzhľadom k typu motora a momentovej záťaži. Možnosť delenia kroku až na 64 mikrokrokov a nastavenia 15 tvarov priebehov prúdu (Tabuľka 1). Pre nastavenie mikrokrokov a tvaru prúdu slúžia spínače DIPA a DIPB umiestnené na doske SDM20.

Tabuľka 1 Priebehy prúdov nastaviteľné DIPB spínačom

tvar sinusoidy	zúžený tvar	plnší tvar	lichobežníkový tvar
S-priebeh	mierny	mierny	úzky
mierny	stredný	stredný	stredný
výrazný	výrazný	výrazný	široký
veľmi výrazný	trojuholník	veľmi výrazný	

2.2. Inerciálny senzor zrýchlenia MEMS 16355

ADIS 16355 je inerciálny senzor určený na meranie uhlových zrýchlení a zrýchlení v troch osiach – šesť stupňov voľnosti. Senzor je zložený z iMEMS komponentov a obvodov signálového spracovania s vysokou integráciou. Výstupné dáta sú získavané štandardom zbernice SPI. Primárnymi senzormi sú senzory uhlovej rýchlosti a akcelerometre umiestnené do trojrozmerného súradnicového systému (Obrázok 5) tak, aby každej osi meraného objektu zodpovedala os citlivosti primárnych senzorov.



Obrázok 5 Bezkrdánový inerciálny navigačný systém

Na modeli je senzor osadený na vývojovej doske ADIS USB-ND (Obrázok 6), ktorá je umiestnená na modeli lineárneho periodického pohybu tak, aby snímač detegoval zrýchlenie v x-ovej osi. Citlivosť akcelerometrov je 2.522 mg. Snímané dáta sú vysielané z ADIS USB-ND do PC zbernicou USB, kde sú ďalej spracované.



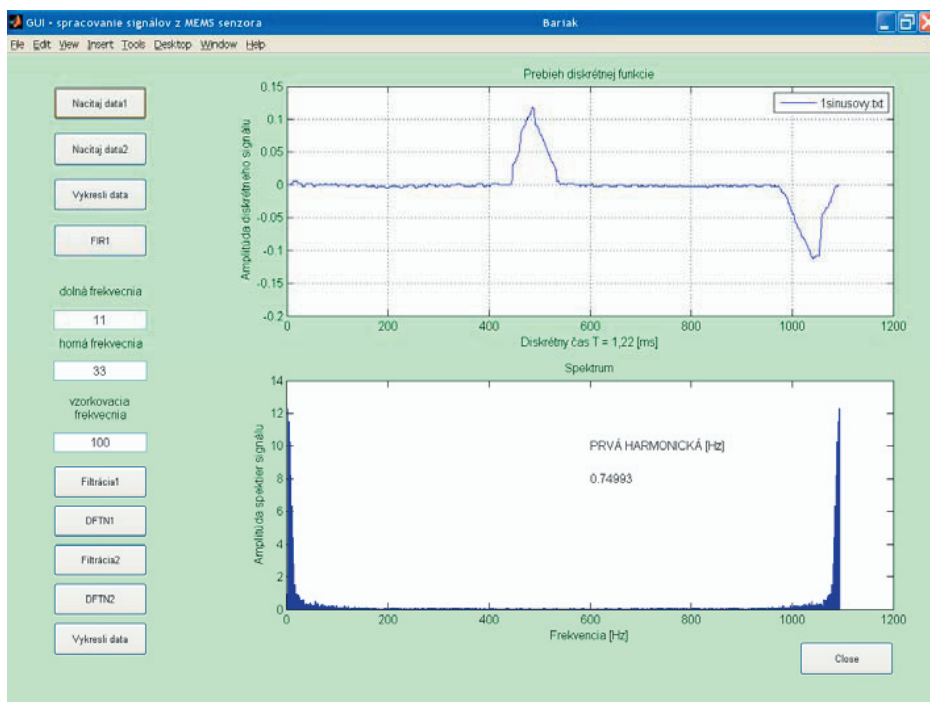
Obrázok 6 Umiestnenie MEMS 16355 na vývojovej doske ADIS USB-ND

3. MERANIE

Meranie je založené na snímaní zrýchlení lineárneho periodického pohybu MEMS senzorom a následnej analýze vplyvu budiaceho tvaru prúdu KM na mechanický pohyb lineárneho modelu. Pred snímaním zrýchlenia lineárneho periodického pohybu bol sequencer nastavený na základné mikrokrokovanie, aby vplyv tvaru budiaceho prúdu KM

bol najvýraznejší na snímanom zrýchlení rotora a vstupný riadiaci signál z MCB STM32C je konštantného kmitočtu.

Signály boli zosnímané pomocou softvéru Analog Device – ADiS 163xx Evaluation Software – Rev 14 do PC konštantnou periódou $T = 1.22 \text{ ms}$.

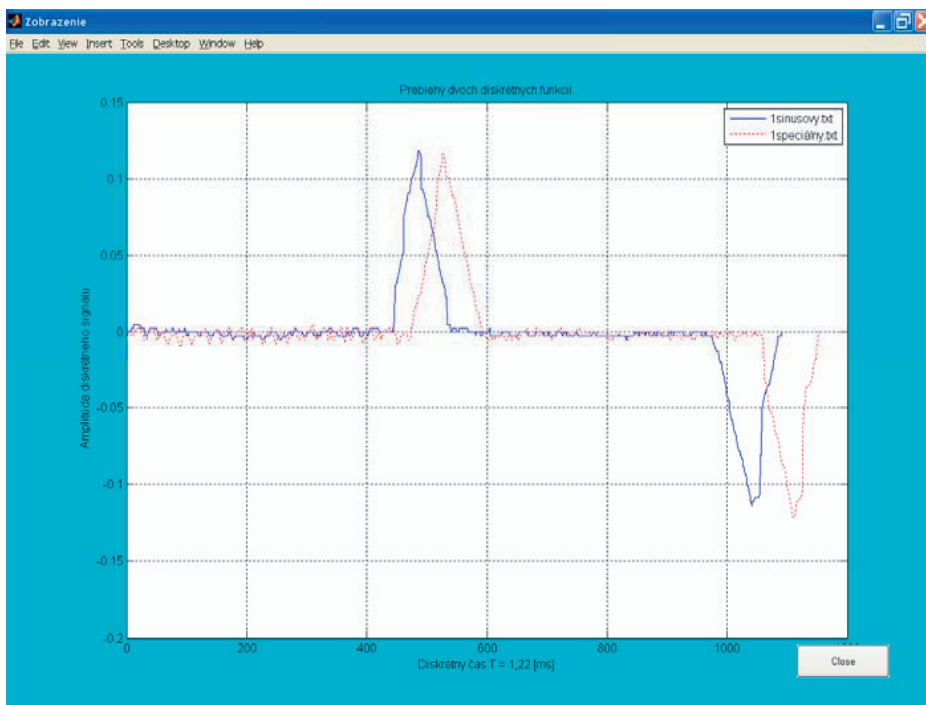


Obrázok 7 Grafické prostredie v Matlabe pre analýzu nameraných signálov. Na obrázku je zobrazený priebeh v časovej oblasti spolu s DFT pri sínusovom budiacom tvare KM

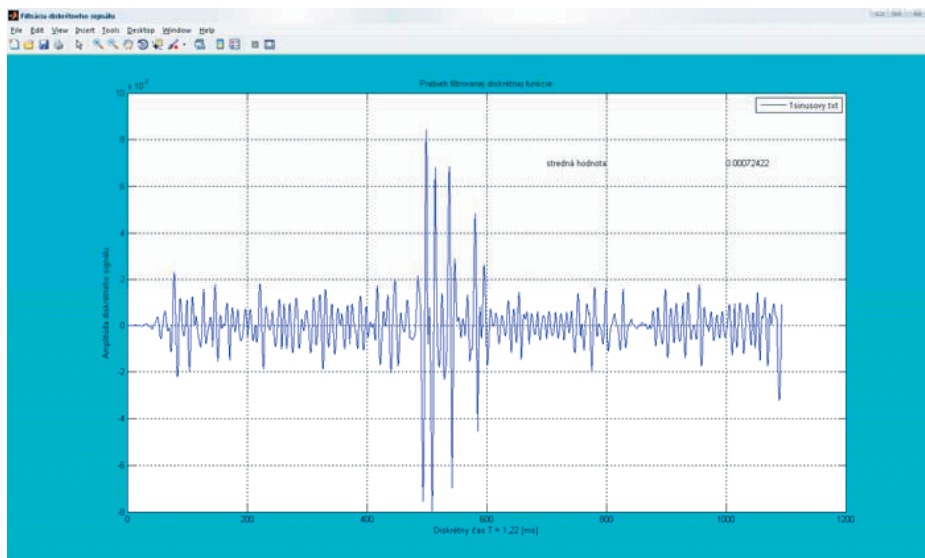
Pre analýzu nameraných signálov bolo vytvorené grafické prostredie v Matlabe s využitím funkcií pre diskretnú Fourierovu transformáciu – DFT a filtráciu (Obrázok 7). Grafické zobrazenie pre porovnanie nameraných zrýchlení pri sínusovom a špeciálnom tvare budenia KM v časovej oblasti sú zobrazené na Obrázku 8. Z Obrázka 8 je viditeľná odlišnosť v perióde jednotlivých signálov a aj zvýšená striedavá zložka pri špeciálnom tvare budiaceho prúdu, čo sa prejavilo kmitaním pohyblivej časti modelu.

Pre identifikáciu zložky charakteristickej pre použitý tvar budiaceho prúdu je potrebný filter pásmová priepust na odfiltrovanie harmonických zložiek. Charakteristické priebehy pre použitý budiaci tvar sú viditeľné vo vyšších harmonických frekvenciách.

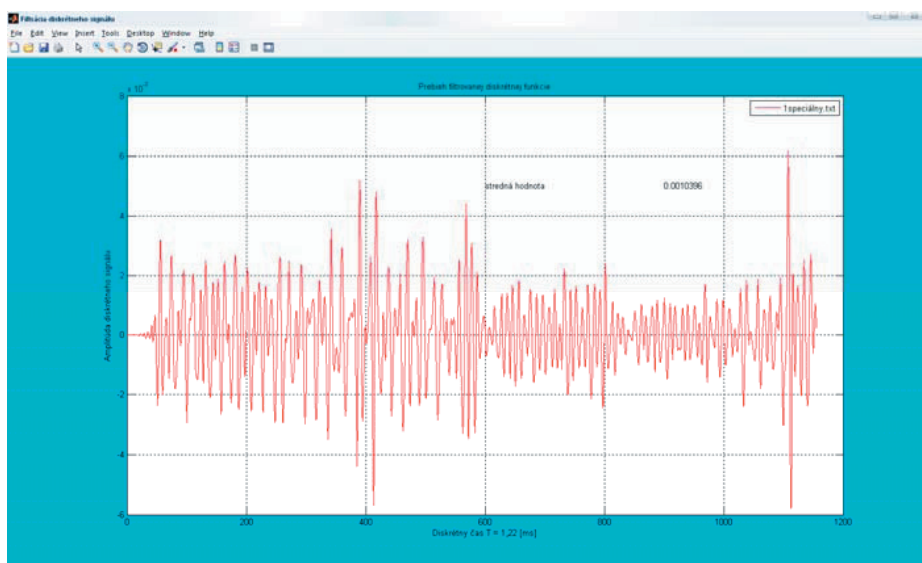
Pre návrh filtra bola použitá funkcia Matlabu `fir1`. Funkcia `fir1` využíva klasickú okienkovú metódu návrhu digitálneho FIR filtra s konečnou impulzovou odozvou. Funkcia navrhuje vektor b-koeficientov. Použitím FIR filtra pásmová priepust v intervale 11 Hz až 33 Hz dostávame priebehy v časovej oblasti pre sínusový budiaci tvar Obrázok 9 so strednou hodnotou amplitúdy $7,1 \cdot 10^{-3} \text{ ms}^{-2}$ a pre špeciálny budiaci tvar Obrázok 10 so strednou hodnotou $10,2 \cdot 10^{-3} \text{ ms}^{-2}$.



Obrázok 8 Porovnanie priebehov diskretných funkcií.
 Legenda: plná čiara – sínusový tvar, bodkovaná čiara – špeciálny tvar budiaceho prúdu



Obrázok 9 Odfiltrovaný signál FIR filtrom pásmová priepust – sínusový budiaci tvar



Obrázok 10 Odfiltrovaný signál FIR filtrom pásmová priepust – špeciálny tvar budenia

4. ZÁVER

Obrázky 9 a 10 s priebehmi nameraných signálov v časovej oblasti spolu s ich príslušnými strednými hodnotami dokazujú rozdielny charakter meraných signálov na základe zmeny tvaru budiaceho prúdu. Analýzou digitálneho signálu z MEMS senzora s využitím FIR filtra je možné identifikovať použitý tvar budiaceho prúdu KM.

Na Obrázku 8 vidieť zvýšenie striedavej zložky pri špeciálnom tvare budiaceho tvaru prúdu, čo vedie k ťažkostiam pri riadení pohonu. Identifikovaním striedavej zložky pri adaptívnom riadení by zmenou tvaru alebo kmitočtu budiaceho prúdu mohlo viesť k optimalizácii riadenia s ohľadom na aplikáciu. Podľa momentovej charakteristiky majú práve spomínané vlastnosti budiaceho prúdu vplyv na moment, plynulosť a dynamiku KM.

Pri analýze bol použitý nameraný signál z akcelerometrov bez prepočtov, teda priamo bolo snímané zrýchlenie. Integráciou zrýchlení by bolo možné získať informácie o polohe a teda zvýšiť použitím adaptívneho riadenia komplexnosť (riadenie polohy, rýchlosti, zrýchlenia) servopohonu.

LITERATÚRA

- PRCHAL 1, J., ŠIMÁK 2, B.: 2000. *Digitální zpracování signálů v telekomunikacích*. Praha: ČVUT Praha, 2001, 210 s. ISBN 80-01-02149-1
- TABATABAEI 3, N., 2008. *Zur inertialen Bahnvermessungen für die Kalibrierung von Werkzeugmaschinen und Robotern*. Kassel: Kassel Univer., 2008, 133 s. ISBN 80-247-1103-6
- ŽALMAN 4, M., 2003. *Akčné členy*. Bratislava: STU Bratislava, 2003, 209 s. ISBN 80-227-1835-1

PAVELKA 5, J., ČEŘOVSKÝ 6, Z., JAVŮREK 7, J., 1999. *Elektrické pohony*. Praha: ČVUT Praha, 1999, 221 s. ISBN 80-01-01411-8

Kontaktná adresa:

prof. Ing. Jozef Šuriansky CSc.

Technická univerzita vo Zvolene, Katedra informatiky a automatizačnej techniky, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky, Technická univerzita vo Zvolene, Študentská 26, 960 53 Zvolen

Ing. Marcel Bariak

Technická univerzita vo Zvolene, Katedra informatiky a automatizačnej techniky, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky, Technická univerzita vo Zvolene, Študentská 26, 960 53 Zvolen

VYUŽITÍ PRINCIPU MINIMAXU PŘI OPTIMALIZACI KONSTRUKCE A PROVOZU VÝROBNÍCH SYSTÉMŮ PŘI ROZPOJOVÁNÍ DŘEVA

EXPLOITATION OF MINIMAX PRINCIPLE IN OPTIMIZING CONSTRUCTION AND PRODUCTION SYSTEMS IN SEPARATING WOOD

Adolf JANEČEK – Milan MIKLEŠ

ABSTRAKT: V článku jsou uvedeny výchozí základní principy přírodního principu minimaxu. Uvedený princip je uplatněn při analýzách konstrukce a provozu výrobních systémů rozpojování biomasy. Na základě rozboru je představena možnost způsobu specifikace vhodného systému určeného pro zadanou práci.

Klíčové slová: přírodní princip minimaxu, rozpojování biomasy, výrobní systémy optimalizace parametrů

ABSTRACT: In the article there are shown input basic principles of natural minimax principle. The shown principle is applied in construction and operational analysis of production systems separating biomass. On the basis of an analyse there is introduced the possibility of the way for specification of suitable system determined for a given work.

Key words: natural minimax principle, biomass separation, production systems, parameters optimizing

0.1 ÚVOD

Na základě použití přírodního principu minimaxu publikace, uvádí standardy práce výrobních systémů v lesním hospodářství při rozpojování dřeva.

Výrobní systémy obdělání půdy obvykle jsou tvořeny pracovním strojem v agregaci s traktorem (energetickým zdrojem).

Standardy výrobních systémů rozpojování dřeva se týkají časových struktur, výkonnostních charakteristik, obtížnosti práce, ekonomiky a ekologické čistoty práce.

Kromě v práci uváděných standardů jsou popsány algoritmy výpočtů optimálních hodnot parametrů výrobních systémů rozpojování dřeva.

Algoritmy využívají uváděné standardy práce výrobního systému zpracování půdy a vycházejí důsledně z fyzikálně mechanických podstat přírodního principu minimaxu.

Verbálně dále přírodní princip minimaxu specifikujeme pro využití v konstrukci a provozování výrobních systémů rozpojování dřeva.

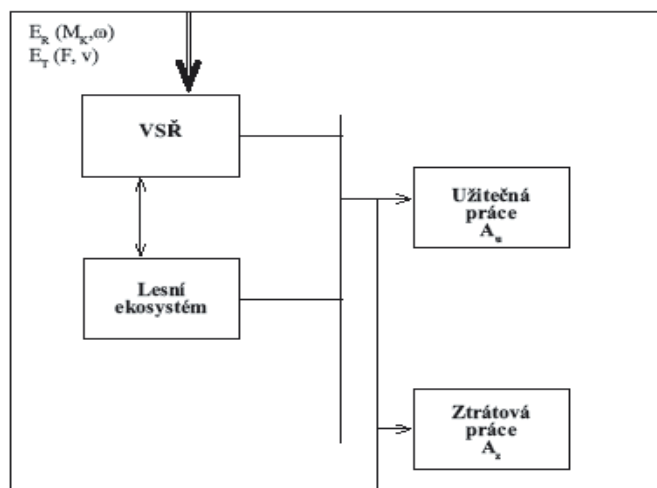
- každý výrobní systém rozpojování dřeva je objektem, v kterém probíhají energetické transformace.
- pro každý výrobní systém rozpojování dřeva existuje optimální velikost a optimální řízení z hlediska energetických transformací.
- Existence výrobního systému rozpojování dřeva je určena charakterem energetických transformací, které v systému pobíhají.
- Výrobní systém rozpojování dřeva se rozpadá, je-li překročena hranice systémové tolerance vzhledem k energetickým transformacím.
- Kritérium existence, či konkurence schopnosti výrobního systému rozpojování dřeva je energie vztažená na jednotku plochy opracované systémem.
- Výrobní systémy rozpojování dřeva jsou schopny existence (konkurence), probíhají-li v systému transformace energie, charakterizované minimem vložené energie vztažené na jednotku výkonnosti realizované systémem.

Na uvedených principech jsou konstruovány standardy výrobních systémů rozpojování dřeva a jsou konstruovány algoritmy výpočtů či optimalizace práce výrobních systémů rozpojování dřeva.

1.0 TRANSFORMACE ENERGIE NA UŽITEČNOU PRÁCI

Stroje a zařízení, které jsou užívány v rámci lesního hospodářství konají práci. Práce může být konána v důsledku energetických transformací, které provázejí technologické operace, zajišťující konkrétní vykonané práce, uváděné ve fyzických jednotkách (drcení dřeva a biomasy).

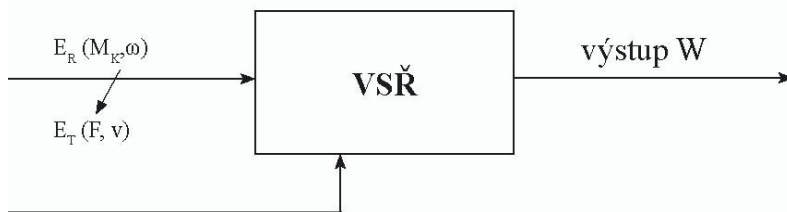
Blokové schéma energetického toku zajišťujícího technologické operace mobilního terénního systému (drtič, štěpkovač, systém řezání), je na obr. č. 1.1.



Obr. 1.1 Blokové schéma přenosu energie výrobních systémů zajišťujících rozpojování dřeva

$E_R(M_K, \omega)$	... energie ve formě rotačního pohybu vložená do technologického procesu	(J)
$E_T(F, v)$	... energie ve formě translačního pohybu vložená do technologického procesu VSŘ výrobního systému drčení a řezání	(J)
A_u	... užitečná práce konaná VSŘ	(J)
A_z	... ztrátová práce konaná VSŘ	(J)
VSŘ	... výrobní systém drčení a řezání biomasy	(-)

Výrobní systém drčení a řezání biomasy (VSŘ) systém pracující v lesním hospodářství lze znázornit blokovým schématem obr. č. 1.2. Na vstupu VSŘ je energie rotačního pohybu $E_R(M_K, \omega)$ a energie translačního pohybu $E_T(F, v)$. Oba typy energie jsou parametry: M_K ... kroutícího momentu. ω ... úhlových otáček, dále jsou funkcí síly konající práci F a příslušné translační rychlosti. Oby typy vstupující energie E_T, E_R konají užitečnou práci uváděnou ve fyzických jednotkách ($ha \cdot h^{-3}$), (viz. obr. 1.2).



Obr. 1.2 Schéma funkce výrobního systému drčení a řezání biomasy (rozpojování dřeva)

$$\eta_c = \frac{A_u / \partial t}{\frac{\partial E_T(\omega, M_k)}{\partial t} + \frac{\partial E_T(F, v)}{\partial t}} \quad (-) \quad (1.1)$$

- η_c ... účinnost transformační energie konající užitečnou práci (-)
- A_u ... užitečná práce (J)
- E_R ... energie ve formě rotačního pohybu vstupující do VSŘ (J)
- E_T ... energie ve formě translačního pohybu vstupující do VSŘ (J)
- F ... síla, parametr translačního pohybu (N)
- v ... rychlost translačního pohybu ($m \cdot s^{-1}$)
- M_K ... parametr (kroutící moment) specifikující vstupní energii E_R (Nm)
- ω ... parametr rotační energie, úhlová rychlost (s^{-1})

VSŘ realizující proces řezání a drčení, pracují s účinností (Janeček, 2009):

$$\eta_c \in < 0,4 - 0,8 >$$

Užitečná práce se demonstruje skutečně vykonanou prací ve fyzických jednotkách dle postupu realizace transformace (1.2).

$$\frac{\partial A_u}{\partial t} = M_k \cdot \omega + F \cdot v \longrightarrow W \quad (1.2)$$

A_u ... užitečná práce (J)

M_k ... kroutící moment parametr rotační energie konající užitečnou práci (Nm)

ω ... úhlová rychlost parametr rotační energie konající užitečnou práci (s^{-1})

F ... rychlost parametr energie konající užitečnou práci (N)

v ... rychlost parametr translační energie konající užitečnou práci ($m \cdot s^{-1}$).

Při běžných inženýrských výpočtech, odhadech je pro energii rotačního či translačního pohybu užíváno vztahů:

$$\frac{\partial E_R}{\partial t} = M_k \cdot \omega \quad (W) \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial E_T}{\partial t} = F \cdot v \quad (W)$$

Vztahy (1.3) představují transformace energie jejichž výsledkem je skutečně vykonaná práce ve fyzických jednotkách tj. výkonnost. Výkonnost W je uváděna obvykle v $ha \cdot h^{-1}$; tj. v hektarech vykonané práce za jednotku času.

Ztráty vznikající při transformaci energie na užitečnou práci je dána vztahem:

$$\frac{\partial A_z}{\partial t} = \frac{\partial A_t}{\partial t} \quad (W) \quad (1.4)$$

A_z ... ztráty vznikající při transformačním procesu (J)

A_t ... ztráty způsobující škody (J)

2.0 DIVERSIFIKACE ZTRÁT

Zjištění dílčích ztrát bylo uskutečněno pomocí simulací pro ČP, pomocí experimentů prováděných v terénu a analyticky.

Průměrné hodnoty ztrátových energií vznikajících při transformačním procesu demonstrujícím se v dílčích specifikacích se pohybovaly v intervalech (Janeček, 2009):

A_δ frézování půdního povrchu

$$A_\delta \epsilon < 2-14 > \% \quad (1.6)$$

A_{uT} ... ztrátová energie způsobující utužení a porušení půdního povrchu porostu

$$A_{uT} \epsilon < 2-15 > \% \quad (1.7)$$

A_K ... ztrátová energie způsobující porušení kořenového systému porostu

$$A_K \epsilon < 1-8 > \% \quad (1.8)$$

A_E ... ztráty vzniklé v důsledku přírůstku emise CL (cizorodých látek)... (CO , CO_2 , NO_x , SO_2 , saze...)

$$A_E \epsilon < 3-8 > \% \quad (1.9)$$

A_s ... ztráty vzniklé poškozením stojících stromů

$$A \epsilon < 1-6 > \% \quad (1.10)$$

3.0 PROVOZOVÁNÍ VÝROBNÍCH SYSTÉMŮ – DRCENÍ, ŘEZÁNÍ, ŠTĚPKOVÁNÍ S OHLEDEM NA MINIMALIZACI ZTRÁTOVÝCH ENERGIÍ

Výchozí princip přírodní – princip minimaxu

Obecný přírodní princip existuje v části vesmíru, kde žijeme. Chápe objekty, které jsou předmětem zkoumání systémově. Objekty mají materiálové, energetické vstupy, případně vstupy pracovních sil (PS) pracovních sil. Výstupem je projev systému.

Objekty mohou být živé, neživé, umělé, přirozené. Mezi vstupy a výstupy existuje vazba, daná intenzitou projevu systému.

Zvyšuje-li se intenzita projevu systému tak, že jeho výkonnost roste lineárně, k zajištění této výkonnosti je nutné přivádět energetické či materiálové vstupy rostoucí exponenciálně.

Výsledkem uvedených skutečností je možný režim práce systému charakterizovaný minimem energie vložené do jednotky objem opracovaném výrobním systémem.

4.0 PRINCIP MINIMAXU A JEHO UŽITÍ V OBLASTI VĚDECKO-TECHNOLOGICKÝCH VÝPOČTŮ PŘI OPTIMALIZACI VÝROBNÍCH SYSTÉMŮ REALIZUJÍCÍCH DRCENÍ, ŘEZÁNÍ, ŠTĚPKOVÁNÍ BIOMASY (DŘEVO)

Obecně je objektem zkoumání výrobní systém. Do systému vstupují energetické, materiálové či vstupy pracovních sil.

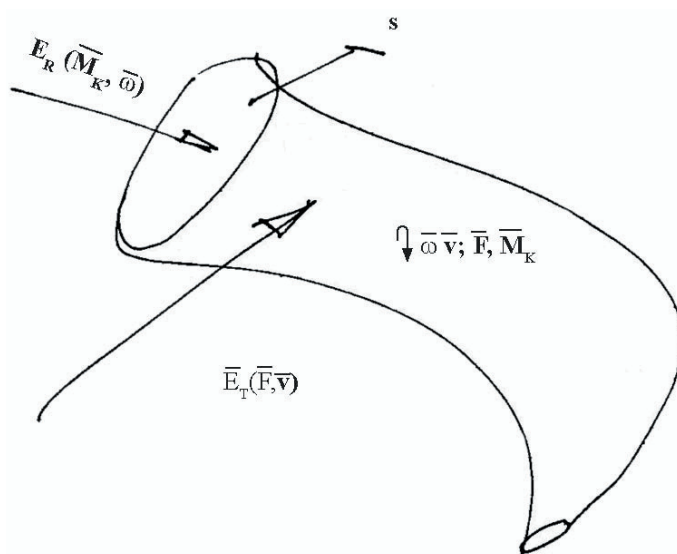
Po převedení různorodých vstupů na stejného jmenovatele na vstupu do systému je energie či hmota či pracovní síla přepočtená na energii. Systém na drcení má konstrukci a funkci takovou, pro kterou byl vytvořen (zkonstruován). Systém koná konkrétní činnosti.

Výsledkem konkrétních činností je práce ve fyzických jednotkách. V pěstební činnosti na úseku lesního hospodářství v této publikaci jsou to systémy realizující řezání, drcení a štěpkování.

Intenzita práce systému „I“ má vliv na množství energie, kterou je nutno dodat, aby systém vykonal práci.

Energie procházející systémem má v konkrétních konstrukčních realizacích stroje či části stroje různou rychlost pohybu a prochází různým průřezem konstrukčního prvku stroje různou rychlostí (viz obr. 4.1).

Jinými slovy – translační energie $E_T(F, v)$, a rotační energie $E_R(M_K, \omega)$ se při konání operace (řezání, štěpkování, drcení), technologického procesu mění (viz obr. 4.1).



Obr. 4.1 Schema konstrukčního elementu, kterým prochází rotační či translační energie

$$E_R(M_K, \omega) \neq \text{CONST} \quad (\text{J})$$

$$E_T(F, v) \neq \text{CONST} \quad (\text{J})$$

E_R ... rotační energie procházející a transformující se v daném prvku stroje na drcení (J)

E_T ... translační energie transformující se v daném prvku stroje na drcení (J)

S ... průřez kanálu, kterým prochází transformující se energie prvkem stroje na drcení (m^2)

v ... rychlost změn transformace energie procházející průřezem S prvku stroje ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

F ... silové působení transformující se energie na stroj či prvek

ω ... rychlost změn transformace procházející rotační energie průřezem prvku stroje (s^{-1})

M_K ... momentové působení transformující se energie na stroj či prvek stroje (Nm)

W ... výkonnost systému ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)

Platí:

$$E_c = E_T + E_R + E_z \dots + E_v \quad (J) \quad (1.11)$$

E_c ... celková energie dodávaná do procesu VSŘ (J)

E_T ... translační energie dodávaná do procesu VSŘ (J)

E_R ... rotační energie dodávaná do procesu VSŘ (J)

E_z ... disipativní energie vznikající v procesu realizace VSŘ (J)

E_v ... ostatní energie vznikající v procesu realizace VSŘ (J)

V důsledku realizace procesu vzniká ztrátová či disipativní energie.

Disipativní energie je tím větší, čím systém pracuje s vyšší intenzitou práce. Intenzita práce systému je specifikována transformací energie v procesu průchodu energie systémem. Průchod energie pracujícím systémem (drtič, štěpkovač) je charakterizován průřezem energetického toku a rychlostí pohybu (transformace) energie v průřezu „S“.

Čím rychleji probíhá transformace energií konajících práci, tj:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial E_T}{\partial t} > 0 \\ \frac{\partial E_R}{\partial t} > 0 \end{array} \right\} \longrightarrow \Delta E_z \quad (J \cdot m^{-3}) \quad (1.12)$$

ΔE_z ... ztrátové energie vznikající v procesu transformací (J)

tím vyšší jsou ztráty vznikají v technologickém procesu realizovaném mobilním či stacionárním systémem realizujícím štěpkování, drcení, atd.

Jinými slovy řečeno: čím je vyšší intenzita transformací konaných strojem „I“, tj. čím vyšší je výkonnost stroje udávaná ve fyzických jednotkách, tím vyšší jsou disipativní ztráty vznikající v tom kterém stroji.

Zvyšuje-li se výkonnost systému, tj. pracovního stroje lineárně, potom k zajištění lineárního růstu výkonnosti musí stroj přijímat energii E_T , E_R exponenciálně rostoucí (obr. 5.1).

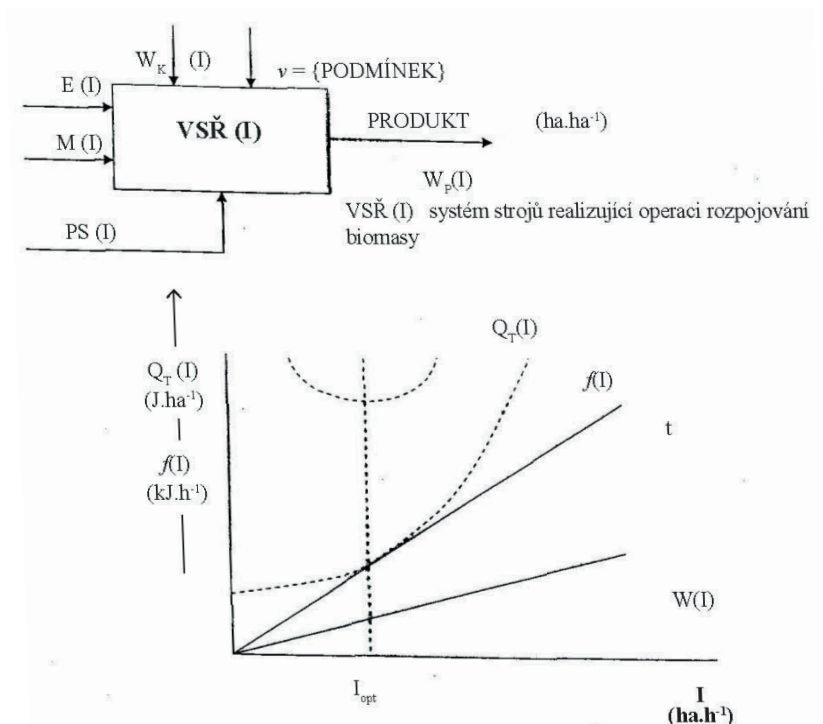
K zajištění výkonnosti W (I), která je funkcí „S“ průřezu toku energie strojem a v rychlosti toku energie, tj. výkonnosti rostoucí lineárně, musí stroj k realizaci trendu přijímat energii f (I) rostoucí exponenciálně.

Vztáhne-li se výstup systému, tj. práce vykonaná strojem ke vstupu do systému, dostane se reciproké hodnotě křivka měrné energie nutné k tomu, aby při dané intenzitě transformace energie stroj konal práci.

Je-li stroj správně dimenzován (konstruován), lze najít režim práce, kdy stroj vykoná množství fyzické práce W (I) ($m^3 \cdot h^{-1}$) a na tato množství fyzické práce, systém vynaloží minimum energie. Výše řečené je formálně graficky vyjádřeno na obr. č. 5.1.

5.0 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ CHOVÁNÍ PŘÍRODNÍHO PRINCIPU MINIMAXU

5.1 Objekt zkoumání



$$f(I) = E(I) + M(I) + PS(I) \quad (\text{kJ.h}^{-1})$$

$$Q(I) = \frac{f(I)}{W(I)} \quad (\text{J.m}^{-3})$$

$$Q'(I) = \frac{\partial Q(I)}{\partial I} = 0$$

Obr. 5.1 Schematické znázornění vazeb mezi vstupy a výstupy výrobního systému rozpojování

5.2 Legenda k obr. 5.1

WK	... parametr konstrukční výkonnosti (viz dále)	(ha.h ⁻¹)
v	... vektor pracovních podmínek	(-)
VSŘ	... výrobní systém na řezání, drcení	(-)
E	... energetický vstup	(J)
M	... materiálový vstup	(Kg)

PS	... vstup pracovních sil	(Kč)
$W_p(I)$	... provozní výkonnost (viz dále)	$(m^3 \cdot h^{-1})$
$Q(I)$	... měrná energie, vztažená na jednotku opracované hmoty	$(J \cdot m^{-3})$
$W(I)$	... výkonnost provozní	$(m^3 \cdot h^{-1})$
$f(I)$	... energie dodaná pracovnímu systému za jednotku času	(kW)
I	... intenzita práce konaná systémem	$I = f(S, v)$
S	... průřez toku energie	(m^2) ,
v	... rychlost toku energie	$(m \cdot s^{-1})$.

6.0 PARAMETRIZACE OBJEKTU OPERACE ŘEZÁNÍ

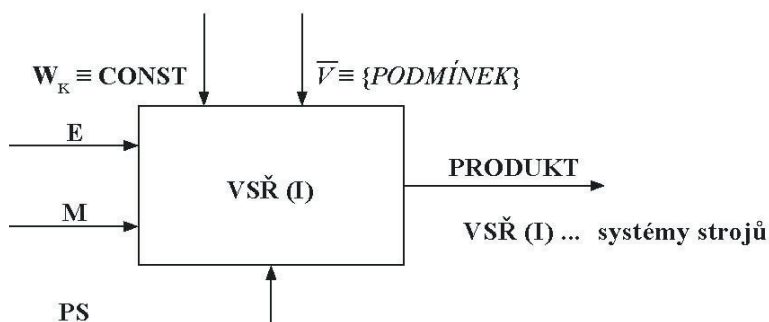
6.1 Slovní specifikace

Systém konající práci vykonává nejen užitečnou práci v závislosti na materiálovém toku či energetické toku procházejícím strojem nýbrž i ztrátovou práci. Jestliže existuje unifikovaná řada výrobního systému specifikována řadou instalovaných tíh, jmenovitého příkonu stroje atd., potom je možné z daných strojů dané unifikované řady vybrat stroj či skupinu strojů, které vykonají daný pracovní objem tak, že do procesu výroby bude vložena minimální energie, vztažená na jednotku objemu opracované hmoty.

Odpověď na otázku jaký stroj. Dává přírodní princip minimaxu. Existuje-li skupina strojů konstrukčně i technologicky si podobných (drtiče atd.), lze pro dané podmínky navrhnout, vybrat stroj o dané výkonnosti, o dané tíze, a daném pracovním režimu tak, aby pro zadaný objem prací stroj (drtič, štěpkovač atd.), zpracoval zadaný objem prací tak, aby spotřeboval minimální množství energie vztažené na jednotkový objem opracované hmoty (viz obr. 6.1).

6.2 Graficko početní specifikace

Parametrizace objektu zkoumání



Obr. 6.1

VSŘ	... výrobní systém řezání, drcení	(-)
$W_{Ki} \neq 0$	... konstrukční výkonnost členů unifikované řady i	($m^3 \cdot h^{-1}$)
i	... počet členů unifikované řady platí	(-)
$W_i < \dots < W_{n-1} \dots W_{n+1} < W_n$		($m^3 \cdot h^{-1}$)
$E_i(I, W_i)$	... energetické vstupy do členů unifikované řady (1 – i)	(J)
M_i	... materiálové vstupy do členu „i“ unifikované řady	(kg)
PS_i	... vstupy pracovních sil do členu „i“ unifikované řady	(Kč)
W_i	... konstrukční výkonnost i-tého členu unifikované řady	($m^3 \cdot h^{-1}$)
V	... vektor podmínek	(-)
I	... intenzita práce systému; $I = f(S, v)$	($m^3 \cdot h^{-1}$)

Řešení problému – nalezení optimálního členu unifikované řady, tj. drtič dané velikosti atd., je daný řešením rovnic:

$$f_1(I, W_{K1}) = E(I, W_{K1}) + M(I, W_{K1}) + PS(I, W_{K1}) \quad (kJ \cdot h^{-1}) \quad (1.13)$$

.

.

.

$$f_n(I, W_{Kn}) = E(I, W_{Kn}) + M(I, W_{Kn}) + PS(I, W_{Kn}) \quad (kJ \cdot h^{-1})$$

S ... průřez energetického či materiálového toku (m^2)

v ... rychlost materiálového či energetického toku ($m \cdot s^{-1}$)

$$Q_i(I, W_{Ki}) = \frac{f_i(I, W_{Ki})}{W(I, W_{Ki})} \quad (J \cdot m^{-3})$$

.

.

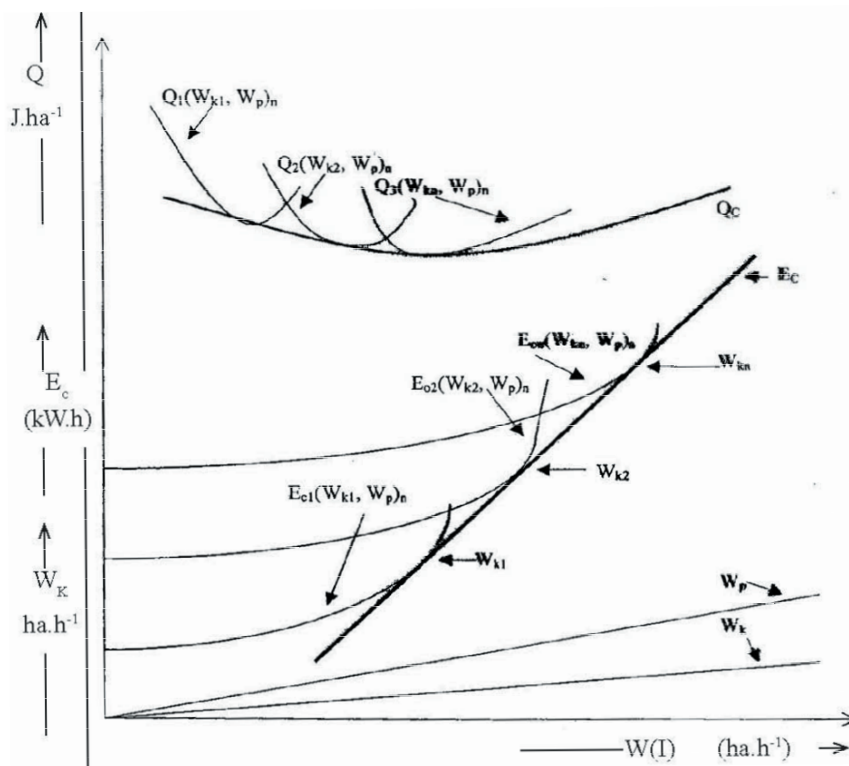
.

.

$$\frac{\partial Q_u(I, W_{Kn})}{\partial I} = 0 \quad (J \cdot m^{-3})$$

$u \in \langle 1 - n \rangle$ (Janeček, 2009).

Řešením systému výše uvedených rovnic lze najít (v souladu s přírodním principem minimaxu) optimální výkonnost strojového systému $W_{Ki, opt}$, pracujícího v optimálním režimu práce, tj. režimu při kterém systém vloží minimum energie do jednotky objemu opracované hmoty. Jinými slovy pomocí přírodního principu minimaxu lze nalézt optimální stroj a optimální energetický zdroj charakterizovaný optimální tíhou či velikostí a optimální intenzitou práce. Grafická interpretace je na obr. č. 6.2.



Obr. 6.2

Legenda k obr. č. 6.2

- $Q_i(W_{k1}, W_p)$... křivka měrných nákladů stroje „i“ (J.m⁻³)
 E_{ci} ... křivka energetických vstupů (J)
 E_c ... obálka energetických vstupů (J)
 Q_c ... obálka měrných energií unifikované řady na měrné energetické náklady (viz dále) (J.m⁻³)
 W_p ... provozní výkonnost (viz dále) (m³.h⁻¹)
 W_k ... konstrukční výkonnost (drtičů, štěpkovacích a řezacích systémů) (m³.h⁻¹)

7.0 PRAKTICKÝ PŘÍNOS PŘÍRODNÍHO PRINCIPU MINIMAXU V DRCENÍ, ŠTĚPKOVÁNÍ A ŘEZÁNÍ BUŘENĚ

Princip minimaxu, experimentálně, analyticky či simulací na PC, dává uživateli odpověď na následující otázky:

- jaký systém drtiče, štěpkovače atd. specifikovaný tíhou, či výkonností je výhodný hlediska kritéria energetiky, ekonomiky či ekologické čistoty práce

- jaký je vliv parametrů konstrukčních či provozních, (drtič, štěpkovač) na výši minima energetického, ekonomického či na hodnotu ekologické čistoty práce
- zda je optimální konstrukční či provozní návrh specifikující vzájemný vztah motoru a pracovního či technologického systému u drtiče, štěpkovače
- zda drtiči štěpkovač z hlediska ekonomiky, energetiky či ekologické čistoty práce je navržen tak, aby byl konkurence schopný
- zda daný drtič, štěpkovač, je z hlediska koncepce konstrukce schopný pro použití v daném terénu

Využitím principu minimaxu se zvyšuje účinnost transformační energie vstupů na užitečnou práci o 30%.

LITERATURA

1. JANEČEK A KOL.: Standardy a optimalizace výrobních systémů rozpojujících biomasu z hlediska ekonomiky, energetiky a ekologické čistoty práce, Věd. publikace Mze NAZV, 2009
2. MIKLEŠ, M.; HOLÍK, J.; MIKLEŠ, J.: Projektovanie a výpočet lesných strojov, Vydavateľstvo TU Zvolen, 2010, 200s., ISBN 978-80-228-2096-7
3. MIKLEŠ, M.; HOLÍK, J.; MIKLEŠ, J.: Lesné stroje, Vydavateľstvo TU Zvolen, 2004, 330 s., ISBN 80-228-1403-2

Kontaktní adresa:

prof. Ing. Adolf Janeček, DrSc., dr. h. c.
 ČZU FLE, Kamýcká 126, Praha 6

prof. Ing. Milan Mikleš, DrSc.

Technická univerzita vo Zvolene, Katedra lesnej a mobilnej techniky, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky, T. G. Masaryka 24,960 53 Zvolen, e-mail: mikles@vsld.tuzvo.sk

K TEORETICKÝM ZÁKLADOM METÓDY OBRÁ- BANIA DREVA ELEKTRICKÝMI PRIERAZMI

ON THEORETICAL FUNDAMENTALS OF WOODWOR- KING BY ELECTRIC BREAKDOWN METHOD

Ivan MAKOVÍNY

ABSTRACT: In the paper the methodics of setting the energetic balance and calculating of specific volume heat in the process of burning of holes into the wood by electric breakdown method is given. This methodics can be used for optimalization of woodworking by electric breakdown method.

Key words: electric breakdown, electric strenght, burning of holes, energetic balance

ABSTRAKT: V príspevku sa uvádza metodika stanovenia energetickej bilancie energie a výpočet merného objemového tepla, pri vypaľovaní otvorov do dreva metódou elektrických prierezov. Navrhnutú metodiku je možné využiť na optimalizáciu procesu elektrický prierezov pri aplikácii danej metódy.

Kľúčové slová: elektrický prierez, elektrická pevnosť dreva, vypaľovanie otvorov, energetická bilancia

1. ÚVOD

Elektrické nestacionárne výboje, umožňujú realizovať otvory kruhového profilu alebo aj spojité drážku do lamiel či dreva. Túto metódu sme nazvali metódou elektrotepelných prierezov.

Fyzikálny proces elektrického prierazu izolantu je komplexný jav, ktorý je závislý od vlastností materiálu a tiež aj elektrického zdroja. Výkon zdroja napätia nemá vplyv na hodnotu elektrickej pevnosti dreva, ale má veľký vplyv na vývoj procesov prebiehajúcich po dosiahnutí prierazného napätia. Elektrickým zdrojom a jeho riadiacimi obvodymi je možné docieľiť, že:

- výboj je nestacionárny a neprechádza do stacionárneho výboja,
- výboj má definovanú hodnotu elektrickej energie,
- výboj má definovanú dobu trvania a frekvenciu opakovania.

Ako je známe z hľadiska času trvania výboja po prieraze možno hovoriť o výboji:

1. elektrickou iskrou, $t_i = (10^{-4} \div 10^{-6} \text{ s})$,
2. nestacionárnym krátkodobým elektrickým oblúkom, $t_i > 10^{-4} \text{ s}$.

V prípade vypaľovania otvorov do dreva však horenie dreva môže proces tvorby otvoru predĺžiť.

Aby sa čo najviac energie výboja využilo na vypálenie otvoru do dreva je nutné stanoviť parametre zdroja na základe výpočtu energie nevyhnutnej na tento proces.

Optimálny stav nastane keď úber dreva je maximálny a úber materiálu elektród zanedbateľný. Z tohto aspektu musíme voliť vhodné parametre elektrického zdroja. Návrh takéhoto zdroja sme riešili v lit., (Makovíny 2004).

Tvar a veľkosť vypáleného otvoru do dreva elektrickým prierazom ovplyvňujú najmä tieto faktory:

- druh napätia (jednosmerné alebo striedavé),
- vlastnosti dreva (vlhkosť, hustota, štruktúra, druh, teplota a stav povrchu dreva),
- usporiadanie a geometrický tvar elektród,
- početnosť, dĺžka impulzov a výkon zdroja.

Rozmery – priemer a hrúbka vypáleného, prerazeného otvoru závisí najmä od veľkosti privedenej energie a dobe výboja.

Tieto dva parametre majú vplyv aj na: presnosť otvorov, hrúbku zuhoľnatenia okrajov otvorov, účinnosť procesu a na štruktúrne zmeny povrchu dreva v blízkosti otvoru, najmä pri elektróde, ktorá sa nedotýka povrchu dreva.

Objem V odobratého, spáleného materiálu je úmerný energii výboja a platí

$$V = k \cdot W \quad (1)$$

kde W je energia výboja, k – súčiniteľ.

Cieľom tejto práce je návrh metodiky teoretického výpočtu – mernej objemovej energie na vypálenie jednotky objemu dreva pri danej vlhkosti a zistenie vplyvu hustoty dreva na túto veličinu a jej zložky.

2. METODIKA VÝPOČTU MERNEJ OBJEMOVEJ ENERGIE POTREBNEJ NA VYPÁLENIE OTVORU DO DREVA

Proces elektrotepelného prierazu dreva prebieha rýchlo. Rovnicu tepelnej energetickej bilancie elektrotepelného prierazu dreva napíšeme pre energiu E dodanú zdrojom a pre mernú energiu „ a “ potrebnú na vypálenie jednotky objemu dreva za predpokladu, že straty tepla vedením, sálaním prípadne konvekciou z miesta prierazu do okolitého prostredia zanedbáme. Potom v mieste prierazu sa teplo spotrebuje na: ohrev dreva na teplotu destilácie (čo zahŕňa teplo ohrevu vody a ohrev sušiny dreva), na vyparenie vody, na ohriatie uhlíka na teplotu vyparovania a na vyparenia uhlíka.

Na základe uvedených predpokladov môžeme v našom prípade písať, že elektrická energia, dodaná zdrojom bude

$$E' = \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt \quad (2)$$

kde T je doba trvania procesu, $u(t)$ – časový priebeh napätia, $i(t)$ – časový priebeh prúdu

Ďalej platí, že energia spotrebovaná na prierez bude

$$E = E' - \Delta E \quad (3)$$

kde ΔE je stratové teplo žiarením.

Energia potrebná na prierez sa bude skladať z nasledovných zložiek

$$E = Q_w + Q_L - Q_G + Q_C + Q_{LC} \quad (4)$$

kde Q_w je teplo potrebné na ohrev vlhkého dreva na teplotu destilácie, Q_L – skupenské teplo na vyparenie vody z dreva, Q_G – teplo generované pri destilácii dreva, Q_C – teplo na ohriatie uhlíka na teplotu vyparovania, Q_{LC} – skupenské teplo vyparovania uhlíka.

Podľa známych vzťahov pre tepelnotechnické veličiny a tepelné bilancie (LIJUN, MAZUNDER 1991; ORECH, JÚZA 1987) bude:

Teplo na ohrev vlhkého dreva na teplotu destilácie:

$$Q_w = \rho_w \cdot S \cdot h \cdot c_w \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) \quad (5)$$

kde ρ_w je hustota dreva pri vlhkosti w , [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], S – stredná hodnota obsahu kruhového otvoru dreva vypáleného prierezom [m^2], h – výška otvoru [m], c_w – stredná hodnota špecifického tepla vlhkého dreva pri vlhkosti w na intervale teploty ϑ_0 až ϑ_1 [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], ϑ_0 – začiatočná teplota dreva [$^{\circ}\text{C}$], ϑ_1 – teplota destilácie dreva.

Skupenské teplo potrebné na vyparenie vody z vlhkého dreva:

$$Q_L = \rho_w \cdot S \cdot h \cdot 2483 \cdot \frac{w}{1+w} \quad (6)$$

w je absolútna vlhkosť dreva, [$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$]

Teplo generované pri destilácii dreva:

$$Q_G = \rho_w \cdot S \cdot h \cdot \frac{1200}{1+w} \quad (7)$$

Teplo na ohriatie uhlíka na teplotu vyparovania:

$$Q_C = S \cdot h \cdot \rho_0 \cdot q \cdot c_1 (\vartheta_2 - \vartheta_1) \quad (8)$$

kde ρ_0 je hustota absolútne suchého dreva [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], q – pomerná časť uhlíka zo suchého dreva, zostávajúca po destilácii ($\approx 0,38$ resp. 38%), ϑ_2 – teplota vyparovania uhlíka (4000°C), c_1 – stredná hodnota špecifického tepla uhlíka na intervale teploty ϑ_1 až ϑ_2 , ($1880 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Skupenské teplo vyparovania uhlíka:

$$Q_{LC} = S \cdot h \cdot \rho_0 \cdot q \cdot L \quad (9)$$

kde L je merné skupenské teplo vyparovania uhlíka ($\approx 5024 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$).

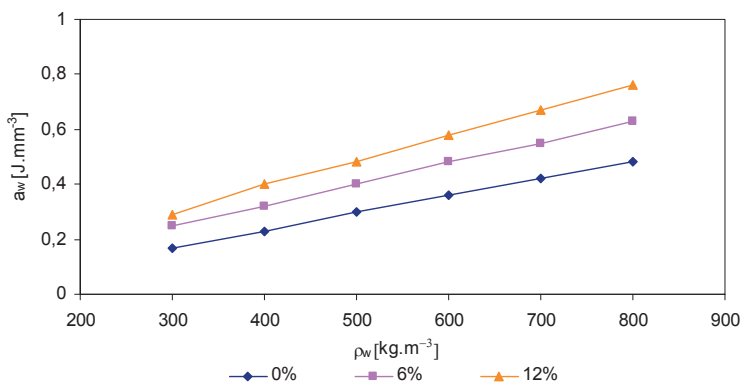
Merné objemové teplo a ($J \cdot m^{-3}$) potrebná na vypálenie objemovej jednotky objemu dreva sa dá získať z rov. (4)

$$a = \frac{E}{V} = \frac{E}{S \cdot h} = \frac{Q_w}{V} + \frac{Q_r}{V} + \frac{Q_G}{V} + \frac{Q_C}{V} + \frac{Q_{LC}}{V} = a_w + a_L - a_G + a_c + a_{LC} \quad (10)$$

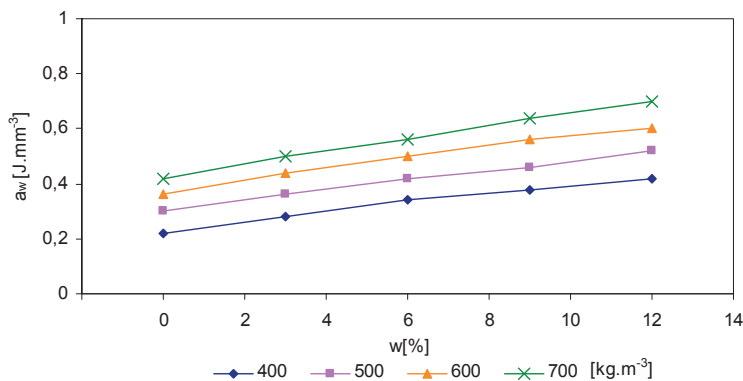
kde a_w je merné objemové teplo na ohrev jednotky objemu vlhkého dreva na teplotu destilácie, a_L – merné skupenské teplo na vyparenie vody z dreva, a_G – merné objemové teplo generované pri destilácii dreva, a_c – merné objemové teplo na ohriatie uhlíka na teplotu vyparovania, a_{LC} – merné objemové skupenské teplo na vyparovanie uhlíka.

3. VÝSLEDKY A DISKUSIA

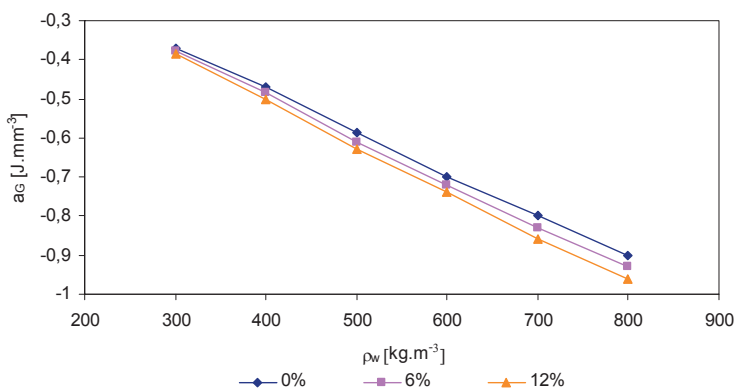
Vypočítané hodnoty merného objemového tepla a jeho zložiek v závislosti od hustoty resp. vlhkosti sú uvedené na obr. 1 až 7.



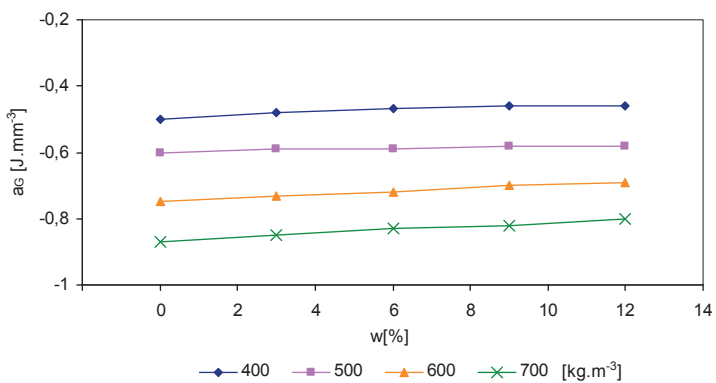
Obr. 1 Merné objemové teplo „ a_w “ potrebné na ohrev dreva na teplotu destilácie v závislosti od hustoty dreva ρ_w pri rôznych vlhkostiach dreva w



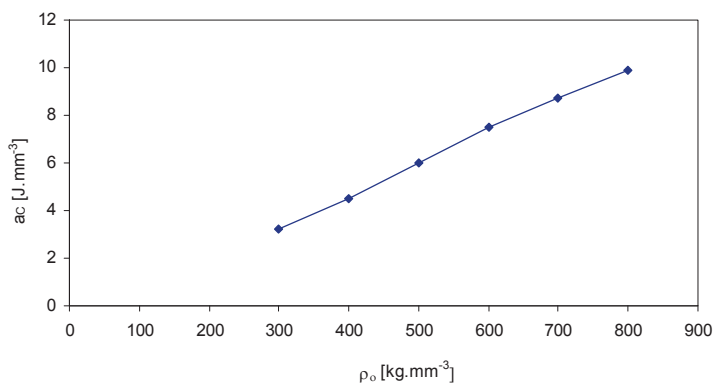
Obr. 2 Merné objemové teplo „ a_w “ potrebné na ohrev dreva na teplotu destilácie v závislosti od vlhkosti dreva w , pri rôznych hustotách dreva ρ_w



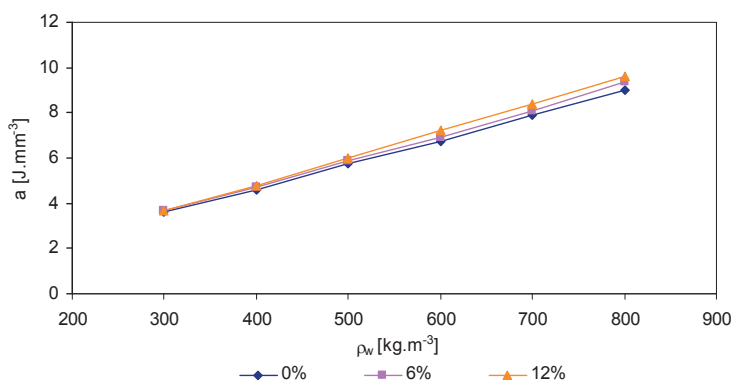
Obr. 3 Merné objemová teplo „ a_G “ generované pri destilácii dreva v závislosti od hustoty dreva ρ_w ěpri rŕzných vlhkostiach dreva w



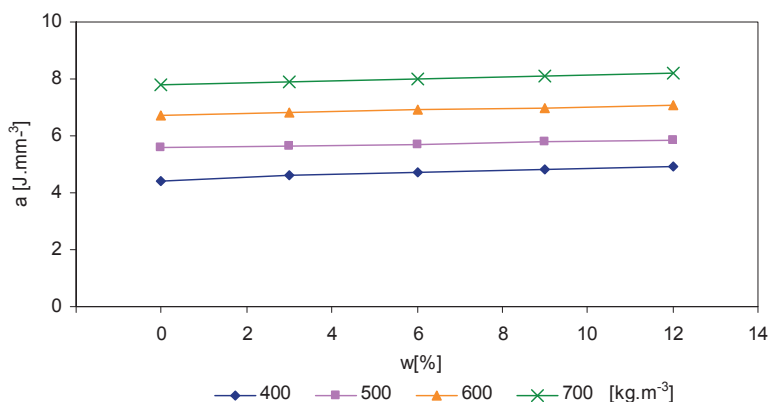
Obr. 4 Merné objemové teplo „ a_G “ generované pri destilácii dreva v závislosti od vlhkosti dreva w, pri rŕzných hustotách dreva ρ_w



Obr. 5 Merná energia „ a_C “ potrebná na vyparenie uhlíka v závislosti od hustoty dreva ρ_o



Obr. 6 Merné objemové teplo „a“ potrebné na vypálenie otvoru do dreva v závislosti od hustoty dreva ρ_w pri rôznych vlhkostiach dreva w



Obr. 7 Merné objemové teplo „a“ potrebné na vypálenie otvoru do dreva v závislosti od vlhkosti dreva w, pri rôznych hustotách dreva ρ_w

Rastúca vlhkosť a hustota dreva spôsobuje zvyšovanie energie potrebnej na ohrev dreva na teplotu destilácie (obr. 1 a 2). Ďalej rastúca vlhkosť mierne znižuje energiu uvoľňujúcu sa pri destilácii dreva (Obr. 4). Rastúca hustota na túto zložku merného objemového tepla pôsobí opačne a výrazne ju zvyšuje, (obr. 3). Merné objemové teplo generované pri destilácii dreva a_G ako aj merné objemové teplo potrebné na destiláciu dreva a_w majú pomerne malý podiel na mernom teple a.

Hlavný podiel na mernom objemovom teple potrebnom na elektrotepelný prierez dreva má merná energia potrebná na vyparenie uhlíka a_C .

Vplyv vlhkosti na merné objemové teplo je nepatrný, s rastúcou vlhkosťou sa jeho hodnota mierne zvyšuje. Výrazný vplyv má hustota dreva. Zmena hustoty dreva od 400 do 700 kg.m⁻³ zvýši hodnotu merného objemového tepla približne na dvojnásobok. To znamená, že aj výkon zdroja potrebný na vypálenie otvoru sa zvýši približne na dvojnásobok.

Výsledky uvedené na obr. 6, 7 porovnáme so špecifickou energiou potrebnou na rezanie dreva laserom (LIJUN LI, MAZUNDER 1991), ktorí uvádzajú jej hodnoty pre rôzne hustoty a vlhkosti dreva ako aj rýchlosti a hĺbku rezania. Tieto sú v intervale 2 až 5 ($\text{J}\cdot\text{mm}^{-3}$), v našom prípade sú tieto hodnoty 4 až 10 ($\text{J}\cdot\text{mm}^{-3}$) čo v podstate dobre korešponduje. Pričom sa čiastočne líšia fyzikálne podmienky pre ktoré sa energetická bilancia vykonala. Tiež existuje aj rozdielny fyzikálny mechanizmus úberu, (laserový lúč, resp. elektrotepelný prieraz).

ZÁVER

Zistilo sa, že celková energia potrebná na vypaľovanie otvorov do dreva metódou elektrotepelných prierazov výrazne závisí od hustoty dreva, naproti tomu nárast tejto energie so zvyšovaním vlhkosti dreva je nepatrný.

Použitím navrhutej metodiky teoretického výpočtu mernej objemovej energie, t. j. energie potrebnej na vypálenie jednotky objemu dreva pri danej vlhkosti, hustote a druhu dreva je možné optimalizovať metódu obrábania dreva elektrotepelnými prierazmi. Pretože takýto výpočet dovoľuje posúdiť energetickú účinnosť tohto procesu, pri zvolených technologických parametroch. Výsledky ďalej dovoľujú korigovať parametre rázového generátora napäťových impulzov.

LITERATÚRA:

1. ORECH, J., JÚZA, F.: 1987. Měrná energie úbeřu a její určení při interakci laserového zařizování se dřevem. Štátny dřevársky výskumný ústav, Bratislava, 1987, 114, s. 29–40.
2. LIJUN, L., MAZUNDER, J.: 1991. A study of the mechanism of laser cutting of wood, Forest Products Journal, 41 (10), pp. 53–59, 1991.
3. MAKOVÍNY, I.: 2000. Rázový generátor pre obrábanie dreva metódou elektrotepelných prierazov. Acta Facultatis Technicae, 2000 (2), IV, s. 53–58.
4. MAKOVINY, I.: 2004. The electric strength of wood. Wood Research, 2004, 49 (3), pp. 35–46.
5. IEC 243: 1967, Recommended methods of test for electric strengt od solid insulating materials at power frequencies.

Pod'akovanie

Príspevok vznikol v rámci riešenia grantového projektu VEGA 1/0144/09 – „Štúdium využitia mikrovlnného ohreву a infračerveného ohreву na blokovanie procesu biodegradácie rastúcich stromov a výrobkov z dreva“.

Kontaktná adresa:

prof. Ing. Ivan Makovíny, CSc.
Katedra dřevárskych strojov a zariadení
Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky
Technická univerzita vo Zvolene
T. G. Masaryka 24
960 53 Zvolen

OPOTREBOVANIE CHRBTÁ KOTÚČOVÉHO NOŽA PRI SÚSTRUŽENÍ DREVA

ROTARY TOOL BACK WEARING IN GREENWOOD TURNING

Lubomír JAVOREK – Jozef HRIC

ABSTRACT: Wood turning with tools shaped as disc is way as to increase to cutting edge life and in the finish tool life. Parallely is possible to increase high surface quality. Angle of inclination is parameter with important influence to cutting force ind its components, tool wearing, and surface quality. Disc tool during machining may rotate or no.

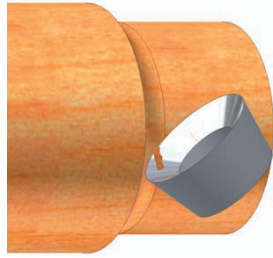
Key words: wood turning, disc tool, wearing

ABSTRAKT: Sústruženie kotúčovým nástrojom je spôsob ako zvýšiť trvanlivosť rezného klina a tým zvýšiť životnosť nástroja pri dosiahnutí vysokej kvality obrobeného povrchu. Uhol sklonu hlavnej reznej hrany λ_s je parameter s významným vplyvom na rezné sily, opotrebovanie nástroja i kvalitu obrobenej plochy. Kotúčový nástroj sa môže, alebo nemusí pri obrábaní obrobku otáčať.

Kľúčové slová: sústruženie dreva, kotúčový nástroj, opotrebovanie

1. ÚVOD

Obrábaniu s rotujúcim nástrojom je od poslednej dekády predchádzajúceho storočia venovaná zvýšená pozornosť výskumníkov napr. Wieloch a Osajda (2008). Výskum orientuje na problematiku opotrebovania rezného nástroja, na meranie síl Javorek, Naščák, Nováček, Moniš (2004), opotrebovania, na mechanizmus tvorby triesky Chmielewski, Cieloszyk, Zasada (2008), na overenie iných materiálov rezného klina. Obrábaniu s nástrojom, pri ktorom rezná hrana rotuje okolo svojej osi, resp. okolo osi čapu, na ktorom je kruhová rezná platnička vytvorená sa venujú Mostowski, Wieloch, Osajda (2008). Existujú rôzne typy rotujúcich nástrojov určených pre sústruženie Javorek a Hric (2005)], pričom boli vytvorené aj mnohé metódy ich použitia. Tieto možno zhrnúť do troch skupín: nástroj hnaný samostatným pohonom pri nulovom naklonení, nástroj hnaný samostatným pohonom pri naklonení s uhlom sklonu reznej hrany λ_s a nástroj hnaný trením pri naklonení s uhlom λ_s v dôsledku kinematických pomerov, t. j. nie samostaným pohonom (obr. 1).



Obrázok 1 Model kotúčového noža s uhlom sklonu $\lambda_s \neq 0$ [Wieloch a Osajda (2008).]

2. EXPERIMENT A VÝSLEDKY

Experiment sa uskutočnil v dielňach Technickej univerzity vo Zvolene. Technické parametre obrábacieho stroja determinovali podmienky pri obrábaní, predovšetkým otáčky obrobku (t. j. reznú rýchlosť) a posuv na otáčku.

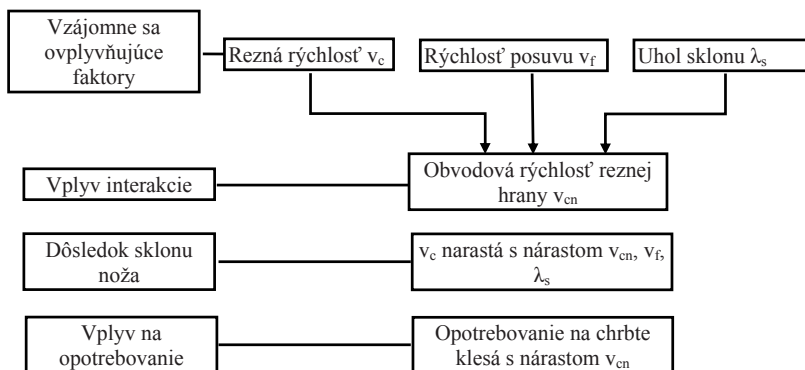
Pevnými parametrami experimentu boli:

- drevinu: smrek a buk,
- vlhkosť: 12%.

Premenlivými parametrami boli:

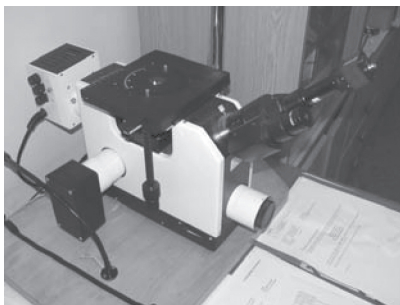
- rezná rýchlosť: $257 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $206 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $172 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $132 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$,
- posuv na otáčku: 0,05 mm, 0,1 mm, 0,2 mm, 0,4 mm,
- uhol sklonu noža: 5° , 10° , 20° , 40° ,
- hĺbka rezu: 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm.

Experiment sa uskutočnil pri neúplnej matici experimentu vytvorenej tak, aby výsledky práce boli dostatočne hodnoverné a s vysokou vypovedacou hodnotou. Cieľom bolo vyhodnotiť vplyv vybraných faktorov na silu a jej zložky, opotrebovanie nástroja, kvalitu obrobeného povrchu a štruktúru triesok. Faktory, ktoré sa navzájom ovplyvňujú, sú v nasledujúcej schéme, ktorá však nezahŕňa napr. rôzne vlastnosti rôznych druhov obrábaného materiálu, resp. jeho prípadné zmeny pri obrábaní, ani rôzne materiály rezného klina.



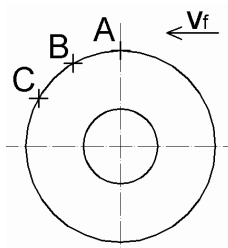
Obrázok 2 Vzájomné interakcie a spôsob ich výberu

Meranie opotrebovania nožov sa vykonalo bezkontaktným spôsobom – opticky. Použil sa upravený mikroskop MTM 350 so zabudovanou digitálnou monochromatickou CCD kamerou, pričom obraz bol zaznamenávaný pomocou softwaru CF Surface[©], skúmaný parameter bol meraný v softvare Gipm 2.0[©] a ďalej štatisticky spracovávaný softwarom Štatistica 6.0[©]. Meranie sa uskutočnilo pri 100 násobnom zväčšení meraného objektu.



Obrázok 3 Mikroskop MTM 350 s monochromatickou CCD kamerou, krokovým motorom vertikálneho zdvihu stola

Na každom nástroji bolo merané opotrebovanie na chrbte (Δ_α) a na čele (Δ_γ) a bolo merané na troch miestach (obr. 4); v každom meracom bode sa meranie opakovalo päťkrát. V tomto príspevku sú uvedené výsledky merania opotrebovania na chrbte.



Obr. 4 Miesta merania

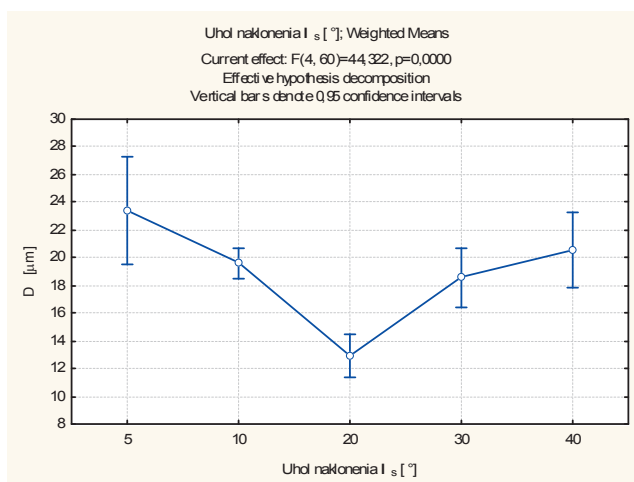
3. VYHODNOTENIE EXPERIMENTU

Z obr. 5 až 7 a tabuľky 1 je zrejmé, že opotrebovanie na chrbte významne závisí na uhle sklonu reznej hrany λ_s . Opotrebovanie bolo v troch meracích miestach rôzne, avšak nie štatisticky významne, nakoľko sa jednotlivé intervaly spoľahlivosti prekrývajú. Aj napriek tomu sú hodnoty opotrebovania zoradené podľa svojej veľkosti. Uhol λ_s , pri ktorom sa rezná hrana opotrebovala najmenej, bol 20° . Kombinácia oboch faktorov – uhla sklonu a miesta merania sa podľa štatistického zhodnotenia ukázala tak isto významná, predovšetkým z dôvodu opotrebovania v mieste „A“ kde sú hodnoty najväčšie. Táto skutočnosť vyplýva z toho, že toto miesto sa na rezaní zúčastňovalo najviac. Preto

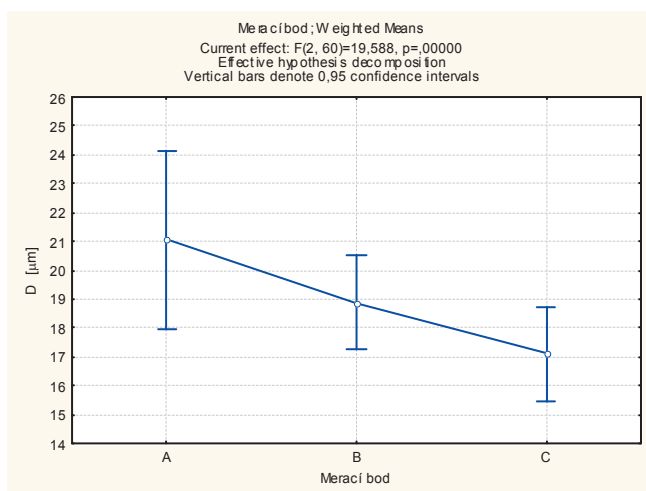
matematické vyjadrenie priebehu opotrebovania Δ_α môžeme vyjadriť, pre meracie miesto „A“, rovnicou (1):

$$\Delta_\alpha = 49,0858 - 22,9552 \cdot \lambda_s + 3,6939 \lambda_s^2 \quad (1)$$

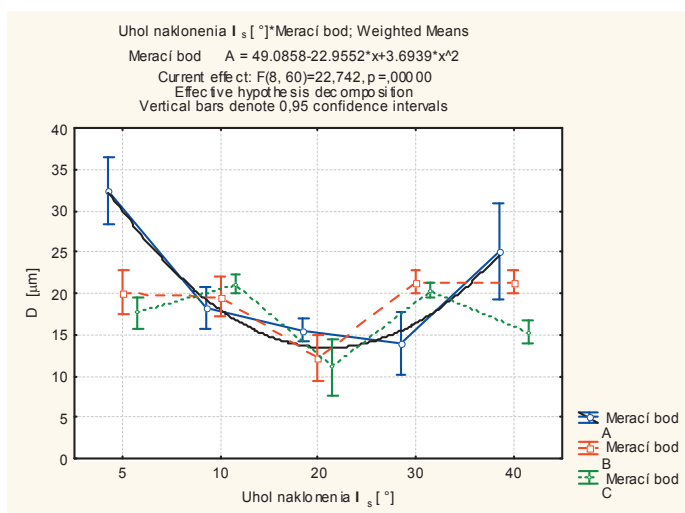
Technologické podmienky posuvov v_f , rezných rýchlostí v_c a hĺbok rezu a_p boli identické ako pri meraniach rezných síl, ktoré uskutočnili Javorek, Hric (2009). Vyhodnotenie bolo vykonané vzhľadom na uhol sklonu reznej hrany λ_s , miesto merania na nástroji a druhú obrábanu dreviny. Pred obrábaním s daným nástrojom bol zmeraný jeho počiatočný stav.



Obr. 5 Priebeh opotrebovania Δ_α vzhľadom na uhol sklonu reznej hrany λ_s (nôž A)



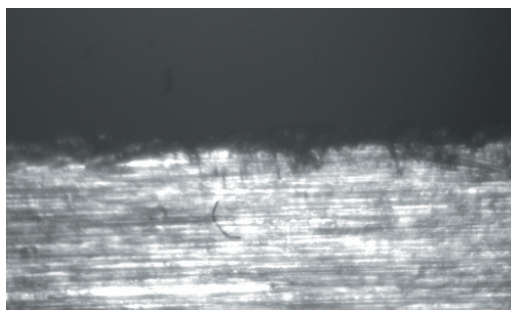
Obr. 6 Priebeh opotrebovania Δ_α vzhľadom na polohu meracieho miesta (nôž A)



Obr. 7 Priebeh opotrebovania Δ_α pri kombinácií uhol sklonu reznej hrany λ_s a polôh meracích miest (nôž A)

Tab. 1 Fisherov Fvtest významnosti pre Δ_α , (nôž A) – smrek (tabuľka MANOVA)

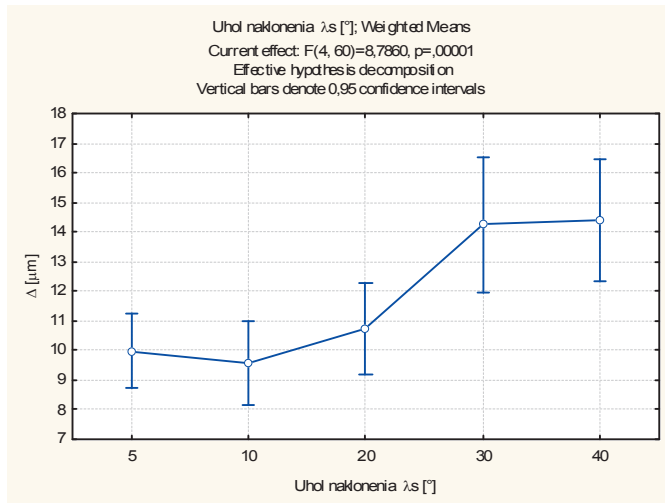
Premenné	Stupeň voľnosti	Súčet štvorcov	Rozptyl	F-test	Hladina významnosti
Uhol sklonu λ_s	888,65	4	222,16	44,322	0,000000
Merací bod	196,37	2	98,18	19,588	0,000000
Uhol sklonu λ_s + Merací bod	911,95	8	113,99	22,742	0,000000
Chyba	300,75	60	5,01		



Obr. 8 Počiatočný stav noža A – chrbát; $\Delta_\alpha = 19,6 \mu\text{m}$, materiál obrobku smrek

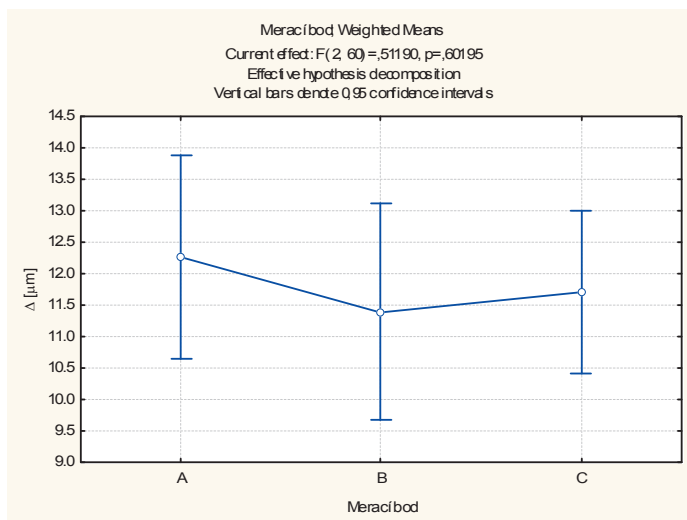
Nôž **B** bol používaný za tých istých technologických podmienok ako nôž A avšak materiál obrobku bol buk. Táto zmena materiálu má vplyv pre priebehy opotrebovania na reznom nástroji. Pri vyhodnotení opotrebovania na chrbte nástroja (obr. 9 až 11) je štatisticky významným iba zmena uhla sklonu reznej hrany λ_s , avšak len pri zmene uhla z 20° na 30°. Hodnoty v rozmedzí 5° až 20° a v rozmedzí 30° až 50° sa štatisticky významne nelíšia.

Ak vezmeme v súvislosti s týmto javom do úvahy aj vzájomnú interakciu uhol sklonu a meracieho miesta, tak zistíme, že významne sa tomto jave podieľajú najmä miesta „A“ a „B“.

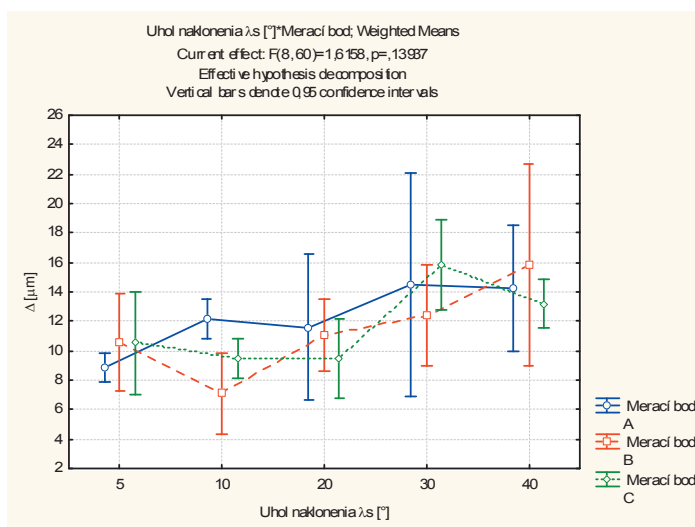


Obr. 9 Priebeh opotrebovania Δ_α vzhľadom na uhol sklonu reznej hrany λ_s (nôž B)

Tento výsledok korešponduje s teoretickým predpokladom opotrebovania sa reznej hrany vzhľadom na meracie miesto. Rovnako opotrebovanie v mieste „C“ vzhľadom na uhol λ_s odpovedá teoretickému predpokladu, že pri vyšších hodnotách tohto uhla bude dochádzať k vyšším hodnotám opotrebovania a to najmä v dôsledku namáhania reznej hrany na ohyb. Hodnoty Fischerovho F-testu sú uvedené v tabuľke č. 2.



Obr. 10 Priebeh opotrebovania Δ_α vzhľadom na polohu meracieho miesta (nôž B)



Obr. 11 Priebeh opotrebovania Δ_α pri kombinácií ulov sklonu reznej hrany λ_s a polôh meracích miest (nôž B)

Tab. 2 Fisherov F-test významnosti pre Δ_α , nôž B – buk (tabuľka MANOVA)

Premenné	Stupeň voľnosti	Súčet štvorcov	Rozptyl	F-test	Hladina významnosti
Uhol sklonu λ_s	333,38	4	83,34	8,786	0,000012
Merací bod	9,71	2	4,86	0,512	0,601952
Uhol sklonu λ_s + Merací bod	122,62	8	15,33	1,616	0,139372
Chyba	569,16	60	9,49		

Tab. 3 Štatistické porovnanie opotrebovania Δ_α na chrbte nástrojov A a B

Premenné	Test	Hodnota	F-test	Efekt	Chyba	Hladina významnosti
Uhol sklonu λ_s	Wilkinsonov	0,148488	23,528	8	118	0,000000
Merací bod	Wilkinsonov	0,590930	8,875	4	118	0,000003
Uhol sklonu λ_s + Merací bod	Wilkinsonov	0,187614	9,652	16	118	0,000000

4. ZÁVER

Uhol sklonu reznej hrany významným spôsobom ovplyvňuje opotrebovanie noža na chrbte. Poznanie jeho kritickej hodnoty môže predĺžiť trvanlivosť reznej hrany, celkovú životnosť nástroja a v konečnom dôsledku efektívnosť obrábania.

Z hľadiska trvanlivosti nástroja pri meniacich sa technologických podmienkach obrábania sa ako optimálny javí uhol sklonu reznej hrany $\lambda_s \approx 25^\circ$ pre smrek. Pre obrábanie buka týmto typom noža je optimálny $\lambda_s \approx 10^\circ$. Porovnanie priemerných hodnôt opotrebení vedie k neočakávanému, no v konečnom dôsledku však logickému záveru.

Hodnoty opotrebovaní Δ_α na chrbte nástroja sú nepomerne vyššie pri obrábaní smreka než pri obrábaní buka. Štatisticky je tento rozdiel významný (tabuľka 3). Tento rozdiel byť

môže zapríčinený rôznou anatomickou stavbou drevín a z toho vyplývajúcich mechanických vlastností. Smrek sa pri obrábaní týmto typom noža a pri daných technologických podmienkach správal poddajnejšie, t.j. najmä v mieste „A“ kde bol kontakt nástroja a obrobku najintenzívnejší, dochádzalo v obrobku k pomerne veľkým plastickým deformáciám a tým k väčšej stykovej ploche medzi chrbtom nástroja a obrobenej plochou tesne za zónou rezania. Túto skutočnosť potvrdzuje aj veľký rozdiel medzi mechanickými vlastnosťami jarného a letného dreva smreku, čo sa prejavuje stlačením mäkkého jarného dreva pri obrábaní na úroveň dreva letného, ktoré je tvrdšie a menej poddajné. Dôsledkom tohto javu je vystúpenie mäkkého dreva po uvoľnení plastickej deformácie pôsobením času, alebo vystavením dreva iným klimatickým podmienkam (hlavne vzdušná vlhkosť). Z toho sa dá usudzovať, že smrek pri sústružení opotrebováva najmä chrbát nástroja a to už aj pri malom dĺžkovom intervale obrobenej plochy.

5. LITERATÚRA

- JAVOREK, L.; NAŠČÁK, L.; NOVÁČEK, E.; MONIŠ, P. (2004): Rezná sila pri sústružení. In: „Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva '04“, Starý Smokovec – Tatry. 119–124. ISBN 80-228-1385-0.
- JAVOREK, L.; HRIC, J. (2005): Konštrukcia nástroja a výkon potrebný na rezanie. In. Acta Facultatis Technicae. Technická univerzita vo Zvolene. Roč. VIII., (1). 107–116. ISBN 80-228--1517-9.
- JAVOREK, L. (2006): Nástroje (1. časť). Vydavateľstvo TU vo Zvolene. 171 s. ISBN 978 80-228-1714-1.
- MOSTOWSKI, R., WIELOCH, G., OSAJDA, M. (2007): Analiza penetracji ostrza noża grzybkowego o małej średnicy. Wood-Machine-Tool-Workpiece. Agricultural University of Poznań. Poznań-Będlewo. 49–90. ISBN 83-907754-5-X.
- JAVOREK, L.; HRIC, J. (2008): Obróbka drewna narzędziami z obracającą się krawędzią skrawającą. In: Obróbka skrawaniem 2, Innowacje. Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania. Krakow. 402–407. ISBN 978-83-912887-8-8.
- CHMIELEWSKI, K., CIELOSZYK, J., ZASADA, M. (2008): Model kształtowania stanu geometrycznego powierzchni w procesie toczenia narzędziami z samoobracającą się ostrzem. Obróbka skrawaniem 2. Innowacje. Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania. Krakow. 352–359. ISBN 978-83-912887-8-8
- WIELOCH, G.; OSAJDA, M. (2008): Construction of self-propelled rotary tool (SPRT) for wood turning. Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Forestry and Wood Technology No 66, 192–195. ISSN 1898-5912.
- JAVOREK, L.; HRIC, J. (2009): Siły skrawania podczas obróbki narzędziami z samoobracającą się krawędzią skrawającą. In Obróbka skrawaniem 3, Zaawansowana technika. Bydgoszcz. 307–313. ISBN 978-83-61314-96-7.

Tento príspevok vznikol ako výsledok vedeckej aktivity autorov pri riešení vedeckého grantového projektu VEGA 1/0751/08, s výraznou finančnou podporou Vedeckej grantovej agentúry Slovenskej republiky.

Kontaktná adresa:

doc. Ing. Ľubomír Javorek, CSc. Katedra drevárskych strojov a zariadení. Fakulta environmentálnej a výrobnéj techniky, Technická univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 24, SK – 960 53 Zvolen
e-mail: lubomir.javorek@vsld.tuzvo.sk

Ing. Jozef Hric, BOTO, spol. s r. o. Považská 30, 940 01 Nové Zámky

URČOVANIE POSUVNEJ RÝCHLOSTI PÍLY PRI SKRACOVANÍ DREVA ŤAŽBOVÝM STROJOM

DETERMINATION OF THE RATE OF SAW FEED DURING LOG CROSS-CUTTING BY A HARVESTER

Milan MIKLEŠ

ABSTRAKT: V príspevku sú uvedené výsledky analýzy procesu skracovania dreva ťažbovým strojom – harvesterom s použitím píly. Cieľom práce je určiť na základe pevnostného rozboru kritickú hodnotu šírky nedorezu, kedy môže dôjsť k odlomeniu, prípadne rozštípeniu dreva, ako aj stanoviť podmienky (posuvnú rýchlosť nástroja), pri ktorých by nemalo dôjsť k poškodeniu dreva.

Kľúčové slová: technika lesnícka; procesor; skracovanie dreva; rezné podmienky

ABSTRACT: The process of log cross-cutting by a saw of the harvester was analyzed. The cross-cutting and final phase of sawing lead to log damage (breaking off, splitting off) due to the weight of overhanging log. On the basis of strength analysis, the critical value of the diameter of uncut log when there occurs a risk of damage was determined. To prevent this, the cutting conditions – rate of saw feed – were determined.

Key words: forest machinery; processor; log cross-cutting; cutting conditions

ÚVOD

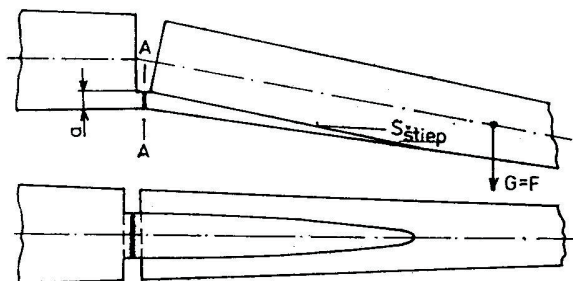
Pri skracovaní dreva pilou a pri výrobe sortimentov procesorom alebo harvesterom môže nastať poškodenie výrezu jeho odlomením alebo rozštípením pri dopilovaní prierezu kmeňa. Aby k poškodeniu výrezov nedochádzalo, je potrebné správne zvoliť posuvnú rýchlosť kotúčovej píly, ktorá závisí od druhu dreveniny, vlhkosti, teploty dreveniny, dĺžky pripravovaných sortimentov a od typu kotúča. Všeobecné a jednoznačné vyjadrenie týchto závislostí je nemožné pre anizotropiu drevenej suroviny.

V predloženom príspevku sú uvedené výsledky analýzy problému a výpočet kritickej hrúbky nedorezu a posuvnej rýchlosti pre konkrétne podmienky.

URČENIE KRITICKEJ HODNOTY NEDOREZU

Pod slovom nedorez budeme rozumieť nedopilenu časť dreva. Kritická hodnota nedorezu je hrúbka nedorezu v okamihu, keď začne dochádzať k porušovaniu výrezu, t. j.

k rozštípeniu časti výrezu alebo k odlomeniu nedorezu, čím sa vyrábaný sortiment znehodnotí (obr. 1): $A - A$ – kritický prierez, v ktorom môže dôjsť k odlomeniu nedorezu; S štiep – predpokladaná plocha odštípenia výrezu pri kritickej hodnote nedorezu a .



Obr. 1 Kritické prierezy pri skracovaní

Pri skracovaní procesorom vzniká v zóne rezania zložitý priestorový napät'ový stav dreva. Ako ukázali výskumy o porušení dreva v týchto podmienkach, priestorový napät'ový stav dreva môže byť zjednodušený na jednoosový. Charakter rozdelenia napätia v nedorezu (v danom prípade tvar nedorezu je segment) môže byť analogický s charakterom rozdelenia napätia v zakrivenom prúte alebo nosníku. Časť tohto nedorezu predstavujúca lichobežník sa v zodpovedajúcich podmienkach (na rezanie vlákien rezným nástrojom spolu s otáčaním prierezu nedorezu po určitý uhol γ) môže porušiť zlomom alebo oddelením vlákien. Pri určitom vzťahu veľkosti nedorezu výrezu k uhlu jeho otočenia môže porušenie nastať pri zodpovedajúcom vzťahu normálových σ a tangenciálnych τ napätí. V danom prípade pod pevnosťou dreva možno rozumieť medznú deformáciu vlákien v blízkosti dna rezu, vyjadrenú uhlom otáčania výrezu. Uhol γ zodpovedajúci medznej podmienke pevnosti nazveme medzným prípustným uhlom otáčania prierezu nedorezu výrezu (obr. 2).

Pre určenie tohto uhla zavedieme tieto hypotézy:

$$F_t = F_d = F_{st} \quad (1)$$

kde: F_t – sila v ťahovej zóne nedorezu,
 F_d – sila v tlakovej zóne nedorezu,
 F_{st} – sila štiepenia pozdĺž vlákien.

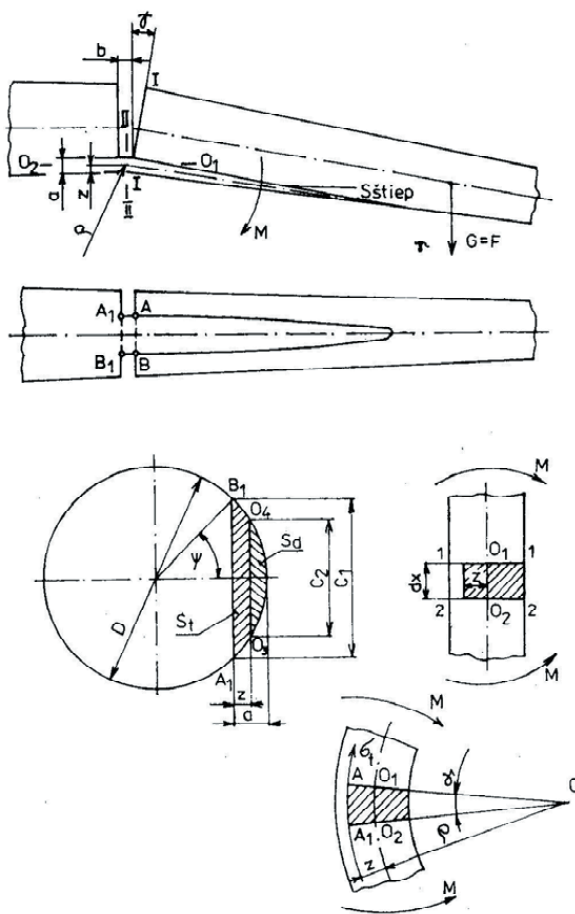
Keď predpokladáme, že k trhlinám (odštípeniu) dochádza v ťahovej zóne nedorezu, potom výraz (1) nadobudne tvar

$$F_t = F_{st} \quad (2)$$

alebo

$$o_t \cdot S_t = \tau_{st} \cdot S_{st} \quad (3)$$

kde: S_t – plocha ťahanej časti segmentu nedorezu,
 S_{st} – plocha, na ktorej dochádza k odštípeniu.



Obr. 2 Schéma napätovo-deformačného stavu

Plochou porušenia S_{st} môže byť predovšetkým plocha zodpovedajúca dnu rezu (úsečka AA_1), kde dochádza ku koncentrácii napätí.

Keď pripustíme, že pri ohybe vlákna navzájom na seba netlačia, a že každé vlákno podlieha prostému ťahu alebo tlaku, pre výpočet napätia σ_t môžeme použiť Hookov zákon pre ťah:

$$\sigma_t = E \cdot \varepsilon \quad (4)$$

kde: E – modul pružnosti dreva v ťahu pozdĺž vlákien,
 ε – relatívne predĺženie.

Pre určenie relatívneho predĺženia vlákien na úsečke AA_1 budeme sledovať deformáciu nedorezu. Vytkneme z neho element dĺžky dx ohraničený dvoma nekonečne blízkymi prierezmi 1 – 1 a 2 – 2. Pohľad na element pred deformáciou a po nej je na obr. 2. Čiara

$O_1 - O_2$ patriaca neutrálnej vrstve si zachová svoju počiatočnú dĺžku dx . Všetky vlákna, ktoré ležia vľavo od neutrálnej osi, sa predlžujú a vpravo sa skraccujú. Nájdeme predĺženie vlákna AA_1 , ktorého plocha sa nachádza vo vzdialenosti z od neutrálnej osi a ktoré je rozťahnuté silou F .

Počiatočná dĺžka tohto vlákna:

$$dx = \widehat{O_1O_2} = \rho d\gamma.$$

Po deformácii jeho dĺžky na oblúku $\widehat{AA_1} = (\rho + z) \cdot d\gamma$ absolútne predĺženie sledovaného vlákna bude

$$\Delta l = (\rho + z)d\gamma - \rho d\gamma = zd\gamma,$$

relatívne predĺženie je rovné

$$\varepsilon = \frac{zd\gamma}{\rho d\gamma} = \frac{zd\gamma}{dx}, \quad (5)$$

kde: ρ – rádius zakrivenia neutrálnej osi,

vtedy platí

$$\sigma_t = E \frac{zd\gamma}{dx} \quad (6)$$

odtiaľ

$$d\gamma = \frac{\sigma_t dx}{E \cdot z}$$

alebo po integrovaní

$$tg\gamma = \frac{\sigma_t \cdot b}{E \cdot z} \quad (7)$$

kde: b – šírka rezu.

Dosadením vzťahu (5) do vzorca (3) dostaneme:

$$ES_t \frac{zd\lambda}{dx} = \tau_{st} \cdot S_{st} \quad (8)$$

$S_t \cdot z = S_{stat}$ – statistický moment plochy prierezu rozťahnutej zóny segmentu nedorezu výrezu k jeho neutrálnej osi, potom

$$E \cdot S_{stat} \frac{d\gamma}{dx} = \tau_{st} \cdot S_{st}$$

odtiaľ

$$d\gamma = \frac{\tau_{st} \cdot S_{st} \cdot dx}{E \cdot S_{stat}}$$

po integrovaní:

$$tg \gamma = \frac{\tau_{st} \cdot S_{st} \cdot b}{E \cdot S_{stat}} \quad (9)$$

Zo získaných rovníc (7) a (9) určíme hraničné podmienky pevnosti nedorezu roztrhnutých vlákien a vlákien, ktoré vznikli rozštiepením. Prierezy, u ktorých dôjde k ťahu S_t a rozštiepeniu S_{stiep} dreva výrezu vypočítame z výrazov:

$$S_t = \frac{C_1 + C_2}{2} \cdot z \quad (m^2) \quad (10)$$

$$S_{stiep} = \frac{D^2}{2t} \left[\sin \varphi - \ln \left(\frac{1 + \sin \psi}{\cos \psi} \right) \cos^2 \psi \right] \quad (m^2) \quad (11)$$

kde: C_1 – šírka segmentu nedorezu v mieste pílenia,
 C_2 – šírka segmentu nedorezu v mieste ťažiska jeho plochy.

$$C_1 = D \cdot \sin \psi \quad (m)$$

kde: D – priemer výrezu v mieste rezu.

$$C_2 = 2 \sqrt{\frac{D^2}{4} - y_s^2} \quad (m)$$

kde: y_s – vzdialenosť stredu prierezu stromu a ťažiska plochy segmentu nedorezu.

$$y_s = \frac{3}{4} \cdot \frac{(D - a)^2}{(1,5D - a)}$$

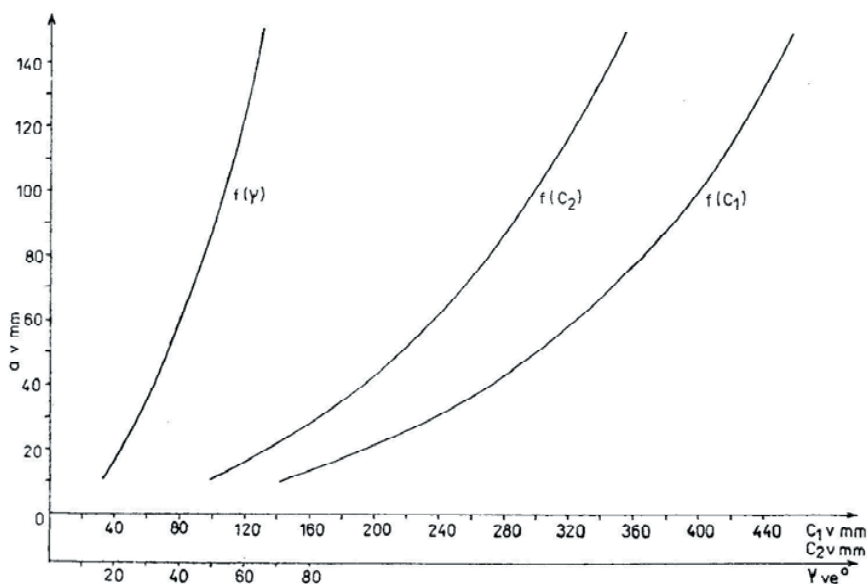
kde: a – hrúbka segmentu nedorezu = $\frac{D}{2}(1 - \cos \psi)$
 z – vzdialenosť ťažiska segmentu od dna rezu.

$$z = y_s - \frac{D}{2} \cos \psi = \frac{3}{4} \cdot \frac{(D - a)^2}{(1,5D - a)} - \frac{D}{2} \cos \psi$$

kde: ψ – polovica stredového uzla segmentu nedorezu.

$$t_1 = D \left(\frac{1}{L} - \frac{1}{q_0} \right)$$

kde: t_1 – zbiehavosť kmeňa,
 q_0 – koeficient tvaru kmeňa
 pre smrek, smrekovce, dub $q_0 = 1,40$;
 borovicu, cér, jedľu, buk $q_0 = 1,25$;
 L – 1,3 m.



Obr. 3 Závislosť veličiny nedorezu a od ψ , C_1 , C_2

Podľa Perfilova je veľkosť sily štiepenia pozdĺž vlákien úmerne rastúca so zväčšovaním plochy štiepenia. Pri dosiahnutí (kde b – šírka, h – výška, l – dĺžka plochy štiepenia, v našom prípade $h = z$, $F_t = F_{\text{štiepenia}}$), sa ďalšie zvyšovanie tejto sily preruší, dochádza k odštiepeniu.

$$S_{\text{štiep.skut.}} = 9 \cdot \frac{C_1 + C_2}{2} \cdot z$$

Veličina nedorezu a , resp. posuvná rýchlosť, môže byť zjednodušene určená analyticky týmto spôsobom:

pri strednej uhlovej rýchlosti otáčania výrezu ω_{st} platí:

$$\omega_{st} = \frac{\pi}{180} \cdot \frac{\gamma}{t}$$

kde: t – čas otočenia výrezu, zodpovedajúci času spil'ovania nedorezu o hrúbke a , pri posuvnej rýchlosti kotúčovej píly U platí:

$$t = \frac{a}{U}$$

potom

$$\omega_{st} = \frac{\pi}{180} \cdot \frac{\gamma}{a} \cdot U \quad (1/s)$$

$$\omega_{st} = \frac{\omega_0 + \omega}{2}, \quad \omega_0 = 0$$

Po dosadení hodnoty uhla γ dostaneme:

$$\omega = 2 \cdot \omega_{st}$$

$$\omega = 2 \cdot \frac{\pi}{90} \cdot \frac{\gamma}{\omega} \cdot U$$

$$a = \frac{\pi}{90} \cdot \frac{U}{\omega} \cdot \arctg \frac{\tau_{st} S_{st}}{E \cdot S_{stat}} \cdot b$$

Pri určovaní kritickej hodnoty hrúbky nedorezu a musíme poznať posuvnú rýchlosť rezného nástroja.

Pri určovaní posuvnej rýchlosti U rezného nástroja treba brať do úvahy (pri danej hodnote a) závislosť hodnoty a od uhla ψ , pretože platí:

$$a = \frac{D}{2} \left(1 - \cos \frac{\psi}{2} \right)$$

$$\psi = 2 \arccos \frac{\frac{D}{2} - a}{\frac{D}{2}}$$

kde: D – priemer výrezu v mieste rezu.

ZÁVER

Tento teoretický výpočet odporúčenej posuvnej rýchlosti rezného nástroja a hrúbky nedorezu objasňuje danú problematiku z hľadiska pevnosti. Použité sú určité zjednodušujúce predpoklady. Zanedbáva sa vplyv krútiaceho momentu od píly, tvar segmentu nedorezu je zjednodušený (berie sa do úvahy nepriaznivejší prípad). Vzhľadom na veľké množstvo faktorov vyplývajúcich na proces skracovania, anizotropiu dreva, druh, vlhkosť, teplotu dreva, hmotnostno-geometrických parametrov vyrábaných sortimentov, priaznivé výsledky z hľadiska poškodenia dreva dosiahneme pri rýchlostiach rezného nástroja nad $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a pri hornej hranici odporúčaného posuvu.

LITERATÚRA

1. TIMOŠENKO, S. P.; GERE, J. M.: Mechanics of Materials, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1972, 669 s.
2. TOROPOV, A. S.: Issledovaniji bezopornej raskrjaževski lesomaterialov. IVUZ Lesnoj žurnal, 1983, č. 6, s. 53–57

VEGA 1/0048/09 Výskum znižovania negatívnych vplyvov pôsobenia lesnej techniky na lesné prostredie s určením technických parametrov lesných mechanizmov pri spracovaní lesnej biomasy.

Kontaktná adresa:

prof. Ing. Milan Mikleš, DrSc., Technická univerzita vo Zvolene,
Katedra lesnej a mobilnej techniky, Masarykova 24,
960 53 Zvolen,
e-mail: mikles@vsld.tuzvo.sk

MINIMALIZÁCIA SPOTREBY ENERGIE VÝROBNÝCH SYSTÉMOV V LESOPESTOVNEJ ČINNOSTI

MINIMIZING OF ENERGY CONSUMPTION OF MANUFACTURING SYSTEMS IN FOREST PLANTING

Adolf JANEČEK – Ján MARKO

ABSTRAKT: Cieľom príspevku je informovať o aplikácii univerzálneho princípu minimaxu pri výbere vhodných typov strojov v lesopestovnej činnosti. Okrem optimalizácie technických a technologických parametrov strojov pri ich výbere sa rozhodujúci dôraz kládol na minimalizáciu spotreby energie na jednotku produkcie. Experimentálnym meraním je možné určiť, ktorý konštrukčný parameter má vplyv na energetiku, ekonomiku, alebo ekologickú čistotu práce. Zo skupiny strojov konštrukčne a technologicky podobných je možné pre dané podmienky navrhnúť, vybrať stroj danej výkonnosti konštrukčnej, o danej tiaži a pracovnom režime tak, aby pre zadaný objem prác stroj vynaložil minimálne množstvo energie vzťahnutej na jednotkový objem opracovanej hmoty. Optimalizácia je praktickým prínosom prírodného princípu minimaxu v procesoch práce.

Kľúčové slová: optimalizácia, lesná kultúra, výrobný systém

ABSTRACT: The article aims to inform about the application of the principle of minimax universal for selecting appropriate types of machines in silviculture activities. In addition to optimizing the technical and technological parameters of machines in their choice is crucial emphasis on minimizing energy consumption per unit of production. Experimental measurement is possible to determine which structural parameter affecting the energy, economy or environment. Within a group of machines that are similar in terms of construction and technology it is possible to design or choose a machine with a given weight, and work operation so, that for a given volume of work a machine will spend minimal energy per unit of processed mass. Optimisation is practical benefit of nature based minimax principle in work processes.

Key words: optimisation, forest culture, manufacturing system

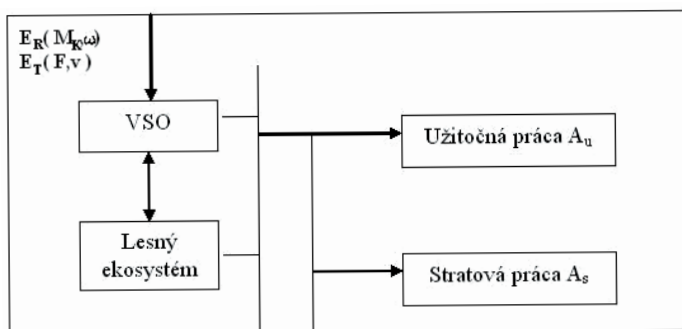
ÚVOD

Výrobný systém ochrany lesných kultúr vykonáva prácu nielen v závislosti na materiálovom alebo energetickom toku prechádzajúcom strojom, ale i na konštrukcii a veľkosti cesty, kadiaľ prechádza merná energia nutná na vykonanie technologického procesu. Optimalizácia je praktickým prínosom prírodného princípu minimaxu v procesoch práce.

1 TRANSFORMÁCIA ENERGIE NA UŽITOČNÚ PRÁCU

Stroje a zariadenia výrobných systémov ochrany (VSO) lesných kultúr, ktoré sa používajú v rámci lesného hospodárstva, konajú prácu. Práca je vykonávaná v dôsledku energetických transformácií, ktoré zabezpečujú technologické operácie zaisťujú konkrétne vykonávané práce, uvádzané v technických jednotkách (plečkovanie, drvenie, zavlažovanie)(Janeček, 1996).

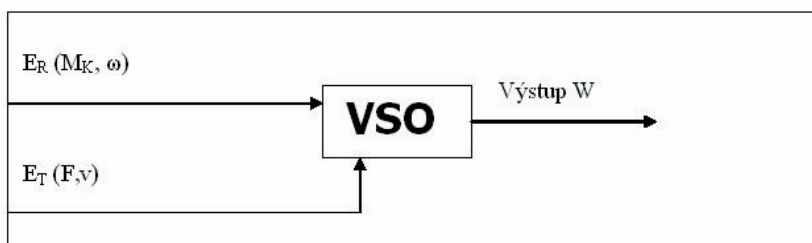
Bloková schéma energetického toku zaisťujúceho technologické operácie mobilného terénneho systému je na obr. 1.



Obr. 1 Bloková schéma energetického toku

$E_R(M_K, \omega)$ – energia vo forme rotačného pohybu vložená do technologického procesu VSO [J],
 $E_T(F, v)$ – energia vo forme transformačného pohybu vložená do technologického procesu VSO [J],
 A_u – užitočná práca konaná VSO [J], A_s – stratová práca konaná VSO [J], VSO – výrobný systém ochrany

Sústava strojov a zariadení tvorí výrobný systém v ochrane lesných kultúr a môžeme ho znázorniť blokovou schémou obr. 2, na vstupe výrobného systému VSO je energia rotačného pohybu $E_R(M_K, \omega)$ a energia transformačného pohybu $E_T(F, v)$. Tieto energie sú špecifikované parametrami M_K – krútiaceho momentu, ω – uhlovej rýchlosti a ďalej $E_T(F, v)$ – je funkciou sily konajúcej prácu F a príslušnej translačnej rýchlosti. Vstupujúce energie E_T, E_R konajú užitočnú prácu uvádzanú v technických jednotkách ha. Energie, pracovné sily, materiál potrebný na zabezpečenie technologického procesu je implicitne vyjadrený vo vstupných formách E_R, E_T , vid' obr. 2 (Janeček, 2007).



Obr. 2

W – práca v technických jednotkách [ha]

Účinnosť transformačnej energie η_c je daná známym vzťahom:

$$\eta_c = \frac{\frac{A_u}{\partial t}}{\frac{\partial E_T(M_K, \omega)}{\partial t} + \frac{\partial E_T(F, v)}{\partial t}} \quad (1)$$

η_c – účinnosť transformovanej energie konajúcej užitočnú prácu [-],

A_u – užitočná práca [J],

E_R – energia vo forme rotačného pohybu vstupujúca do VSO [J],

E_T – energia vo forme translačného pohybu vstupujúca do VSO [J],

v – rýchlosť translačného pohybu konajúceho prácu [m.s⁻¹],

M_K – parameter (krútiaci moment) špecifikujúci vstupnú energiu [N.m],

ω – parameter (uhlová rýchlosť) rotačnej energie [s⁻¹]

Mobilné výrobné systémy ochrany lesných kultúr pracujúce na úseku lesného hospodárstva pracujú s účinnosťou $\eta_c < 0,4 - 0,7 >$.

Užitočná práca sa demonštruje skutočne vykonanou prácou v technických jednotkách podľa postupu realizácie (sekvencie) transformácie:

$$\frac{\partial A_u}{\partial t} = M_K \cdot \omega + F \cdot v \Rightarrow W \quad (\text{ha.h}^{-1}) \quad (2)$$

Pri bežných inžinierskych výpočtoch, odhadoch sa pre energiu rotačného alebo translačného pohybu používajú vzťahy:

$$\frac{\partial E_R}{\partial t} = M_K \cdot \omega \Rightarrow W \quad (\text{ha.h}^{-1}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial E_T}{\partial t} = F \cdot v \Rightarrow W \quad (\text{ha.h}^{-1})$$

Vzťahy (3) predstavujú transformáciu energií, ktorých výsledkom je skutočne vykonaná práca v technických jednotkách, t.j. výkonnosť W . Výkonnosť W v jednotlivých operáciách lesopestovnej činnosti (príprava pôdy) je uvádzaná v ha.h⁻¹, t.j. v hektároch vykonanej práce za jednotku času.

Straty vznikajúce pri transformácii energie na užitočnú prácu sú dané vzťahom:

$$\frac{\partial A_z}{\partial t} = \frac{\partial A_t}{\partial t} \quad (4)$$

A_z – straty vznikajúce pri transformačnom procese (J),

A_t – straty spôsobujúce pri transformačnom procese škody (J).

2 DIVERZIFIKÁCIA STRÁT

Zistenie dielčích strát bolo uskutočnené pomocou simulácií na PC a pomocou experimentov vykonávaných v teréne a analyticky. Priemerné hodnoty nadmernej spotreby energie zistené pri jednotlivých experimentoch a činnostiach sa pohybovali v jednotlivých intervaloch nasledovne:

- nadmerná spotreba energie pri vzniku zhutnenia a porušenia pôdneho povrchu porastu a poškodenia pôdneho povrchu A_{uT} :

$$A_{uT} \in \langle 2 - 15 \rangle \% \quad (5)$$

- nadmerná spotreba energie pri poškodení koreňového systému lesných porastov A_K :

$$A_K \in \langle 1 - 8 \rangle \% \quad (6)$$

- prírastok produkcie emisií cudzorodých látok (CL) (CO , CO_2 , NO_x , SO_2 , sadze...) v dôsledku nadmernej spotreby energie A_E :

$$A_E \in \langle 3 - 8 \rangle \% \quad (7)$$

- straty vzniknuté poškodením stojacich stromov A_S :

$$A_S \in \langle 1 - 6 \rangle \% \quad (8)$$

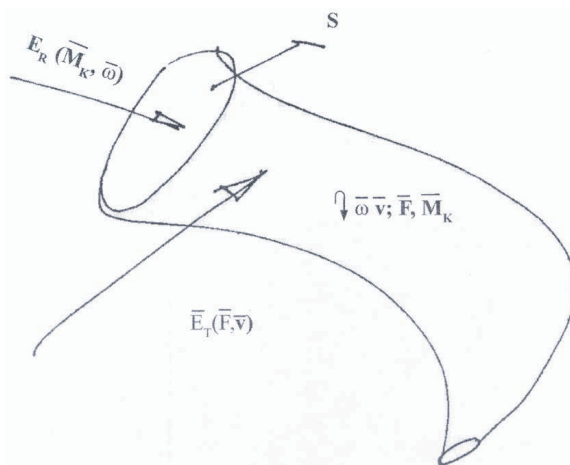
3 PRINCÍP MINIMAXU A JEHO POUŽITIE V OBLASTI VEDECKO-TECHNICKÝCH VÝPOČTOV PRI OPTIMALIZÁCII VSO

Obecne je objektom skúmania systém. Do systému vstupujú energetické, materiálové vstupy i vstupy pracovných síl.

Po vykonaní rôznorodých vstupov na rovnakého menovateľa na vstupe do systému je energia, hmota alebo pracovná sila prepočítaná na energiu.

Systém koná konkrétne činnosti, ich výsledkom je práca v technických jednotkách. V pestovnej činnosti na úseku ochrany lesných kultúr sú to hektáre opracovanej hmoty za jednotku času. Intenzita práce realizovaná systémom má vplyv na množstvo energie, ktorú je nutné dodať, aby systém vykonal prácu (Janeček, 1996).

Energia prechádzajúca systémom VSO má v konkrétnych konštrukčných realizáciách, VSO i časti stroja rôznu rýchlosť pohybu a prechádza rôznym prierezom konštrukčného procesu stroja rôznou rýchlosťou (obr. 3).



Obr. 3

Inými slovami translačná energia $E_T(F, v)$ a energia rotačného pohybu $E_R(M_K, \omega)$ sa pri konaní operácie technologického procesu mení. Platia relácie:

$$\begin{aligned} E_R(M_K, \omega) &\neq \text{const} \\ E_T(F, v) &\neq \text{const} \end{aligned} \quad (9)$$

E_R – rotačná energia prechádzajúca a transformujúca sa v danom prvku stroja (J),
 E_T – translačná energia transformujúca sa v danom prvku stroja (J),
 S – prierez kanála, ktorým prechádza transformujúca sa energia prvkom stroja (m^2),
 v – rýchlosť zmien transformácie prechádzajúcej prierezom S prvku stroja ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),
 F – silové pôsobenie transformujúcej sa energie na stroj či prvok (N),
 ω – rýchlosť zmien transformácie prechádzajúcej rotačnej energie prierezom prvku stroja (s^{-1}),
 M_K – momentové pôsobenie transformujúcej sa energie na stroji či prvku stroja (Nm)

Platí:

$$E_C = E_T + E_R + E_S + E_O \quad (J) \quad (10)$$

E_C – celková energia dodávaná do procesu (J),
 E_T – translačná energia dodávaná do procesu (J),
 E_R – rotačná energia dodávaná do procesu (J),
 E_S – spotreba energie v dôsledku výskytu disipatívnych síl (J),
 E_O – spotreba ostatnej energie v pracovnom procese (J).

Počas realizácie procesu sa spotrebáva časť energie v dôsledku výskytu disipatívnych síl. Spotreba energie je tým väčšia, čím systém pracuje s vyššou intenzitou práce. Intenzita práce systému – VSO je špecifikovaná transformáciou energie v procese priechodu energie systémom. Priechod energie pracujúcim systémom VSO je charakterizovaný prierezom energetického toku a rýchlosťou pohybu (transformácie) energie v priereze S . Čím rýchlejšie prebieha transformácia energie, t.j.:

$$\frac{\partial E_T}{\partial t} \gg 0 \Rightarrow \Delta E_S \quad (\text{kW}) \quad (11)$$

ΔE_S – stratová energia vznikajúca v procese transformácie (J),

$$\frac{\partial E_R}{\partial t} \gg 0 \quad (\text{kW}), \quad (12)$$

tým väčšie sú straty vznikajúce v technologickom procese realizovanom výrobným systémom v ochrane lesných kultúr.

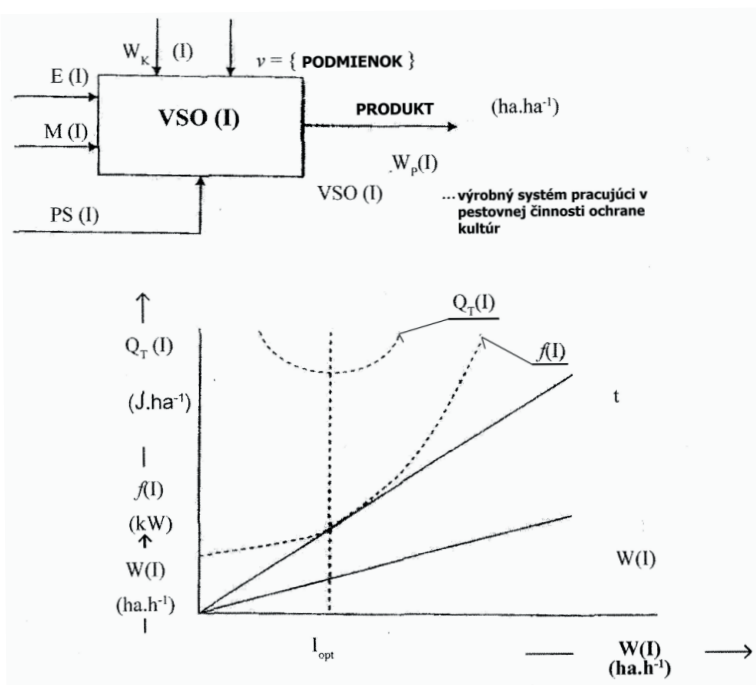
Inými slovami povedané, čím je väčšia intenzita transformácií konaných strojom, t.j. čím väčšia je výkonnosť stroja udávaná v technických jednotkách, tým väčšie sú straty vznikajúce v konkrétnom stroji.

Ak sa zvyšuje výkonnosť systému, t.j. pracovného stroja lineárne, potom na zabezpečenie lineárneho rastu výkonnosti musí stroj prijímať energiu E_T , E_R exponenciálne rastúcu (obr. 4).

Na zaistenie výkonnosti $W(I)$, ktorá je funkciou S prierezu toku energie a v rýchlosti toku energie, t.j. výkonnosti rastúcej lineárne, musí stroj na realizovanie trendu spotrebávať energiu $f(I)$ rastúcu exponenciálne.

Ak sa vzťahne výstup systému ku vstupu do systému, obdrží sa krivka spotrebovanej energie nutnej k tomu, aby pri danej intenzite transformácie energie stroj konal prácu.

Ak je stroj správne dimenzovaný – konštruovaný, je možné nájsť režim práce, kedy stroj vykoná množstvo fyzickej práce $W(I)$ a na toto množstvo fyzickej práce stroj – systém vynaloží minimum energie. Vyššie povedané je formálne graficky vyjadrené na obr. 4.



Obr. 4

- W_K – riadiaci parameter výkonnosti ($ha.h^{-1}$),
- v – vektor pracovných podmienok (–),
- VSO – výrobný systém ochrany lesných kultúr (–),
- E – energetický vstup (J),
- M – materiálový vstup (kg),
- PS – vstup pracovných síl (Euro),
- $W(I)$ – výkonnosť ($ha.h^{-1}$),
- $Q_T(I)$ – spotrebovaná energia, vzťahujúca sa na jednotku opracovanej hmoty ($J.ha^{-1}$),
- $f(I)$ – energia dodávaná VSO za jednotku času ($kJ.h^{-1}$),
- $I = S \cdot v$ – intenzita práce systému ($ha.h^{-1}$),
- S – prierez toku energie (m^2),
- v – rýchlosť toku energie ($m.s^{-1}$).

4 PRAKTICKÝ PRÍNOS PRÍRODNÉHO PRINCÍPU MINIMAXU V PROCESOCH PRÁCE VSO

4.1 Vhodnosť VSO pre vykonanie danej práce

Ak je experimentálne (prípadne analyticky alebo simuláciou na počítači) zistená väzba medzi výkonnosťou a prácou vykonanou VSO tak, aby boli splnené relácie:

$$\frac{\partial Q(S, v)}{\partial S} = 0, \quad \frac{\partial Q(S, v)}{\partial v} = 0, \quad (13)$$

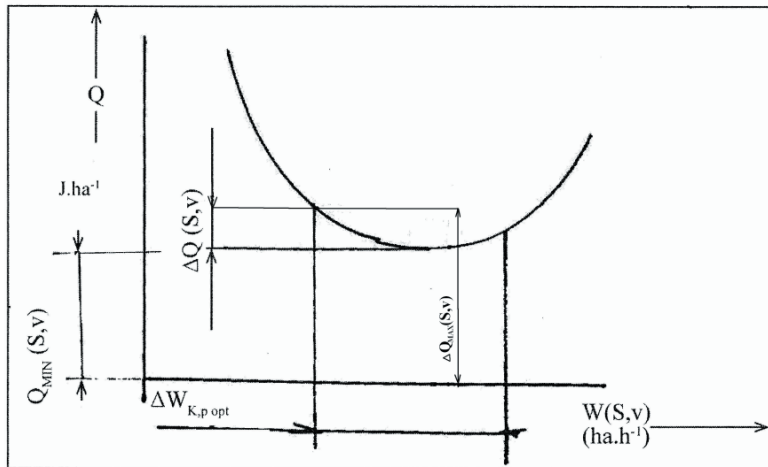
dosiahne VSO optimálne hodnoty z hľadiska energetického, ekonomického alebo ekologického kritéria. Systém pri svojom pracovnom režime bude pracovať optimálne, ak bude platiť:

$$\Delta Q(S, v) \langle \Delta Q(S, v) \rangle_{MAX} \quad (\text{J} \cdot \text{ha}^{-1}) \quad (14)$$

Optimálny režim výkonnosti VSO bude v oblasti špecifikovanej:

$$W \in \langle \Delta W_{opt} \rangle \quad (\text{ha} \cdot \text{h}^{-1})$$

Režim VSO charakterizuje obr. 5.



Obr. 5

- Q – spotrebovaná energia vložená VSO do 1 ha opracovanej plochy ($\text{J} \cdot \text{ha}^{-1}$),
- S – prierez materiálového toku prechádzajúceho strojom (m^2),
- v – rýchlosť materiálového toku prechádzajúceho strojom ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),
- $Q(S, v)_{\text{MIN}}$ – minimálne hodnoty energie spotrebovanej pri práci ($\text{J} \cdot \text{ha}^{-1}$),
- $Q(S, v)_{\text{MAX}}$ – maximálna prípustná hodnota energie spotrebovaná pri práci VSO ($\text{J} \cdot \text{ha}^{-1}$),
- $\Delta Q(S, v)$ – prírastok energie spotrebovanej pri práci VSO ($\text{J} \cdot \text{ha}^{-1}$),
- $\Delta W_{\text{opt}}(S, v)$ – optimálny interval výkonnosti VSO ($\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$),
- $W(S, v)$ – výkonnosť VSO ($\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$).

4.2 Vplyv konštrukčných parametrov na spotrebu mernej energie, ekonomiku, alebo ekologickú čistotu práce

Experimentálnym meraním je možné určiť, ktorý konštrukčný parameter má vplyv na energetiku, ekonomiku, alebo ekologickú čistotu práce. Je možné zistiť, ako intenzívne pôsobí konštrukčný parameter na charakteristiku zadanú daným kritériom. Ďalej môžeme zistiť, či daný konštrukčný parameter pôsobí pozitívne alebo negatívne na energetiku, ekonomiku alebo ekologickú čistotu práce VSO.

Schématicky je možné zistiť vplyv pomocou rovnice:

$$\frac{\partial Q(W_K, W_P)}{\partial W_{K1}} \leq 0, \quad \frac{\partial Q(W_K, W_P)}{\partial W_{Ki}} \leq 0 \quad (15)$$

$Q(W_K, W_P)$ – merná energia, ekonomická náročnosť, ekologická čistota práce v závislosti na konštrukčnej alebo prevádzkovej výkonnosti ($J \cdot ha^{-1}$),

W_K – konštrukčná výkonnosť daná parametrami stroja ($ha \cdot h^{-1}$),

W_P – pracovná výkonnosť daná parametrami, konštrukciou a prevádzkou VSO ($ha \cdot h^{-1}$),

b – šírka pneumatiky (mm),

r_d – polomer trakčného ústrojenstva kovového VSO (mm),

λ_b – obecná súradnica ťažiska VSO (–),

λ_r – obecná súradnica charakterizujúca trakčné ústrojenstvo (–),

λ_H – obecná súradnica špecifikujúca polohu technologickej nadstavby (–),

$\lambda\lambda_1$ – obecná súradnica špecifikujúca polohu technologickej nadstavby (–),

p – tlak hustenia kolesového trakčného ústrojenstva (MPa).

ZÁVER

Predložená publikácia umožní analyzovať aký systém použiť a akým spôsobom vybaviť systém tak, aby spracoval daný objem prác v reálnom čase a z hľadiska vlozenej energie alebo nákladov tak, aby bol tento systém optimálny.

Podľa uvedených postupov je možné analyzovať vyššie uvedené problémy z hľadiska výkonnosti systému, konštrukcie, prevádzky za zmenu, sezónu alebo rok.

LITERATÚRA

JANEČEK, A.: 1996. Teorie obecné systémové analýzy, optimalizace parametrů lesní techniky a její ratifikace. LF ČZU Praha

JANEČEK, A.: 2007. Vliv pěstební techniky na životní prostředí. MZe Praha

Kontaktná adresa:

prof. Ing. Adolf Janeček, DrSc. Dr. h. c

Česká zemědělská univerzita, Lesnicko-dřevařská fakulta, 165 21 Praha 6-Suchbát, Česká republika, E-mail:janecek@fld.cz

doc. Ing. Ján Marko, CSc.

Katedra lesnej a mobilnej techniky, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky, TU vo Zvolene, e-mail: marko@vsld.tuzvo.sk

REFERÁT

VYVAŽOVANIE MONTÁŽNYCH LINIEK

EINTAKTUNG DER MONTAGELINIEN

Vladimír ŠTOLLMANN

ABSTRACT: Der Artikel beschäftigt sich mit den häufigst verwendeten Verfahren zum Fließbandabgleich in der Praxis. Der Artikel stellt die neusten Verfahren zum Fließbandabgleich vor, die im Mittelpunkt der Universitätsforschung stehen. Zum Schluß wird die Forschung in diesem Bereich am TU Zvolen erwähnt.

Key words: Fließbandabgleich, Montagelinien, Prioritätsregeln

ABSTRAKT: Článok sa zaoberá s najčastejšie používanými postupmi pre vyvažovanie montážnych liniek praxi. V článku sú predstavené najnovšie trendy v oblasti vyvažovania liniek, ktoré sú v popredí výskumu na domácich aj zahraničných univerzitách. V závere článku je spomenutý smer výskumu na TU Zvolen.

Kľúčové slová: vyvažovanie montážnych liniek, prioritné pravidlá, montáž

1. ÚVOD, VÝZNAM A CIELE VYVAŽOVANIA MONTÁŽNYCH LINIEK

Slovensko je krajina v ktorej strojársky priemysel už tradične zastáva významné miesto v ekonomike. V strojárskej oblasti u nás pôsobí veľké množstvo závodov, či už domácich alebo presunutých zo západnej Európy, ktorých ťažisko predstavuje montáž. Jedná sa predovšetkým o subdodávateľov a výrobcov automobilov a producentov spotrebnej elektroniky. Montáž v súčasnosti predstavuje činnosti, s vysokým podielom ľudskej práce a teda s vysokými nákladmi na personál. Jedným z možných cieľom vyvažovania linky je zabezpečenie primeraného rovnomerného vytťaženia materiálnych a ľudských zdrojov montážnej linky a tým zároveň minimalizáciu počtu potrebných montážnych pracovísk linky (podrobnejšie popísanie možných cieľov vyvažovania linky je uvedené v časti 3).

2. VŠEOBECNÉ PODMIENKY A OBMEDZENIA

Pri návrhu teórie vyvažovania liniek vychádzame z toho, že výrobný proces každého produktu sa dá rozložiť na operácie. Na operácie sa pri vyvažovaní výrobných liniek pozerá ako na nedeliteľné jednotky. K operáciám sú priradené operačné časy t_j ($j = 1, 2, \dots$) a medzi operáciami existujú reštrikcie typu predchodca-nasledovník. Tieto sa dajú vyjadriť napríklad využitím precedenčného grafu alebo formou tabuľky (Domschke, Scholl, Voß, 1993).

Výroba s časovou väzbou (s pevným taktom linky) – každá stanica má na vykonanie k nej pridelených operácií na produkte (výrobnej dávke) pevne určený maximálny časový limit – takt linky. Jednotlivé stanice sú navzájom spojené pomocou transportných zariadení. Taktovaný transport sa dá dosiahnuť dvomi spôsobmi:

1. Pás s pevnou rýchlosťou pohybujúci sa kontinuálne dopredu. Priestorové rozpätie stanice je potom determinované cez rýchlosť pásu a čas taktu.
2. Opracovávané dielce sa posúvajú k ďalšej stanici až na konci každého taktu. Pri uvažovaní takýchto modelov sa väčšinou zanedbávajú dopravné časy.

Výroba bez časovej väzby – Pre prevedenie pracovných procesov na stanicach nie sú dané žiadne časové obmedzenia. Toto často znamená, že sa musia zriadiť vyrovnávacie sklady – riešenie týchto problémov smeruje na permutačné problémy (Permutations-Flow Shop Problems).

Problémy, ktoré pojednáva komplexná teória vyvažovania montážnych liniek:

1. Počet vyrábaných produktov na montážnej linke.
2. Počet variantov produktu vyrábaných na linke.
3. Špeciálne priradovacie obmedzenia (napr. nutnosť vykonávať operáciu len na určitom takte).
4. Stochastické časy na vykonanie operácií.
5. Štruktúra linkového systému.
6. Taktovanie staníc s pracovníkmi a pracovnými pomôckami.
7. Obmedzenia staníc (napríklad či je možné dorábať prácu na ploche nasledujúceho pracoviska v prípade kontinuálne posuvného pásu).
8. Spojovacie väzby. Vstupujú nové výrobky na linku v pravidelných periódach alebo vstupujú kedykoľvek keď sa uvoľní miesto na prvom takte.
9. Spojenie opracovávaných dielcov s transportným systémom.
10. Zohľadnenie alternatív výrobných postupov.
11. Stanovenie cieľov vyvažovania linky.

3. PREDPOKLADY A CIELE VYVAŽOVANIA JEDNOPRODUKTOVÝCH LINIEK

Predpoklady vyvažovania jednoduktovej linky: Takzvaný „klasický model vyvažovania“ (z angličtiny Simple Assembly Line Balancing Problem, SALBP). Vychádza z nasledujúcich predpokladov (Scholl, Voß, 1996):

- výroba jedného homogénneho produktu v n operáciách. Výrobný postup je pevne daný.
- pevne dané operačné časy t_j pre operácie $j = 1, \dots, n$,
- spracované poradie operácií (precedenčné vzťahy) vo forme precedenčného grafu,
- konštantný čas taktu pre všetky stanice,
- výrobok vchádza na linku v pravidelných pevných intervaloch,
- rovnako vybavené stanice (ohľadne personálu a prevádzkových prostriedkov),
- sériovo usporiadané stanice (žiadne paralelné stanice),

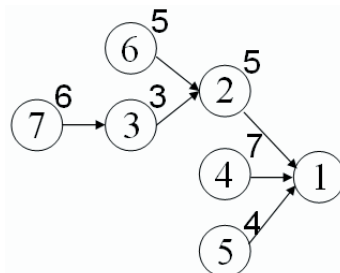
- uzatvorené stanice (nie je možné nadbiehať/dorábať operáciu na plochách prislúchajúcich okolitým staniciam),
- montované dielce nie sú samostatne presuvné (sú spojené s dopravníkom),
- neexistujú žiadne dodatočné prirad'ovacie reštrikcie.

Postavenie cieľov: Ohľadne postavenia cieľov sa rozlišujú štyri alternatívy základného modelu („G“ pre General, „F“ pre Feasibility – uskutočniteľnosť):

- **SALBP-G:** K určeniu je hodnota taktu c a počet staníc m , tak že pri priradení n operácií k m staniciam bude vyťaženie dopravníka maximálne. Ako miera pre vyťaženie slúži účinnosť linky: $UL = 1/(m.c) \cdot t_{sum}$
- **SALBP-1:** Pri danom čase taktu c sa má stanoviť minimálny počet staníc m . Toto je najčastejšie preskúmaná alternatíva základného modelu.
- **SALBP-2:** Pri danom počte staníc m sa má stanoviť minimálny takt.
- **SALBP-F:** Pri danom čase taktu c a zadanom počte staníc m sa má preskúmať, či je možné priradenie všetkých operácií k maximálne m staniciam pri dodržaní taktu c a precedenčných vzťahov. Riešenie je buď v takomto priradení alebo vo výpovedi, že odpovedajúce priradenie neexistuje. Pri SALBP-F nie je teda postavenie cieľa v bežnom ponímaní, jedná sa o problém prípustnosti.

		Takt c	
		konšt.	zmenšiť
Počet staníc m	konšt.	SALBP-F	SALBP-2
	zmenšiť	SALBP-1	SALBP-G

Obr. 1 Modelové alternatívy pri vyvažovaní výrobných liniek (Scholl, Voß, 1996)



Obr. 2 Precedenčný graf montáže výrobku (Štollmann, 2009)

Technologické obmedzenia sú definované väzbami typu predchodca-nasledovník medzi montážnymi operáciami. Väzby predchodca-nasledovník sú vyjadrené v grafe prostredníctvom šípok. Číslo v krúžku udáva číslo montážnej operácie (procesu). Číslo nad krúžkom definuje montážny čas nutný na realizáciu operácie. Technologické reštrikcie je okrem precedenčného grafu možné znázorniť aj formou tabuľky.

4. SÚČASNÉ PRÍSTUPY K VYVAŽOVANIU LINIEK V PRAXI

Prioritné pravidlá

Zabezpečujú výber a priradenie operácií k stanici na základe veľkosti váhy operácií, ktoré sa určia na základe prioritného pravidla. Podľa toho, či takýto postup prebehne raz alebo viackrát (s rôznymi alebo kombinovanými prioritnými pravidlami), sa rozlišujú v anglickej literatúre Single-Pass- a Multi-Pass-Heuristiky.

V nasledujúcom uvažujeme niektoré príklady pre prioritné pravidlá alebo pravidlá pre stupne hodnoty (SH). Pre tieto a ďalšie pravidlá pozri (Scholl a Voß 1994, 1996) a (Talbot, 1986).

Pravidlo 1: Zoradenie operácií podľa postupne klesajúceho procesného času operácií:

$$SH1_j = t_j \quad (1)$$

Pravidlo 2: Triedenie operácií podľa postupne klesajúceho počtu priamych (bezprostredných) všetkých nasledovníkov:

$$SH2_j = N_j \quad (2)$$

Pravidlo 3: Triedenie operácií podľa postupne klesajúceho počtu priamych a nepriamych (všetkých) nasledovníkov:

$$SH3_j = N_j^m \quad (3)$$

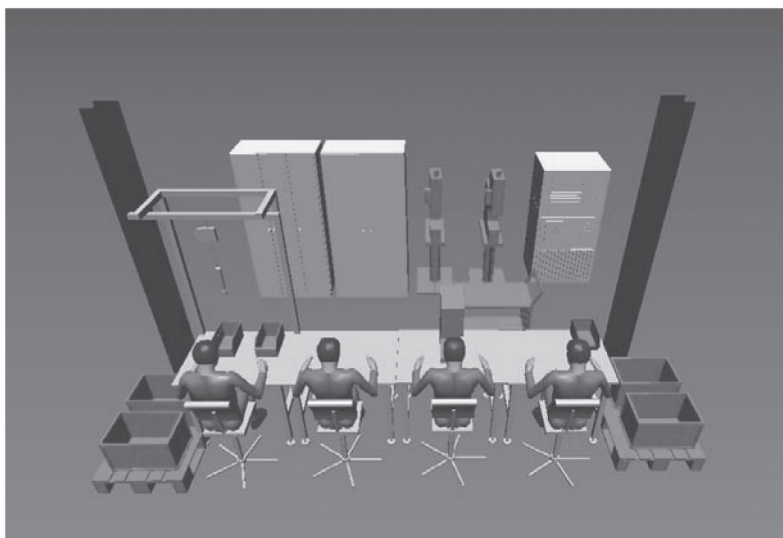
Pravidlo 4: Tried' operácie podľa postupne rastúcej hĺbky operácií v precedenčnom grafe:

$$SH4_j = \text{Najväčší počet spojnic (šípok) v ceste od poslednej operácie (vrcholu precedenčného grafu) po operáciu } j. \quad (4)$$

Pravidlo 5: Tried' operácie podľa postupne klesajúcej pozičnej hodnoty (podľa sumy časov kritickej cesty), pozri (Helgeson a Birnie, 1961):

$$SH5_j = t_j + \sum_{h \in N_j^m} t_h \quad (5)$$

Využívanie prioritných pravidiel pri vyvažovaní výrobných a montážnych liniek je integrované aj vo veľmi známych softvérových balíkoch využívaných v automobilovom priemysle ako napríklad systém DELMIA od firmy Dassault Systemes.



Ukážka grafického výstupu softvéru DELMIA na vyvažovanie montážnych liniek (Štollmann, 2009)

5. BUDÚCE SMEROVANIE V OBLASTI VYVAŽOVANIA MONTÁŽNYCH LINIEK

Metaheuristiku tvoria heuristické metódy pre riešenie veľmi veľkej skupiny výpočtových problémov s predpokladom, že sa získa efektívnejší výpočtový postup. Metaheuristika sa všeobecne vzťahuje na problémy, pre ktoré neexistuje uspokojujúci problémovo-špecifický algoritmus alebo v prípadoch, keď nie je vykonávanie takéhoto algoritmu praktické. Najčastejšie používané zacielenie metaheuristiky je na skupinu **kombinatorických optimalizačných problémov**.

Príklady metaheuristických algoritmov:

- **Tabu Search** (skratka TS), navrhnutý v roku 1986 Fredom Gloverom (Glover, 1997).
- **Simulované žihanie** (v angličtine Simulated Annealing, skratka SA). Metóda bola nezávisle popísaná S. Kirkpatrickom, C.D. Gelattom a M.P. Vecchim v roku 1983, a V. Černým v roku 1985 (Černý, 1985).
- **Variable Neighborhood Search** (VNS) vynájdená Mladenovićom a Hansenom v roku 1997 (Mladenović, Hansen, 1997).
- **Genetický algoritmus** (v angličtine Genetic Algoritmus, skratka GA). Vyvinutý Johnom H. Hollandom v 60-tych rokoch. Názov genetický algoritmus bol prvýkrát predstavený Bagleym. Genetický algoritmus sa stáva známym po podrobnom popise v Hollandovej knihe adaptácia v prírodných a umelých systémoch (Holland, 1975).
- **Prírastkovo adaptívny vyhľadávací postup** (v angličtine Greedy Randomized Adaptive Search Procedure, skratka GRASP). GRASP bol prvýkrát predstavený Feom

- a Resendem v roku 1989 (Feo a Resende, 1989). Ucelený obraz o metóde poskytujú Pitsoulis and Resende 2002, Resende a Ribeiro, 2003, Feo a Resende, 1995.
- **Algoritmus mravčích kolón** (v angličtine Ant Colony Optimization Algorithm, skratka **ACO**). Prvotne bol navrhnutý Marcom Dorigom v roku 1992 v jeho dizertačnej práci (Colorni, Dorigo, Manizzo 1991), (Dorigo, 1992).

6. OBLASŤ VÝSKUMU NA KATEDRE VÝROBNÝCH TECHNOLOGIÍ A MATERIÁLOV

Katedra výrobných technológií a materiálov na technickej univerzite vo Zvolene sa zaoberá výskumom nových heuristických algoritmov. Sú postavené na základnom princípe algoritmu ACO (algoritmus mravčích kolón), pomocou ktorého nastáva priradovanie operácií k stanicam linky na základe ich osvedčenia v minulosti. Rozšírením algoritmu ACO je algoritmus Metódy inteligentnej populácie, ktorá rozlišuje inovačnú, konštrukčnú a konvergenčnú fázu. V prvej fáze algoritmus nekladie veľký dôraz na priradenia podľa osvedčenia z minulosti, keďže nebola v minulosti vytvorená dostatočne veľká reprezentatívny vzorka vyvážení linky. Konštrukčná fáza je identická s konvenčným algoritmom ACO. V záverečnej konvergenčnej fáze kladie algoritmus oproti konvenčnému ACO veľmi veľký dôraz na osvedčenosť priradení z minulosti.

7. ZÁVER

Článok sa zaoberá problematikou vyvažovania výrobných liniek. V článku sú pojednávané základné princípy vyvažovania výrobných liniek v praxi. Je v ňom tiež zachytené smerovanie najnovšieho výskumu v oblasti vyvažovania výrobných liniek na katedra výrobných technológií a materiálov, fakulty environmentálnej a výrobnéj techniky univerzity vo Zvolene.

LITERATÚRA:

- CERNY, V.: 1985. A thermodynamical approach to the travelling salesman problem. In: an efficient simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications* 45, 1985, s. 41–51.
- COLORNI, A., DORIGO, M. – MANIEZZO, V.: 1991. Distributed Optimization by Ant Colonies, actes de la première conférence européenne sur la vie artificielle, Paris, France, Elsevier Publishing, 1991, s. 134–142.
- DOMSCHKE, W., SCHOLL, A., VOß, S.: 1993. Produktionsplanung, zweite Auflage, Springer, 1993, ISBN-13: 978 3540635604.
- DORIGO, M.: 1992. Optimization, Learning and Natural Algorithms, PhD thesis, Politecnico di Milano, Italie, 1992.
- FEO T.A., RESENDE, M.G.C.: 1995. Greedy randomized adaptive search procedures. *J. of Global Optimization*, 6:109–133, 1995.
- FEO T.A., RESENDE M.G.C.: 1989. A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem. *Operations Research Letters*, 8:67–71, 1989.

- GLOVER, F., LAGUNA, M.: 1997. Tabu Search, University of Colorado at Boulder, Hardbound, júl 1997, ISBN 0-7923-9965-X Paperback, ISBN 0-7923-8187-4.
- HELGESON, W. B., BIRNIE, D.B.: 1961. Assembly line balancing using the ranked positional weight technique. In: Journal of Industrial Engineering 12, 1961, s. 394–398.
- HOLAND, J.: 1975. Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, 1975, Ann Arbor.
- KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D., VECCHI M. P.: 1983. Optimization by Simulated Annealing. Science. New Series 220 (4598): s. 671–680, 13 máj 1983, ISSN 00368075.
- MLADENOVIC, N., HANSEN, P.: 1997. Variable neighborhood search, Computers and Operations Research 24, 1997, s. 1097–1100, Dostupné z
- PITSOULIS, L., RESENDE, M. G. C.: 2002. Greedy randomized adaptive search procedures. In: P. M. Pardalos and M. G. C. Resende, editors, Handbook of Applied Optimization, pp. 168–181, Oxford University Press 2002.
- RESENDE, M. G. C., RIBEIRO, C. C.: 2003. Greedy randomized adaptive search procedures. In F. Glover and G. Kochenberger, editors, Handbook of Metaheuristics, pp. 219–249, Kluwer Academic Publishers, 2003.
- SCHOLL, A., VOß, S.: 1994. A note on fast, effective heuristics for simple assembly line balancing. In: Schriften zur Quantitativen BWL 13/94, 1994, TH Darmstadt.
- SCHOLL, A., VOß, S.: 1996. Simple assembly line balancing – Heuristic approaches. In: Journal of heuristics 2, 1996, s. 217–244.
- ALBOT, F. B., PATTERSON, J. H.: 1984, An integer programming algorithm with network cuts for solving the assembly line balancing problem. In: Management Science 30, 1984, s. 85–99.
- ŠTOLLMANN, V.: 2009. Inteligentné prístupy k vyvažovaniu montážnych liniek, dizertačná práca, Žilinská univerzita 2009.
- ZELENKA, J.: Discrete event Dynamic Systems Framework for Analysis and Modeling of Real Manufacturing System, In. CD zborník konferencie INES 2010, Las Palmas of Gran Canaria 2010, ISBN 978-1-4244-7651-0, IEEE Catalog Number: CFP10IES-CDR.

Článok bol vypracovaný v rámci grantovej úlohy VEGA 1/0511/08 0150 Využitie technológií neurónových sietí pre diagnostiku a spoľahlivosť technických systémov zariadení tepelnej energetiky.

Kontaktná adresa:

Ing. Vladimír Štollmann
Katedra výrobných technológií a materiálov, FEVT, TU vo Zvolene,
Študentská 26, 960 53 Zvolen,
tel.: +421-455206505, e-mail: stollmann@vsld.tuzvo.sk