

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



TECHNICKÁ UNIVERZITA VO ZVOLENE

2

ROČNÍK: XVI

ZVOLEN 2011

OBSAH

VEDECKÉ ČLÁNKY

BEZDRÔTOVÝ SENZOROVÝ SYSTÉM PRE SNÍMANIE DYNAMIKY POHYBU KYVADLA WIRELESS SENSOR SYSTEM FOR DYNAMIC PENDULUM MOVEMENT SENSING	7
Miroslav Adamík – Jozef Šuriansky	
MOŽNOSTI OPTIMALIZÁCIA ZÁKLADNÉHO RÁMU LANOVÉHO SYSTÉMU V CAE SYSTÉME ANSYS POSSIBILITIES OF OPTIMIZATION OF THE MAIN FRAME BY THE CAE SYSTEM ANSYS.....	19
Pavel Beňo	
ODOLNOSŤ DLÁTOVÝCH RADLIČIEK V PODMIENKACH ABRAZÍVNEHO OPOTREBENIA RESISTANCE OF CHISEL PLOW SKIVES IN CONDITION OF ABRASIVE WEAR	25
Peter Čičo – Martin Kotus – Daniela Kalincová	
NÁVRH SPÔSOBU HODNOTENIA KOMBINOVANÝCH ÚČINKOV RIZIKOVÝCH FAKTOROV DEVELOPMENT OF FRAMEWORK FOR ASSESSMENT OF COMBINED EFFECTS OF RISK FACTORS.....	31
Richard Hnilica	
HUSTOTA TEPELNÉHO TOKU Z POVRCHU PROFILOVANEJ PLOCHY PRI SKLONE 45 STUPŇOV THE HEAT FLOW DENSITY FROM PROFILATED SURFACE AT 45 DEGREE SLOPE	39
Rastislav Igaz	
VPLYVU KONŠTRUKCIE VRTÁKA NA OSOVÚ SILU A KRÚTIACI MOMENT INFLUENCE OF DRILL DESIGN TO FEED FORCE AND TORQUE CUTTING MOMENT.....	47
Ľubomír Javorek – Martin Balko	
ZVYŠOVANIE ŽIVOTNOSTI RELIÉFU RAZIDIEL CHRÓMOVANÍM INCREASING OF THE LIFETIME OF COINING DIES BY CHROMING.....	57
Daniela Kalincová – Rudolf Kašťan	
EXPERIMENTÁLNE MERANIA PROSTRIEDKU VÝROBY ELEKTRICKEJ ENERGIE A TEPLA V TRIGENERAČNOM SYSTÉME EXPERIMENTAL MEASUREMENTS OF A MEANS OF ELECTRICAL AND THERMAL ENERGY PRODUCTION IN TRIGENERATION SYSTEM	65
Vladimír Kocúr – Jozef Šuriansky	
SKELETIZAČNÉ ALGORITMY SKELETIZATION ALGORITHMS	73
Pavol Koleda – Ľubomír Naščák	
OPTIMALIZÁCIA TRAJEKTÓRIE POMOCOU ALGORITMU OPTIMALIZÁCIE KOLÓNIOU MRAVCOV OPTIMISATION OF TRAJECTORY USING THE ANT COLONY OPTIMISATION ALGORITHM	83
Peter Koleda – Ľubomír Naščák	
OPTIMALIZÁCIA VÝROBNÉHO PROCESU DREVENÝCH STAVEBNÍC THE OPTIMIZATION OF WOOD TOYS PRODUCTION PROCESS	91
Mária Krajčovičová	

DETERMINATION OF THE OXIDATIVE STABILITY OF VEGETABLE OIL – BASED LUBRICANTS	
STANOVENIE OXIDAČNEJ STABILITY MAZÍV NA RASTLINNEJ BÁZE	101
Marián Kučera – Miroslav Rousek	
GEOMETRICKÉ ASPEKTY MODELOVANIA PÁSOVÝCH VOZIDIEL V MSC.ADAMS SYSTÉME	
GEOMETRIC ASPECTS OF TRACKED VEHICLES MODELING IN MSC.ADAMS/VIEW SYSTEM	111
Jaroslav Matej	
NÁVRH MODELU REZNÝCH SÍL PRI SÚSTRUŽENÍ POMOCO UMELÝCH NEURÓNOVÝCH SIETÍ	
MODELING THE CUTTING FORCE FOR TURNING TOOL USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS	119
Júlia Mečiarová – Aleš Pavelka – Ľubomír Javorek	
ADAPTÁCIA NÁKLADNÝCH AUTOMOBILOPRE ODVOZ DREVA	
ADAPTATION OF LORRIES FOR TIMBER TRANSPORT	127
Juraj Mikleš	
STABILITA LESNÝCH TRAKTOROV NA SVAHOCH	
STABILITY OF LOGGING TRACTORS ON THE SLOPE.....	135
Milan Mikleš	
THE HIGH-SPEED CAMERA IN MACHINING	
VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERA V OBRÁBĚNÍ.....	141
Martin Novák – Nataša Náprstková	
VPLYV VYBRANÝCH TECHNOLOGICKÝCH PARAMETROV NA DRSNOSŤ OBROBENÉHO POVRCHU PRI SÚSTRUŽENÍ	
THE INFLUENCE OF CHOSEN TECHNOLOGICALPARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS DURINGTURNING.....	149
Dušan Paulíny – Ľubomír Javorek	
ANALÝZA PRESNOSTI POLOHOVANIA KROKOVÉHOMOTORA V REŽIME DROBENIA	
THE STEPPER MOTOR ACCURACY MOVEMENT ANALYSIS IN A MICROSTEPPING.....	159
Rudolf Petráš – Jozef Šuriansky	
MOŽNOSTI VYUŽITIA INTEGRÁLNYCH TRANSFORMÁCIÍ PRI SLEDOVANÍ CHYBOVOSTI VO VÝROBNOM PROCESE	
INTEGRAL TRANSFORMATIONS USING POSSIBILITIES IN FAILURING CHECKING IN PRODUCTION.....	167
Elena Pivarčiová	
ANALÝZA DYNAMICKÝCH SÍL VO VRATNOM LANELESNÍCKEJ LANOVKY POČAS PRIBLIŽOVANIADOLE SVAHOM	
ANALYSIS OF DYNAMIC FORCES AT THE HAUL-BACKROPE ON FOREST CABLEWAY DURING DOWNTHE SLOPES SKIDDING	173
Martin Remper – Milan Mikleš	
HYDRODYNAMICKY MAZANÉ KLZNÉ LOŽISKO S MENIACIM SA UHLOM VSTUPU OLEJA	
HYDRODYNAMICALLY LUBRICATED SLIDING BEARING WITH VARIABLE ANGLE OF INLET..	183
Mária Sedničková – Ján Turis	
KVALITA REZNEJ PLOCHY PO REZANÍ ABRAZÍVNÝMVODNÝM LÚČOM	
THE QUALITY OF CUTTING SURFACE AFTER BEING CUT BY AN ABRASIVE WATER JET ...	190
Miroslava Ťavodová	

VEDECKÉ ČLÁNKY

BEZDRÔTOVÝ SENZOROVÝ SYSTÉM PRE SNÍMANIE DYNAMIKY POHYBU KYVADLA

WIRELESS SENSOR SYSTEM FOR DYNAMIC PENDULUM MOVEMENT SENSING

Miroslav ADAMÍK – Jozef ŠURIANSKY

ABSTRACT: The article deals with design and composition of wireless sensor system for sensing of dynamic pendulum movement. It describes implementation of wireless communication standard IEEE 802.15.4 (XBee) to sensorial network which consist of sensor node and central communication module. The result of programming work is graphic software application intended for processing, calibration and visualization of sense data from ADIS16006 accelerometer.

Key words: sensor system, pendulum, accelerometer, wireless communication, XBee

ABSTRAKT: Článok sa zaoberá návrhom a konštrukciou bezdrôtového senzorového systému pre snímanie dynamických parametrov pohybu modelu kyvadla. Rozoberá implementáciu bezdrôtového komunikačného štandardu IEEE 802.15.4 (XBee) do senzorovej siete tvorenej senzorovým a centrálnym modulom. Výsledkom programátorskej činnosti je softvérová aplikácia určená pre spracovanie, kalibráciu a vizualizáciu údajov snímaných akcelerometrom ADIS 16006.

Kľúčové slová: senzorový systém, kyvadlo, akcelerometer, bezdrôtová komunikácia, XBee

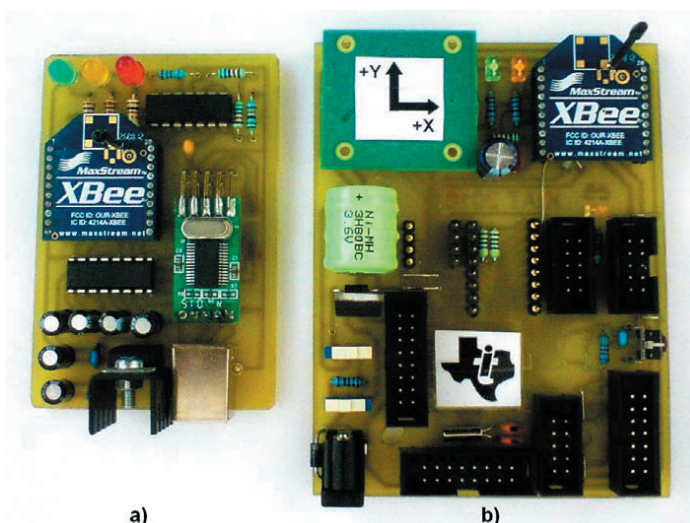
1. ÚVOD

V riadiacich systémoch výrobnjej techniky a priemyselnej automatizácie sa ako prvok spätnej väzby používajú senzorové moduly, ktoré snímajú informácie o stave a podmienkach výrobného procesu pre účely riadenia, diagnostiky či tvorby interaktívnej počítačovej vizualizácie (Virtuálnej reality). Senzorové moduly tvoria distribuovanú senzorovú sieť v prostredí, kde častou požiadavkou ich prevádzkovej inštalácie je bezdrôtová komunikácia s centrálnym riadiacim systémom, ktorá zvyšuje spoľahlivosť, eliminuje rušenia a problémy vznikajúce použitím káblových spojení. Preto sa v moderných senzorových sieťach využívajú nízkoprikonové komunikačné technológie WPAN (Wireless Personal Area Network). Kvôli extrémne nízkej spotrebe dnešných elektronických komponentov, sú batériovo napájané moduly schopné autonómnej prevádzky, použitím mikrogenerátorov elektrickej energie priamo v mieste ich inštalácie. Tým je možné eliminovať nákladné servisné zásahy spojené s výmenou či dobíjaním batérií.

Kľúčovým snímacím prvkom sensorového modulu v dynamickom pohybovom systéme je mikromechanický akcelerometer, ktorý sníma zrýchlenia v mieste jeho prevádzkového umiestnenia. Pomocou výpočtových prostriedkov priemyselnej robotiky je potom možné získať informácie o kinematike pohybov sledovaného objektu. Preto je dôležitou úlohou vytvorenie kvalitného bezdrôtového meracieho reťazca, ktorého výstupom budú kalibrované údaje vhodné pre ďalšie procesné spracovanie. Kvôli známym pohybovým pomerom je výhodné pre odladenie takéhoto systému použiť práve model kyvadla.

2. MATERIÁL A METÓDY

V rámci projektu bola vytvorená transportná bezdrôtová sensorová sieť s použitím XBee komunikačných modulov rádiového štandardu IEEE 802.15.4. Tie boli osadené do dosiek navrhnutého sensorového modulu (Obr. 1-b) a centrálnemu modulu (Obr. 1-a) za účelom transportu údajov snímaných akcelerometrickým snímačom, umiestneného na ramene kmitajúceho kyvadla.

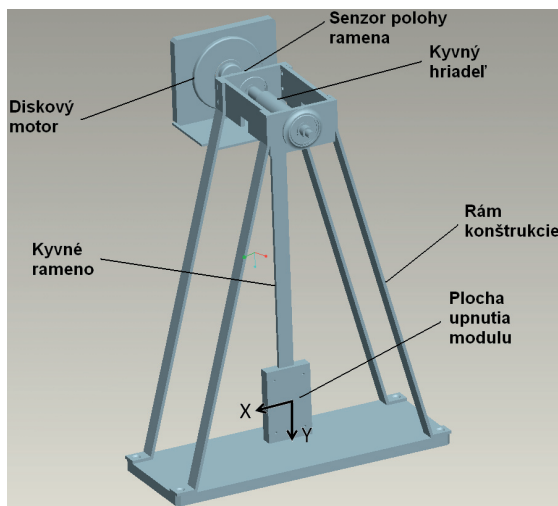


Obr. 1 Moduly sensorovej siete: a) centrálny modul, b) sensorový modul

Dynamická sústava kyvadla (Obr. 2) je udržiavaná v periodickom kmitavom pohybe pomocou diskového motora. Budič kmitania, v momente prechodu kyvadla nulovou polohou spína diskový motor a jednostranným vychýľovaním udržiava parametre kmitania na nastavenej hodnote.

Na zotrvačnú plochu kyvného ramena bol namontovaný sensorový modul s osadeným dvojosím akcelerometrom ADIS 16006, tak aby jeho X -ová os bola v každom okamihu pohybu kyvadla totožná so smerom pôsobenia tangenciálneho zrýchlenia uvažovaného koncového telesa. Rovnakým spôsobom došlo k sústreďeniu pôsobenia normálového zrýchlenia do Y -ovej osi akcelerometra. Zrýchlenie v Z -ovej osi je úplne eliminované pevnou osou kývavého pohybu. Mikromechanický senzor sa navonok javí ako snímač

zrýchlenia telesa s jednotkovou hmotnosťou. Preto je možné pri simulácii uvažovať s kmitajúcim hmotným bodom. Dôležitým konštrukčným parametrom je polomerom kmitania $r = 35$ cm.



Obr. 2 Model kyvadla

Úlohou návrhu a realizácie systému bolo bezdrôtovým spôsobom snímať informácie o dynamike kmitavého pohybu zostrojeného kyvadla a ich číselná a grafická prezentácia v prostredí počítačovej aplikácie. Otázka presnosti systému sa dotýka frekvencie snímaných vzoriek zrýchlenia a kalibrácie prepočtu nameraných údajov. Na začiatku je potrebné poznať teoretický základ týkajúci sa matematického kyvadla.

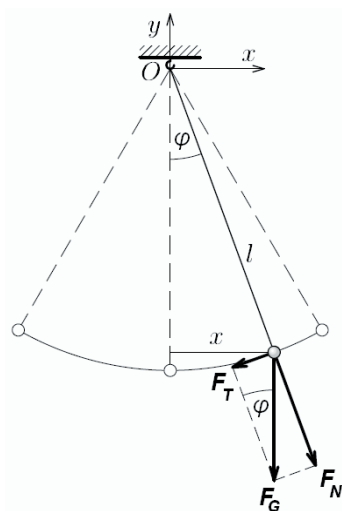
2.1 Matematické kyvadlo

Matematické kyvadlo (Obr. 3) je idealizovaná sústava hmotného bodu jednotkovej hmotnosti m zaveseného v gravitačnom poli zeme na nehmotnom závесе dĺžky l schopné otáčania okolo vodorovnej osi, ktorá neprechádza jeho ťažiskom. Hmotný bod je pri svojom periodickom pohybe viazaný na kružnicu a tvorí harmonický oscilátor.

Pri kmitaní sa uplatňuje zákon zachovania energie, kedy sa potenciálna energia premieňa na kinetickú a naopak. Zmenu pohybového stavu matematického kyvadla spôsobuje tangenciálna zložka F_t tiažovej sily F_G , ktorej veľkosť sa určí podľa vzťahu:

$$F_t = F_G \sin \varphi \quad [N] \quad (1)$$

Obr. 3 Matematické kyvadlo



V každom okamihu je možné určiť polohu sprievodiča kyvadla, teda uhol φ z podobnosti trojuholníkov. Ak sa jedná o teleso s jednotkovou hmotnosťou, je možné vyjadriť pôsobenie na hmotný bod pomocou zrýchlení vzťahom (2), ktorý platí v statickom prípade.

$$\sin \varphi = \frac{x}{l} \doteq \frac{F_t}{F_G} = \frac{a_t}{g} \quad [-] \quad (2)$$

Kinematiku harmonického pohybu kyvadla po kruhovej dráhe je možné s výhodou riešiť v súradnicovej sústave dotyčnica – normála (Bodnár 2000) so začiatkom v ťažisku hmotného bodu orientovanú v kladnom smere pôsobenia normálového zrýchlenia a_n . Zložkový tvar celkového zrýchlenia pôsobiaceho na hmotný bod bude:

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_t^2} \quad [ms^{-2}] \quad (3)$$

Pre kmitajúci model je zdrojom informácií o zložkových zrýchleniach vhodne umiestnený akcelerometrický snímač. Pri tvorbe výpočtového programu sa vynára otázka riešenia inverznej úlohy kinematiky pre určenie všetkých kinematických veličín v ľubovoľnom časovom okamihu. Pre zložkové zrýchlenia platí:

$$\begin{aligned} a_n &= g \cos\varphi + r\omega^2 \quad [ms^{-2}] \\ a_t &= g \sin\varphi \quad [ms^{-2}] \end{aligned} \quad (4)$$

Idealizovaný model matematického kyvadla vyhovuje reálnym podmienkam umiestnenia akcelerometrického snímača, ktorý sníma priamo zložky celkového zrýchlenia pohybujúcej sa hmoty na ktorú je pripevnený.

2.2 Bezdrôtový komunikačný modul XBee

XBee je rádiový komunikačný modul pracujúci vo frekvenčnom pásme 2,4 GHz podľa medzinárodného štandardu IEEE 802.15.4 (Protokoly ZigBee) určený pre vytvorenie samoorganizujúcej sa Ad – Hoc siete. Disponuje prenosovou rýchlosťou do 250 kbit/s. V porovnaní s inými štandardmi je nižšia prenosová rýchlosť zárukou zvýšenia odolnosti proti rušeniu a predurčuje ho pre priemyselné aplikácie ako bezdrôtová náhrada sériového prenosu RS232 a RS 485. Kvôli nízkej spotrebe a nízkym obstarávacím nákladom je špeciálne navrhnutý pre bezdrôtové senzorové siete (BSS).

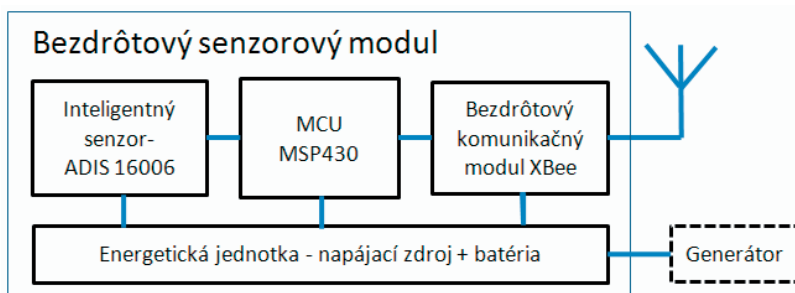


Obr. 4 Komunikačný modul XBee

Komunikačný modul disponuje vyžarovaným výkonom 1 mW s dosahom od 30 do 100 m podľa charakteru distribučnej oblasti. Pri prijíme/vysielaní a napájacom napätí 3,3 V má prúdovú spotrebu 50 mA, avšak v režime spánku iba 10 μ A. Činnosť modulu XBee je definovaná súborom nastavení vo vnútornej pamäti a definuje vysielací výkon, funkčnosť zariadenia v sieti (koordinátor, smerovač, koncové zariadenie) a rýchlosť dátového prenosu. Pomocou vývojového kitu a softvérového prostriedku je možné tento súbor nastavení editovať. Výrobcom je nastavená základná prenosová rýchlosť 9,6 kbit/s a režim, v ktorom dve dostupné zariadenia začnú prenos ihneď po zaslaní bajtu po ich asynchrónnom komunikačnom rozhraní.

2.3 Senzorový modul s dvojsím akcelerometrom

Základom skonštruovaného prenosného senzorového modulu (Obr. 5) je mikrokontrolér MSP 430 pre riadenie sekvencie zberu údajov snímaných inteligentným senzorom – akcelerometrom ADIS 16006. Zosnímané údaje usporiada do štruktúry vhodnej pre bezdrôtový transport za účelom zaistenia synchronizácie spracovania údajov PC aplikáciou a verifikácie ich integrity.



Obr. 5 Bloková schéma senzorového modulu

Modul je energeticky autonómny a má vlastné akumulátorové napájanie. Vzhľadom na nízku spotrebu je možné použiť mikrogenerátory elektrickej energie rôzneho prevedenia. Zberom a transformáciou energie priamo z prostredia jeho prevádzkového umiestnenia je možné úplne eliminovať servisné zásahy pre jeho údržbu.

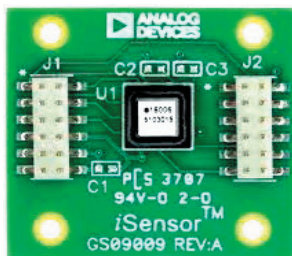
2.3.1 Mikrokontrolér MSP 430

Vyššie spomínaný mikrokontrolér (MCU) je produktom firmy Texas Instruments s typovým označením MSP430FG4617. Je to výkonný 16 bitový mikropočítač s Harvardskou architektúrou a s ultra-nízkym príkonom vhodný pre aplikácie s batériovým napájaním. Pri napájacom napätí od 1,8 do 3,6 V a bežnej prevádzke má prúdovú spotrebu 400 mA, ktorá však v režime spánku klesne na 0,22 μ A. Vnúterná štruktúra mikropočítača disponuje periférnymi systémovými obvodmi, ktorých funkčné vývody sú vyústené na nezávisle programovateľné vstupno-výstupné 8 bitové porty P1 až P10. Sú to najmä tieto:

- sériové komunikačné rozhranie USART0, USART1 (I²C, SPI, UART, IrDA)
- 12 bitový AD prevodník, analógový komparátor A,
- časovače A a B, budič LCD displeja.

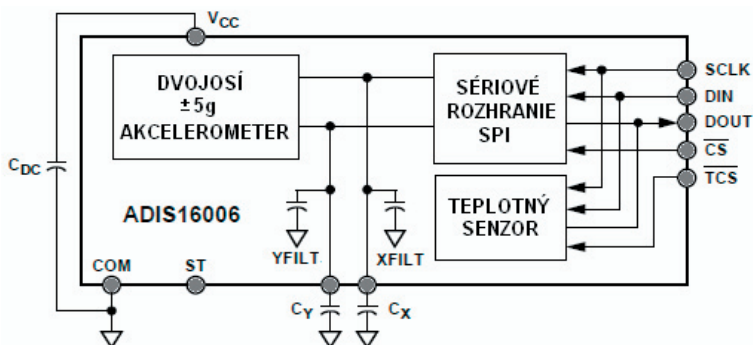
2.3.2 Akcelerometer ADIS 16006

Akcelerometer ADIS 16006 je kompletný nízkoпрíkonový profesionálny dvojosí inteligentný senzor zrýchlenia pracujúci na kapacitnom princípe.



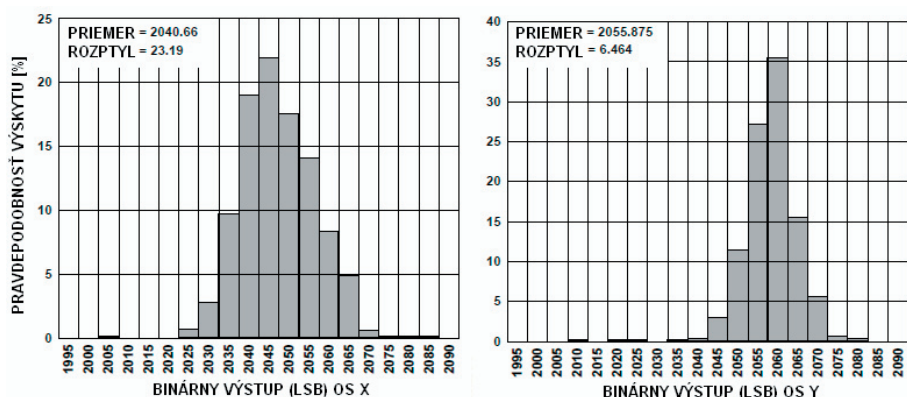
Obr. 6 Vývojová doska akcelerometra ADIS

V miniaturizovanom puzdre mikromechanického senzora (MEMS) je spolu s implementovaným SPI digitálnym rozhraním prítomný aj kalibračný teplotný senzor. Vnútrná bloková schéma akcelerometra s jeho externými obvodovými prvkami je na Obr. 7.



Obr. 7 ADIS16006 – funkčná bloková schéma

Akcelerometer ADIS meria zrýchlenie v plnom rozsahu $\pm 5g$ (minimálne rozpätie), ktoré digitalizuje 12 bitový A/D prevodník. Z dôvodu vnútornej kalibrácie a parazitných šumov udáva výrobca funkciu pravdepodobnosti rozptylu (výskytu) nulovej hodnoty zrýchlenia ($0g$) okolo strednej hodnoty rozsahu 0 až 4095 (2^{12}). Z priebehu na Obr. 8 je vidieť posun hodnoty $0g$, ktorý je rovnako ako citlivosť, rôzny pre jednotlivé osi. Preto je potrebné pri softvérových prepočtoch vykonať kalibráciu.

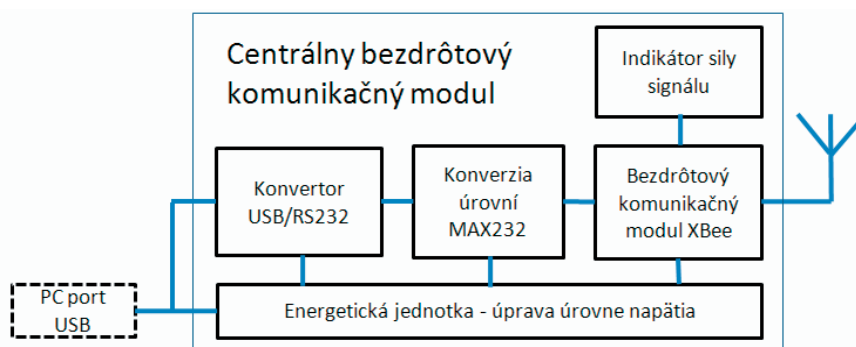


Obr. 8 Funkcia pravdep. výskytu (posuv) hodnoty 0g výstupu pre os X a Y pri teplote 25 °C

Akcelerometer ADIS je združený senzor statického (gravitácia) a dynamického (pohyb, vibrácie) zrýchlenia so šokovou odolnosťou do 3 500 g. V napájacom rozsahu od 3 do 5,25 V má prúdovú spotrebu 2 mA. Samotný senzor je implementovaný na vývojovej doske (Obr. 6) spolu s voliteľným filtračným kondenzátormi pre filtráciu napájacieho napätia (C_{DC}) a kondenzátormi dolno-priepustného (DP) filtra (C_X, C_Y) pre obmedzenie snímania vyšších frekvencií kmitov zrýchlenia (viď Obr. 7). Aktuálna nastavená medzná frekvencia filtra je 2 250 Hz.

2.4 Centrálny komunikačný modul

Je kompaktný modul určený pre zber údajov vysielaných senzorovými modulmi a cez PC rozhranie USB slúži ako vstupný prvok počítačovej aplikácie. Disponuje pevnou logikou pre transformáciu USB komunikačného štandardu na štandard RS232 použitím konvertora FT232RL v káblovom prevedení. Pre konverziu napät'ových úrovní priemyselnej normy RS232 na CMOS úrovní XBee modulu je použitý medziprevod cez obvod MAX232.



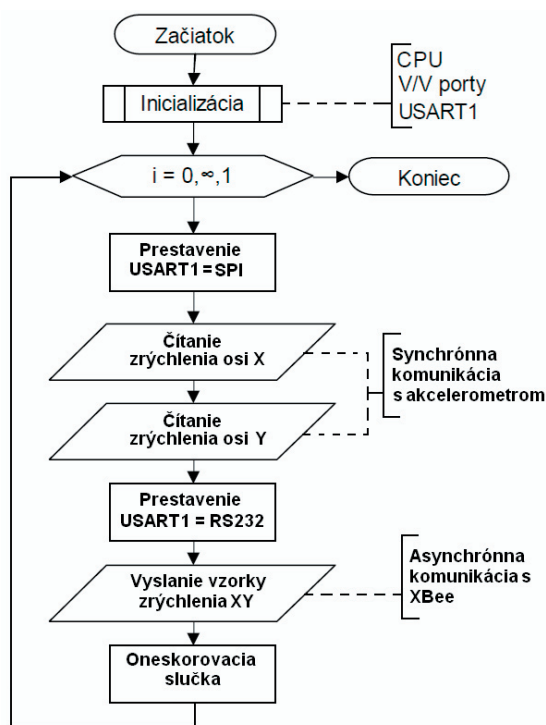
Obr. 9 Bloková schéma centrálného modulu

Kvôli overeniu konektivity je použitý trojúrovňový LED indikátor sily signálu. Požiadavkou je napájanie priamo z USB portu, čo je kvôli nízkej spotrebe realizovateľné cez stabilizačný obvod. Modul sa v prostredí operačného systému javí ako nové USB zariadenie, ku ktorého činnosti je potrebné nainštalovať dostupný ovládač. Ten mu priradí číslo komunikačného portu COM, cez ktorý sa s modulom komunikuje.

2.5 Riadiaci program pre mikrokontrolér senzorového modulu

Riadiaci program mikrokontroléra MSP 430 bol vyvíjaný v programovacom jazyku C programovacieho prostredia IAR Workbench. Program sa člení na súbor hlavného zdrojového kódu a hlavičkové súbory s deklaráciou systémových premenných mikropočítača a často používaných užívateľských funkcií. Vývojový diagram behu hlavného programu je na obrázku (Obr. 10).

Po zapnutí napájacieho napätia sa jednorázovo vykoná inicializácia funkčných a periférnych modulov mikropočítača a stabilizuje sa taktovacia frekvencia CPU. Podľa prednastavenej rozhodovacej premennej sa spustí periodický cyklus snímania vzoriek zrýchlenia jednotlivých osí akcelerometra.



Obr. 10 Vývojový diagram procesu snímania zrýchlenia

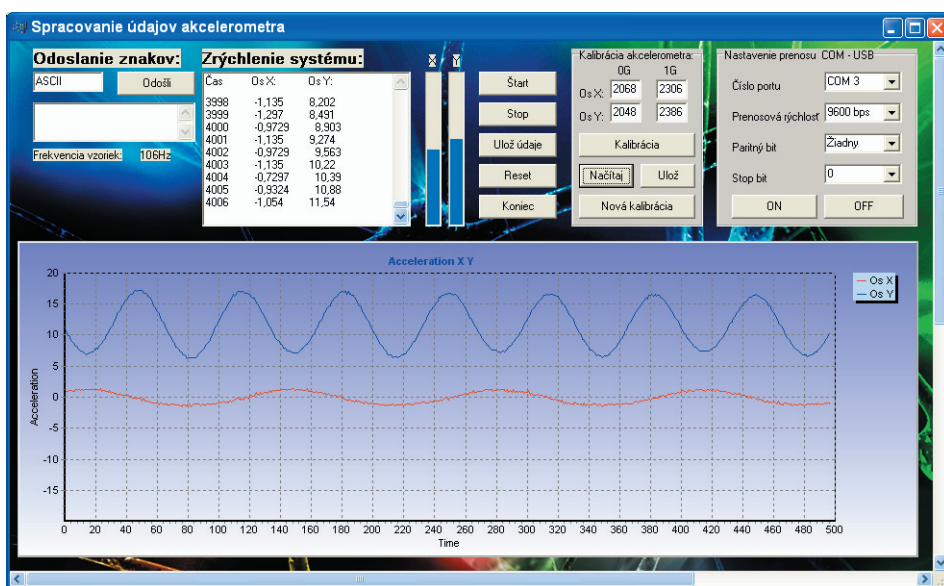
XBee aj akcelerometer sú pripojené na vývody komunikačného modulu USART1. Keďže sa pracuje s rozdielnymi druhmi dátovej komunikácie je potrebné cyklicky editovať

registre nastavení a tým prepínať činnosť modulu USART1. Po zostavení dátovej štruktúry je vzorka XY zrýchlenia vyslaná k rozhraniu XBee modulu pre bezdrôtový prenos. Programové oneskorovacie slučky slúžia na stabilizáciu vnútornej činnosti a nastavujú celkovú frekvenciu vzoriek snímaného zrýchlenia. Pri odlaďovaní riadiaceho programu bola dosiahnutá vzorkovacia frekvencia 106 Hz čo podľa vzorkovacieho teorému postačuje pre zachytenie zmien zrýchlenia s frekvenciou 53 Hz.

2.6 Softvérová aplikácia spracovania údajov

Pre spracovanie údajov akcelerometra reprezentovaných v hexadecimálnom tvare bola vytvorená grafická softvérová aplikácia v objektovo orientovanom programovacom prostredí C++ Builder 5. Aplikácia pristupuje k vytvorenému virtuálnemu sériovému COM portu pomocou funkcií prídavného komponentu AsyncPro. Algoritmus pre spracovanie údajov sa vykonáva automaticky po prijatí kompletného znaku v ASCII kóde. Samotná vzorka XY zrýchlenia zahŕňa 6 znakov (bajtov), z ktorých prvé dva sú vodiace. Za nimi nasledujú horné a dolné polbajty zrýchlenia súradníc XY. Vodiace znaky pomáhajú synchronizovať výpočet a indikujú nekompletnú vzorku po chybe vzniknutej na prenosovej trase.

Okno aplikácie pre spracovanie údajov akcelerometra (Obr. 11) zoskupuje príbuzné funkcie do funkčných modulov. Zahŕňa modul pre odoslanie ASCII znakov, ktoré môžu slúžiť na riadenie činnosti distribuovaného senzorového modulu. Pred zahájením samotného prenosu je nutné editovať parametre v module nastavení (COM-USB) a kalibrovat' algoritmus výpočtu. Aplikácia združuje ovládacie prvky pre riadenie meracieho postupu a prezentuje číselné a grafické výstupy s možnosťou uloženia nameraných údajov.



Obr. 11 Aplikácia pre spracovanie údajov akcelerometra

2.6.1 Kalibrácia spracovania

Dokumentácia akcelerometra používa relatívne označovanie zrýchlenia pomocou hodnoty g (gravitačné zrýchlenie, pre Slovensko $g = 9,81 \text{ kg.m.s}^{-2}$), ktoré sa so zemepisnou polohou mení. Je preto potrebné v algoritme definovať rovnovážny stav $0g$ a stav gravitačného zrýchlenia $1g$ v našich fyzikálnych podmienkach.

$$k = \frac{g}{bit_{1G} - bit_{0G}} \rightarrow k_X = \frac{9,81}{2306 - 2068} = 0,0412 \text{ [kg.m.s}^{-2} / LSB] \quad (5)$$

Kalibrácia sa vykonáva v kalibračnom module aplikácie pri dodržaní definovaného postupu polohovania sensorového modulu a potvrdzovaním kalibračnej hodnoty. Výsledkom kalibrácie sú kalibračné koeficienty k_X a k_Y definované vzťahom a vzorovým výpočtom (5), ktoré je možné uložiť a neskôr spätne načítať. Ako kalibračný parameter možno použiť hodnotu teploty puzdra akcelerometra zo vstavaného snímača, ktorá vplyva na geometriu doskových kondenzátorov a tým aj na ich kapacitu.

3. VYHODNOTENIE

Činnosť vytvoreného bezdrôtového sensorového systému bola overená meraním na dynamickom modeli. Grafický priebeh okna softvérovej aplikácie (Obr. 11) znázorňuje zrýchlenia voľne kmitajúceho modelu kyvadla. Z obrázka je vidieť sinusovú funkciu priebehu zrýchlenia osi $Y = a_n$ ako moduláciu gravitačného zrýchlenia odstredivým zrýchlením. Os X predstavuje zrýchlenie a_t kolísaním okolo hodnoty $0g$. Pri meraní bolo potrebné zhodnotiť vplyvy všetkých kalibračných faktorov na presnosť výpočtu a vplyv dynamiky samotného pohybu na úspešnosť rádiovej komunikácie. Z výsledkov možno povedať, že sensorický systém predstavuje spoľahlivý merací reťazec, ktorého výstup môže slúžiť pre systémy ďalšieho spracovania údajov.

4. ZÁVER

V rámci projektu sa podarilo skonštruovať a vyladiť bezdrôtový sensorový systém pre snímanie dynamiky pohybov, ktorého činnosť bola demonštrovaná na modeli zostrojeného kyvadla. Navrhnutý systém je univerzálny a tvorí základný stavebný prvok pre softvérové aplikácie zaoberajúce sa identifikáciou parametrov výrobného procesu, riešením úloh inverznej kinematiky či tvorbou interaktívnej počítačovej grafiky.

LITERATÚRA

- ANALOG DEVICES.: ©2007. *Dual-Axis ±5g Accelerometer with SPI Interface*, ADIS16006. [online katalógový list], [cit. 2011-06-30], Dostupné na internete: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/161405/AD/ADIS16006/PCB.html>.
- BODNÁR, F.: 2000. *Mechanika 1. (Statika a kinematika)*. Vysokoškolské skriptá, Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. Január 2000. 319s. ISBN 80-228-0986-1.

- DIGI INTERNATIONAL.: ©2009, *XBee/XBee PRO RF Modules*, [online katalógový list], 2009, [cit. 2011-06-30], Dostupné na internete: http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000982_B.pdf.
- PECÚCH, M.: 2010. *Bezdrôtové senzorové siete*. [online], UK Bratislava, Fakulta matematiky fyziky a informatiky, Katedra informatiky 2010. [cit. 2011-06-23]. Dostupné na internete: <http://www.dcs.fmph.uniba.sk/diplomovky/obhajene/getfile.php/Diplomova+Praca+FV.pdf?id=268&fid=467&type=application%2Fpdf>.
- ŠEDIVÝ, P; VOLF, I; HORÁKOVÁ, R.: 2010. *Harmonické kmity mechanických soustav*, [online] ÚVFO Hradec Králové 2010, Dostupné na internete: <http://fo.cuni.cz/texty/kmity.pdf>.
- TEXAS INSTRUMENTS.: 2011. *Mixed signal microcontroller, MSP430xG461x*. [online katalógový list], Posledná revízia 2011, [cit. 2011-06-29], Dostupné na internete: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/msp430fg4617.pdf>.

Kontaktná adresa:

Ing. Miroslav Adamík

Technická Univerzita vo Zvolene, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky,
Katedra informatiky a automatizačnej techniky, T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen
e-mail: mirysko@gmail.com

prof. Ing. Jozef Šuriansky, CSc.

Technická Univerzita vo Zvolene, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky,
Katedra informatiky a automatizačnej techniky, T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen
e-mail: surian@vsld.tuzvo.sk

MOŽNOSTI OPTIMALIZÁCIA ZÁKLADNÉHO RÁMU LANOVÉHO SYSTÉMU V CAE SYSTÉME ANSYS

POSSIBILITIES OF OPTIMIZATION OF THE MAIN FRAME BY THE CAE SYSTEM ANSYS

Pavel BEŇO

ABSTRACT: The main theme of the paper is the theoretical analysis of strength parameters for optimisation of stresses and deformation on statically loaded thin-walled steel construction. For stresses and deformations are in this work calculated by the ANSYS computing programme and by means of the finite elements method, a significant part deals with theoretical basis of the mentioned method. The main part deals basic concepts of the modern optimisation of construction.

Key words: optimisation, objective function, thin-walled steel construction, finite elements method

ABSTRAKT: Hlavnou témou príspevku je teoretická analýza pevnostných parametrov pre optimalizáciu napätia a deformácie staticky zaťaženej tenkostennej ocelevej konštrukcie. Vzhľadom na zložité okrajové podmienky napätia a deformácie v práci sú v práci počítané pomocou výpočtového programu ANSYS s využitím metódy konečných prvkov. Hlavná časť práce uvádza základný koncept modernej optimalizácie konštrukcie.

Kľúčové slová: optimalizácia, cieľová funkcia, tenkostenná konštrukcia, metóda konečných prvkov

1. ÚVOD

Optimalizácia konštrukčných návrhov je nevyhnutnou súčasťou moderného navrhovania strojov a zariadení. Optimalizáciu môžeme definovať ako postup pre získanie návrhu konštrukcie, ktorý je najlepší zo všetkých možných návrhov s ohľadom na predpísaný cieľ a danú množinu geometrických ohraničení na správanie sa sústavy (Žmindák, 2000). Každý konštrukčný návrh je hneď po jeho praktickom zrealizovaní zdrojom neustálych konštrukčných zmien, ktoré sú odozvou na jeho prevádzku v reálnom pracovnom nasadení. Táto skutočnosť vo väčšine prípadov vyplýva zo snahy zákazníka a taktiež výrobcu po dokonalejšom výrobku, ktorý by čo najefektívnejšie splňal svoju úžitkovú funkciu. Riešenie optimalizačných problémov napríklad z hľadiska napätí a deformácií je možné realizovať aj na základnom ráme lanového systému poháňaného kolesami zadnej nápravy traktora. Nakoľko základné rozmery rámu sú obmedzené bázovým strojom ktorým je traktor, pokiaľ sa nerozhodneme meniť koncepciu stroja, celkové riešenie problému sa zredukuje na optimalizáciu hrúbok jednotlivých konštrukčných prvkov resp. ich

základných nosných rozmerov. Optimalizačné výpočty je možné realizovať v súčasnosti pomocou moderných CAE systémov využitím metódy konečných prvkov.

1.1 Optimalizácia konštrukcie

Návrh konštrukcie je vo všeobecnosti vždy daný relatívnymi vlastnosťami materiálu a okrajovými podmienkami. Zaťaženie konštrukcie býva dané buď v deterministickom alebo pravdepodobnostnom zmysle. Pre každý prípad zaťaženia môžeme potom vypočítať odozvu konkrétnej konštrukcie riešením zodpovedajúcich rovnovážnych a konštitutívnych rovníc a splnení podmienok kompatibility a okrajových podmienok. Optimalizácia je typ problému návrhu, kde je množina konštrukčných parametrov rozdelená do dvoch skupín. Prvú skupinu tvoria vopred určené parametre. Druhú skupinu tvoria parametre, ktoré nazývame premenné návrhu, alebo návrhové premenné. Optimalizáciou potom rozumieme nájdenie optimálnych hodnôt premenných návrhu tak, aby maximalizovali alebo minimalizovali tzv. cieľovú alebo kritériálnu funkciu, pričom musia spĺňať požiadavky na geometriu a stav konštrukcie.

Lubovoľná množina premenných návrhu, ktorá definuje návrh konštrukcie môže byť reprezentovaná bodom v tzv. *návrhovej priestore*. Mnoho návrhov z celkového počtu možných návrhov nemôžeme akceptovať, pretože nespĺňajú požiadavky na návrh a prevádzku. Aby sme vylúčili tieto návrhy, zavádzame pojem *ohraničenie* (obmedzenie), ktoré musíme špecifikovať pred optimalizáciou.

Rozoznávame dva typy týchto ohraničení:

1. geometrické alebo tzv. stranové ohraničenia sú priame ohraničenia premenných návrhu
2. ohraničenia stavu konštrukcie (stavové ohraničenia)

Matematicky môžeme tieto ohraničenia vyjadriť v tvare rovníc alebo nerovníc:

a) Ohraničenia v tvare rovníc:

$$h_j(X) = 0, \quad j = 1, \dots, k \quad (1)$$

kde: $X = [X_1, X_2, \dots, X_n]^T$ je vektor premenných návrhu

Typickými rovnicami tohto typu sú rovnice rovnováhy. V súvislosti s týmito ohraničeniami je potrebné poznamenať, že každé ohraničenie tohto typu poskytuje príležitosť vylúčiť istú premennú návrhu z optimalizačného procesu a tým redukovať dimenziu problému. Nevýhodou tohto eliminačného postupu je jeho nešikovnosť a algebraická komplikovanosť, takže sa používa iba niekedy.

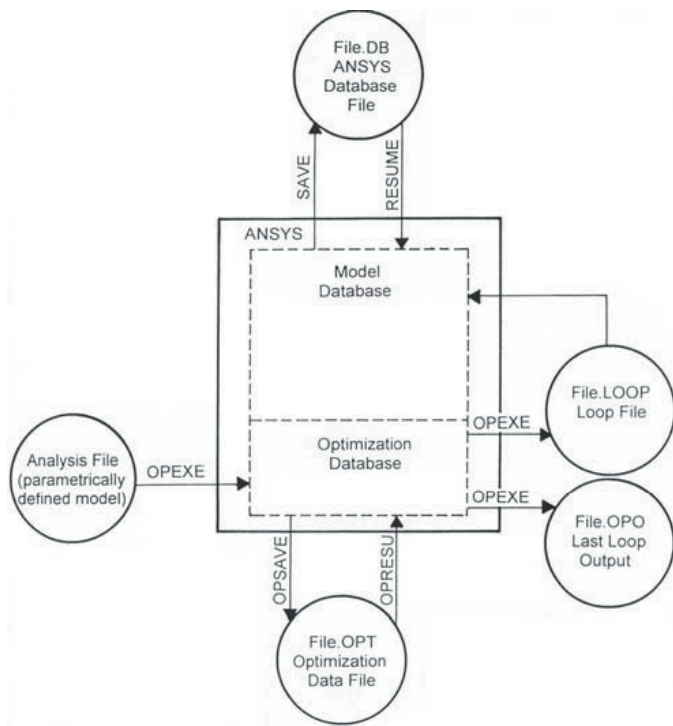
b) Ohraničenia v tvare nerovníc:

$$g_j \leq 0, \quad j = 1, \dots, m \quad (2)$$

Tieto ohraničenia vyjadrujú ohraničenia veľkosti premenných návrhu alebo tiež na stav konštrukcie. Ohraničenie, pre ktoré platí znak rovnosti v rovnici (2) nazývame *aktívne* alebo *kritické* a ohraničenie so znakom nerovnosti nazývame *pasívne*. Podobne to platí aj pre premenné návrhu.

1.2 Možnosti optimalizačných výpočtov v CAE systéme ANSYS

Optimalizačné výpočty rámu boli vykonané v CAE systéme ANSYS pomocou metódy konečných prvkov. ANSYS ako jedna z vedúcich predstaviteľov CAE technológií má v sebe zabudovaný optimalizačný modul (obrázok 1).

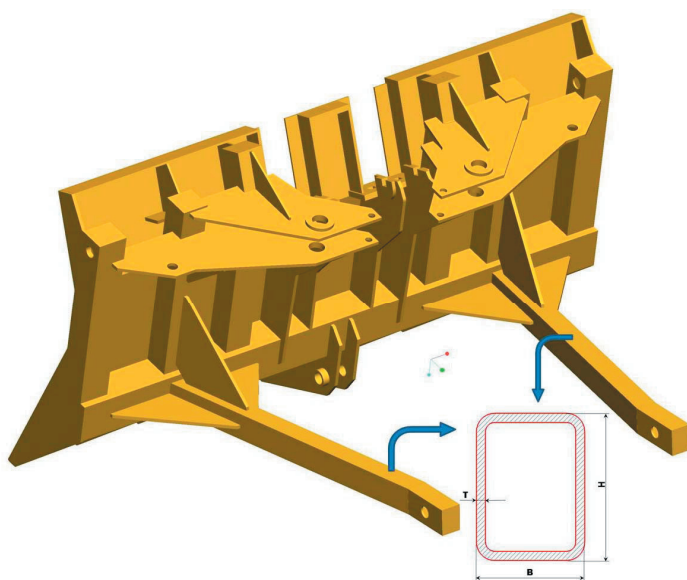


Obrázok 1 Optimalizačný modul CAE systému ANSYS

2. MATERIÁL A METÓDY

Ako základ pre vytvorenie výpočtového modelu pre optimalizačné výpočty poslužil 3D model rámu vytvorený v CAD systéme Pro/ENGINEER Wildfire. Predmetom optimalizačných výpočtov boli nosné valcované profily (obrázok 2) z hľadiska ich základných rozmerov (výška H , šírka B a hrúbka T).

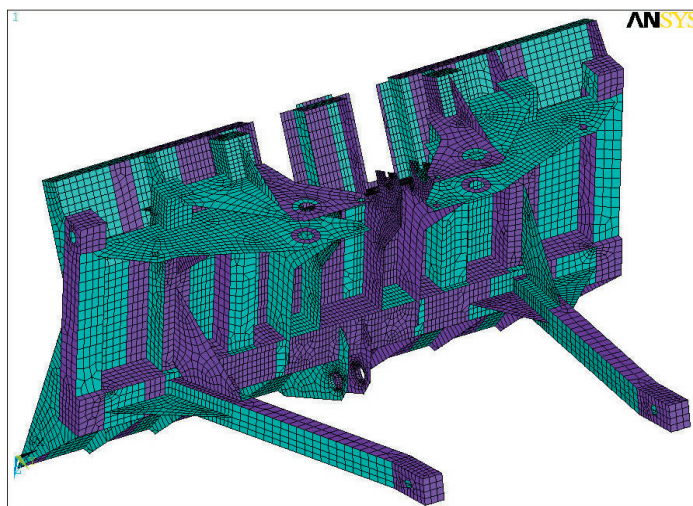
Výpočtový model použitý pre výpočty bol vyhotovený ako model plošný pomocou elementov typu SHELL 63. Od vytvorenia objemového výpočtového modelu sme upustili z dôvodu, že pri generovaní konečnoprvkovej siete by vzniklo príliš veľa elementov, ktoré by v konečnom dôsledku neúmerne predlžovali samotný výpočet. Použitý výpočtový model je na obrázku 3 a jeho parametre sú uvedené v tabuľke 1.



Obrázok 2 Optimalizované profily nosného rámu

Tabuľka 1 Parametre výpočtového modelu z prvkov typu SHELL 63

43407 ELEMENTS SELECTED	MAX ELEMENT NUMBER 68452
75605 NODES SELECTED	MAX NODE NUMBER 13015
617 KEYPOINTS SELECTED	MAX KEYPOINT NUMBER 694
985 LINES SELECTED	MAX LINE NUMBER 953
523 AREAS SELECTED	MAX AREA NUMBER 551



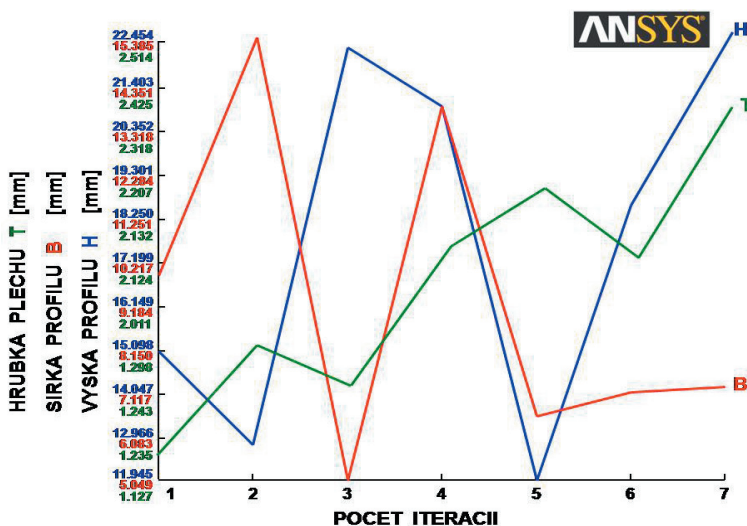
Obrázok 3 Plošný výpočtový model

3. VÝSLEDKY

Výsledkom optimalizačných výpočtov sú optimalizované rozmery použitého profilu ako aj jeho optimalizovaná hrúbka podľa tabuľky 2 resp. grafu na obrázku 4.

Tabuľka 2 Optimalizované parametre rámu

LIST OPTIMIZATION SETS FROM SET 1 TO SET 7 AND SHOW ONLY OPTIMIZATION PARAMETERS. (A "*" SYMBOL IS USED TO INDICATE THE BEST LISTED SET)					
		SET 1	SET 2	SET 3	SET 4
		(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)
SMAX	(SV)	95.075	95.075	95.075	95.075
H	(DV)	90.00	96.18	88.44	86.73
B	(DV)	80.00	79.14	82.36	76.41
T	(DV)	1.127	1.760	1.957	1.855
VTOT	(OBJ)	0.66602E+08	0.66602E+08	0.66602E+08	0.66602E+08
		SET 5	SET 6	SET 7	
		(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	(FEASIBLE)	
SMAX	(SV)	95.075	95.075	95.075	
H	(DV)	92.38	88.24	97.18	
B	(DV)	71.40	89.79	87.38	
T	(DV)	1.946	1.633	2.514	
VTOT	(OBJ)	0.66602E+08	0.66602E+08	0.66602E+08	



Obrázok 4 Plošný výpočtový model

4. ZÁVER

Na základe tabuľky 2 a obrázku 4, ktorý graficky znázorňuje optimalizované parametre nosného profilu je možné konštrukčne navrhnúť jeho optimálny prierez základného

rámu. Pri rozhodovaní sa ktorý variant bude nakoniec v konštrukcii použitý zohráva hlavnú úlohu to aké sú dostupné normalizované profily. Nemenej dôležitým faktorom je aj to ako táto konštrukčná zmena ovplyvní celkovú technológiu výroby celého nosného rámu.

LITERATÚRA

ŽMINDÁK, M., SÁGA, M., TVARUŽEK, J., HUSÁR, Š. 2000. *Optimalizácia mechanických sústav*. Žilina: Žilinská univerzita, 2000.

Kontaktná adresa:

Pavel Beňo,

Katedra mechaniky a strojnictva, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky,

Technická univerzita vo Zvolene, Študentská 26, 960 53 Zvolen

ODOLNOSŤ DLÁTOVÝCH RADLIČIEK V PODMIENKACH ABRAZÍVNEHO OPOTREBENIA

RESISTANCE OF CHISEL PLOW SKIVES IN CONDITION OF ABRASIVE WEAR

Peter ČIČO – Martin KOTUS – Daniela KALINCOVÁ

ABSTRACT: The contribution presents the results of the research of resistance of hard facing metals in condition of abrasive wear. This study deals with verification of the properties of two different surfacing overlays. Metal arc hand-welding technology – MAG and stick electrode was used. Specimens were affected by abrasive wear and tear. The study consists of two parts: theoretical and experimental. The theoretical part contains a summary of the abrasive wear and tear and fabrication technology of the surfacing overlay. The experimental part describes the proceedings of the welded overlay samples production and the consecutive comparison of the samples. Then we can determine more effective technology and weld deposit. The samples were put through the hardness test by Rockwell and their length and weight were measured. Evaluation of each test and complex comparison of the results determined the best sample resistant to abrasive wear and tear. Results of the experiments showed that intensity of wear is very depended on hardness as well as structure morphology of hard facing metals.

Key words: renovation, abrasive resistance, structure morphology, tribological properties, weld deposit

ABSTRAKT: Príspevok prezentuje výsledky výskumu odolnosti tvrdonávarových materiálov v podmienkach abrazívneho opotrebenia, aplikovaných na dlátové radličky kompaktoru. Použili sa dva druhy návarových materiálov a dve technológie a to ručné naváranie elektrickým oblúkom obalenou elektródou a technológiou MAG rúrkovým drôtom. Experimentálna časť popisuje postup a podmienky vyhotovenia návarov a následné prevádzkové skúšky. Na zistenie mechanických vlastností použitých návarov sa vykonávali skúšky tvrdosti podľa Rockwela, radličky boli premerané a odvážené a zistili sa úbytky opotrebenia zo zmeny lineárnych rozmerov. Vyhodnotením jednotlivých skúšok a komplexným porovnaním výsledkov bola stanovená odolnosť renovovaných dlátových radličiek voči opotrebeniu. Experimentálne výsledky ukázali, že intenzita opotrebenia závisí hlavne od tvrdosti a štruktúry návarov.

Kľúčové slová: renovácia, abrazívna odolnosť, štruktúra návarov, prevádzkové podmienky

ÚVOD

Stroje na spracovanie pôdy pracujú v rôznych pôdnych podmienkach, ktoré sa odlišujú štruktúrou, vlhkosťou pôdy a aj jej chemickým zložením. Tieto podmienky ovplyvňujú

a skraccujú technický život nástrojov takýchto strojov. Príčinou straty funkčnosti súčiastok je abrazívne opotrebenie. Rýchlosť opotrebenia závisí od použitého materiálu súčiastky, vlastností abrazívnej hmoty a od vzájomného pôsobenia nástroja o pôdy.

Pracovný nástroj sa musí vyznačovať vysokou technickou úrovňou a vykonávať kvalitnú prácu. Aby mohol tieto požiadavky spĺňať musí mať kvalitný povrch. Tento sa dá dosiahnuť výrobou súčiastky z kvalitného materiálu alebo zvýšením kvality povrchu chemickým, chemicko-tepelným spracovaním, alebo preventívnym renovovaním tejto plochy.

Dôvody, ktoré nás nútia predlžovať životnosť pracovného nástroja sú ekonomické ale aj technické. Okrem zníženia nákladov na opravu a výmenu opotrebených súčiastok sa znižia aj preстоje strojov a zvýši sa efektívnosť práce.

Neustále sa hľadajú postupy a vykonávajú opatrenia na predĺženie životnosti súčiastok v oblasti konštruovania a renovácie súčiastok. Funkčné vlastnosti súčiastok vo väčšine prípadov možno obnoviť, resp. predĺžiť renováciou – naváraním. Naváraním umožníme vytvoriť vhodnú, požadovanú kombináciu vlastností povrchových vrstiev (povrchová tvrdosť, oteruvzdornosť). Naváraním častokrát zlepšime oteruvzdorné vlastnosti viac ako mal pôvodný materiál. Návar musí byť vytvorený z materiálov vhodných mechanických a tribologických vlastností.

K častiam pôdy spracujúcich strojov, ktoré sú vystavené silnému abrazívnemu opotrebeniu, patria aj funkčné časti poľnohospodárskych strojov na predsejbovú prípravu pôdy. Opotrebenie funkčných častí spôsobuje zníženie kvality práce. Preto je im potrebné venovať pozornosť zvyšovaním odolnosti a tým aj zvýšením technického života.

Cieľom príspevku je poukázať na odolnosť navarených dlátových radličiek Komondoru 440 vystavených abrazívnemu opotrebeniu. Ako návarový prídavný materiál bol použitý rúrkový drôt FLUXODUR 62 pre naváranie technológiou MAG a obalená elektróda FIDUR 10/65 pre ručné oblúkové naváranie.

Materiál a metódy

Na prevádzkové skúšky boli použité dlátové radličky dodávané výrobcom Komondoru 440, na ktoré boli urobené preventívne návary.

Na naváranie dlátových radličiek boli použité vysoko oteruvzdorné návarové materiály FLUXODUR 62 od firmy Oerlikon a FIDUR 10/65 od firmy Kjellberg. Chemické zloženie návarového kovu udávané výrobcom pre Fluxodur 62 je v tabuľke č. 1 a pre FIDUR 10/65 v tabuľke č. 2. Návarový materiál Fluxodur 62 – je legovaný plnený drôt \varnothing 2,4 mm (zvarový kov bez trosky), pre naváranie metódou MAG a Fidur 10/65 – hrubobalená elektróda \varnothing 2,5 mm určená pre ručné naváranie elektrickým oblúkom.

Tabuľka 1 Analýza návarového kovu Fluxodur 62 (%)

C	Si	Mn	Cr
4,0	1,2	0,5	30

Tabuľka 2 Analýza návarového kovu Fidur 10/65 (%)

C	Si	Mn	Cr
4,5	0,7	0,5	34,0

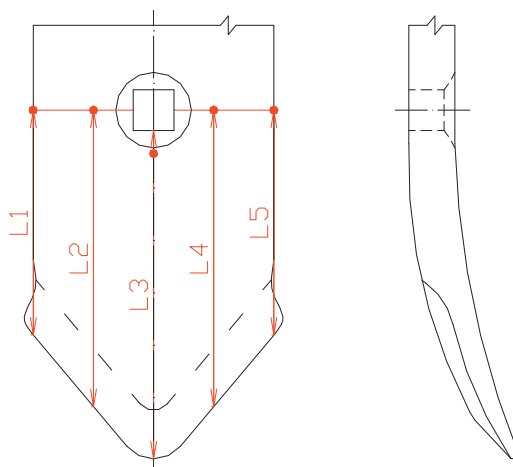
Na prevádzkové skúšky bolo použitých desať navarených radličiek a jedna bola pôvodná bez návaru ako etalón.

Naváranie bolo realizované ručne. Fluxodur 62 bol navarený zväracím zariadením pre MAG technológiu: STEL-TOP-504-A, s parametrami: prúd $I_n = 190$ A, napätie $U = 37$ V.

Fidur 10/65 bol navarený zariadením pre ručné oblúkové zväranie: TIGER-170 od firmy REHM s parametrami: prúd $I_n = 90$ A, napätie $U = 25$ V.

Pred vyhotovením návaru bola každá radlička zbavená povrchovej úpravy – farby, očíslovaná 1 až 11 a to za pomoci číselných razníc a farby. Potom nasledovalo samotné naváranie na radličky nasledovne:

Radličky č. 1 ÷ 5 – Fidur 10/65, č. 6 – etalón – nenavarená radlička a č. 7 ÷ 11 – Fluxodur 62. Na každej radličke bolo pomocou uhlovej brúsky a jamkára vyznačených päť meracích miest L1 až L5 – obrázok č. 1. Takto sme zabezpečili zhodnosť meracích rovín, na ktorých boli merané lineárne dĺžkové rozmery po navarení a po prevádzkových skúškach. Taktiež bola každá radlička odvážená a zmeraná tvrdosť podľa Rockwella – STN ISO 6508.



Obrázok 1 Jednotlivé meracie miesta na jednej a druhej strane radličky

Výsledky a diskusia

Podrývacie radličky pracovali prevažne v suchých hlinitých až ílovito-hlinitých pôdnych druhoch, čo sa prejavilo aj na dosiahnutých výsledkoch. Merania sa uskutočnili po spracovaní 2×300 ha pôdy. Pri meraní boli radličky na jednej strane natoľko opotrebené, že už nedokázali ďalej kvalitne pracovať a museli byť otočené a skúšala sa druhá strana radličky. Namerané výsledky z jednej strany radličiek sú zapísané v tabuľke č. 3 a graficky znázornené na obrázku č. 2.

Namerané výsledky z druhej strany radličiek sú zapísané v tabuľke č. 4 a graficky znázornené na obrázku č. 2.

Tabuľka 3 Namerané úbytky lineárnych rozmerov na jednotlivých meracích miestach

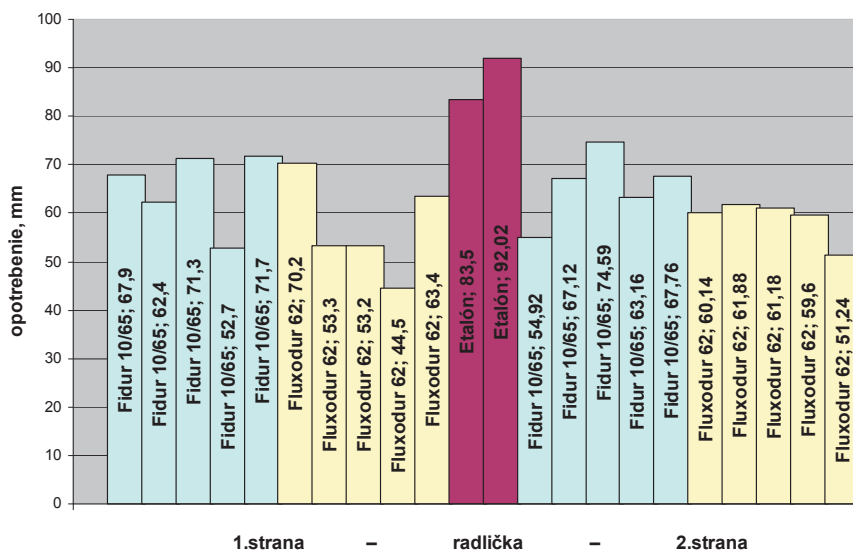
Číslo radličky	Materiál	Úbytky na jednotlivých meracích miestach [mm]					Priemerná hodnota [mm]
		L1	L2	L3	L4	L5	
1	Fidur 10/65	36,3	60,7	79,1	56,4	42,1	54,92
2	Fidur 10/65	73,5	70	76,2	64,6	51,3	67,12
3	Fidur 10/65	11,9	122	143,4	53,9	41,78	74,59
4	Fidur 10/65	26,5	123,8	58,3	60,7	46,5	63,16
5	Fidur 10/65	23,8	128,9	66,6	65,9	53,6	67,76
6	Etalón	38,8	137,1	142,2	120,3	21,7	92,02
7	Fluxodur 62	40	65,5	79,3	59,7	56,2	60,14
8	Fluxodur 62	24,3	127,1	58,4	59,2	40,4	61,88
9	Fluxodur 62	23,5	127	57,6	58,6	39,2	61,18
10	Fluxodur 62	43,6	69,9	78,4	52,1	54	59,6
11	Fluxodur 62	55,2	48,9	59,7	51,7	40,7	51,24

Tabuľka 4 Namerané úbytky lineárnych rozmerov na jednotlivých meracích miestach

Číslo radličky	Materiál	Rozmerové úbytky po spracovaní 300 ha [mm]					Priemerná hodnota [mm]
		L1	L2	L3	L4	L5	
1	Fidur 10/65	44,7	61,6	80,1	72,5	80,9	67,9
2	Fidur 10/65	54,3	62,5	78,6	66,4	50,4	62,4
3	Fidur 10/65	14,4	130,3	143,8	40,6	27,8	71,3
4	Fidur 10/65	46,1	50,5	62,8	50,2	54,3	52,7
5	Fidur 10/65	72,1	76,3	80,8	73,2	56,5	71,7
6	Etalón	15	128,8	141,6	118,8	13,3	83,5
7	Fluxodur 62	48,5	67,2	81,9	80,3	73,3	70,2
8	Fluxodur 62	54,9	46,8	63,7	49,1	52	53,3
9	Fluxodur 62	54,8	47,4	62,2	50,8	50,8	53,2
10	Fluxodur 62	46,2	54,5	60,3	36,5	25	44,5
11	Fluxodur 62	52,3	126,4	44,6	44	49,6	63,4

Z dosiahnutých výsledkov je zrejmé, že materiálové lineárne úbytky pri radličkách sú nerovnomerné. Pri materiály Fidur 10/65 na radličkách č. 1 ÷ 5 priemerná hodnota sa pohybuje v rozmedzí 54,92 mm až 74,59 mm. Pri materiáli Fluxodur 62 – radličky č. 7 ÷ 10 okrem radličky č. 11, u ktorej bol dosiahnutý najmenší úbytok opotrebenia 51,24 mm, vidieť rovnomernosť opotrebenia v rozsahu od 59,6 mm do 61,88 mm (na jednej strane).

Na druhej strane u radličiek č 1 ÷ 5 boli lineárne úbytky v rozsahu 52,7–71,7 mm, u radličiek č. 7 ÷ 10 v rozsahu 44,5–70,2 mm. Priemerná hodnota opotrebenia z oboch strán radličky u materiálu Fidur 10/65 bola 65,35 mm a u materiálu Fluxodur 62 bola 57,87 mm. Priemerná hodnota úbytku u nenavarenej pôvodnej radličky bola 87,8 mm. Ak tieto hodnoty porovnáme percentuálne, vychádza nám, že etalón má oproti Fiduru 10/65 úbytky o 34 % väčšie a oproti Fluxoduru 62 o 52 % väčšie.



Obrázok 2 Priemerná hodnota opotrebenia radličiek – úbytky lineárnych rozmerov

Pri laboratórnych meraniach tvrdosti sme zistili tvrdosť u navarených radličiek. Výsledok skúšok nepotvrdil, že jeden z faktorov vplyvujúcich na veľkosť opotrebenia je tvrdosť. Hoci radličky navarené Fidurou 10/65 dosiahli priemernú tvrdosť 54 HRC, opotrebenie je u nich väčšie ako u materiálu Fluxodur 62, kde bola nameraná priemerná tvrdosť 48 HRC. Tieto výsledky môžu byť pravdepodobne ovplyvnené aj množstvom navareného materiálu, ale hlavne dosiahnutou štruktúrou návaru. Obidva návarové materiály však voči nenavarenému etalónu s tvrdosťou 31 HRC, dosiahli lepšiu odolnosť proti opotrebeniu.

Na odolnosť voči opotrebeniu vplyva chemické zloženie návarového kovu. Použitý návarový materiál mali približne rovnaké chemické zloženie. Bol predpoklad vzniku rovnakej štruktúry, avšak s iným rozložením karbidov, čo mohlo byť aj jednou z príčin nerovnakého opotrebenia.

Zhodnotením opotrebenia a nákladovosti jednotlivých technológií vyplynulo, že naváranie metódou MAG (Fluxodur 62) je pri celkových nákladoch 1,8 € na naváranie radličiek ekonomicky výhodnejšie, ako pri nákladoch 3,2 € pri naváraní obalenou elektródou (Fidurou 10/65).

Záver

Cieľom tejto práce bolo v prevádzkových podmienkach overiť odolnosť dlátových radličiek zrenovovaných návarovým materiálom Fluxodur 62 a Fidurou 10/65.

O niečo vyššiu odolnosť voči abrazívnemu opotrebeniu dosiahol materiál Fluxodur 62, s priemernou tvrdosťou 48 HRC, ako materiál Fidur 10/65 s tvrdosťou 54 HRC. Obidva návarové materiály voči nenavarenému etalónu s tvrdosťou 31 HRC, však dosiahli na základe úbytkov lineárnych rozmerov, ale aj hmotnostných úbytkov, ktoré v príspevku nie sú zhodnotené, lepšiu odolnosť voči opotrebeniu. Danej problematike je potrebné neustále

venovať pozornosť a hľadať ďalšie možnosti zvyšovania odolnosti nástrojov pre spracovanie pôdy, čoho výsledným efektom bude zníženie nákladov a zvýšenie efektívnosti a hospodárnosti výroby.

LITERATÚRA

- AIR LIQUIDE WELDING CENTRAL EUROPE s. r. o. 2011. Firemná literatúra Oerlikon, charakteristika tvrdonávarov.
- BOŠIAK, M. – ČIČO, P. 2009. Overenie tvrdonávarových materiálov v podmienkach abrazívneho opotrebenia. In *Najnovšie trendy v poľnohospodárstve, v strojárstve a v odpadovom hospodárstve*. Nitra : SPU, 2009. s. 49–53. ISBN 978-80-552-0208-2.
- BUJNA, M. – ČIČO, P. 2008. Predĺženie životnosti podrývacích dlát naváraním. In *Kvalita a spoľahlivosť technických systémov 2008*. Nitra : SPU, 2008. s. 110–114. ISBN 978-80-552-0059-0.
- ČIČO, P. 2009. *Údržba a oprava strojov*. Nitra : SPU, 2009. 175 s. ISBN 978-80-552-0171-9.
- KOTUS, M. – BUJNA, M. 2007. Meranie abrazívneho opotrebenia v prevádzke. In *Bezpečnosť-kvalita-spoľahlivosť 2007*. Košice : TU, 2007. s. 151–156. ISBN 978-80-8073-828-0.

Tento článok bol napísaný v rámci projektu VEGA 1/0576/09 – Zvyšovanie kvality poľnohospodárskych strojov a výrobných zariadení.

Kontaktná adresa:

doc. Ing. Peter Čičo, CSc., Ing. Martin Kotus, PhD., Katedra kvality a strojárskych technológií, Technická fakulta, Slovenská poľnohospodárska univerzita, Tr. A. Hlinku 2, 949 76 Nitra

Ing. Daniela Kalincová, PhD., Katedra výrobných technológií a materiálov, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky, Technická univerzita vo Zvolene, Študentská 26, 960 53 Zvolen

NÁVRH SPÔSOBU HODNOTENIA KOMBINOVANÝCH ÚČINKOV RIZIKOVÝCH FAKTOROV

DEVELOPMENT OF FRAMEWORK FOR ASSESSMENT OF COMBINED EFFECTS OF RISK FACTORS

Richard HNILICA

ABSTRACT: The aim of paper is to mention on possible approaches for assessment of combined effects of working environment factors assessment. It is widely known that individual factors of working environment can significantly affect human behaviour. Assurance of suitable work environment culture is basic presumption for complex assessment. Confrontation between subjective and objective methods for assessment of working environment is optimal manner of work management in this area, during which time it is essential to target the complex examination of working environment state.

Key words: working environment factors, risk, complex assessment, safety

ABSTRAKT: Príspevok sa zaoberá možnými prístupmi ku komplexnému posudzovaniu rizikových faktorov pracovného prostredia. Je všeobecne známe, že jednotlivé faktory pracovného prostredia môžu významne ovplyvniť ľudské správanie. Zabezpečenie vhodnej kultúry pracovného prostredia je základným predpokladom pre komplexné posudzovanie. Konfrontácia medzi subjektívnymi a objektívnymi metódami hodnotenia pracovného prostredia je základným spôsobom riadenia práce v tejto oblasti, pričom v súčasnosti je nutné zamerať sa na komplexné posúdenie pracovného prostredia.

Kľúčové slová: faktory pracovného prostredia, riziko, komplexné hodnotenie, bezpečnosť

ÚVOD

Ergonómia pracovného prostredia je veda o prispôbovaní pracovného prostredia potrebám človeka, pričom cieľom je nájsť správny súlad medzi fyzickými potrebami, prostredím a vybavením pracoviska s ohľadom na environmentálne faktory (držanie tela, záťaž, hluk, osvetlenie, mikroklimatické podmienky, výpary a pod.). Sledovanie pracovného komfortu alebo úrovne bezpečnosti a ochrany zdravia ľudí pri práci má význam pre úpravu a navrhovanie pracovných podmienok na existujúcich prípadne novovytvorených pracoviskách.

V pracovnej činnosti sa v súčasnej dobe vyžaduje dosiahnutie maximálneho výkonu, čo však nie je možné bez vytvorenia optimálnych pracovných podmienok. Aby boli

vytvorené optimálne pracovné podmienky je potrebné zaviesť tento trend aj v oblasti tvorby pracovného prostredia a to hlavne vo výrobnjej oblasti. Túto výrobnú oblasť hlavne ovplyvňuje technologický faktor výroby čo spôsobuje komplikovanejšie dosiahnutie požadovaných optimálnych pracovných podmienok.

Nedocenenie významu niektorej zo zložiek zaťaženia pracovného prostredia vedie k zhoršeniu pracovných podmienok a zníženiu bezpečnosti práce. Poškodzuje sa zdravie ľudí, zvyšuje sa nebezpečenstvo vzniku úrazov a prejavujú sa nepriaznivé účinky na psychike ľudí, čo sa v konečnom dôsledku prejaví znížením produktivity a kvality práce.

Operátor strojov je pri práci vystavený účinku viacerých faktorov pracovného prostredia (hluk, osvetlenie, prašnosť, fyzická záťaž atď.). Uvedené faktory pracovného prostredia predstavujú z pohľadu posudzovania rizík potenciálne iniciačné impulzy, ktoré môžu aktivovať reťazec udalostí ústiacich do neželanej udalosti (pracovného úrazu resp. pri dlhodobej expozícií choroby z povolania).

MATERIÁL A METÓDY

Hodnotenie rizika je proces vyhodnocovania pravdepodobnosti a závažnosti škodlivého účinku na človeka v dôsledku expozície nebezpečnému faktoru za definovaných podmienok z definovaných zdrojov, ktorý pozostáva z určenia nebezpečenstva, zhodnotenia expozície, posúdenia vzťahu dávky a účinku a charakterizácie rizika stanovenia nelistôt vyhodnotenia.

Analýza súčasného stavu hodnotenia pracovného zaťaženia zamestnancov poukazuje na stav, že v praxi prevláda spôsob parciálneho hodnotenia zaťaženia pri práci. Znamená to, že sa účinok každého pôsobiaceho faktora na organizmus pracovníka počas jeho pracovnej činnosti vyhodnocuje samostatne, nezávisle od ostatných prítomných faktorov prostredia. Súčasný spôsob hodnotenia nedokáže zohľadniť vzájomný synergizmus t.j. spolupôsobenie všetkých prítomných negatívnych faktorov pracovného procesu (Kapustová, 2005). V súčasnosti sa u zamestnancov, ktorí sú exponovaní viacerými faktormi práce a pracovného prostredia, určuje kategorizácia prác z hľadiska zdravotných rizík pre jednotlivé faktory osobitne. Pri kategorizácii sa vychádza z Vyhlášky č. 448/2007 Z. z. o podrobnostiach o faktoroch práce a pracovného prostredia vo vzťahu ku kategorizácii prác z hľadiska zdravotných rizík a o náležitostiach návrhu na zaradenie prác do kategórií.

V súvislosti s tým, čo sa vyžaduje od procesu posudzovania kvality pracovného prostredia, možno zdefinovať podľa (Lumnitzer a kol., 2004) nasledujúce ciele procesu hodnotenia:

%hodnotenie kritických faktorov pracovného prostredia,

- hodnotenie typických faktorov pracovného prostredia,
- hodnotenie predpísaných faktorov pracovného prostredia,
- hodnotenie vybraných faktorov,
- hodnotenie tried faktorov,
- hodnotenie komplexnej kvality pracovného prostredia.

V prevádzkach strojárskoho priemyslu pôsobí množstvo negatívnych faktorov, ktoré rôznou intenzitou zaťažujú organizmus človeka počas aktívnej práce. Z tohto dôvodu je dôležité pre tvorbu pracovného komfortu zisťovanie veľkosti pracovného zaťaženia, ktoré súvisí so spokojnosťou zamestnanca. Pri posudzovaní pracovného zaťaženia je potrebné

zohľadniť vzájomný synergizmus všetkých pôsobiacich negatívnych faktorov pracovného procesu a nie len ich samostatné vyhodnotenie.

Náplňou tohto príspevku je pomocou prípadovej štúdie načrtnúť možnosti využitia matematického modelu na komplexné hodnotenie kvality pracovného prostredia. Vychádzať sa bude zo základného predpokladu, že na organizmus človeka počas jeho práce na rôznych pozíciách pôsobia rôzne rizikové faktory.

Pri týchto faktoroch si je nutné uvedomiť ich intenzitu a trvanie, od čoho potom závisí aj ich vplyv na organizmus človeka. Kvantifikovať tento vplyv je veľmi zložité, z dôvodu:

- každý parameter pracovného prostredia si vyžaduje iný prístup pri analýze jeho vplyvu na človeka,
- každý z parametrov má širokú škálu účinkov,
- vplyv jednotlivých rizikových faktorov (ich charakter a intenzita) sa mení s časom a zmenou pracovnej činnosti,
- vnímanie účinkov pracovného prostredia je výrazne individuálnou záležitosťou (Sablík, 1990).

Predovšetkým je potrebné stanoviť intenzitu a trvanie vplyvu hodnotených parametrov pracovného prostredia na organizmus človeka. Kvantifikovať vplyv jednotlivých parametrov pracovného prostredia na organizmus človeka je veľmi ťažké. O to zložitejšie je najmä matematickú závislosť medzi úrovňou pracovného prostredia ako celku a jeho účinkami na človeka (aj keď je napríklad prakticky dokázaná závislosť medzi zlepšovaním pracovného prostredia a rastom pracovného výkonu – produktivity práce).

Pred určením vhodnej metódy hodnotenia je vhodné spojiť kvalitatívne a kvantitatívne hodnotenie, čím vznikne systém hodnotenia parametrov pracovného prostredia, ktorý zohľadňuje:

- charakter vplyvu parametrov pracovného prostredia,
- čas trvania vplyvu,
- rozsah súčasne pôsobiacich rizikových faktorov,
- závažnosť vplyvu jednotlivých parametrov pracovného prostredia.

VÝSLEDKY

V prípadovej štúdií sa vychádza z podmienky, že na človeka v strojárskom priemysle pôsobia súčasne rôzne rizikové faktory. Pri komplexnom hodnotení takéhoto pracovného prostredia sa hodnotí interakcia všetkých rizikových faktorov. Daná prípadová štúdia komplexného hodnotenia je zameraná na štyri základné rizikové faktory, ktoré majú vplyv na zdravie a pohodu človeka pri práci. Pôjde o:

- hluk,
- osvetlenie,
- teplotu,
- fyzickú záťaž.

Ako prvé sa nastavili vstupné hodnoty faktorov pracovného prostredia, ktoré boli kombinované pri troch rôznych úrovniach (pozri Tabuľku 1). Fyzická záťaž sa sledovala pomocou meracieho zariadenia srdcovej frekvencie.

Tabuľka 1 Hodnoty nastavených rizikových faktorov

Rizikový faktor	úroveň		
	1	2	3
hluk [dB]	70	80	90
osvetlenie [lx]	50	250	500
teplota [°C]	17,5	24,5	28,5

Pri komplexnom hodnotení pracovného prostredia sa bude vychádzať z multikriteriálnej analýzy, pomocou ktorej sa posúdi významnosť jednotlivých vybraných rizikových faktorov. Existuje viacero multikriteriálnych rozhodovacích metód, ktoré majú rovnaký cieľ, a to posúdiť niekoľko variantov riešenia zadaného problému podľa zvolených kritérií a stanovenie ich poradia. Jednotlivé metódy sa líšia hlavne podľa toho, ako sa určuje váha jednotlivých kritérií. Pre prípadovú štúdiu sa zvolila Saatyho metóda, ktorá slúži na určenie váhy jednotlivých kritérií hodnotenia, ktoré číselne vyjadrujú význam týchto kritérií (resp. dôležitosť sledovaných cieľov). Čím je kritérium významnejšie, tým je aj jeho váha vyššia. Pre dosiahnutie zrovnateľnosti váh kritérií sa tieto váhy normujú tak, aby ich súčet bol rovný jednej. Výsledky váh podľa významnosti sú uvedené v tabuľke 2.

Výsledky nameraných a nastavených hodnôt vybraných rizikových faktorov sú uvedené v tabuľke 3. Keďže jednotlivé merania trvali 30 minút, bolo nutné namerané údaje previesť na 8 hodinovú pracovnú dobu.

Pre hluk bolo potrebné previesť nastavenú hodnotu na ekvivalentnú hladinu A zvuku (L_{Aeq}) a následne z L_{Aeq} na normalizovanú hladinu hlukovej expozície ($L_{AEX,8h}$). Za podmienky, že rýchlosť prúdenia vzduchu $v_a < 0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, je možné nahradiť výslednú teplotu guľového teplomeru t_g operatívnu teplotou t_o . Pre správne určenie fyzickej záťaže bolo potrebné premeniť kcal (kilokalórie) na MJ (megajouly), nakoľko vo Vyhláške MZ SR č. 542/2007 Z. z., je uvádzaná fyzická záťaž v MJ.

Tabuľka 2 Saatyho metóda odhadu váh kritérií

s (i, j)	Kritériá					R(i) =	Váha
Kritériá	K1	K2	K3	K4	$\Pi a(i,j)$	$[\Pi a(i,j)]^{1/4}$	v(i)
K1 (teplota)	1	0,33	0,2	0,14	0,009	0,312	0,055
K2 (osvetlenie)	3	1	0,33	0,2	0,2	0,669	0,118
K3 (hluk)	5	3	1	0,33	5	1,495	0,263
K4 (fyz. záťaž)	7	5	3	1	105	3,201	0,564
Spolu						5,678	1,000

Ak sú známe všetky potrebné údaje k vyhodnoteniu pracovného zaťaženia, je možné pristúpiť k samotnému hodnoteniu komplexného zaťaženia. Pri hodnotení sa vychádzalo zo vzťahu:

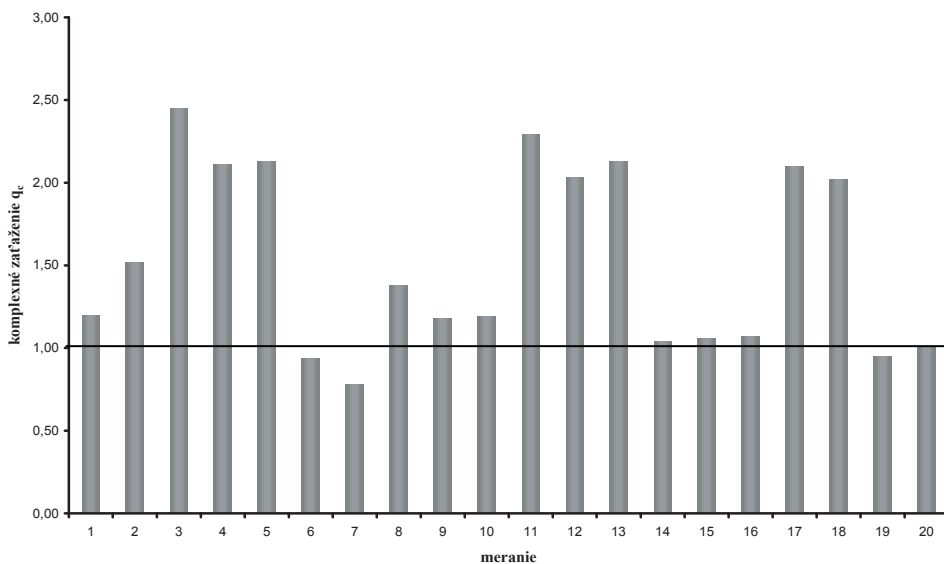
$$q_c = \sum_{j=1}^4 v_j \frac{Z_j^r}{Z_j^p} \quad (1)$$

kde výraz $v_j \frac{Z_j^r}{Z_j^p}$ definuje stupeň reálneho zaťaženia ľudského organizmu zaťažujúcim faktorom Z_j z celkového zaťaženia všetkými zaťažujúcimi faktormi Z_1, Z_2, \dots, Z_n .

Výsledky komplexného hodnotenia sú uvedené v tabuľke 3 a na obrázku 1. Z týchto výsledkov je ako referenčná hodnota braná $q_c = 1$.

Tabuľka 3 Nastavené a namerané hodnoty vybraných rizikových faktorov s výsledným komplexným hodnotením

Meranie	Hluk $L_{AEX,8h}$ [dB]	Osvetlenie E_m [lx]	Operatívna teplota t_o [°C]	Energetický výdaj zmenový [MJ]	KOMPLEXNÉ HODNOTENIE
1	79,7	250	17,5	9,74	1,20
2	89,7	250	17,5	14,78	1,52
3	69,7	50	17,5	15,46	2,45
4	89,7	50	17,5	8,74	2,11
5	79,7	50	17,5	9,48	2,13
6	69,7	500	17,5	8,06	0,94
7	79,7	500	17,5	5,32	0,78
8	89,7	250	24,5	12,77	1,38
9	69,7	250	24,5	10,75	1,18
10	79,7	250	24,5	9,41	1,19
11	79,7	50	24,5	12,77	2,29
12	89,7	50	24,5	7,39	2,03
13	69,7	50	24,5	10,75	2,13
14	69,7	500	24,5	9,41	1,04
15	89,7	500	24,5	8,74	1,06
16	79,7	500	24,5	9,41	1,07
17	79,7	50	28,5	8,74	2,10
18	69,7	50	28,5	8,06	2,02
19	79,7	500	28,5	7,39	0,95
20	69,7	500	28,5	8,74	1,01



Obrázok 1 Grafické zobrazenie komplexného zaťaženia q_c .

Z výsledkov znázornených na obrázku 1 je zrejmé, že merania, ktorých hodnota komplexného hodnotenia $q_c < 1$, možno považovať za vyhovujúce. Z týchto výsledkov je zrejmé, že pri meraniach, kde bola prekročená aspoň jedna limitná hodnota, potom hodnota komplexného hodnotenia $q_c > 1$, tak ide o pásmo s vysokým škodlivým účinkom. Pásmo, v ktorom sú hodnoty komplexného hodnotenia blízke 1, možno považovať za príпустné pásmo s mierne škodlivým účinkom.

V ďalšom riešení je potrebné zamerať sa na tie merania, ktorých hodnota q_c je blízka 1. Predpokladom pri skúmaní komplexného hodnotenia bude zmena vstupných parametrov a sledovanie, ako sa bude meniť hodnota výsledného komplexného hodnotenia. Vplyv týchto zmien na výsledné komplexné hodnotenie bude tvoriť základ pre posúdenie vhodnosti zvolenej metódy a návrhu možných modelov pre posudzovanie miery rizika.

ZÁVER

Záverom je možné konštatovať, že ani v prípade dodržania hygienických limitov pre jednotlivé rizikové faktory, ktorým je človek vystavený, nemôže zaisťovať celkovú bezpečnosť a spoľahlivosť človeka v pracovnom systéme v prípade exponovania viacerými faktormi súčasne. Aj samotná prax ukazuje, že je potrebné posudzovať rizikové faktory, pôsobiace na človeka, komplexne a nie len parciálne. V súčasnosti je základným kľúčom k tomu, či môže dochádzať ku kumulatívne pôsobeniu faktorov pracovného prostredia, kvalitne spracovaná vstupná analýza a hodnotenie rizík. Na základe tejto analýzy je možné posúdiť všetky rizikové faktory a ich pôsobenie na človeka.

Kvalitná identifikácia a klasifikácia neželaných udalostí, t. j. udalostí nezlučiteľných s bezpečnou prevádzkou, je považovaná za jeden zo základných atribútov pre analýzu vzniku týchto udalostí a teda pre návrh programov prevencie zamedzenia ich vzniku (Dado, 2008).

Z výsledkov uskutočnených meraní a následného experimentálneho posúdenia je možné konštatovať, že výsledok komplexného hodnotenia multikriteriálnou metódou výrazne ovplyvňuje určenie váhového koeficientu významnosti. Vyššia hodnota váhového koeficientu znamená že, daný rizikový faktor viac ovplyvňuje výsledok a naopak, rizikový faktor s nižšou hodnotou váhového koeficientu ovplyvňuje výsledok podstatne menej. Z tohto dôvodu bol výsledok vyhovujúci aj pri meraniach, pri ktorých hodnoty faktorov s nižším váhovým koeficientom boli prekročené. Z tohto dôvodu je potrebné svedomito a zodpovedne pristupovať k posudzovaniu jednotlivých dvojíc rizikových faktorov v Saatyho matici, na základe ktorých sú potom určené výsledné váhy koeficientov významnosti.

Z doterajších výsledkov vyplýva, že stanovenie referenčnej hodnoty pre komplexné hodnotenie rizikových faktorov, pri ktorej dôjde už k poškodeniu zdravia, je veľmi komplikované a preto bude predmetom ďalšieho skúmania.

LITERATÚRA

DADO, M. 2008. Využitie počítačovej simulácie pri analýze vplyvu osvetlenia na bezpečnosť pri práci na drevoobrábачích strojoch. In *Bezpečnosť práce* 12/2008. Bratislava, s. 23–27, ISSN 1335-4078.

- HNILICA, R., DADO, M. Úvod do komplexného hodnotenia kvality pracovného prostredia v strojárskych priemyselných prevádzkach pri zváraní. In *XI. Medzinárodná vedecká konferencia mladých 2009*. Zvolen: TU, 2009, ISBN 978-80-228-1994-7.
- HNILICA, R., DADO, M. Komplexné hodnotenie kvality pracovného prostredia v drevospracujúcom priemysle. In *Acta facultatis technicae: vedecký časopis Fakulty environmentálnej a výrobnnej techniky*. Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2009, roč. 12, č. 2, s. 119–130. ISSN 1336-4472.
- LUMNITZER, E., ROMÁNOVÁ, M. Trendy v oblasti ochrany zdravia v pracovnom prostredí priemyselných prevádzok. In *Strojárstvo*, 2004, č. 4, s. 55.
- SABLIK, J. *Ergonómia*. Vydavateľstvo SVŠT, Bratislava: 1990. 213 s. ISBN 80-227-0299-4.
- KAPUSTOVÁ, M. The mathematical model for comfort at work determination in engineering production. In *Acta Metallurgica Slovaca*, 11, 1/2005. Košice: TU, s. 126–133. ISSN 1335-1532.
- Nariadenie vlády SR č. 115/2006 Z. z., o minimálnych zdravotných a bezpečnostných požiadavkách na ochranu zamestnancov pred rizikami súvisiacimi s expozíciou hluku.*
- SALVENDY, G. *Handbook of human factors and ergonomics*. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. 1654 s. ISBN 978-0-471-44917-1.
- SCHWARZ, M., DADO, M., HNILICA, R. 2009. *Pracovné prostredie a technika prostredia*. Zvolen, Vydavateľstvo TU Zvolen. 2009. 187 s. ISBN 978-80-228-2090-5.
- Výhláška MZ SR č. 541/2007 Z. z. o podrobnostiach a požiadavkách na osvetlenie pri práci.*
- Výhláška MZ SR č. 542/2007 Z. z., o podrobnostiach o ochrane zdravia pred fyzickou záťažou pri práci, psychickou pracovnou záťažou a senzorickou záťažou pri práci.*
- Výhláška MZ SR č. 544/2007 Z. z., o podrobnostiach o ochrane zdravia pred záťažou teplom a chladom pri práci.*
- Zákon č. 355/2007 Z.z., o ochrane, podpore a rozvoji verejného zdravia a o zmene a doplnení niektorých zákonov.*

Príspevok bol spracovaný v rámci riešenia vedeckého grantového projektu KEGA 016TUZVO-4/2011 „Tvorba modelov pre posudzovanie miery rizika práce v lesníckych činnostiach a strojárskych prevádzkach“.

Kontaktná adresa:

Ing. Richard Hnilica, PhD., Katedra výrobných technológií a materiálov,
FEVT, TU vo Zvolene, Študentská 26, 960 53 Zvolen,
tel.: +421-455206596, e-mail: hnilica@vsld.tuzvo.sk

HUSTOTA TEPELNÉHO TOKU Z POVRCHU PROFILOVANEJ PLOCHY PRI SKLONE 45 STUPŇOV

THE HEAT FLOW DENSITY FROM PROFILATED SURFACE AT 45 DEGREE SLOPE

Rastislav IGAZ

ABSTRACT: Heat transfer process is utilized also in heating of dwelling and working areas of humanity. Requirement of effective utilization of energy have result in research of design and construction of heating and heat exchanger. Submitted paper deals with research in area of heat transfer efficiency increase through surface profilation of heat transfer solid.

Key words: heat transfer coefficient, surface profilation, heat flow, heat flow density

ABSTRAKT: Proces prestupu tepla sa uplatňuje pri vykurovaní obytných a pracovných priestorov človeka. S potrebou šetrenia energie a jej efektívneho využívania je potrebné zdokonaľovať konštrukciu teplovýmenných plôch. Prekladaná práca sa zaoberá výskumom v oblasti zvyšovania efektívnosti prestupu tepla v dôsledku povrchovej profilácie teplovýmennej plochy.

Kľúčové slová: súčiniteľ prestupu tepla, profilácia povrchu, tepelný tok, hustota tepelného toku

1. ÚVOD

Radiátory dnes predstavujú najčastejšie využívané tepelné výmenníky využívané na vykurovanie obytných a pracovných priestorov. Za dobu ich existencie bolo vytvorené množstvo rôznych dizajnov a konštrukcií. Hnacou myšlienkou vývoja je dosiahnutie väčšej efektívnosti prenosu tepla z radiátora do vykurovaného priestoru. Základnými požiadavkami na moderné radiátory sú hlavne vysoká efektívnosť a tepelný výkon, malé rozmery, malá tepelná zotrvačnosť, jednoduchá a lacná výroba, ale aj jednoduchá údržba a dlhá životnosť (CIHELKA a kol, 1985).

Hospodárny proces výroby tepla, jeho distribúcia a efektívne odovzdávanie do prostredia obytných priestorov predstavuje proces zabezpečovania základných životných podmienok človeka. V procese vykurovania priestorov určených pre pobyt ľudí existuje množstvo možností, kde je možné zefektívniť využívanie tepla a prispieť tak k všeobecnej spoločenskej požiadavke hospodárneho nakladania s energiou.

Na základe dlhodobého výskumu v oblasti vykurovacích telies a procesov s nimi spojených boli špecifikované niektoré zásady vedúce k zvyšovaniu efektívnosti prenosu tepla do prostredia. Medzi základné patria:

- zvýšenie tepelného výkonu je možné zmenšením vzdialenosti od podlahy a zväčšením odstupu od steny (COLTHORPE, 1959),
- zníženie rýchlosti prúdenia vody znižuje tepelný výkon (WATERS a kol., 1969, WARD, 1991),
- tepelne izolovaný reflektor umiestnený na stenu za radiátor znižuje tepelné straty vedením cez stenu až o 70 % (HARRIS, 1995),
- vloženie fólií s veľkou emisivitou do priestoru medzi panely radiátora sa zvyšuje jeho tepelný výkon (BECK a kol., 2003),
- použitie lesklých (metalických) náterov môže znížiť radiačnú zložku tepelného výkonu o viac ako 10 % (PEACH, 1972),
- znečistenie povrchu radiátora znižuje jeho konvektívny tepelný výkon,
- prídavné rebrovanie zvyšuje konvektívnu zložku tepelného výkonu.

Výskum v oblasti zvyšovania efektívnosti vykurovacích telies a procesom prestupu tepla z povrchu teplovýmennej plochy do vzduchu hľadá nové možnosti modernizácie vykurovacieho procesu. Prekladateľský príspevok sa venuje problematike intenzity prestupu tepla z profilovaného povrchu tepelného výmenníka v závislosti od jeho priestorovej orientácie.

2. TEÓRIA

V prípade štandardných vykurovacích telies, tzv. radiátorov, je proces prestupu tepla reprezentovaný prenosom tepla medzi pevným povrchom vykurovacieho telesa a tekutinou obtekajúcou tento povrch – vzduchom. Množstvo tepla Q odovzdané prirodzenou konvekciou pri prestupe tepla z povrchu vykurovacieho telesa do okolitého prostredia je definované Newtonovým vzťahom

$$Q = \alpha \cdot S \cdot \Delta t, \quad (1)$$

kde: Q – množstvo odovzdaného tepla (W),
 α – koeficient prestupu tepla ($Wm^{-2}K^{-1}$),
 S – plocha, ktorou sa prestup uskutočňuje (m^2),
 Δt – rozdiel teplôt povrchu telesa a okolitého prostredia (K).

Z uvedeného vzťahu (1) vyplýva, že množstvo tepla odovzdané z povrchu telesa do okolitého prostredia závisí od veľkosti vstupnej plochy S , rozdielu teplôt povrchu a okolitého prostredia Δt a hodnoty koeficienta prestupu tepla α . Hodnota koeficienta α je závislá od rôznych faktorov súvisiacich s podmienkami prestupu tepla a jeho hodnota môže v závislosti na podmienkach procesu nadobúdať hodnoty vo veľmi širokom intervale.

Súbor okrajových podmienok vplývajúcich na hodnotu koeficienta prestupu tepla je rozsiahly a zahŕňa hlavne (FERSTL, 1995):

- vznik prúdenia – prirodzené alebo nútené prúdenie,
- druh prúdenia – laminárne, prechodné alebo turbulentné prúdenie,
- tepelno-fyzikálne vlastnosti tekutiny – koeficient tepelnej vodivosti, koeficient teplotnej vodivosti, merná tepelná kapacita, hustota, viskozita a ďalšie,
- veľkosť a tvar povrchu – geometria povrchu, smer prúdenia (pozdĺžne, šikmé, priečne), drsnosť povrchu, uhol sklonu, obtekanie zospodu alebo zvrchu,...
- smer prenosu energie – zo steny alebo do steny.

Okrajové podmienky charakterizujúce proces prestupu tepla majú vplyv na hodnotu súčiniteľa prestupu tepla, pričom jednotlivé okrajové podmienky majú rozdielnú mieru vplyvy na efektívnosť procesu tepelnej výmeny. Okrem toho sa jednotlivé faktory ovplyvňujú navzájom, preto je veľmi ťažké vytvoriť matematický model zahŕňajúci všetky vplyvy, schopný dôveryhodne popísať proces tepelnej výmeny. Základným postupom pre určovanie hodnoty koeficienta prestupu tepla preto zostáva experimentálny výskum (PAVELEK a kol., 2007).

Overenou experimentálnou metódou určovania hodnoty súčiniteľa prestupu tepla je využitie holografickej interferometrie (PAVELEK a kol., 1995, URGELA a kol., 1992, ČERNECKÝ a kol., 1997). Táto optická experimentálna metóda umožňuje zviditeľňovanie procesov prestupu tepla v okolí povrchu telies, pričom na základe získaných dát poskytuje informácie o rozložení teploty v okolí povrchu telesa. Zo záznamov interferogramov získame informácie o teplotných gradientoch v kvapaline obtekajúcej teleso. Tieto informácie sú použité na určenie lokálnych hodnôt súčiniteľa prestupu tepla.

Zo získaných interferogramov sa určí rozloženie teploty v kvapaline, pretože interferometrické čiary vznikajúce v procese záznamu predstavujú izotermy, ktorým sa na základe známych vzťahov priradí teplota. Z rozloženia teploty a vzdialenosti jednotlivých izotermických čiar sa určí hodnota gradientu teploty v ľubovoľnom mieste na povrchu telesa. Následne podľa vzťahu

$$\alpha = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \cdot \frac{1}{T_w - T_\infty}, \quad (2)$$

kde: α – súčiniteľ prestupu tepla ($Wm^{-2}K^{-1}$),

λ – súčiniteľ tepelnej vodivosti kvapaliny ($Wm^{-1}K^{-1}$),

$\frac{\partial T}{\partial y}$ – gradient teploty v mieste merania (Km^{-1}),

T_w – teplota povrchu telesa (K),

T_∞ – teplota kvapaliny (K),

sa určí lokálna hodnota súčiniteľa prestupu tepla v danom mieste na povrchu telesa. Gradient teploty na povrchu v mieste merania je možné určiť ako hodnotu tangensu uhla dotýčnice k teplotnému profilu na povrchu telesa, pretože platí (PAVELEK a kol., 2007)

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) = \operatorname{tg} \beta. \quad (3)$$

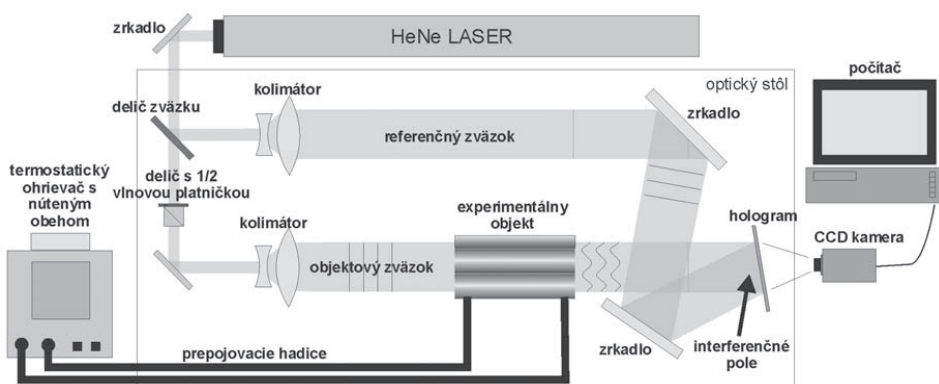
Po úprave vzťah nadobudne tvar

$$\alpha = -\lambda \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \frac{1}{T_w - T_\infty}. \quad (4)$$

Zo vzťahu (4) a experimentálne získaných dát sa určí lokálna hodnota súčiniteľa prestupu tepla v ľubovoľnom mieste na povrchu. Na základe známej hodnoty súčiniteľa prestupu tepla a okrajových podmienok experimentu sa určí použitím vzťahu (1) tepelný výkon odovzdávaný z povrchu telesa do okolitého prostredia.

3. EXPERIMENT

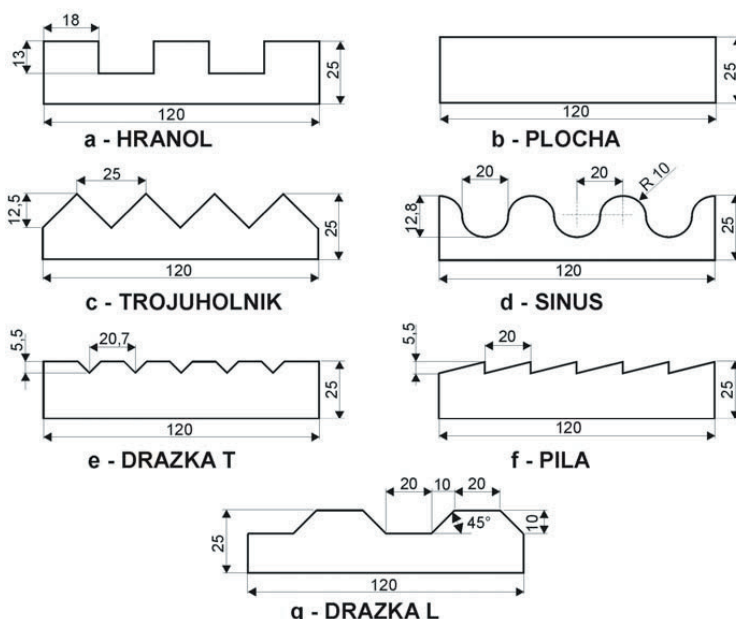
Zostava experimentálneho zariadenia (holografického interferometra) bola zostavená na optickom stole Katedry environmentálnej techniky FEVT podľa schémy na obrázku 1. Ako zdroj koherentného laserového žiarenia bol použitý 50 mW HeNe laser generujúci zväzok žiarenia s vlnovou dĺžkou 632,8 nm. Zväzok žiarenia je deličom rozdelený do dvoch samostatných vetiev – referenčnej a predmetovej. Referenčná vetva je po rozkolidovaní na potrebný priemer zväzku (cca. 80 mm) vedená priamo na holografickú platňu. Predmetová vetva prechádza deličom s $\frac{1}{2}$ vlnovou platničkou, ktorý slúži na korekciu intenzity žiarenia v predmetovej vetve. Po prechode kolimátorom a priestorom experimentálneho modelu je vedená na holografickú platňu. Na holografickej platni je zaznamenaná vzniknutá interferenčná štruktúra. Táto štruktúra reprezentuje zmeny v dráhe zväzku vyvolané vplyvom pozmenených okrajových podmienok experimentu. Zo získanej štruktúry interferenčných prúžkov je možné kvalitatívne aj kvantitatívne vyhodnotenie experimentu. Interferenčná štruktúra bola zaznamenávaná v podobe dátových súborov cez CCD snímač kamery do počítača v podobe .jpg obrazových súborov. Usporiadanie experimentálnej zostavy je znázornené na obrázku 1.



Obrázok 1 Celková schéma použitej experimentálnej zostavy

Experimenty boli uskutočnené na siedmich druhoch profilovaných teplotných povrchov, ktorých tvar a rozmery sú znázornené na obrázku 2. Modely boli vyhrievané na povrchovú teplotu v rozsahu 30–70 °C, pričom záznam interferogramov bol uskutočňovaný vždy v intervale 5 °C. Teplota vzduchu v miestnosti počas experimentov bola $20 \pm 0,5$ °C. Pri každom zázname bolo archivovaných 10 obrazov, z ktorých boli následne získané informácie o rozložení interferenčných prúžkov. Pre výpočty boli použité priemerné hodnoty sledovaných premenných zo získaného súboru dát pre daný profil a teplotu povrchu.

Hodnoty lokálnych súčiniteľov prestupu tepla boli určované podľa členitosti povrchu v 1 až 6 rôznych miestach na povrchu. Zo získaných hodnôt boli vypočítané hustoty tepelného toku z povrchu jednotlivých profilov, ktoré slúžia ako porovnávacie kritérium pre vyhodnotenie efektívnosti prestupu tepla z povrchu jednotlivých profilov.



Obrázok 2 Tvar, rozmery a označenie použitých experimentálnych profilov

Stanovenie hodnoty hustoty tepelného toku pre jednotlivé profily bolo uskutočnené na základe prepočtu efektívnej povrchovej plochy (po rozvinutí) na plochu 1 m² vytvorenú danou profiláciou povrchu. Na prepočet hustoty tepelného toku boli použité prepočtové koeficienty získané na základe priemetu profilu do roviny a skutočnej povrchovej plochy daného profilu. Použité prepočtové koeficienty sú uvedené v tabuľke 1.

Tabuľka 1 Pomery priemetu profilu do plochy k efektívnej povrchovej ploche

profil	a	b	c	d	e	f	g
	HRANOL	PLOCHA	TROJUHOLNÍK	SINUS	DRÁŽKA T	PÍLA	DRÁŽKA L
prepočtový pomer	1,7085	1,0000	1,4200	1,2875	1,2135	1,3373	1,1407

Metóda určovania hodnôt súčiniteľov prestupu tepla s využitím interferometrických metód je vo všeobecnosti považovaná za veľmi presnú (napr. PAVELEK a kol, 1978, URGELA a kol, 1992, ČERNECKÝ a kol, 1997). Napriek tomu je dôležité poznať vplyv nepresnosti určenia jednotlivých okrajových podmienok experimentálneho procesu na získanú hodnotu súčiniteľa prestupu tepla. Medzi okrajové podmienky procesu prestupu tepla vstupujúce do výpočtu a ovplyvňujúce presnosť určenia hodnoty súčiniteľa prestupu tepla patria presnosť určenia povrchovej teploty teplovýmennnej plochy a teploty okolitého prostredia, atmosférického tlaku a presnosť určenia vzdialeností interferenčných prúžkov.

Najvýznamnejší vplyv na presnosť výslednej hodnoty súčiniteľa α má presnosť určenia teploty povrchu a teploty okolia. V závislosti od teplotnej diferencie teploty povrchu a okolia je chyba určenia súčiniteľa asi 10% pri odchýlke merania 1 °C pri teplotnom

rozdiel 10 °C, a asi 2 % pri odchýlke merania 1 °C pri teplotnom rozdiel 50 °C. Presnosť určenia tlaku prostredia vplýva na výslednú hodnotu súčiniteľa α chybou, ktorej percentuálna veľkosť je približne rovná chybe určenia tlaku v kPa, pričom vplyv chyby určenia tlaku sa s teplotnou diferenciou medzi teplotou povrchu a okolia mierne zväčšuje. Chyba v určení vzájomnej vzdialenosti interferenčných prúžkov vplýva na presnosť hodnoty súčiniteľa α približne 1 percentom pri odchýlke merania vzdialenosti o 1 %.

4. VÝSLEDKY

Priemerná hodnota súčiniteľa prestupu tepla pre daný profil ako celok bola stanovená ako vážený priemer lokálnych hodnôt, pričom váhou jednotlivých čiastkových plôch profilu bol ich plošný obsah.

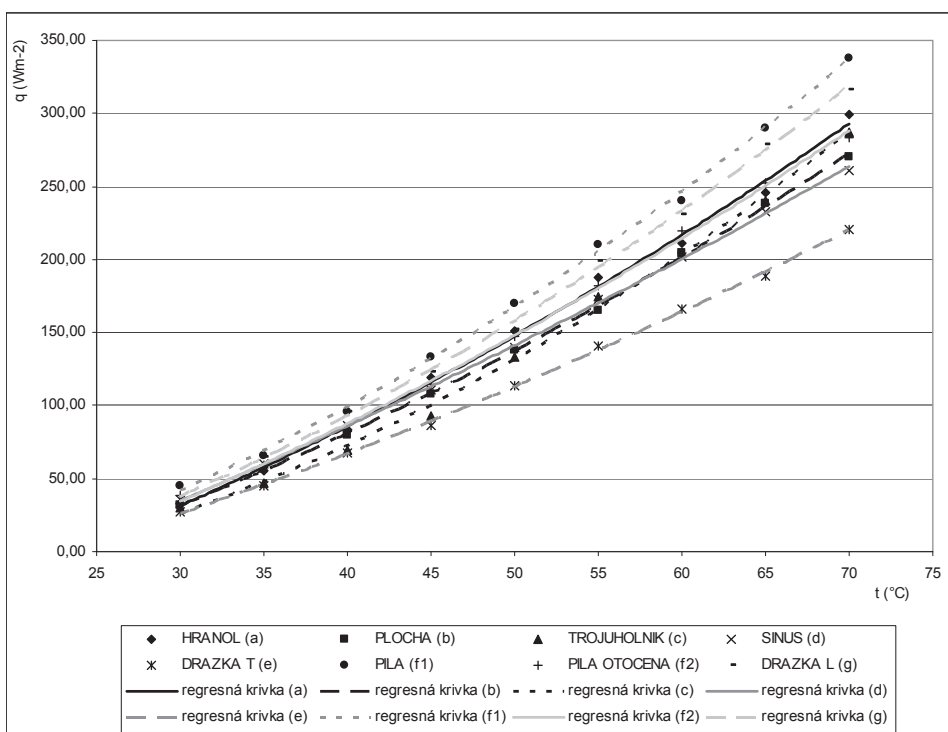
V nasledujúcej tabuľke (tab. 2) sú uvedené hodnoty hustoty tepelného toku pre jednotlivé profily vypočítané na základe experimentálne stanovených rovníc regresnej závislosti hustoty tepelného toku od teploty povrchu profilu. Označenie profilov korešponduje s označením v obrázku číslo 2. Profil PÍLA (označený aj ako „f“) umožňuje dve rôzne možnosti natočenia vzhľadom na nesúmernosť profilu. V tab. 2 a v obr. 3 je preto zobrazený dva krát, pričom označenie „f1“ označuje polohu zubami hore a označenie „f2“ polohu zubami dolu.

Sumár experimentálne získaných hodnôt hustoty tepelného toku (q_R) poskytovaného jednotlivými profilmi pri sklone 45° v závislosti od teploty je zhrnutý v tabuľke 2. Pod tabuľkou je grafické znázornenie hodnôt, ktoré umožňuje získať komplexnú predstavu o závislosti hustoty tepelného toku od teploty povrchu. V grafe sú vynesené experimentálne získané krivky regresnej závislosti pre jednotlivé profily.

Hodnoty hustoty tepelného toku uvedené v tabuľke 2 predstavujú množstvo tepla odovzdané do okolitého priestoru z povrchu s obsahom 1 m² pri danej profilácii povrchu orientovanej pod uhlom 45° voči horizontálnej rovine.

Tabuľka 2 Hodnoty hustoty tepelného toku pre jednotlivé profily vypočítané z experimentálne stanovených rovníc regresnej závislosti od teploty

t_w (°C)	q_R (Wm ⁻²)							
	a	b	c	d	e	f1	f2	g
	HRANOL	PLOCHA	TROJUHOLNÍK	SINUS	DRÁŽKA T	PÍLA (zuby hore)	PÍLA otočená (zuby dolu)	DRÁŽKA L
30	31,32	31,63	26,53	34,76	26,16	42,05	34,46	37,97
35	57,74	55,33	47,91	59,98	45,96	69,20	60,25	64,15
40	85,97	80,85	72,51	86,15	67,03	99,11	87,72	92,88
45	116,01	108,20	100,33	113,30	89,39	131,78	116,89	124,15
50	147,85	137,37	131,35	141,41	113,01	167,22	147,75	157,97
55	181,51	168,36	165,60	170,48	137,92	205,43	180,30	194,33
60	216,98	201,18	203,06	200,52	164,09	246,40	214,53	233,24
65	254,26	235,83	243,73	231,52	191,54	290,13	250,46	274,70
70	293,35	272,30	287,62	263,49	220,27	336,63	288,08	318,69



Obrázok 3 Grafické znázornenie závislosti hustoty tepelného toku pre jednotlivé profily od teploty pri vertikálnej orientácii povrchu

5. ZÁVER

Povrchová profilácia významne vplyva na hustotu tepelného toku z povrchu plochy do okolitého prostredia. Percentuálne rozdiely v hustote tepelného toku sú pri danej orientácii v závislosti od teploty a profilácie v rozsahu 47,4–60,7%.

V celom intervale sledovaných teplôt poskytuje najvyššiu hodnotu hustoty tepelného toku profil PILA otočený zubami smerom hore (f1). Najnižšiu hustotu tepelného toku pri tejto orientácii povrchu poskytuje profil DRAZKA T. Rozdiel v efektívnosti prestupu tepla predstavuje 52,8–60,7%, pričom s rastúcou teplotou sa tento rozdiel znižuje.

Priestorová orientácia nesúmerných profilov vplyva na efektívnosť prestupu tepla. Je to zrejme z výsledkov experimentu s profilom PILA. Rozdiel v efektívnosti prestupu tepla v závislosti na otočení profilu predstavuje 16,6–22,0% v prospech otočenia zubami smerom hore. Percentuálny rozdiel v efektívnosti sa znižuje s rastúcou teplotou povrchu profilu.

Literatúra

BECK S. M. B., GRINSTED S. C., BLAKEY S. G., WORDEN K.: 2003, A novel design for panel radiators, *Applied Thermal Engineering* 24 (2004), 1291–1300.

- CIHELKA J a kol.: 1985, *Vytápění, vetrání a klimatizace*, SNTL, 1995, Praha.
- COLTHORPE K. J.: 1959, The performance of radiators and convectors, *The Heating and Ventilating Research Council*, technical note no. 3, 1959.
- ČERNECKÝ J., PIVARČIOVÁ E.: 1997, *Aplikácia holografickej interferometrie pri zviditeľňovaní teplotných polí*, Vedecká štúdia, TU Zvolen, 1997, ISBN 80-228-0654-4.
- FERSTL K.: 1995, *Výbrané state z prúdenia a prenosu tepla*, Bratislava: ES STU, 1995.
- HARRIS D.J.: 1995, Use of metallic foils as radiation barriers to reduce heat losses from buildings, *Applied Energy* 52 (1995) 331–339.
- IGAZ, R., ČERNECKÝ J.: 2009, Závislosť hustoty tepelného toku od povrchovej profilácie vertikálne orientovaného profilu, In: *Acta Facultatis Technicae – Zvolen*, TU Zvolen, č. XIII, 2009 (1): 83–91.
- IGAZ R.: 2009, Efektívnosť prestupu tepla v závislosti na teplote povrchu a povrchovej profilácii, XI. *Medzinárodná konferencia mladých 2009*, FEVT TUZVO, Zvolen, ISBN 978-80-228-1994-7.
- PAVELEK M., JANOTKOVÁ M., ŠTĚTINA J.: 2007, *Vizualizační a optické měřicí metody, druhé vydání*, Brno, VUT, 2007.
- PAVELEK M., RAMÍK Z., LIŠKA M.: 1978, *Určování lokálních hodnot součinitele přestupu tepla z holografických interferogramů*, *Strojnícky časopis* 29, 1978 – 5, s. 592–602.
- PEACH S.: 1972 Radiators and other convectors, *Journal of Institute of Heating Ventilation Engineers* 39 (2) (1972) 239–253.
- URGELA S., EUPTÁK O.: 1992, Determination of Temperature Fields above Plates with Different Geometry Heated by Moistened Air, In: Y. Tanida – H. Miyashiro (Editors), *Flow Visualization VI*, Springer Verlag, 1992, s. 545–549.
- WATERS K., FINE R.H.: 1969, The performance of radiators and convectors using medium emperature hot water, *The Heating and Ventilating Research Association*, laboratory report no. 59, 1969.
- WARD I.C.: 1991, Domestic radiators: performance at lower mass flow rates and lower temperature differentials than those specified in standard performance tests, *Building Services Engineering Research and Technology* 12 (3) (1991) 87–94.

Kontaktná adresa:

Ing. Rastislav Igaz, PhD.

KFEAM DF TUZVO, Masaryka 24, 960 53 Zvolen, igaz@vsld.tuzvo.sk

VPLYVU KONŠTRUKCIE VRTÁKA NA OSOVÚ SILU A KRÚTIACI MOMENT

INFLUENCE OF DRILL DESIGN TO FEED FORCE AND TORQUE CUTTING MOMENT

Ľubomír JAVOREK – Martin BALKO

ABSTRACT: Machine boring is a common operation whenever dowels, rungs or serews are used in assembling wood components. Holes are also required for bolten connections in poles, crossarms, trusses and structural beams. This paper offered here torgue, thrust were correlated with spindle speed.

Key words: drilling, feed force, cutting moment, flat drill

ABSTRAKT: Vrtanie je bežná operácia pre výrobu otvorov potrebných pre kolíky, skrutky, krúžky potrebné pre spájanie dielcov. Článok uvádza hodnoty rezného výkonu a osovej sily pri vrtaní buka pri rôznej orientácii drevných vlákien a rôznych technologických parametroch plochými vrtákmi.

Kľúčové slová: vrtanie, osová sila, rezný moment, plochý vrták

1. ÚVOD

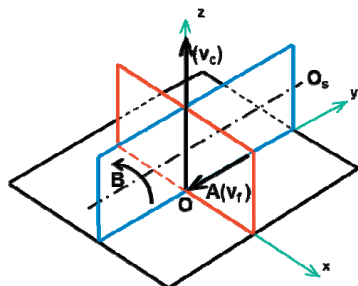
Vrtanie dreva, ako technologická operácia, je v tieni ostatných technologických operácií ako pílenie, frézovanie, brúsenie. Vrtaním sa vytvárajú otvory pre valcové čapy, skrutky, kolíky a pod. pre montážne spojenie drevených dielcov, vykružovaním sa vyrábajú drevené zátky na uzavretie valcových otvorov, opravu chýb, hŕč a pod. Výsledkom je pomerne málo informácií o tejto problematike, tak v oblasti silových charakteristík ako aj z oblasti opotrebenia rezného klína, či kvality vyrobenej plochy, predovšetkým dodržanie rozmeru (priemer) a tvaru (kruhovitosť, valcovitosť).

2. CHARAKTERISTIKA VRTANIA

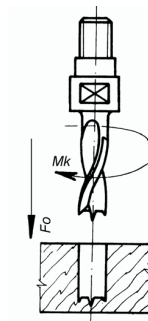
2.1 Kinematické parametre

Vrtanie je kombinácia jedného rotačného a jedného priamočiareho pohybu. Ide o najvýznamnejšiu skupinu pre mnoho rôznych metód obrábania, ktoré sú založené na tejto kombinácii pohybov, ktoré vykonáva nástroj alebo obrobok. Zmenou pomeru veľkostí ich rýchlosti alebo vzájomným umiestnením v priestore vzniká množstvo kombinácií. Napr.

hlavný pohyb je rotačný v smere B a vykonáva ho obrobok (rotácie O_s leží v rovine xy a je rovnobežná s osou y) a posuvný pohyb v smere vektora A vykonáva nástroj.



a) principiálna schéma



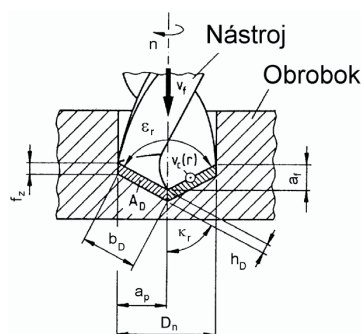
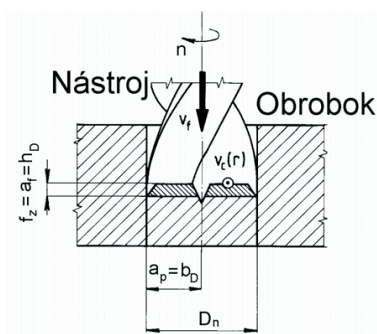
b) model

Obr. 1 Kinematika pohybov pri vrtaní (Javorek, 2006)

2.2 Prierezové parametre triesky

V prípade vrtáka s jednou reznou hranou je teoretický prierez triesky daný vzťahom:

$$A_{D1} = b_D \cdot h_D = \frac{f_n}{1} \cdot \sin \kappa_r \cdot \frac{D_n}{2 \cdot \sin \kappa_r} = \frac{D_n \cdot f_n}{2} = \frac{D_n \cdot f_z}{2} \quad (1)$$



Obr. 2 Prierezové parametre triesky pri vrtaní (Javorek, 2001)

V prípade vrtáka s dvoma reznými hranami je teoretický prierez triesky pripadajúci na jednu reznú hranu daný vzťahom:

$$A_{D1} = b_D \cdot h_D = \frac{f_n}{2} \cdot \sin \kappa_r \cdot \frac{D_n}{2 \cdot \sin \kappa_r} = \frac{D_n \cdot f_n}{4} = \frac{D_n \cdot f_z}{2} \quad (2)$$

V prípade vrtáka s dvomi reznými hranami výsledný prierez triesky odrezávaný obojma reznými hranami bude:

$$A_D = 2 \cdot A_{D1} = \frac{D_n \cdot f_n}{2} = D_n \cdot f_z \quad (3)$$

2.3 Silové a energetické parametre

Vrtanie patrí do kategórie uzavretého rezania, pri ktorom nie je výpočet silových veličín jednoduchý a častejšie sa zisťuje experimentálne Barbu (2010), Balko (2011).

Vo všeobecnosti pre reznú silu, t. j. pre tangenciálnu zložku výslednej sily pôsobiacej na ramene $D_n/4$ platí:

$$F_{c1} = F_{c2} = F_c = K \cdot A_D = K \cdot \frac{D_n \cdot f_n}{4} \quad (4)$$

a pre odpovedajúci rezný moment:

$$Mk_z = F_c \cdot \frac{D_n}{2} = K \cdot \frac{D_n^2 \cdot f_n}{8} \quad (5)$$

Veľkosť rezného krútiaceho momentu pôsobiaceho pri vrtaní hlbších dier je daná krútiacim momentom Mk_z pre odobratie triesky, ďalej krútiacim momentom Mk_f spôsobeným trením fázky vrtáka o dieru a krútiacim momentom Mk_t daným trením triesky o stenu drážky vrtáka a otvoru.

$$Mk = Mk_z + Mk_f + Mk_t \quad (6)$$

So zväčšujúcou sa hĺbkou vrtaného otvoru rastú zložky Mk_f a Mk_t .

Pre výpočet osovej sily F_{o_f} z veľkosti sily F_c sa používa empirický vzťah:

$$F_{o_f} = k \cdot F_c \quad (7)$$

Veľkosť konštanty k sa pohybuje v širokom rozmedzí, v závislosti od veľkosti otupenia nástroja. Obdobne ako krútiaci moment aj veľkosť výslednej osovej sily je daná zložkami:

$$F_{o_f} = F_f + F_{ff} + F_{ft} \quad (8)$$

Dogaru (1977) a Amalickij, Sanev (1992) pre výpočet Mk_z používajú aj nasledujúci vzťah:

$$Mk_z = C \cdot D^x \cdot f_n^y \cdot e^z \quad (9)$$

Pre výpočet osovej sily Dogaru (1977) používa vzťah:

$$F_{o_f} = (0,25 + 0,08 \cdot D) \cdot F_c \quad (10)$$

a Amalickij, Sanev (1992) používa:

$$F_{o_f} = C_1 \cdot D^q \cdot f_n^w \quad [N]$$

Loth (1988), Bajkowski (1960), Amalickij (1992) určujú veľkosť osovej sily vzťahom:

$$F_{of} = (1 \div 1,6) \cdot F_c \quad (11)$$

Sanev (1992) pre výpočet silových veličín udáva vzťahy:

$$M_{kz} = K_m \cdot D^s \cdot f_z^t \cdot e^j \quad [Nm] \quad (12)$$

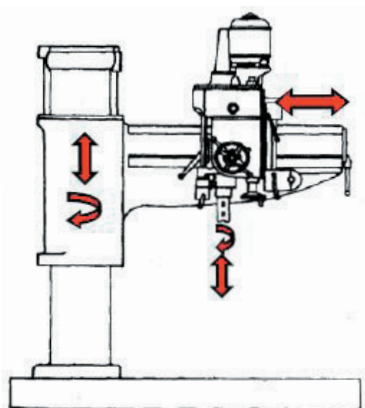
$$F_c = \frac{1}{2} \cdot K_d \cdot \left(\frac{D}{2} \right)^{(1+\alpha)} \cdot f_z^{(1+\beta)} \cdot e^j \cdot z \quad [N] \quad (13)$$

$$F_{of} = K_T \cdot D^\mu \cdot f_z^\nu \cdot e^\epsilon \quad [N] \quad (14)$$

3. EXPERIMENT

3.1 Stroj, nástroj, meracia aparatúra

V experimente bola použitá radiálna vrtáčka RFh 75/1750 (obr. 3), ktorá patrí do kategórie otočných vrtáčiek s ramenom na stĺpe. Technické parametre sú uvedené v tab. 1.



Obr. 3 Schéma vrtáčky (Balko, 2011)

Tabuľka 1: Technické parametre vrtáčky

Rozmery stroja (d × š × v)	2970 mm × 1130 mm × 3400 mm
Otáčky vretena	19 min ⁻¹ –1900 min ⁻¹
Rýchlosť posuvu	0,047 mm · ot ⁻¹ – 2 mm · ot ⁻¹
Max. priemer vrtáka	75 mm
Priemer vrtacieho vretena	50 mm
Celkový príkon	15 kW

V experimente sú použité nástroje rovnakého priemeru 16 mm, avšak s rozdielnym tvarom reznej časti – bez a s predrežávačmi (obr. 4).



Obr. 4 Vrtáky (Balko, 2011)
(A – bez predrezávačov, B – s predrezávačmi)

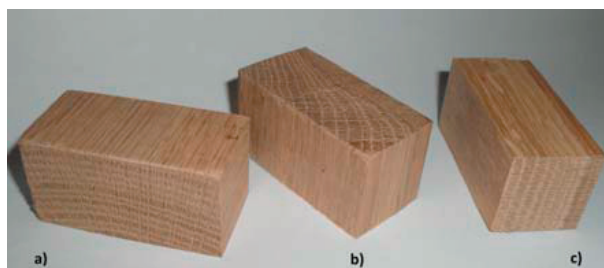
Meracia aparátúra sa skladala z dynamometra (merací rozsah merania osovej sily 0 kN – 10 kN; merací rozsah merania krútiaceho momentu 0 Nm – 50 Nm), zosilňovača, A/D prevodníka (meracia karta NI USB 6210) a softvéru na spracovanie nameraných údajov.



Obr. 5 Dynamometer so zosilňovačom (Foto Javorek)

3.2 Experimentálny materiál a podmienky experimentu

Osová sila a rezný moment bol sledovaný pri vŕtaní duba. Skúšobné vzorky s rozmermi: dĺžka 50 mm, šírka 25 mm a výška 25 mm boli tak pripravené, aby sa mohlo vŕtať v smere: radiálnom (R) (obr. 6a), pozdĺžnom (A) (obr. 6b), a tangenciálnom (T) (obr. 6c) voči drevným vláknam.



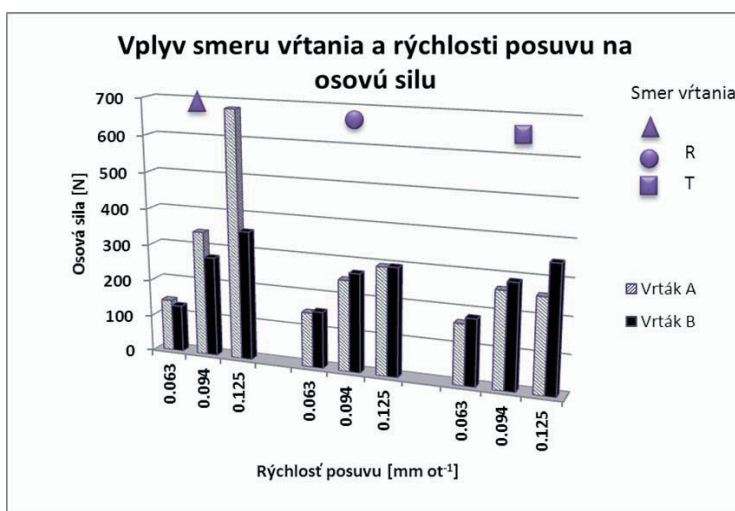
Obr. 6 Skúšobné vzorky (Balko, 2011)

Rýchlosť posuvu bola $0,063 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$, $0,094 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$, $0,125 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ pri otáčkach 375 min^{-1} alebo 475 min^{-1} . Týmto otáčkam odpovedá rezná rýchlosť $18,85 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, resp. $23,88 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

4. VÝSLEDKY A DISKUSIA

4.1.1 Vplyv smeru vrtania voči drevným vláknam na osovú silu

Orientácia vlákien má značný vplyv na veľkosť osovej sily. Napr. pri vrtaní v smere pozdĺžnom (A) vrtákom označeným A a pri zmene rýchlosti posuvu z $0,063 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ na $0,094 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$, resp. $0,125 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$, t. j. 1,5 krát, resp. cca 2 krát osová sila vzrástla 2,4 krát, resp. cca 4,8 krát. Táto sila bola vždy vyššia oproti osovej sile pri vrtaní vrtákom označeným B a to 1,17 krát, resp. 1,25 krát, resp. 1,9 krát. Vzájomný pomer sily v smere posuvu sa výrazne zmenil pri vrtaní v radiálnom, resp. v tangenciálnom smere. Výsledky sú zrejmé z grafu na obr. 7. Pri vrtaní v radiálnom smere je nie je rozdiel konštrukcie vrtáku výrazný a pri vrtaní v tangenciálnom smere sa výhodnejší javí vrták A.



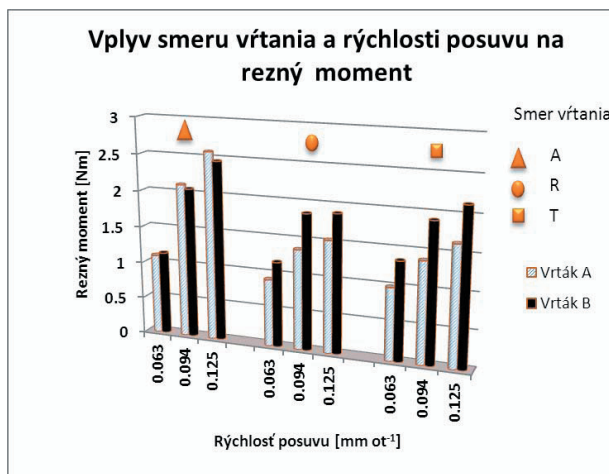
Obr. 7 Vplyv smeru vrtania a rýchlosti posuvu na osovú silu

4.1.2 Vplyv smeru vrtania voči drevným vláknam na rezný moment

Na obr. 8 je zobrazený vplyv smeru vrtania voči drevným vláknam na rezný moment pre obidva druhy vrtákov a pre všetky rýchlosti posuvu. Pri posuve $0,063 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ a vrtaní pozdĺžnom bol rezný moment takmer zhodný, avšak s rastúcou rýchlosťou posuvu narastala tak absolútna hodnota ako aj rozdiel v hodnotách rezného momentu; aj keď len nepatrne (od $0,04 \text{ Nm}$ do $0,12 \text{ Nm}$) medzi oboma druhmi vrtákov.

Úplne iná situácia bola pri vrtaní v radiálnom, resp. v tangenciálnom smere. V tomto prípade sa výhodnejší javil vrták A, ktorý potreboval na odrezanie materiálu menej rezného momentu, v priemere o cca $0,41 \text{ Nm}$ (od $0,24 \text{ Nm}$ do $0,53 \text{ Nm}$). Pri porovnaní oboch

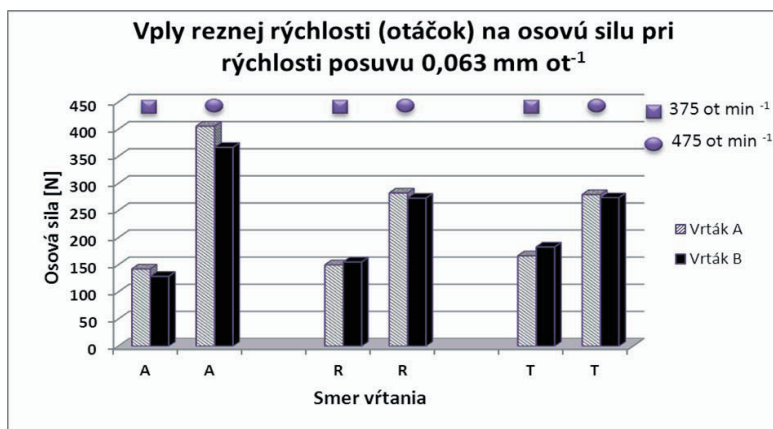
vrtákov a vrtání v axiálnom smere bol výhodnejší vrták s predrežávačmi, v ostatných prípadoch bol výhodnejší vrták bez predrežávačov.



Obr. 8 Vplyv smeru vrtania a rýchlosti posuvu na rezný moment

4.2.1 Vplyv reznej rýchlosti, orientácie drevných vlákien na osovú silu

Pri vrtaní v axiálnom smere sa pri rýchlosti posuvu 0,063 mm · ot⁻¹ a 0,094 mm · ot⁻¹ sa zvýšením reznej rýchlosti zvýšila aj osová sila a to pri oboch druhov vrtákov. Táto zmena súvisí so zmenou rýchlosti posuvu, ktorá sa zmenila 1,26 krát.



Obr. 9 Vplyv reznej rýchlosti, orientácie drevných vlákien na osovú silu

Pri vrtaní v radiálnom smere vrták A pri všetkých rýchlostiach posuvu a otáčkach znamenal vyššie hodnoty osovej sily ako vrták B; rozdiel sa znižoval zvyšovaním rýchlosti posuvu.

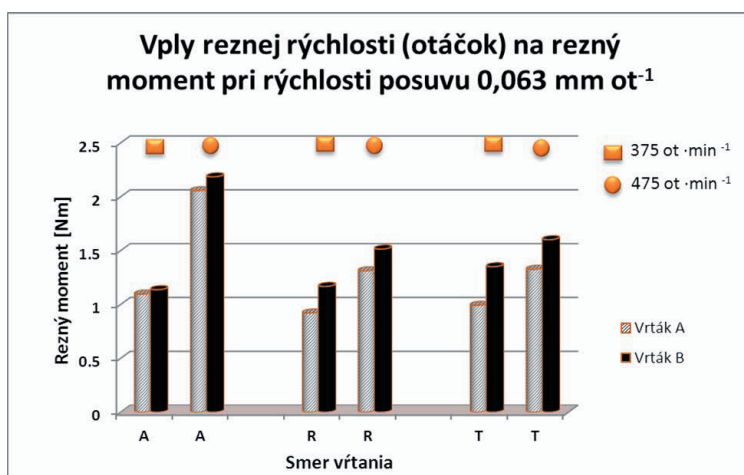
Pri vrtaní v tangenciálnom smere sa výsledky takmer zhodovali s výsledkami v radiálnom smere, s rozdielmi od 15 N do 100 N pri porovnaní s výsledkami vrtania v tangenciálnom smere.

4.2.2 Vplyv reznej rýchlosti, orientácie drevných vlákien na rezný moment

Najmenšie hodnoty rezného momentu pri vrtaní v pozdĺžnom smere boli pri kombinácii rezných rýchlostí s rýchlosťou posuvu $0,063 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$. Pri otáčkach 375 min^{-1} bola hodnota krútiaceho momentu nižšia 1,88 krát ako pri otáčkach 475 min^{-1} .

Pri vrtaní v radiálnom smere vrtákom A pri všetkých rýchlostiach posuvu zvýšením otáčok došlo k zvýšeniu rezného momentu. Pri rýchlosti posuvu $0,125 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ sa hodnota rezného momentu líšila najmenej, len o $0,134 \text{ Nm}$. Pri rýchlosti posuvu $0,094 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ a $0,125 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ sa hodnota rezného momentu zvyšovaním reznej rýchlosti znižovala.

Pri vrtaní v tangenciálnom smere sa hodnoty skúšobných vrtákov A aj B takmer zhodovali s hodnotami, ktoré boli namerané pri radiálnom smere. Rozdiely rezného momentu boli približne o $0,1 \text{ Nm}$ vyššie pri vrtaní v tangenciálnom smere.



Obr. 10 Vplyv reznej rýchlosti, orientácie drevných vlákien na rezný moment

5. ZÁVER

Osová sila v pozdĺžnom smere vrtania priamo úmerne rástla s rastúcou rýchlosťou posuvu. Najmenšie hodnoty osovej sily boli pri rýchlosti posuvu $0,063 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ a najväčšie pri rýchlosti posuvu $0,125 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$. Vrták A pri oboch otáčkach mal tendenciu nárastu osovej sily. Vrták B pri otáčkach 375 min^{-1} vykazoval podobnú stúpajúcu tendenciu; pri otáčkach 475 min^{-1} sa hodnota osovej sily takmer ustálila. Menila sa len mierne, v rozmedzí 22 N, s rastúcou rýchlosťou posuvu. Pri vrtaní v radiálnom smere so zvyšujúcou sa rýchlosťou posuvu narastá aj osová sila, pričom najväčší rozdiel je pri zmene rýchlosti

posuvu $0,063 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ na $0,094 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$. Experiment ukázal, že pri otáčkach 375 min^{-1} je vhodnejší vrták A, kým pri otáčkach 475 min^{-1} je vhodnejší vrták B.

Pri vrtaní v tangenciálnom smere sú výsledky zrovnateľné s výsledkami z vrtania v radiálnom smere. Väčší rozdiel sa zaznamenal len pri rýchlosti posuvu $0,125 \text{ mm} \cdot \text{ot}^{-1}$, kde hodnoty osovej sily sú väčšie o cca 100 N.

6. LITERATÚRA

- AMALICKIJ, V. V., SANEV, V. I. (1992): Oborudovanie i instrument derevoobrabatyvajuščich predpriyatij. Ekologia Moskva. s. 107–112.
- BAJKOWSKI at all.(1960): Poradnik drzewiarza. Państwowe wydawnictwo rolnicze i leśne. Warszawa. s. 613–614.
- BALKO, M. (2011): Hodnotenie vplyvu konštrukcie vrtáka na osovú silu, krútiaci moment a kvalitu vrtaného otvoru. Diplomová práca. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky. Vedúci práce: doc. Ing. Ľubomír Javorek, CSc. s. 73.
- BANSHOYA, K., MORI, M. (1980): Effects of spindle speed of spur machine bit. In Tool Life in Machine Boring of Wood and Wood Based Materials I. Vol. 26. p. 74–80.
- BARBU, S. M., BADESCU, L., JAVOREK, L. (2010): Studies concerning the chip formation at the longitudinal drilling of the beech wood with help high speed camera”. In Annals of Warsaw university of life sciences. Forestry and Wood Technology. Warszawa: Warsaw University of Life Sciences Press. ISSN 1898-5912. No. 72. p. 9–12.
- DOGARU, V. (1977): Aschiera Lemnului, Editura Technica, Bucuresti. s. 215–230.
- JAVOREK, L., OSWALD, J. (2001): Possibilities for monitoring of drilling. Medzinárodná vedecká konferencia „Wood science and engineering in the third millennium“. Brašov 16.–17. november 2001.
- JAVOREK, L., OSWALD, J., SOKOLOWSKI, W. (2000): Influence of grain orientation on feed force and spindle torque during boring. In.: Zborník referátov z 8. vedeckej konferencie CO-MAT-TECH 2000. Trnava. s. 111÷115. ISBN 80-227-1413-5.
- JAVOREK, L. (2006): Nástroje (1. časť). Vydavateľstvo TU vo Zvolene. 171 s. ISBN 978 80-228-1714-1.
- LOTH, E., MIKLASZEWSKI, S.(1988): Zbiori zadań z obróbki drewna skrawaniem. Wydawnictwo GGW-AR. Warszawa. s. 85–88.
- ZHAO, A., EHMANN, F. (2002): Development and performance analysis of new spade bit designs. In International Journal of Machine Tools & Manufacture. Vol. 42. s. 1403–1414.
- WIELOCH, G., POHL, P., HOFFMAN, M.(1998): Pomiar właściwej pracy skrawania przy wierceniu drewna i tworzyw drzewnych. In. Krajowy kongres metrologii. Gdańsk. s. 199–204.

Kontaktná adresa:

doc. Ing. Ľubomír Javorek, CSc.

Katedra drevárskych strojov a zariadení

Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky, Technická univerzita vo Zvolene

T. G. Masaryka 24, SK – 960 53 Zvolen

e-mail: lubomir.javorek@vsld.tuzvo.sk

Ing. Martin Balko

Ul. Rázusova 523/11

SK – 965 01 Žiar nad Hronom

e-mail: bmatko1@gmail.com

ZVYŠOVANIE ŽIVOTNOSTI RELIÉFU RAZIDIEL CHRÓMOVANÍM

INCREASING OF THE LIFETIME OF COINING DIES BY CHROMING

Daniela KALINCOVÁ – Rudolf KAŠTAN

ABSTRAKT: Príspevok sa zaoberá kontrolou kvality Cr vrstiev na troch razidlách s rôznou dosahovanou životnosťou. Povlakovanie reliéfu, ktoré je podrobnejšie vysvetlené v článku, výrazne zvyšuje životnosť razidiel, preto je veľmi dôležitá kvalita vytvorených vrstiev. Metódou mikroskopickkej analýzy pozdĺžnych rezov vzoriek boli hodnotené hrúbky vrstiev vytvorených chrómovaním, za účelom zistenia príčin nízkej životnosti razidiel.

Kľúčové slová: razenie mincí, razidlo, životnosť nástrojov, chrómovanie reliéfu, mikroskopická analýza

ABSTRACT: The article is aimed at the quality control of the Cr layers. Three coining dies were analysed. Each of those coining dies has a different lifetime. Coating of the coining die relief, which is explained in the article, significantly increases the lifetime of dies, therefore quality of layers is very important. Based on the microscopic analyses of the longitudinal sections of samples, the thickness of Cr layers was evaluated in order to determine the cause of low life of dies.

Key words: mintage, coining die, life time of tool, coating of relief, microscopic analysis

ÚVOD

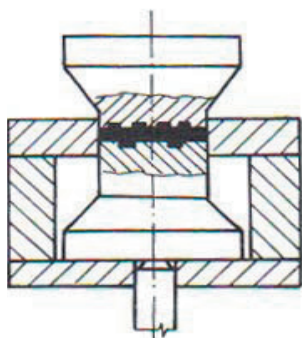
Pri výrobe mincí sa používajú nástroje, ktorých kvalita a spoľahlivosť závisia od mnohých činiteľov. Kvalita nástrojov je primárne ovplyvnená už voľbou materiálu, použitou výrobnou technológiou, tepelným spracovaním a finálnymi operáciami úpravy funkčných plôch. Počas prevádzky sa vlastnosti materiálu nástrojov menia, až dochádza k ich opotrebovaniu a v konečnom dôsledku k vyradeniu, keďže je ohrozená kvalita vyrábaných produktov. Tieto zmeny vlastností pri exploatacii nástroja sú charakterizované pojmom prevádzková degradácia.

Degradácia môže byť prevádzková aj výrobná (Ptáček a kol. 2002). Výrobná degradácia je vnášaná do materiálu, z ktorého má byť nástroj vyrobený, už počas výroby ocele. Technológia výroby ocele predurčuje jej kvalitu z hľadiska mikročistoty, čo je dôležitý faktor vplývajúci na požadované vlastnosti. Vlastnosti, najmä mechanické, závisia od chemického zloženia, tepelného spracovania a finálnych operácií funkčných plôch pri výrobe

nástrojov. Tieto faktory ovplyvňujú spoľahlivosť, vyjadrenú životnosťou – počtom vyrazených mincí na jedno razidlo. Optimálna životnosť býva približne 300 000 ks vyrazených antikorových mincí na jedno razidlo. Z toho vyplýva, že pre výrobu miliónových zákaziek sa spotrebuje veľké množstvo razidiel, čo je náročné na spotrebu drahých nástrojových ocelí. Životnosti razidiel je treba venovať veľkú pozornosť, aby sa zvyšovala efektívnosť výroby a tým znížila environmentálna záťaž podniku.

1 TECHNOLOGIA RAZENIA A PREVÁZKOVÉ PODMIENKY NÁSTROJOV

Pri výrobe mincí na raziacich strojoch sa ako nástroj používa razidlo, ktoré je zložené z dvoch častí: razník a raznica (obr. 1). Obe časti majú funkčnú plochu tvorenú reliéfom, ako vidieť na obr. 2. Reliéfy na funkčnej strane razníka aj raznice predstavujú negatív líčnej, alebo rubovej strany mince. Tvar reliéfu sa na polotovary – kovové platničky vyrába technológiou razenia, čo je tvárnenie zastudena pod lisom, tlakom veľkosti 250–400 ton, čo závisí od polotovaru platničiek. (Hrivňák a kol. 1992) Razidlá sú v prevádzke na raziacom stroji vystavené rázovému zaťaženiu. Frekvencia rázov sa pohybuje v rozmedzí 750–850 rázov/min., čo predstavuje počet vyrazených mincí.



Obr. 1 Schéma razidla



Obr. 2 Razník s reliéfom

2 FAKTORY VPLÝVAJÚCE NA ŽIVOTNOSŤ RAZIDIEL

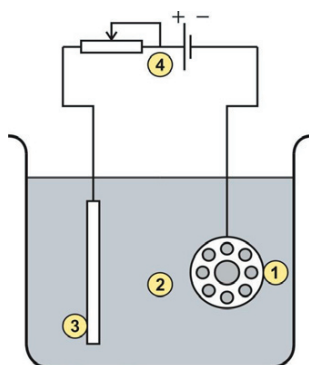
Životnosť razidiel ovplyvňuje množstvo faktorov. Medzi tie, ktoré sa ovplyvniť nedajú, je materiál platničiek, ten si zákazník volí na základe klimatických podmienok krajiny. Pre subtropické a tropické oblasti sa vyrábajú mince z antikorošnej ocele, pre krajiny mierneho pásma sú vhodné mince zo zliatin farebných kovov, aj z povlakovaných oceľových platničiek. Výrazne sa nedá ovplyvniť ani ľudský faktor – obsluha raziaceho stroja, lebo sa nedá dopredu odhadnúť, ako daný zamestnanec bude zaobchádzať so strojom, či bude dodržiavať predpísané tlaky a robiť pravidelnú údržbu stroja.

Životnosť nástrojov pre razenie mincí závisí od kvality vstupného materiálu, jednotlivých výrobných operácií, správneho tepelného spracovania nástrojovej ocele a v nemalej miere od finálnej úpravy povrchu reliéfu.

Výrobný postup nástrojov na razenie mincí je veľmi náročný, je potrebné dodržiavať technologickú disciplínu pri každom kroku výrobného postupu. Výrazný vplyv na dosahovanú životnosť razidiel majú zvyškové napätia po operáciách výroby reliéfu lisovaním punzou, tepelné spracovanie, dosiahnuté mechanické vlastnosti a finálna povrchová úprava reliéfu. Nástroje na výrobu mincí sa kalia a nízko popúšťajú, aby sa dosiahla vysoká tvrdosť materiálu a teda odolnosť voči opotrebovaniu. Výsledná tvrdosť materiálu po kalení však závisí od ďalšej operácie – od technológie povlakovania reliéfu. V súčasnosti sa povrch razidiel povlakuje metódou galvanického pokovovania – chrómovaním. Táto technológia tvorby povlakov predstavuje veľkú environmentálnu záťaž, pretože chemikálie elektrolytu obsahujú Cr a škodlivé kyseliny, likvidovanie ktorých je náročné.

2.1 Chrómovanie

Chrómovanie je najviac používaná technológia galvanického pokovovania povrchov. Líši sa od ostatných galvanických procesov jednak tým, že anódou nie je chróm, ale tvrdé olovo s minimálnym obsahom antimónu 6%, jednak zložením elektrolytu, v ktorom chróm nie je kation, ale anión. Elektrolytom je kyselina chrómová s prídavkom kyseliny sírovej, fluorovodíkovej, fluoro-kremičitej alebo octovej. Zavedením prúdu do kúpeľa je zpočiatku na katóde kyslíčnik chrómový redukovaný na soľ chromitú a až potom sa začne vylučovať kov. Preto je pri chrómovaní iba veľmi malý výťažok prúdu, asi 10–15%, ostatný prúd sa spotrebuje na vývoj vodíka. (Chrómovanie, 2010) Schéma galvanického pokovovania je na obr. 2. a zariadenie chrómovne na obr. 3.



Obr. 3 Schéma galvanizácie
1 – chrómovaná súčiastka,
2 – elektrolyt, 3 – anóda, 4 – zdroj



Obr. 4 Zariadenie na chrómovanie razidiel

Chrómovanie pozostáva z týchto operácií:

1. elektrolytické odmastenie v alkalickom roztoku,
2. prietokový oplach – dvojstupňový,
3. naleptanie (dekapovanie) aktívneho povrchu chrómovým roztokom – cyklus anodický – teplota 50 °C,
4. chrómovanie,
5. ekonomický oplach na hrubo,

6. konečný oplach,
7. odvodíkovanie v peci vyhriatej na 160 až 180 °C.

Dôležité je dodržať jednotlivé operácie postupu, pretože kvalita vylúčených vrstiev závisí od čiastkových operácií, ktoré sa začínajú už prípravou povrchu. V praxi sa rozlišujú dva druhy povlakovania:

- lesklé (dekoratívne povlakovanie),
- tvrdé (funkčné povlakovanie).

Lesklé chrómovanie sa požíva hlavne na dekoratívne účely. Lesklé chrómovanie slúži aj na ochranu proti korózii. Na chrómovanie razníkov, alebo razníc sa nepoužíva.

Pri **tvrdom chrómovaní** sa vrstva chrómu nevyužíva k dekoratívnym alebo antikoroziým účelom, ale výhradne kvôli zvýšeniu tvrdosti povrchu. Povlak tvrdého chrómu však nemôže nahradiť kalenie, pretože tvrdá, ale relatívne tenká vrstva chrómu by bola pri nedostatočnej pevnosti základného kovu (súčiastok namáhaných tlakom) vtláčaná do mäkkého jadra. Povlakovanie po kalení výrazne zvyšuje funkčnosť povrchu a tým aj celkovú životnosť súčiastok. Pretože kalená oceľ má v sebe vnútorné napätia, vzniká nebezpečenstvo, že pri dlhodobom chrómovaní spojenom s vývojom vodíka sa môžu napätia uvoľniť a súčiastka praskne. Pred chrómovaním je preto nutné uvoľniť vnútorné napätia po kalení adekvátnym popustením, po chrómovaní zasa treba urobiť odvodíkovanie.

2.1.1 Vlastnosti tvrdého chrómu

Povlaky tvrdého chrómu zlepšujú odolnosť proti opotrebeniu a v styku s oceľou nemajú sklon k zadieraniu. Sú taktiež odolné voči vyšším teplotám, ani pri 500 °C nevznikajú na povrchu popušťacie farby. Pri teplotách medzi 360 a 370 °C len čiastočne povrch zmäkne. Tvrdý chróm tiež chráni podklad pred koróziou.

Hrúbka vylučovaných vrstiev sa pohybuje medzi 0,005 do 0,5 mm, niekedy i viac. Pre účely zvýšenia povrchovej tvrdosti sa používajú hrúbky 5–30 µm, pre odolnosť voči oteru pre menej náročných podmienkach zaťažovania 20–30 µm, pri náročnejších do 100 µm.

Chróm vyrobený hutníckym spôsobom má tvrdosť 300 HV, elektrolyticky vylúčené povlaky chrómu však 700 až 1100 HV. (Chrómovanie, 2010)

3 MATERIÁL A METÓDY

Analyzované vzorky razidiel boli vyrobené z vysoko kvalitnej ocele Bohler K455. Tepelné spracovanie spočívalo v kalení a popustení na tvrdosť 58–60 HRC. Povlak na reliéfe skúmaných razidiel bol urobený galvanickým pokovovaním – chrómovaním.

Charakteristika vzoriek, na ktorých bola hodnotená kvalita chrómovej vrstvy je v tabuľke 1.

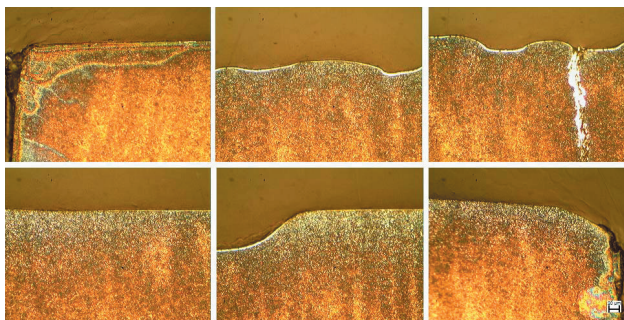
Tab. 1 Charakteristika skúmaných vzoriek

Nástroje	Materiál	Životnosť	Chrómová vrstva
Vzorka č. 1	Böhler K455	5 000 ks minci/razidlo	áno
Vzorka č. 2	Böhler K455	nepoužité	áno
Vzorka č. 3	Böhler K455	490 000 ks minci/razidlo	áno

Nakoľko životnosť razidiel č. 1 a č. 3 je veľmi rozdielna, skúmali sme príčiny nízkej životnosti. Na vzorkách bola urobená kontrola kvality štruktúry po tepelnom spracovaní a kvality chrómovej vrstvy na pozdĺžnych rezoch nástrojov. Mikroštruktúra bola hodnotená po naleptaní 1% Nitalom a hrúbku vrstiev sme merali pomocou softvéru na analýzu obrazu NIS Elements. Pri dávnejších analýzach razidiel, ktoré vyrazili až 750 000 ks min-cí, bola zistená hrúbka Cr vrstvy v rozmedzí 5 – 10 μm . Túto hrúbku sme určili za optimálnu, podľa uvedených hodnôt bola posudzovaná aj kvalita vzoriek.

3.1 Výsledky merania hrúbky Cr vrstiev

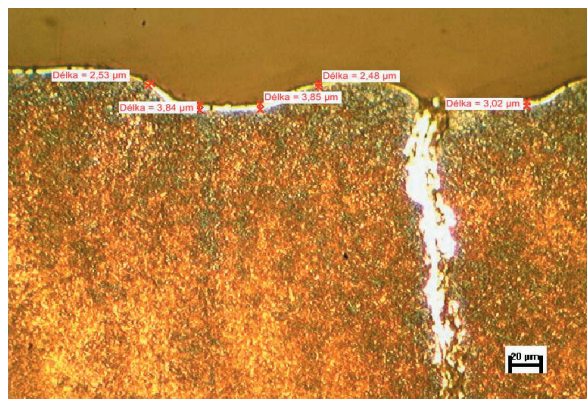
Vzorka č. 1: Na obr. 5 je sekvencia, ktorá dokumentuje stav Cr vrstvy na reliéfe razidla. Mikroštruktúra po kalení a nízkom popustení je jemnozrná, prítomná riadkovitosť v štruktúre je charakteristická pre tvárnené polotovary.



Obr. 5 Stav chrómovej vrstvy na reliéfe vz. č. 1

Vrstva nie je súvislá, má nerovnomernú hrúbku, v mieste trhliny je vylúčený chróm, čo znamená, že trhlina vznikla pred chrómovaním.

Obr. 6 dokumentuje spôsob merania hrúbky pomocou softvéru NIS Elements. V tabuľke 2 sú namerané hodnoty.



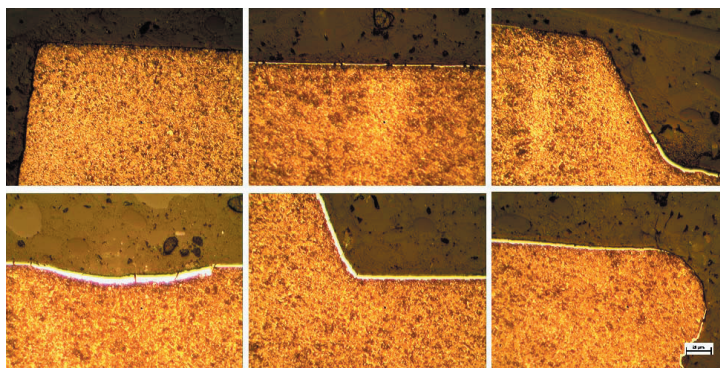
Obr. 6 Meranie hrúbky Cr vrstvy – obrazová analýza NIS Elements, délka = hrúbka

Tab. 2 Hodnoty hrúbky vrstvy – vz. č. 1

Meranie	1	2	3	4	5	Stredná hodnota	Minimum	Maximum
Hrúbka [µm]	2,53	3,84	3,85	2,48	3,02	3,14	2,48	3,85

Maximálna nameraná hodnota nedosahuje požadovanú hrúbku.

Vzorka č. 2: Na obrázku 7 je stav reliéfu vz. č. 2, namerané hodnoty na vybraných miestach reliéfu sú uvedené v tab. 3. Vrstva je nerovnomerná, hoci razidlo nebolo po opätovnom chrómovaní použité. Plastická deformácia viditeľná na pravej strane okraja razidla (obr. 7) potvrdzuje, že razidlo bolo už použité v prevádzke. Kvôli nekvalitnej produkcii mincí bolo vyradené, Cr vrstva z reliéfu chemicky odstránená a po úpravách znova reliéf pochrómovaný. (Informácia od výrobcu) Kvalita novej vrstvy nie je vyhovujúca.



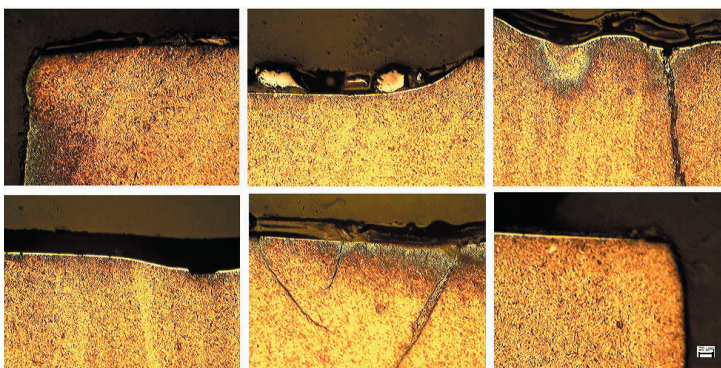
Obr. 7 Stav vrstvy na reliéfe vz. č. 2

Tab. 3 Hodnoty hrúbky vrstvy – vz. č. 2

Meranie	1	2	3	4	5	Stredná hodnota	Minimum	Maximum
Hrúbka [µm]	3,38	4,34	5,31	5,55	5,07	4,73	3,38	5,55

Z nameraných hodnôt vyplýva, že nebola dosiahnutá požadovaná hrúbka a rovnomernosť vrstvy.

Vzorka č. 3: Stav vrstvy je na sekvencii obrázkov, obr. 8. Cr vrstva je nesúvislá, reliéf popraskaný v dôsledku prevádzkového zaťaženia (razidlo vyrazilo 490 000 ks mincí).



Obr. 8 Stav vrstvy na vzorke č. 3

Tab. 4 Hodnoty hrúbky vrstvy – vz. č. 3

Meranie	1	2	3	4	5	Stredná hodnota	Minimum	Maximum
Hrúbka [μm]	1,65	2,86	2,21	2,53	2,00	2,25	1,65	2,86

Nameraná hrúbka vrstvy nie je vyhovujúca.

4 ZÁVER

Po analýze kvality vrstiev na troch vzorkách sme dospeli k záveru, že optimálna hrúbka vrstvy nebola dosiahnutá ani na jednom z razidiel. Na vzorke č. 1 sa potvrdili domnienky, že trhlina na reliéfe, ktorá má vo vnútri vylúčený chróm vznikla už pri kalení, preto dávnejšie odporúčania, robiť žihanie razidiel po tvárnení reliéfu, boli opodstatnené. Na pravej strane vzorky č. 2 je zdeformovaný okraj razidla, čo potvrdzuje, že razidlo už bolo v prevádzke a vyradili ho preto, že vizuálne zistili zníženu kvalitu povrchu mincí. Po odchrómovaní bolo pripravené na nové povlakovanie, avšak neúspešné, pretože vylúčená vrstva je veľmi nehomogénna a tenká. Razidlo – vzorka č. 3 – malo uspokojivú životnosť, blížiacu sa k priemerným hodnotám dosahovaných životností v prevádzke.

V literárnom prameni (Chrómovanie, 2010) je uvedené, ako sa má postupovať pri chrómovaní, detaily uvádzam nižšie:

Povrch výrobkov musí byť pred chrómovaním hrubo obrúsený a nakoniec dočistený fibrovou kefou a zelenou pastou. Brúsenie sa musí realizovať za intenzívneho chladenia, miestne prehriatie a spálenie povrchu sa aj po opätovnom prebrúsení prejavujú odlupovaním chrómovaného povrchu. Po hrubom odmastení nasleduje montáž na prípravky a ochrana miest, ktoré sa nemajú chrómoviť. Hĺbková účinnosť kúpeľa je veľmi slabá, preto sa závesnej technike musí venovať veľká pozornosť. Na pokovovanom predmete sa musí dosiahnuť čo najrovnomernejšie rozloženie elektrického poľa, čím sa dosiahne rovnomerné rozloženie a hrúbka povlaku. Pre zlepšenie rovnomernosti sa používajú rôzne

tvarovania tienidiel, alebo sa používajú pomocné anódy. Okrem toho sa používajú katódové plochy ako tienidlá, predlžovacie nástavce a pod., ktoré odvedú časť prúdu a zabránia tak vzniku nárastu vrstiev na rohoch a hranách pokovovaného predmetu. Ďalší spôsob ovplyvňovania elektrického poľa spočíva v použití rôznych izolačných vložiek, tieniacich plôch a pod. Po ďalšom odmastení povrchu nasleduje zdrsnenie – dekapovanie. Cieľom je odstrániť vrstvy kysličníka a naleptanie povrchu tak, aby chrómový povlak na ňom pevne zakotvil a zvýšila sa tak jeho príľnavosť. Realizuje sa ponorením do 60 % kyseliny sírovej pri normálnej teplote, anodicky pri prúdovej hustote 20–30 A/dm² po dobu 1–2 minút. Tento spôsob sa však nehodí pre ocele s vyšším obsahom uhlíka a liatinu, pretože uvoľnený grafit zostáva na povrchu a znižuje jeho príľnavosť.

Z uvedených detailov technologického postupu je vidieť, aké sú náročné jednotlivé čiastkové kroky postupu. Nedodržanie predpisov spôsobí nekvalitné výstupy, čoho dôkazom sú aj analyzované vzorky. Cieľom experimentu, ktorý je popísaný v príspevku bolo dokázať, že kvalita povlakov na reliéfoch veľmi vplyva na životnosť nástrojov pre raziene mincí. Je nutné hľadať vo výrobe príčiny zisteného stavu, sprísniť kontrolu pri jednotlivých operáciách chrómovania, najmä prísne dodržať prípravné fázy a zamerať sa na odporúčenia, ktoré sú uvedené v literárnych prameňoch.

LITERATÚRA

HRIVŇÁK, A.; PODOLSKÝ, M.; DOMAZETOVICH, V.: 1992 *Teória tvárnenia a nástroje*. Bratislava: Alfa, 1992, 344 s. ISBN 80-05-01032.

Chrómovanie [online]. [cit. 2008-11-10]. Dostupné na internete: <http://209.85.129.132/search?q=cache:66s6L5uTN3gJ:starezelezo.webzdarma.cz/Chr%25F3movanie.doc+chr%C3%B3movanie&hl=sk&ct=clnk&cd=6&gl=sk&lr=lang_sk>.

PTÁČEK, L. a kol.: 2002, *Náuka o materiálu II*. Brno: Cerm, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-130-4.

Kontaktná adresa:

Ing. Daniela Kalincová, PhD.

TU vo Zvolene,

Katedra výrobných technológií a materiálov,

Fakulta environmentálnej a výrobnéj techniky, Študentská 26,

960 53 Zvolen

Študent doktorandského štúdia FEVT:

Ing. Rudolf Kaštan

Mincovňa š.p.

Kremnica

EXPERIMENTÁLNE MERANIA PROSTRIEDKU VÝROBY ELEKTRICKEJ ENERGIE A TEPLA V TRIGENERAČNOM SYSTÉME

EXPERIMENTAL MEASUREMENTS OF A MEANS OF ELECTRICAL AND THERMAL ENERGY PRODUCTION IN TRIGENERATION SYSTEM

Vladimír KOCÚR – Jozef ŠURIANSKY

ABSTRACT: Article refers to problems of creation of fluctuation of electrical energy in trigeneration systems and it provides a possible solution for correction of these shortcomings by means of measurements. Moreover it contains measurement of thermal characteristic of combustion engine and following calculation of system transfer function necessary for controller design.

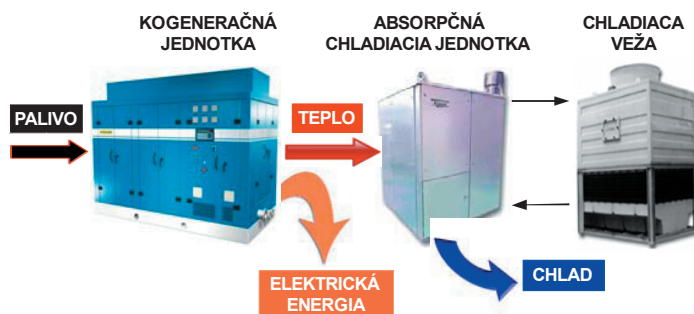
Keys words: trigeneration system, trigeneration control, experimental measurements of cogeneration unit

ABSTRAKT: Článok prostredníctvom vykonaných meraní poukazuje na problematiku vzniku fluktuácií elektrickej energie u trigeneračných systémov a zároveň poskytuje možné riešenie pre odstránenie týchto nedostatkov. Okrem toho zahŕňa meranie teplotnej charakteristiky spaľovacieho motora a následné určenie prenosovej funkcie sústavy, potrebnej pre návrh regulátora.

Kľúčové slová: trigeneračný systém, riadenie trigenerácie, experimentálne merania kogeneračnej jednotky

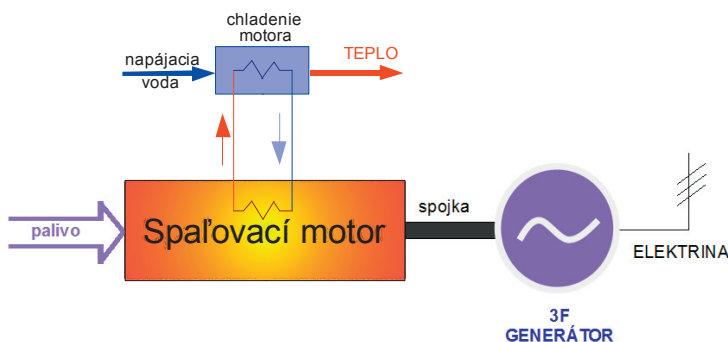
1 ÚVOD

Trigeneračný systém vznikne prepojením kogeneračnej jednotky a sorpčnej chladiacej jednotky. Kogeneračná jednotka produkuje elektrickú energiu a súčasne teplo, ktoré je ďalej v chladiacej jednotke transformované na chlad. Veľmi často sa ako chladiaci systém využíva absorpčná chladiaca jednotka. Okrem nej je však možné použitie zariadenia pracujúceho na princípe absorpcie, adsorpcie, resorpcie alebo difúzie [2]. Vyrobenú elektrickú energiu je možné využiť pre vlastné účely, prípadne poskytovať do siete elektrorozvodných závodov a chlad v letných mesiacoch na klimatizovanie priestorov. Absorpčná chladiaca jednotka umožňuje v prípade požiadavky namiesto chladu produkovať teplo, ďalej využiteľné pre účely vykurovania, čím sa zefektívňuje využitie systému, pretože trigeneračný systém je možné využívať celoročne podľa potreby.



Obr. 1 Trigeneračný systém

Článok sa zaoberá problematikou produkcie elektrickej energie a tepla kogeneračnou jednotkou. Kogeneračná jednotka pozostáva z pohonnej jednotky (najčastejšie sa jedná o spaľovací motor) pevne spojenej pomocou spojky s elektrickým generátorom (Obr. 2). Roztočením generátora sa vyrába elektrická energia a odvodom tepla z motora sa získava energia pre sorpčný chladiaci systém.



Obr. 2 Bloková schéma kogeneračnej jednotky

2 FORMULÁCIA PROBLEMATIKY

Jednou z vyrábaných foriem energie kogeneračnou jednotkou je elektrická energia. Elektrická energia musí dosahovať istú kvalitu. Existujú preto štandardy parametrov, ktoré musia byť splnené. Podstatným kritériom je stabilita frekvencie a amplitúdy generovaného napätia. Pre frekvenciu platí štandardizovaná tolerancia $\pm 1\%$ menovitej hodnoty a pre napätie $\pm 10\%$ [5]. Pokiaľ by tomu tak nebolo, mohlo by to spôsobiť chybnú činnosť záťaže systému. Výrobca energie sa preto pre zabezpečenie kvality okrem iného musí zaoberať riešením problematiky vzniku prepätia, poklesov napätia, či náhodných prerušení výroby elektrickej energie. Článok si preto prostredníctvom vykonaných meraní za prvý cieľ kladie poukázať na vznik fluktuácií vyrobenej elektrickej energie vplyvom zmeny zaťaženia, na základe ktorých je ďalej možné navrhnúť vhodné kroky pre optimalizovanie riadenia elektrickej sústavy kogeneračnej jednotky.

Druhou produkovanou energiou kogeneračnej jednotky je tepelná energia. Tá je privádzaná do chladiacej jednotky prostredníctvom cirkulačného okruhu horúcej vody. Absorpčná chladiaca jednotka bežne pracuje na vstupe s tepelným spádom 95/70 °C. Je dôležité, aby pracovala s čo najvyššou účinnosťou chladenia. Na základe vstupujúceho tepla sa však proporcionálne mení aj množstvo chladu po jeho transformovaní. Okrem toho je potrebné prihliadať aj na prevádzku spaľovacieho motora. Jeho optimálna teplota totiž býva v závislosti na type motora 80–95 °C. Pokiaľ by motor nepracoval pri optimálnych podmienkach, mohlo by to viesť časom k jeho poškodeniu. Optimálny chod tepelnej sústavy je možné zabezpečiť prostredníctvom vhodného regulátora. K jeho vytvoreniu je však potrebné poznať teplotnú závislosť spaľovacieho motora na čase. Druhým cieľom článku preto je meranie teplotnej charakteristiky spaľovacieho motora a následné stanovenie prenosovej funkcie sústavy ďalej využiteľnej pre výpočet regulátora.

3 VYKONANÉ EXPERIMENTÁLNE MERANIA

Ako laboratórny model elektrickej sústavy trigeneračnej jednotky bola zvolená elektrocentrála GSE 1200 4T (viď Obr. 3). Zariadenie je tvorené sústrojenstvom spaľovací motor – synchronný generátor.

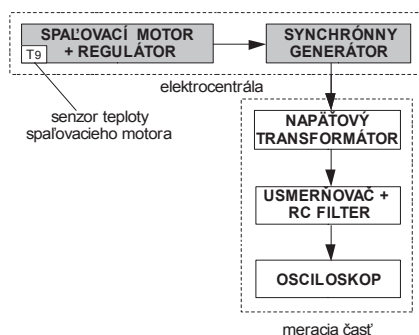


Obr. 3 Elektrocentrála GSE 1200 4T [1]

Špecifikácia systému [1]:

otáčky	3000 ot/min
motor	1 valec, 4-takt
výkon generátora	850W
výkon generátora (max.)	950W
napätie generátora	230V ±15 %
trieda ochrany	IP 23
akustický výkon	75 dB
kapacita palivovej nádrže	5 l
doba chodu na 1 náplň	7 hod.

Na elektrocentrále boli vykonané merania skokového zaťaženia generátora a merania teplotnej charakteristiky jej tepelnej sústavy. Bloková schéma meraní sa nachádza na Obr. 4.



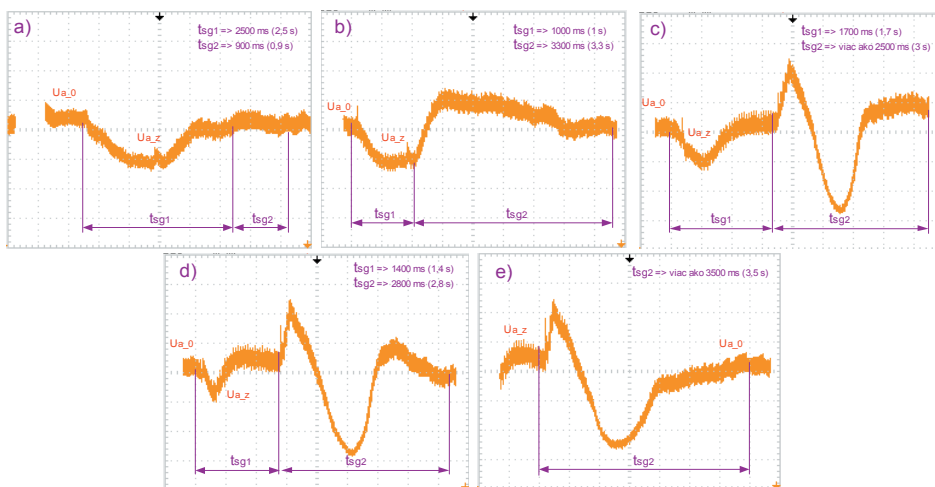
Obr. 4 Bloková schéma merania synchronného generátora poháňaného spaľovacím motorom

3.1 Meranie skokového zaťaženia

V prvom prípade sa jednalo o merania elektrického generátora v režime zaťaženia. Elektrocentrála bola skokovo zaťažovaná odporovou záťažou zodpovedajúceho výkonu 150, 300, 460, 800 a 850 W. Záťaž bola pripájaná vždy v časovom intervale 1–2,5 s. Cieľom bolo zistiť stabilitu výstupného napätia pri skokových zmenách záťaže a reakciu regulátora elektrocentrály. Záznam priebehov bol vykonaný osciloskopom pripojeným prostredníctvom meracieho transformátora a usmerňovača s RC filtrom s časovou konštantou 100 ms.

Osciloskopom zaznamenané priebehy meraní sa nachádzajú na Obr. 5, kde jednotlivé značenia znamenajú:

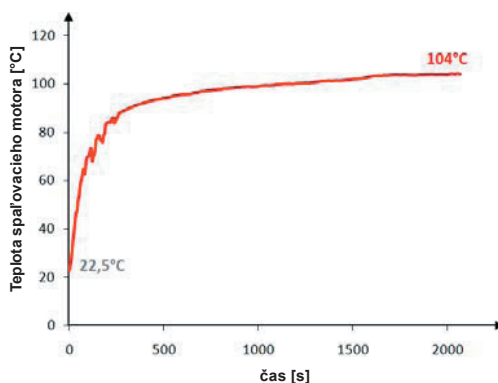
t_{sg1} → časový interval zodpovedajúci pripojeniu záťaže, t_{sg2} → časový interval po odpojení záťaže do doby opätovného vyregulovania generovaného napätia, U_{a0} → usmernené fázové napätie generátora naprázdno, U_{az} → usmernené fázové napätie generátora počas zaťaženia.



Obr. 5 Namerané charakteristiky generovaného napätia elektrocentrály GSE 1200 4T zaťažného výkonom: a) 150 W, b) 300 W, c) 460 W, d) 800 W, e) 850 W

3.2 Meranie teploty spaľovacieho motora

Ďalším meraním bolo meranie teploty spaľovacieho motora. Cieľom týchto experimentov bolo poznanie reálneho priebehu tepelnej sústavy spaľovacieho motora v závislosti na čase, na základe ktorého je možné vypočítať prenosovú funkciu sústavy. Merací teplomer bol upevnený medzi rebrami chladiča motora. Dokonalý tepelný prevod bol zaistený použitím teplovodivej pasty. Nameraná charakteristika sa nachádza na Obr. 6.



Obr. 6 Charakteristika teploty spaľovacieho motora v závislosti na čase nameraná na elektrocentrále GSE 1200 4T

4 VYHODNOTENIE EXPERIMENTOV

Na zobrazených grafoch v prvom meraní je možné pozorovať pokles napätia spôsobený zaťažením elektrocentrály a jeho následnú reguláciu (časový interval t_{sg1}), ako aj reguláciu po prudkom náraste napätia vzniknutého odpojením záťaže (t_{sg2}). Tento nárast je tým väčší, čím je väčšia pripojená záťaž na elektrocentrále. Veľmi dobré je to vidieť porovnaním malej (Obr. 5 a) a veľkej (Obr. 5e) záťaže. Prudký nárast napätia vzniknutý po odpojení väčšej záťaže ako 300 W dosahoval až 40% nominálnej hodnoty generovaného napätia centrárou. Platí to však pre prípad, kedy generátor ostal v chode naprázdno. To ale znamená, že v prípade odpojenia veľkej záťaže (napr. ohrievač) by sa jednalo o potenciálne nebezpečenstvo pre pripojené menšie záťaže citlivé na prepätia (lekárske vybavenie, počítačová technika).

Regulované priebehy napätia poukazujú na to, že napätie meranej elektrocentrály je regulované regulátorom s charakterom PI regulátora, nakoľko nie je viditeľná regulačná odchýlka, napätie pred reguláciou je totiž rovnaké napätiu po regulácii. V prípade malej regulačnej odchýlky by bolo možné uvažovať o P-regulátore. V každom prípade z tohto merania je evidentné, že regulácia nie je plne vyhovujúca z dôvodu už spomínaných nárastov napätia. Jednou z možností zabránenia týchto nebezpečenstiev je možné aplikovaním vhodnejšieho regulátora. Veľký nárast napätia po odpojení záťaže odstráni využitie PID regulátora. Ten totiž využíva derivačnú zložku, ktorá sa zúčastní v regulácii za podmienky, že nastane prudká zmena regulovanej veličiny. Použitie kvalitnejšieho regulátora

by sa javilo ako elegantné riešenie. Okrem tejto možnosti zahŕňajúcej zmenu regulátora je možné uvažovať o použití veľmi rýchlej ochrany generátora tzv. univerzálnej sieťovej ochrany, ktorá reaguje odpojením ističa generátora od siete. Tá pracuje na princípe merania vektorového skoku. Zariadenie je odolné voči rušeniu. Ochrana je riadená 16-bitovým procesorom a má v sebe implementovanú prepäťovú a podpäťovú, nadfrekvenčnú a podfrekvenčnú ochranu a ochranu proti napäťovej nesymetrii, vektorovú ochranu a zároveň zabezpečuje aj dozeranie nad postupom fáz. V prípade potreby sa môžu jednotlivé ochrany vypnúť a ponechať len vybrané z nich. Táto ochrana deteguje chyby siete v priebehu 30 ms, v prípade zmeny výkonu o viac ako 10–15 %, pričom pomalé zmeny frekvencie nespôsobia jej aktivovanie. Univerzálna sieťová ochrana tak zabezpečí odpojenie od siete v prípade nebezpečenstva do 100 ms [4]. Vhodným riešením by bolo aplikovanie hybridnej metódy s využitím kvalitnejšieho regulátora a spomínanej univerzálnej ochrany. A keďže meraná elektrocentrála je systém charakterom zhodný s kogeneračnou jednotkou, je možné uvažovať navrhované riešenie aj pre elektrickú sústavu kogeneračnej jednotky.

Druhým meraním bolo meranie teplotnej charakteristiky. Teplota spaľovacieho motora dosiahla hodnotu 104 °C. (Poznámka: Okrem tejto teploty bola meraná aj teplota elektrocentrály typu Einhell BT-PG 850, ktorá využíva 2-taktný motor s výkonom 650 W. Výsledkom bol asi o polovicu kratší čas ustálenia teploty, pričom teplota dosahovala hodnotu v rôznych miestach chladiča najmenej 120 °C. Z toho vidieť, že teplotné charakteristiky závisia od typu motora a jeho chladenia). Merania teploty sú základom pre stanovenie prenosovej funkcie sústavy potrebnej pre návrh regulačného obvodu. Podľa teórie z [3] boli prevedené nasledovné výpočty.

Pre obrazový prenos sústavy 1. rádu vo všeobecnosti platí:

$$S(s) = \frac{K}{1 + T \cdot s}; \quad (1)$$

kde K je zosilnenie sústavy vyjadrené ako pomer výstupnej a vstupnej zmeny veličiny a T je časová konštanta sústavy v sekundách.

Rozdiel medzi ustálenou a počiatočnou hodnotou veličiny je:

$$Z_x = 81,5 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (2)$$

Časová konštanta sústavy T sa odčíta z časovej osi, zodpovedajúcej bodu charakteristiky $y(T)$:

$$y(T) = Z_x \cdot \left(1 - e^{-\frac{T}{T}}\right) = Z_x \cdot (1 - e^{-1}) = 0,632 \cdot Z_x; \quad (3)$$

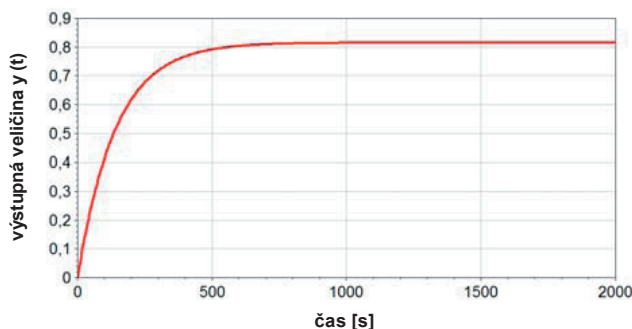
$$T = 141 \text{ s}; \quad (4)$$

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{104 - 22,5}{100} = 0,815; \quad (5)$$

kde Δy reprezentuje zmenu výstupnej veličiny teploty, Δx zmenu vstupnej veličiny úrovnne otvorenia klapky regulačného orgánu v percentách.

Obrazový prenos sústavy potom je:

$$S(s) = \frac{0,815}{1 + 141 \cdot s}; \quad (6)$$



Obr. 7 Teplotná charakteristika spaľovacieho motora elektrocentrály SGE 1200 4T zodpovedajúca vzťahu (6), simulovaná v Programe CC

Na základe stanovenia tejto sústavy bol navrhnutý P-regulátor teploty spaľovacieho motora, ktorý v spojení s PI-regulátorom absorpčnej chladiacej jednotky v regulačnom obvode vlečnej regulácie regulujú celú tepelnú sústavu trigeneračného systému.

5 ZÁVER

Článok popisuje experimentálne merania elektrickej a tepelnej sústavy kogeneračnej jednotky, často používanej v systéme trigenerácie. Ako laboratórny model kogeneračnej jednotky bol použitý agregát GSE 1200 4T. Merania elektrickej sústavy poukázali na vznik fluktuácii elektrickej energie vplyvom zmeny elektrickej záťaže. Pre riešenie týchto nedostatkov bol zvolený PID regulátor, ktorý je možné kombinovať s použitím univerzálnej sieťovej ochrany. Týmto krokom sa ochráni citlivé zariadenia pripojené na sieť napájanej elektrickým generátorom. Druhým cieľom článku bolo meranie teploty spaľovacieho motora v závislosti na čase. Ustálená hodnota teploty motora dosiahla až 104 °C, čo je pre jeho optimálnu prevádzku ako aj činnosť samotnej chladiacej jednotky trigenerácie nevhodné. Na základe získanej charakteristiky bol vypočítaný obrazový prenos sústavy, potrebný pre návrh regulátora optimálnej teploty spaľovacieho motora.

LITERATÚRA

- [1] GÜDE GMBH & CO: *Elektrocentrála GSE 1200 4T*. [online]. Dostupné na internete: <<http://www.akunaradi.cz/files/40639.pdf>>, náhľad stránky jún 2011.

- [2] INTECH SLOVAKIA.: *Trigenerácia*. [online]. Dostupné na internete: <<http://www.intechenergo.sk/sekcie/kogeneracia/trigeneracia>>, náhľad stránky jún 2011.
- [3] NAŠČÁK L., ŠURIANSKY J.: 2004. *Základy automatizácie a riadenia procesov*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2004. ISBN 80-228-1430-X.
- [4] ŠINDELÁŘ L., VANDÍREK M.: 2002. *NPU – Univerzální síťová ochrana, návod k instalaci a používání*. [online]. 2002, s. 15–16, 22 s. Dostupné na internete: <<http://cdn.comap.cz/files/manuals/NPU-2.0-Referencni%20prirucka.pdf>>, náhľad stránk jún 2011.
- [5] WEBAREAL. Technické podmienky výroby a rozvodu elektrickej energie. [online]. Dostupné na internete: <http://www.webareal.sk/fotky4725/kurzy/Technicke_podmienky_1.pdf>, náhľad stránky jún 2011.

Kontaktná adresa:

Ing. Vladimír Kocúr

Technická univerzita vo Zvolene, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky,
Katedra informatiky a automatizačnej techniky, Študentská 26, 960 53 Zvolen
e-mail: xkocurv@is.tuzvo.sk

prof. Ing. Jozef Šuriansky, CSc.

Technická univerzita vo Zvolene, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky,
Katedra informatiky a automatizačnej techniky, Študentská 26, 960 53 Zvolen
e-mail: surian@vsld.tuzvo.sk

SKELETIZAČNÉ ALGORITMY

SKELETIZATION ALGORITHMS

Pavol KOLEDA – Ľubomír NAŠČÁK

ABSTRACT: This paper describes the most common methods of image skeletization. At first, it is necessary to adjust the processed image by means of binarization before thinning, whereby areas appertaining to the analyzed model and areas appertaining to the background are created. Adjusted image is consistently thinned by selected thinning algorithm, which decides of exclusion or keeping of point in the pattern by determined conditions. The result of skeletization is pattern thinned on size 1 pixel, called skeleton of picture.

Key words: Thinning, skeletization, 8-neighbourhood

ABSTRAKT: Článok popisuje najpoužívanejšie metódy skeletizácie obrazov. Pred samotnou skeletizáciou je potrebné spracovávaný obraz najprv upraviť pomocou binarizácie, kde sa v obraze vytvoria oblasti patriace analyzovanému vzoru a oblasti patriace pozadiu vzoru. Takto upravený obraz sa následne stenčuje podľa vybraného skeletizačného algoritmu, ktorý podľa určitých podmienok rozhoduje o vylúčení, prípadne o ponechaní daného bodu vo vzore. Výsledkom skeletizačného procesu je vzor stenčený na hrúbku čiar 1 pixel, ktorý sa nazýva kostra obrazu.

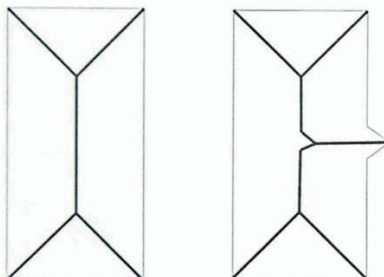
Kľúčové slová: Stenčovanie, skeletizácia, osemokolie

1. ÚVOD

Skeletizácia (stenčovanie) je významným prvkom spracovania obrazov pri operáciách analýzy obrazov pri odtlačkoch prstov, pri optickom rozpoznávaní a tiež v biomedicínskych systémoch. Skeletizáciou sa rozumie odstránenie bodov alebo vrstiev pôvodného obrazu až kým nemajú všetky čiary tvoriace vzor v obraze šírku jeden obrazový bod (pixel). Takýto výsledný súbor čiar sa nazýva skelet alebo kostra obrazu. Používaním sa skeletizácia rozvíjala a boli navrhnuté rôzne metódy stenčovania.

Cieľom algoritmu je získať výstupný obraz – kostru objektov v obraze, ktorá je tvorená čiarami s hrúbkou jeden obrazový bod. Vstupom pre skeletizáciu je binárny obraz, kde skúmaný vzor v obraze je reprezentovaný bodmi s jasovou úrovňou 1 (body s čiernou farbou). Body v obraze patriace okoliu vzoru majú jasovú úroveň 0 (body s bielou farbou). Algoritmus prechádza obraz po jednotlivých pixeloch a zisťuje, či práve skúmaný pixel spĺňa určité podmienky a teda, či má byť označený ako kandidát na odstránenie a bude mu priradená hodnota jasu 0. Podmienky na odstraňovanie bodov v obraze sa v jednotlivých algoritmoch skeletizácie od seba líšia. Aj keď sa hľadanie kostry obrazu zdá na prvý

pohľad jednoduché, na Obrázku 1 je znázornené, ako veľmi sa môže kostra objektu zmeniť zmenou niekoľkých bodov na hranici objektu (napríklad vplyvom nerovností a šumov).



Obrázok 1 Kostra obdĺžnika

2. PODMIENKY SKELETIZÁCIE

Pre skeletizačné algoritmy sa požaduje:

1. Zachovanie súvislostí 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. Toto sa nie vždy podarí.
4. Stenčený výsledok by mal vyjadrovať os objektu. Vplyvom diskkrétnej povahy objektu, rôznym prístupom k stenčovaniu a vplyvom šumu to nebude splnené celkom presne.
5. Mal by byť minimalizovaný vplyv výbežkov v obraze.

Všetky podmienky sú ťažko splniteľné. Často je možné sa len priblížiť k ideálnej kostre obrazu.

3. POUŽITÉ ALGORITMY

Pri skeletizácii sa postupne prechádza obraz a postupne sa odstraňujú body z okraja oblastí v obraze. Tento proces sa vykonáva opakovane, až kým neostanú z oblastí čiary o hrúbke jedného obrazového bodu (pixla). 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 jedná o hraničný bod a neporuší sa kontinuita čiar, je daný bod vymazaný z obrazu a pridaný k okoliu. Tieto podmienky sa testujú na susedných bodoch práve kontrolovaného bodu na odstránenie (Obrázok 2). To či daný bod bude odstránený, určujú vzťahy medzi týmito susedmi, ktoré sú špecifické pre každý skeletizačný algoritmus.

Q ₄	Q ₃	Q ₂
Q ₅	P	Q ₁
Q ₆	Q ₇	Q ₈

Obrázok 2 Maska pre vytvorenie okolia bodu

3.1 Deutschov algoritmus

Pri skeletizácii podľa Deutschovho algoritmu je práve posudzovaný bod P odstránený z obrazu, ak sú splnené nasledujúce podmienky:

1. počet susedných bodov $N(P)$ s hodnotu jasu 1 musí byť z intervalu $\langle 2, 6 \rangle$,
2. prechodové číslo X musí byť rovné dvom
3. pri kroku:
 - a) párnom: $Q_1 \vee Q_7 \vee (Q_3 \wedge Q_5) = 0$
 - b) nepárnom: $Q_3 \vee Q_5 \vee (Q_1 \wedge Q_7) = 0$

Prvá podmienka zabraňuje odstránenie konca čiary alebo spôsobenie nadmernej erózie. Počet susedov $N(P) = 0$ znamená, že sa jedná o izolovaný bod, jeden sused znamená, že sa jedná o koniec čiary. V prípade siedmich susedov by odstránenie bodu spôsobilo nadmernú eróziu objektu. Ak má bod ôsmich susedov, znamená to, že daný bod leží uprostred objektu a nie na okraji. Počet susedných bodov s hodnotou jasu 1 vypočítame podľa vzťahu:

$$N(P) = \sum_{i=1}^8 Q_i = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_8 \quad (1)$$

Prechodové číslo X v druhej podmienke udáva, koľkokrát sa zmenila hodnota intenzity jasu z 0 na 1 a z 1 na 0, t. j. z čiernej farby na bielu a z bielej na čiernu pri obchádzaní bodu P dookola. Prechodové číslo $X = 2$ znamená, že bod P leží na hranici objektu, $X = 0$ by znamenalo, že ide o izolovaný bod, alebo že sme vo vnútri objektu. $X = 4$ ukazuje na prítomnosť výbežku. Prechodové číslo X sa vypočíta podľa vzťahu:

$$X = \sum_{i=1}^8 |Q_{i+1} - Q_i| = |Q_2 - Q_1| + |Q_3 - Q_2| + \dots + |Q_8 - Q_7| + |Q_1 - Q_8| \quad (2)$$

3.2 Deutschov modifikovaný algoritmus

Deutschov algoritmus je analogický s predchádzajúcim algoritmom, má ale rozšírené podmienky pre odstránenie bodu v párných a nepárných prechodoch. Rovnako ako pri predchádzajúcom algoritme aj tu sa testuje okolie bodu P ležiaceho uprostred masky (Obrázok 2), t. j. sú skúmané susedné body Q_1 až Q_8 . Aby bol bod označený ako kandidát na odstránenie, musia byť splnené nasledujúce podmienky:

1. počet susedných bodov s hodnotou jasu 1 $N(P) \neq 1$
 2. prechodové číslo X musí mať hodnotu 0, 2 alebo 4
 3. pre párne prechody musí platiť:
 - a) ak $X = 0$ alebo $X = 2$: $Q_1 \vee Q_7 \vee (Q_3 \wedge Q_5) = 0$
 - b) ak $X = 4$: $(Q_1 \wedge Q_7 = 1) \wedge (Q_6 \vee Q_2 = 1) \wedge (Q_3 \wedge Q_4 \wedge Q_5 \wedge Q_8 = 0)$
alebo $(Q_1 \wedge Q_3 = 1) \wedge (Q_4 \vee Q_8 = 1) \wedge (Q_2 \wedge Q_5 \wedge Q_6 \wedge Q_7 = 0)$
- pre nepárne prechody musí platiť:
- c) ak $X = 0$ alebo $X = 2$: $Q_3 \vee Q_5 \vee (Q_1 \wedge Q_7) = 0$
 - d) ak $X = 4$: $(Q_3 \wedge Q_5 = 1) \wedge (Q_6 \vee Q_2 = 1) \wedge (Q_1 \wedge Q_4 \wedge Q_7 \wedge Q_8 = 0)$
alebo $(Q_5 \wedge Q_7 = 1) \wedge (Q_4 \vee Q_8 = 1) \wedge (Q_1 \wedge Q_2 \wedge Q_3 \wedge Q_6 = 0)$

Prechodové číslo X má rovnaký význam ako v predchádzajúcom algoritme.

3.3 Zhang-Suen algoritmus

Medzi najpoužívanejšie algoritmy skeletizácie patrí algoritmus Zhang-Suen, ktorý je schopný vyrábať dostatočne presnú kostru obrazu. Bod P je odstránený zo vzoru a priradený okoliu, ak spĺňa nasledovné podmienky:

1. daný bod P patrí vzoru: $P = 1$
2. $X(P) = 1$
3. počet čiernych susedov z okolia bodu P je z intervalu $\langle 2, 6 \rangle$
4. pre subiterácie musí platiť:
 - a) párna: $(Q_1 \vee Q_3 \vee Q_5) \wedge (Q_3 \vee Q_5 \vee Q_7) = 0$
 - b) nepárna: $(Q_5 \vee Q_7 \vee Q_1) \wedge (Q_7 \vee Q_1 \vee Q_3) = 0$

Hodnota $X(P)$ v druhej podmienke predstavuje počet prechodov hodnôt susedov bodu P z 0 na 1.

3.4 Modifikovaný Zhang-Suen algoritmus

Algoritmus Zhang-Suen, ktorý bol popísaný vyššie, bol upravený Luom a Wangom. Používa rovnaký popis okolia bodu P . Podmienky pre vymazanie bodu P sú 0:

1. bod P patrí vzoru: $P = 1$
2. pre počet susedov $B(P)$ bodu P s hodnotu 1 platí: $3 \leq B(P) \leq 6$
3. pre subiterácie musí platiť:
 - a) párna: $Q_1 = 0 \vee Q_7 = 0 \vee (Q_3 = Q_5 = 0)$
 - b) nepárna: $Q_5 = 0 \vee Q_3 = 0 \vee (Q_1 = Q_7 = 0)$

3.5 Guo & Hall algoritmus

Algoritmus Guo & Hall je paralelný algoritmus stenčovania. Každý bod patriaci obrazu je pomocou masky 3×3 (obrázok 2) posudzovaný, či je možné ho odstrániť. Aby bol daný pixel P odstránený, musí spĺňať nasledovné podmienky:

1. $C(P) = 1$
2. $N(P)$ má hodnotu 2 alebo 3
3. pri kroku:
 - a) párnom: $(Q_3 \vee Q_4 \vee \overline{Q_6}) \wedge Q_5 = 0$
alebo: $(Q_5 \vee Q_6 \vee \overline{Q_8}) \wedge Q_7 = 0$
 - b) nepárnom: $(Q_7 \vee Q_8 \vee \overline{Q_2}) \wedge Q_1 = 0$
alebo: $(Q_1 \vee Q_2 \vee \overline{Q_4}) \wedge Q_3 = 0$

Hodnota $C(P)$ v prvej podmienke je z intervalu 0 až 4 a predstavuje súčet stavov štvorokolia bodu P (Q_1, Q_3, Q_5, Q_7) s danými dvomi bodmi v okolí bodu P v smere hodi-
nových ručičiek od niektorého z bodov štvorokolia. Táto hodnota sa určí zo vzťahu:

$$C(P) = \overline{Q_1} \wedge (Q_8 \vee Q_7) + \overline{Q_3} \wedge (Q_2 \vee Q_1) + \overline{Q_5} \wedge (Q_4 \vee Q_3) + \overline{Q_7} \wedge (Q_6 \vee Q_5) \quad (3)$$

kde:

$$N(P) = \text{Min}(N_1(P), N_2(P))$$

$$N_1(P) = (Q_1 \vee Q_2) + (Q_3 \vee Q_4) + (Q_5 \vee Q_6) + (Q_7 \vee Q_8)$$

$$N_2(P) = (Q_2 \vee Q_3) + (Q_4 \vee Q_5) + (Q_6 \vee Q_7) + (Q_8 \vee Q_1)$$

3.6 C. J. Hildish algoritmus

Algoritmus stenčovania podľa C.J. Hildisha je založený na viacprechodovom spracovaní obrazu. Každému bodu je pri prechádzaní obrazu vytvorené osemokolie podľa Obrázku 2. V tomto okolí je definované:

$$N_8 \in \{Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, Q_7, Q_8\}$$

$$N_{nep} \in \{Q_1, Q_3, Q_5, Q_7\}$$

$$B(P) = \sum_{i=1}^8 Q_i = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_8$$

Podmienky pre odstránenie bodu sú:

$$1. \sum_{i \in N_{nep}} \{1 - |B(Q_i)|\} \geq 1$$

$$2. \sum_{i \in N_8} |B(P_i)| \geq 2$$

3. $\sum_{i \in N_8} C_i \geq 1$ kde: $C_i = \begin{cases} 1; & \text{pre } B(P) = 1 \\ 0; & \text{pre } B(P) \neq 1 \end{cases}$
4. $N_c^8(P_0) = 1$ kde: $N_c^8(P_0) = \sum_{i \in N_{nep}} \{D(P_i) - D(P_i) \times D(P_{i+1}) \times D(P_{i+2})\}$

hodnota je: $D(P_i) = 1$ pre $|B(P_i)| = 1$
 0 pre $|B(P_i)| \neq 1$

Podmienka 1 znamená, že bod patrí vzoru.

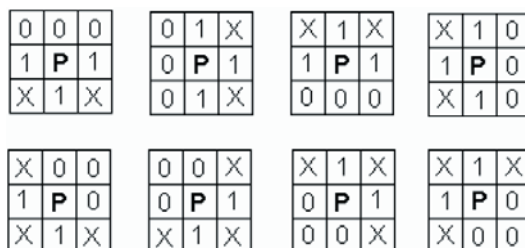
Podmienka 2 znamená, že bod P nie je koncový bod skeletu

Podmienka 3 zamedzuje odstránenie izolovaného bodu.

Podmienka 4 zamedzuje odstránenie bodu spájajúceho kostru obrazu.

3.7 Stover-Iverson algoritmus

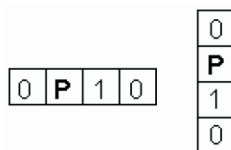
Algoritmus Stover-Iverson patrí medzi viacprechodové algoritmy. Body obrazu sa pri jednotlivých prechodoch porovnávajú so sadou ôsmich štruktúrnych masiek (obrázok 3), ktoré rozhodujú o tom, či práve prechádzaný bod bude z obrazu vymazaný. Ak sa práve kontrolovaný bod so svojim okolím zhoduje s nejakou z týchto masiek, bude daný bod vymazaný zo vzoru a bude priradený k pozadiu obrazu.



Obrázok 3 Štruktúrne masky pre algoritmus Stover-Iverson

Symbolom P je označený práve kontrolovaný bod na vymazanie. Bod s označením 0 v jeho okolí musí patriť okoliu, bod s označením 1 patrí vzoru v obraze. Body s označením X nemajú vplyv na vymazanie kontrolovaného bodu P .

Pri tomto algoritme však existuje výnimka, kedy nedôjde k vymazaniu bodu P . Táto podmienka nastáva v prípade, ak testovaný bod P a jeho okolie súhlasí s niektorou z nasledujúcich masiek:



Obrázok 4 Masky pre zakázanie odstránenia bodu P

Pri podrobnejšom preskúmaní oboch skupín masiek (obrázok 3, obrázok 4) zistíme, že existuje možnosť spojiť tieto skupiny do jednej sady ôsmich masiek pri zachovaní všetkých vlastností algoritmu. Princíp spočíva v tom, že označíme masky z prvej skupiny (obrázok 3), u ktorých môže dôjsť k situácii, že testovaný bod bude následne vyhovovať aj niektorej z masiek zabraňujúcich vymazaniu bodu (obrázok 4). Označené masky vhodne rozšírime o ďalšiu časť okolia (riadok alebo stĺpec), aby boli schopné sami zabrániť vymazaniu bodu, ktorý by bol aj tak označený ako nezmazateľný. Pri niektorých maskách nenastáva situácia kolízie vymazania s nevy mazaním, preto tieto môžeme ponechať v pôvodnom stave bez rozšírenia. Výsledné masky po tejto úprave vidíme na obrázku 5:

0	0	0	0	1	X	X	X	1	X	X	1	0	
1	P	1	0	P	1	1	1	P	1	1	P	0	
X	1	X	0	1	X	X	0	0	0	X	1	0	
X	1	X											
X	0	0	0	0	X	X	X	1	X	X	X	1	X
1	P	0	0	P	1	1	0	P	1	1	1	P	0
X	1	X	X	1	X	X	0	0	X	X	X	0	0
X	1	X	X	1	X	X							

Obrázok 5 Upravené masky

Táto metóda skeletizácie je však veľmi citlivá na akýkoľvek výbežok v obraze. Výsledný skelet je preto veľmi rozvetvený, preto je nutné po použití tohto algoritmu upraviť výsledný skelet vyhladením a odstránením nerovností.

3.8 Sekvenčný algoritmus s použitím štruktúrnych masiek

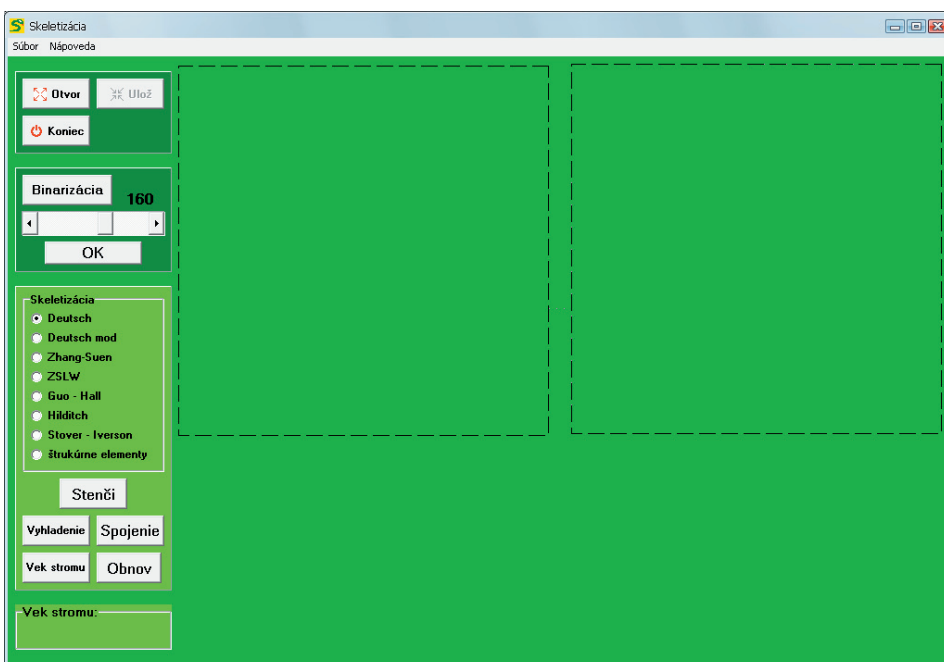
Podobne ako predchádzajúci algoritmus, aj sekvenčný algoritmus je založený na prehľadávaní jednotlivých bodov obrazu a ich porovnávaní so sadou štruktúrnych masiek. Obraz sa prehľadáva dovtedy, kým dva po sebe idúce obrazy sa od seba nelíšia, teda až kým je čo vymazať. Dohromady sa v tomto algoritme používa osem porovnávacích masiek na mazanie bodov, žiadna maska nezabraňuje vymazaniu niektorých bodov. Všetky tieto masky majú veľkosť 3×3 bodov, sú zobrazené na nasledujúcom obrázku:

0	0	0	X	0	0	1	X	0	X	1	X
X	P	X	1	P	0	1	P	0	1	P	0
1	1	1	X	1	X	1	X	0	X	0	0
1	1	1	X	1	X	0	X	1	0	0	X
X	P	X	0	P	1	0	P	1	0	P	1
0	0	0	0	0	X	0	X	1	X	1	X

Obrázok 6 Štruktúrne masky

4. PROGRAM

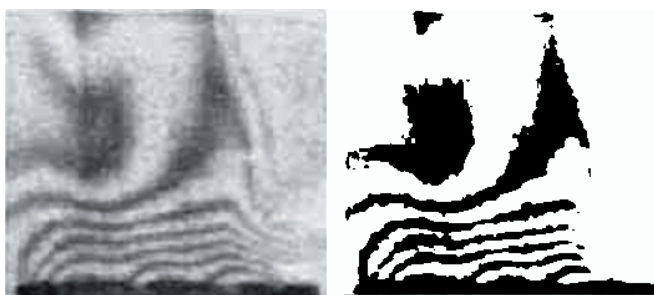
Na skeletizáciu obrazov bol navrhnutý program (obrázok 7). Program umožňuje upraviť bitmapový obrázok pomocou binarizácie a prahovania na binárny obraz, kde vzor v obraze má čiernu farbu, pozadie bielu. V ďalšom kroku je obraz stenčovaný podľa vybraného algoritmu. Po skeletizácii je výsledný skelet zobrazený v ľavej časti obrazovky, vpravo sú zobrazené odstránené časti z pôvodného obrazu. Výslednú kosťu je možné upraviť vyhladením, prípadne spojením prerušených čiar. Ak sa spracováva obraz s le- tokruhmi stromu, je možné z výsledného skeletu určiť vek stromu. Výsledný obraz so skeletom je možno uložiť v obrazovom formáte bitmapy (*.bmp).



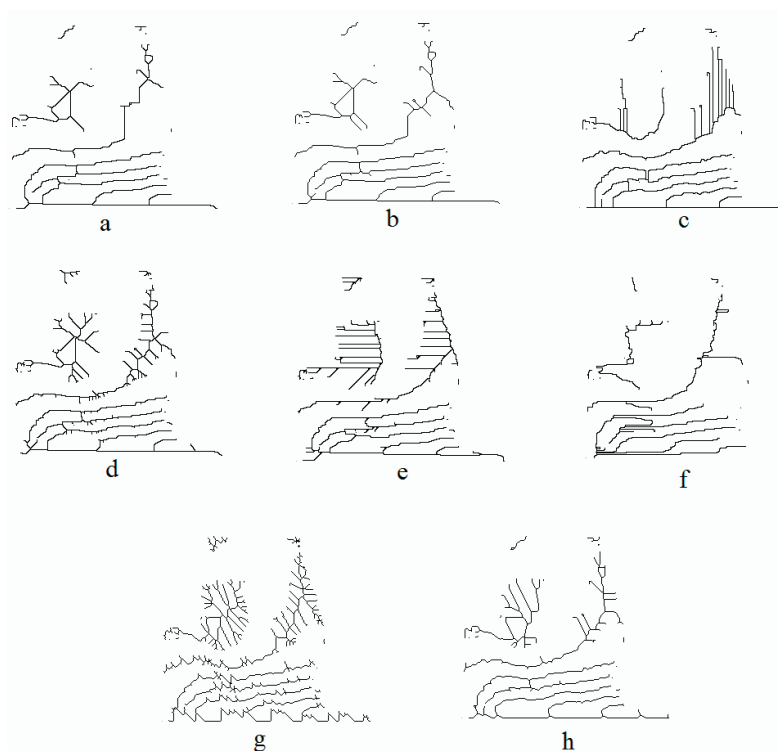
Obrázok 7 Navrhnutý skeletizačný program

5. VÝSLEDKY

Pre porovnanie jednotlivých skeletizačných algoritmov bol použitý holografický interferogram teplotného poľa horizontálnej drevenej vzorky (topoľ – pozdĺžny smer) (Černecký, Pivarčiová 2007).



Obrázok 8 Interferogram teplotných polí: originálny a prahovaný obrázok



Obrázok 9 Porovnanie skeletizačných algoritmov:

- a) Deutsch, b) Deutsch modifikovaný, c) Zhang-Suen, d) Zhang-Suen modifikovaný,
e) Guo & Hall, f) Hildish, g) Stover-Iverson, h) sekvenčný

6. ZÁVER

Každý skeletizačný algoritmus má individuálny prístup k stenčovaniu obrazov, preto každý dáva odlišné výsledky výsledného skeletu. Najlepšie výsledky skeletizácie dávajú

algoritmy Deutsch, Deutsch modifikovaný, Hilditch a sekvenčný algoritmus. Skeletizáciu obrazov je možné použiť napr. pri analýze interferogramov teplotných polí, pri analýze a rozpoznávaní odtlačkov prstov pri identifikácii osôb pomocou biometrických znakov.

LITERATÚRA

- ČERNECKÝ, J., PIVARČIOVÁ, E.: Holografia a jej technické aplikácie: Počítačové spravovanie a analýza holografických interferogramov. Dostupné on-line: <<http://www.holografia.wz.cz/holografia/pocitacove-spracovanie-a-analyza-holografickych-interferogramov.php>>
- DOBEŠ, M.: 2001. Rozpoznávání obrazu se zaměřením na identifikaci osob dle otisku prstu. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a informatiky. Brno, 2001. ISBN 80-214-1820-6.
- 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.
- KWOK, P.: A thinning Algorithm by Contour Generation. [cit. máj 2011]. Dostupné on-line: <<https://dspace.ualgary.ca/bitstream/1880/45551/2/1987-287-35.pdf>>.
- LIN, Ch., H., CHANG, W., K., LIN, Y., Y., CHENG, L., Y.: Binary Document Images Authentication by Thinning Digital Patterns. Tunghai University, Taiwan. [cit. apríl 2011]. Dostupné on-line: <<http://dado.thu.edu.tw/files/teacher/279.pdf>>.
- NOORULLAH, R. M., DAMODARAM, A.: Innovative thinning and gradient algorithm for edge field and categorization skeleton analysis of binary and grey tone images. [cit. máj 2011]. Dostupné on-line: <<http://www.jatit.org/volumes/research-papers/Vol5No1/1Vol5No12.pdf>>.
- ZHANG, F., WANG, Y., GAO, Ch., SI, S., XU, J.: An Improved paralel thinning algorithm with tvo subiterations. [cit. máj 2011]. Dostupné on-line: <<http://www.springerlink.com/content/u84-k0n10v8433045/fulltext.pdf>>.

Článok je súčasťou riešenia grantového projektu VEGA 1/0150/09 Detekcia a kvantifikácia počtu, veľkosti frakčných častíc a prachu vznikajúcich pri obrábaní dreva.

Kontaktná adresa:

Ing. Pavol Koleda

Technická univerzita vo Zvolene, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky

Študentská 26, 960 53 Zvolen, Slovenská republika

e-mail: pavol.koleda@zoznam.sk

doc. Ing. Ľubomír Naščák, CSc.

Technická univerzita vo Zvolene, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky

Študentská 26, 960 53 Zvolen

Tel: +421 455 206 572

e-mail: nas@vsld.tuzvo.sk

OPTIMALIZÁCIA TRAJEKTÓRIE POMOCOU ALGORITMU OPTIMALIZÁCIE KOLÓNIU MRAVCOV

OPTIMISATION OF TRAJECTORY USING THE ANT COLONY OPTIMISATION ALGORITHM

Peter KOLEDA – Ľubomír NAŠČÁK

ABSTRACT: The article describes an optimization problem for finding a shape of trajectory passing through determined node points in order to reach them all. Evolution and genetic algorithms are being advantageously used for optimization problems whereby a memetic ant colony optimisation (ACO) algorithm is used for defined problem. The core of this work is created by a theoretical description of ACO algorithm and its application for finding an optimal trajectory suitable for modelled example. In the conclusion results of simulation are resumed as well as possible improvements for inclusion of other relevant parameters besides the displacement of node points.

Key words: optimisation of trajectory, memetic algorithms, ant colony algorithm

ABSTRAKT: Článok sa zaoberá optimalizačnou úlohou pre hľadanie tvaru trajektórie prechádzajúcej cez definované uzlové body tak, aby sa dosiahol každý uzlový bod. Pre optimalizačné úlohy sa s výhodou používajú evolučné a genetické algoritmy, pričom pre definovaný problém je použitý memetický algoritmus optimalizácie pomocou kolónie mravcov. Jadro práce tvorí teoretický popis tohto algoritmu a jeho aplikácia na nájdenie optimálnej trajektórie pre modelovaný príklad. V závere sú zhrnuté výsledky simulácie a možné vylepšenia pre zahrnutie iných relevantných parametrov vrátane vzdialenosti uzlových bodov.

Kľúčové slová: optimalizácia trajektórie, memetické algoritmy, algoritmus kolónie mravcov

1. ÚVOD

Manipulátory, polohovacie a pohybové mechanizmy používané na premiestnenie a sledovanie definovanej trajektórie sa dnes už nezaobídu bez procesorového riadenia, ktorého nevyhnutnou súčasťou je zodpovedajúci počítačový softvér umožňujúci predspracovanie údajov o žiadanej trajektórii. Túto je potrebné interpolovať a nahradiť trajektóriou vhodnou pre riadiace algoritmy a parametrizáciu akčných veličín. Problémom môže byť výber vhodnej interpolačnej metódy a tiež výber zo značného rozsahu možností, ako žiadanú trajektóriu vytvoriť. Definujúcou podmienkou sú zväčša uzlové body, cez ktoré má interpolovaná trajektória prechádzať. Konkrétny postup interpolácie a umiestnenia uzlových bodov závisia však na aplikácii, pre ktorú sa má zvoliť vhodná trajektória.

Príklad výrobného zariadenia, pri ktorom je potrebné dosiahnuť uzlové body, môže predstavovať súradnicová vrtačka. Pracovný nástroj musí dosiahnuť polohu všetkých otvorov, ktoré majú byť vyvrtané, pričom sa pohybuje po trajektórii, ktorej tvar sa dá určiť viacerými spôsobmi. Obmedzujúcou podmienkou môže byť vykonateľnosť samotných pohybov, ako aj prítomnosť prekážok nachádzajúcich sa vo vymedzenom manipulačnom priestore.

Asi najpodstatnejšou podmienkou pre vytvorenie optimálnej trajektórie je jej dĺžka ako súčet všetkých prejdenej vzdialeností medzi uzlovými bodmi. Ak bude pre uvažovaný systém aj vhodne navrhnutý regulátor pre riadenie rýchlosti premiestnenia, môže sa takýmto spôsobom získať trajektória optimálna nie len vzhľadom na svoju dĺžku, ale aj na čas premiestnenia.

2. MODERNÉ METÓDY OPTIMALIZÁCIE – EVOLUČNÉ STRATÉGIE

Osvedčeným spôsobom riešenia optimalizačných úloh je použitie evolučných stratégií a genetických algoritmov (Šipoš, 2009). Technológie, inovačné princípy a technologické postupy vytvárané človekom sú čoraz častejšie inšpirované správaním a hierarchiou spoločenských v prírode (Dorigo, 2004). Pre daný typ problému, kedy je riešenie vykonateľné viacerými spôsobmi, pričom len jeden z nich je najvhodnejší, sa javí primerané použiť algoritmus, ktorý bude uprednostňovať len tie najlepšie nájdené riešenia a tieto si zapamätá. K takýmto memetickým algoritmom patrí aj optimalizácia pomocou kolónie mravcov (Ant Colony Optimization – ACO), príp. metódou inteligentnej populácie, ktorá je jej rozšírením (Štollmann, 2010). V prírode mravce nájdu najkratšiu cestičku k potrave, hoci vzhľadom na prekážky, ktoré sa nachádzajú medzi mraveniskom a zdrojom potravy, je týchto cestičiek väčší počet. Len jedna je však najkratšia – optimálna.

Teoretické pozadie algoritmu ACO je odvodené od skutočného správania sa mravcov v prírode (Yaseen, 2008). Mravce sa pohybujú po možných cestičkách, pričom za sebou zanechávajú feromónovú stopu. Keďže sa feromón prirodzene odparuje, na kratšej ceste zostane táto stopa výraznejšia ako na dlhšej ceste. Pravdepodobnosť výberu jednej z viacerých ciest sa dá vyjadriť vzťahom

$$P(\tau_{i,j}) = \frac{\tau_{i,j}^{\beta} h_{i,j}^{\alpha}}{\sum_i \sum_j \tau_{i,j}^{\beta} h_{i,j}^{\alpha}} \quad (1)$$

$h_{i,j}$ – matica viditeľnosti,

$\tau_{i,j}$ – matica ciest (feromónových stôp),

α – koeficient efektívnosti zraku mravcov,

β – koeficient efektívnosti ciest.

Koeficienty α a β vyjadrujú mieru zvýhodňovania lepších parametrov v maticiach $\tau_{i,j}$ a $h_{i,j}$, pričom horšie získavajú menší význam (Matlab Central, 2007). Z toho vyplýva, že v priebehu iterácií sa na riešenia vedúce k horším výsledkom zabúda.

2.1 Algoritmus riešenej úlohy

Výber z možných ciest z aktuálnej pozície sa realizuje na základe pravdepodobnosti $P(\tau_{i,j})$, ktorá je vypočítaná podľa vzťahu (1). Po inicializačnom generovaní všetkých trás sa vypočíta dĺžka každej jednej ako súčet čiastkových úsekov medzi uzlovými bodmi, ktoré na trase ležia. Príspevok ku feromónovej stope od každej cesty je daný vzťahom

$$d\tau_i = \frac{1}{f_i} \quad (2)$$

f_i – dĺžka cesty mravca i zmenšená o upravenú minimálnu cestu,

$$f_i = f_i - \varepsilon \cdot f_{\min} \quad (3)$$

ε – koeficient minimálnej cesty,

f_{\min} – minimálna cesta.

Koeficient minimálnej cesty ε vyjadruje mieru zohľadnenia dĺžky aktuálne nájdenej minimálnej cesty ku aktuálnej ceste, čím sa zabezpečí vyšší príspevok ku feromónovej stope pre lepšie riešenia. Je vhodné vyberať hodnoty ε z intervalu $(0,8; 1)$, pretože sa tým zamedzí deleniu nulou vo vzťahu (2), čo môže nastať ak je aktuálna cesta zároveň minimálna a $\varepsilon = 1$.

Feromónová stopa sa následne upraví podľa vzťahu

$$\tau_{i,j} = (1 - e)\tau_{i,j} + d\tau_{i,j} \quad (4)$$

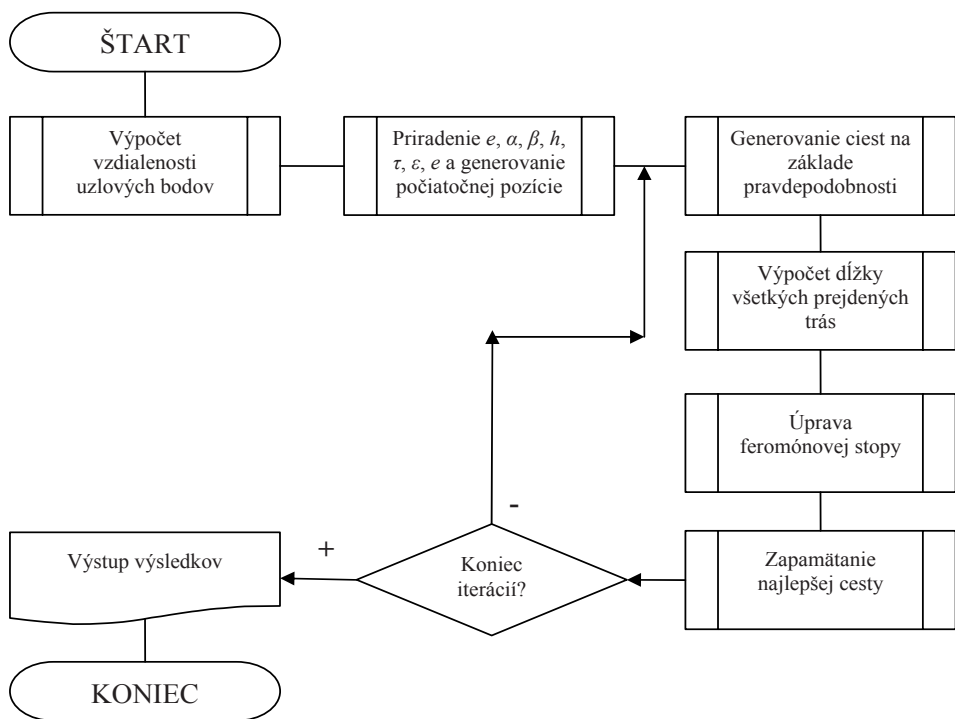
e – koeficient evaporácie.

Vzťah (4) popisuje zmenu aktuálnej feromónovej stopy. V prírode sa vplyvom prostredia a poveternostných podmienok feromón odparuje a znižuje sa jeho intenzita. Pri simulácii tento jav nahrádza koeficient evaporácie e , ktorý predstavuje mieru zníženia aktuálnej hodnoty feromónu. Ak bola cesta použitá, pripočíta sa k nej feromónový prírastok $d\tau_{i,j}$.

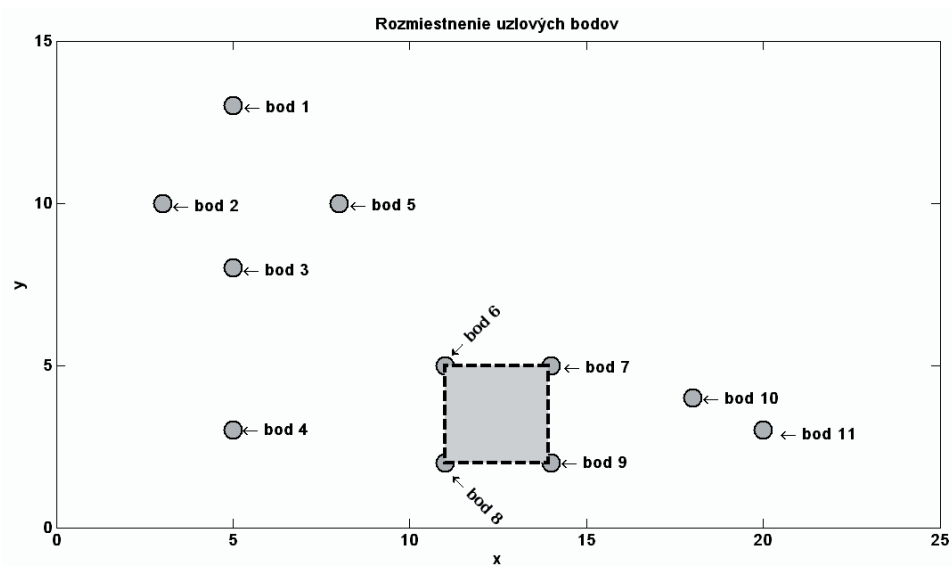
Čím je prejdená cesta dlhšia, tým je príspevok k nej menší a pomocou koeficientu evaporácie sa stáva menej významná pri ďalšom rozhodovaní o výbere cesty. Pravdepodobnosť jej výberu $P(\tau_{i,j})$ sa znižuje až kým nezostane v pamäti mravcov takmer zabudnutá. V protiklade k tomu majú kratšie cesty väčšie a častejšie príspevok ku feromónovej stope, pretože pravdepodobnosť ich výberu sa počíta na základe prevrátených hodnôt ich dĺžok a so zvyšujúcou sa pravdepodobnosťou po nich prejde aj viac mravcov.

Algoritmus optimalizácie pomocou kolónie mravcov je znázornený na obrázku 1.

Modelový príklad riešenej úlohy s vyznačenými uzlovými bodmi je znázornený na obrázku 2. Zobrazený štvorec tvorí prekážku, cez ktorú nie je povolené sa pohybovať. Jeho rohy tvoria body 6, 7, 8, 9, cesty 6-9, 9-6, 8-7, 7-8 a tiež cesty prechádzajúce cez tento štvorec sú zvolené s veľkou dĺžkou, pravdepodobnosť, že si ich nejaký mravec vyberie je teda veľmi malá.

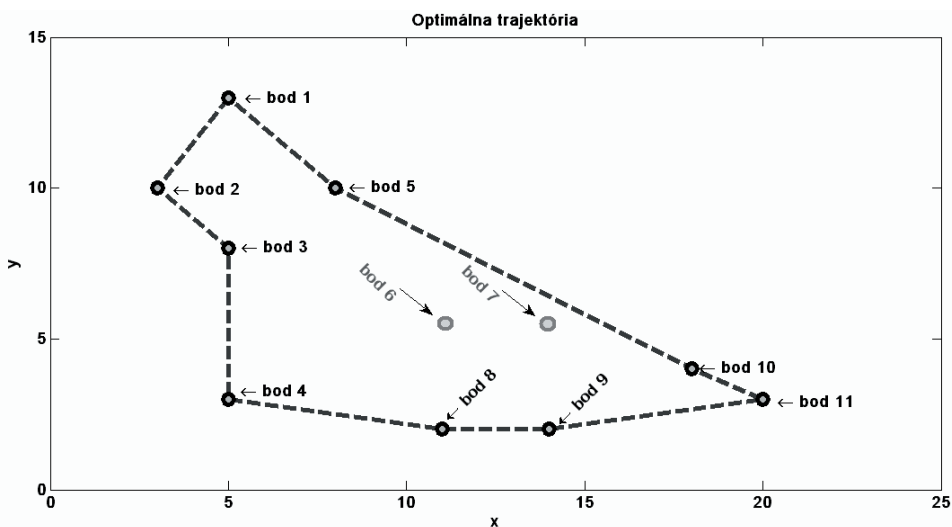


Obrázok 1 Algoritmus optimalizácie pomocou kolónie mravcov



Obrázok 2 Rozmiestnenie uzlových bodov pre ilustračný príklad

Inicializácia matice viditeľnosti h_{ij} je vykonaná na základe obrátených dĺžok, čiže $h_{ij} = 1/l_{ij}$, každý prvok matice ciest τ_{ij} sa po inicializácii rovná hodnote 0,0001. Voliteľné koeficienty sú určené nasledovne: $\alpha = 1$, $\beta = 5$, $\varepsilon = 0,96$, $e = 0,1$. Počet mravcov hľadajúcich optimálne riešenie a počet iterácií je 100. Optimálna nájdená trajektória je znázornená na obrázku 3.



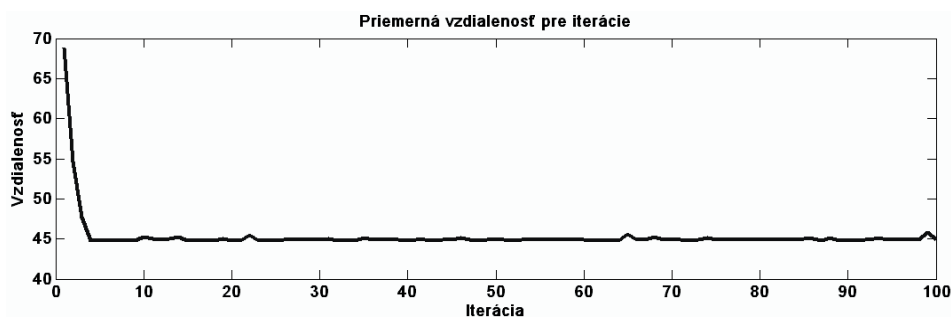
Obrázok 3 Nájdená optimálna trajektória

Dĺžka nájdenej optimálnej trajektórie pre modelový príklad je 44,7401 jednotiek dĺžky. Body 6, 7, 8 a 9 sú vrcholy štvorca tvoriaceho prekážku v manipulačnom priestore. Ak sa bude uvažovať, že body 6 a 7 ležia vo vnútri objektu ohraničeného vonkajšími uzlovými bodmi, tak trajektória môže prechádzať z bodu 5 priamo do bodu 10, keďže body 6 a 7 sa nemusia dosiahnuť. Okrajové body 8 a 9 ležia mimo tohto objektu, preto je potrebné dosiahnuť aj ich polohu, aby sa prekážka obišla najkratším možným variantom.

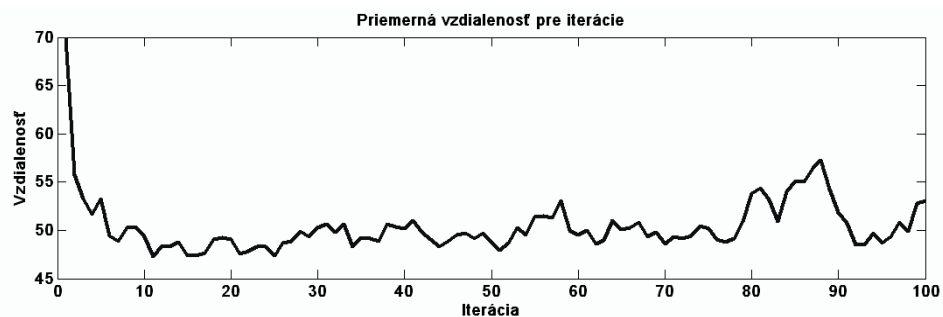
Riešená úloha nie je náročná na výpočet a ukázalo sa, že už pri druhej iterácii niektorí z jedincov našli najlepšie riešenie. V priebehu vývoja bol výber týchto ciest pravdepodobnejší ako ostatných, pretože mali výraznejšiu feromónovú stopu. Z priebehu iterácií (obrázok 4) je viditeľné zlepšovanie nájdeného optimálneho riešenia počas vývoja a zvyšovanie najlepších variantov. Už v štvrtej iterácii je nájdená priemerná cesta najkratšia, pričom sa do poslednej iterácie nenašiel žiadny lepší variant. V niektorých iteráciách je priemerná dĺžka cesty väčšia než je optimálna. Tu sa prejavuje to, že pravdepodobnosť výberu optimálnej trasy je síce vysoká, no pravdepodobnosť výberu inej trasy ešte stále nie je nulová. Preto v zriedkavých prípadoch si niektorý jedinec mohol vybrať aj inú než optimálnu cestu.

Ak sa zvolí koeficient minimálnej cesty $\varepsilon = 0,85$, z priebehu iterácií (obrázok 5) je viditeľné nesystematické uprednostňovanie najlepších riešení, keďže priemerné dĺžky ciest sa neustálili na minimálnych hodnotách, hoci minimálne riešenie bolo nájdené. Podobný

jav možno pozorovať aj pri hodnote koeficientu efektívnosti ciest $\beta = 1$, kedy neboli jednoznačne zvýhodňované najlepšie riešenia.



Obrázok 4 Priemerná vzdialenosť nájdených riešení pre $\beta = 5$



Obrázok 5 Priemerná vzdialenosť nájdených riešení pre $\beta = 1$

3. ZÁVER

V predloženom algoritme optimalizácie tvaru trajektórie prechádzajúcej cez uzlové body sa s výhodou využil algoritmus optimalizácie pomocou kolónie mravcov, ktoré hľadajú najlepšie možné riešenie zadanej úlohy. Matica viditeľnosti h_{ij} bola v modelovanom príklade počítaná na základe obrátených vzdialeností medzi jednotlivými bodmi, pričom sa nepovolené cesty zadali ako veľmi dlhé, čím sa znížila pravdepodobnosť ich výberu. Matica viditeľnosti však nemusí byť počítaná len na základe dĺžok úsekov, vhodným parametrom pre jej odvodenie môže byť aj energetická náročnosť na pohyb po jednotlivých úsekoch, príp. iné kritérium zvýhodňujúce niektoré vybrané cesty.

LITERATÚRA

DORINGO, M., STÜTZLE, T.: 2004. *Ant colony optimization*. Cambridge: MIT Press, 2004, 305 s. ISBN 978-0-262-04219-2.

- Matlab Central. 2007. *Solving TSP with ant colony system – m.file example*. Dostupné na internete <<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/15049-solving-tsp-with-ant-colony-system>>.
- ŠIPOŠ, L.: 2009. Genetické algoritmy a evolučná biológia. In.. *Informatika a automatizácia v riadení procesov, V. vedecká konferencia*, Zvolen, 10. September 2009. Zvolen: Vydavateľstvo TU vo Zvolene, 2009, s. 115–123. ISBN 978-80-228-2029-5.
- ŠTOLLMANN, V.: 2010. *Vyvažovanie liniek*. Vedecká monografia, Ostrava: Ámos, 2010. ISBN 978-80-904523-4-3.
- YASEEN, S. G., AL-SLAMY, N. M. A.: 2008. Ant colony optimization. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 2008, roč. 8, č. 6, s. 351–357. ISSN 1738-7906.

Kontaktná adresa:

Ing. Peter Koleda

doc. Ing. Ľubomír Naščák, CSc.

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

OPTIMALIZÁCIA VÝROBNÉHO PROCESU DREVENÝCH STAVEBNÍC

THE OPTIMIZATION OF WOOD TOYS PRODUCTION PROCESS

Mária KRAJČOVIČOVÁ

ABSTARCT: The creation of the mathematical and optimizing models is inseparable part of productions processes. In present time exist a lot of productions, which economical effect is not desired. In this article we solve the problem of the critical narrow places in production. The results from the research, which are described in this article, are applicable for every production process. Very important is to set the input conditions for the concrete production process. In the article is the example of those applications.

Key words: optimization, manipulation with material, wood toys, production, mathematical methods

ABSTRAKT: Tvorba matematických a optimalizačných modelov sa stáva neoddeliteľnou súčasťou výrobných procesov. Stále však existuje veľa rozbehnutých výrobných, ktoré nefungujú s požadovaným efektom. Tento príspevok sa zaoberá riešením optimalizácie výrobného procesu ako aj hľadáním úzkych miest. Výsledky, ktoré sú v ňom prezentované, je možné aplikovať pri nastavení požadovaných vstupných podmienok na každý výrobný proces. V príspevku je uvedený príklad takejto aplikácie.

Kľúčové slová: optimalizácia, manipulácia s materiálom, drevené stavebnice, výrobný proces, matematické metódy

1. ÚVOD

Cieľom každej výroby je čo najvyšší možný zisk. Dosiachnutie pozitívnych ekonomických výsledkov si ale vyžaduje správne nastaviť výrobný proces, ako aj procesy, ktoré ho ovplyvňujú. Na dosiahnutie, čo najlepších výsledkov je možné použiť matematické modely, výrobné programy alebo optimalizačné programy. S ich prispením sa dá výroba nastaviť tak, aby vyhovovala požiadavkám trhu a aby zhodnotenie jej výsledkov bolo, čo najlepšie kvalitatívne ako aj ekonomicky ohodnotené.

Prosperita podnikov závisí predovšetkým od včasného a správneho rozhodovania ich manažmentu o spôsobe získania a veľkosti finančných, surovinových a tovarových zdrojov. Ďalej závisí od efektívnosti práce jednotlivých pracovísk a pracovníkov vo výrobe; od riadenia tovarových, surovinových zásob a odbytu; od lokalizácie odberateľov a výšky prepravných nákladov; od prostredia, v ktorom sa podnik nachádza, ako aj od iných faktorov (SUJOVÁ 2006).

2. METODIKA RIEŠENIA OPTIMALIZÁCIE PROCESU VÝROBY

Pri riešení optimalizácie materiálového toku sa vychádzalo z poznatkov o logistike, ale aj z iných vedných odborov, nakoľko v drevárskom priemysle, a teda vo výrobe drevených výrobkov sa nenachádza dostatočné množstvo informácií. Je veľmi prospešné, priam nevyhnutné, zaoberať sa aj touto problematikou. Pre riešenie optimalizácie výrobného procesu bol navrhnutý nasledovný metodický postup:

1. analýza a pomenovanie základných podmienok optimalizácie (technologické, ekonomické, časové, kvalitatívne a aj kvantitatívne),
2. vplyv jednotlivých kritérií na priebeh optimalizačného procesu materiálového toku,
3. matematický model optimalizácie,
4. výber a zhodnotenie najvhodnejšieho riešenia,
5. zovšeobecnenie a vedecký prínos.

V prvom rade bolo potrebné definovať model lineárneho programovania. Krátky úvod do problematiky spolu s popisom jednotlivých metód a postupov.

Úlohou lineárneho programovania je nájsť vektor

$$\vec{x} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), \quad (1)$$

pre ktoré nadobúda lineárna funkcia:

$$z(\vec{x}) = \vec{c} \cdot \vec{x}$$

kde $\vec{c} \in R^n$ (2)

maximálne (respektíve) minimálne hodnoty za ohraničujúcich podmienok

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &\begin{array}{l} \geq b_1, \\ \leq \\ \geq \\ \leq \end{array} b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &\begin{array}{l} \geq b_2, \\ \leq \\ \geq \\ \leq \end{array} b_2, \\ \dots\dots\dots &\dots\dots\dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &\begin{array}{l} \geq b_m, \\ \leq \\ \geq \\ \leq \end{array} b_m, \end{aligned} \quad (3)$$

kde na mieste znakov $\begin{array}{l} \geq \\ < \end{array}$ môže byť ľubovoľný zo symbolov $\leq, \geq, =$.

3. OPTIMALIZÁCIA VÝROBY DREVENÝCH STAVEBNÍC GRINGO – IMAGO – PEDRO

V prvej praktickej fáze boli zosumarizované možnosti a podmienky výroby drevených stavebníc VEVA (obr. 1) od polovýrobovkov, ich popisu, popisu jednotlivých operácií, možností strojov a ich analýzy až po zosumarizovanie vstupných parametrov.

V druhej fáze boli zhodnotené všetky podmienky, ktoré vplývajú na optimalizačný proces.

Z uvedeného boli vytvorené tabuľky, ktoré všetky tieto informácie skompletizovali. V tabuľkách 1, 2, 3 sú zosumarizované výrobné časy jednotlivých prvkov. Pričom v riadkoch sú uvedené stroje a v stĺpcoch jednotlivé prvky. Stroje sú označené od S1 do S9 a prvky podľa stavebníc. Jednotlivé prvky sú nazvané od G1 – do G11, I1 do I18 a P1 až P2 – všetky prvky sú označené jednotne ako H1 – H31. Ďalej sú v tabuľke 3 zadefinované aj ceny jednotlivých prvkov, maximálny čas, ktorým môžu jednotlivé stroje pracovať za deň ako aj celkový čas výroby jednotlivých prvkov. V tabuľke 4 sú zadefinované počty prvkov v jednotlivých stavebniciach. V riadkoch sú uvedené jednotlivé prvky od H1 do H31 a v stĺpcoch stavebnice, ktoré sme pomenovali od D1 do D11. Ďalej sú tam zosumarizované celkové počty prvkov v stavebniciach ako aj ceny stavebníc. Z nich boli zostavené matice, ktoré tak tvorili prvý bod optimalizačného matematického modelu. S maticami bolo potom potrebné postupovať podľa optimalizačných možností. Použitím metód lineárneho programovania bol vytvorený matematický model v programe MATEMATIKA.



Obr. 1 Stavebnice VEVA

Tabuľka 1 k Matici C

Prvky stavebnice Gringo		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	bi
Stroje S _i /Prvky H _i		H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	
Omiotací stroj	S1	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	200	28 800
Skracovacia píla	S2	605	605	605	605	605	605	618	618	1226	618	613	28 800
Vítačka	S3	240	240	240	290	290	290	180	180	155	180	0	28 800
Drážkovací stroj	S4	188	188	188	280	290	290	154	154	0	154	154	28 800
Rozmietací stroj	S5	0	0	0	0	0	0	0	0	133	0	0	28 800
Sústruh	S6	0	0	0	0	0	0	0	0	720	0	0	28 800
Frézovací stroj	S7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	720	720	28 800
lamelovací stroj	S8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28 800
Omieľací bubon	S9	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	28 800

Tabuľka 2 k Matici C

Prvky stavebnice Imago		I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	I11	I12	I13	I14	I15	I16	I17	I18	bi	
Stroje S _i /Prvky H _i		H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29		
Omiotací stroj	S1	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	200	200	140		28 800	
Skracovacia píla	S2	605	605	605	605	605	615	605	615	605	605	605	605	605	605	605	613	613	613		28 800
Vítačka	S3	340	440	415	340	155	155	230	205	280	330	530	180	205	230	505	0	0	180		28 800
Drážkovací stroj	S4	178	178	154	142	0	142	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	154	0	142	28 800
Rozmietací stroj	S5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		28 800
Sústruh	S6	0	0	0	0	840	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	720	28 800
Frézovací stroj	S7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	720	720		28 800
lamelovací stroj	S8	0	0	0	0	0	0	145	145	145	145	145	145	145	145	145	145	0	0		28 800
Omieľací bubon	S9	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	28 800

Tabuľka 3 k Matici C

Prvky stavebnice Pedro		P1	P2	bi
Stroje Si/Prvky Hj		H30	H31	
Omietač stroj	S1	140	140	28 800
Skracovacia píla	S2	605	605	28 800
Vrtáčka	S3	0	0	28 800
Drážkovací stroj	S4	192	192	28 800
Rozmietací stroj	S5	0	0	28 800
Sústruh	S6	0	0	28 800
Frézovací stroj	S7	0	0	28 800
lamelovací stroj	S8	0	0	28 800
Omielací bubon	S9	36	36	28 800

Tabuľka 4 k Matici B

Prvky v stavebniciach		Gringo											Imago			Pedro			celkový počet prvkov
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D9	D10	D11				
G1	H1	0	3	4	12	18	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	61		
G2	H2	1	4	4	12	18	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60		
G3	H3	0	1	4	12	18	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	57		
G4	H4	0	0	1	8	12	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37		
G5	H5	1	1	2	12	18	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	59		
G6	H6	0	0	3	12	18	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	57		
G7	H7	1	4	4	12	18	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	61		
G8	H8	0	1	4	12	18	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	58		
G9	H9	1	1	4	12	18	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	59		
G10	H10	4	4	4	12	20	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	68		
G11	H11	2	4	2	4	12	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30		
I1	H12	0	0	0	0	0	0	1	8	8	0	0	0	0	0	0	7		
I2	H13	0	0	0	0	0	0	1	7	7	0	0	0	0	0	0	8		
I3	H14	0	0	0	0	0	0	2	4	4	0	0	0	0	0	0	6		
I4	H15	0	0	0	0	0	0	1	4	4	0	0	0	0	0	0	5		
I5	H16	0	0	0	0	0	0	3	6	6	0	0	0	0	0	0	9		
I6	H17	0	0	0	0	0	0	4	8	8	0	0	0	0	0	0	12		
I7	H18	0	0	0	0	0	0	2	4	4	0	0	0	0	0	0	6		
I8	H19	0	0	0	0	0	0	0	4	4	0	0	0	0	0	0	4		
I9	H20	0	0	0	0	0	0	2	4	4	0	0	0	0	0	0	6		
I10	H21	0	0	0	0	0	0	0	4	4	0	0	0	0	0	0	4		
I11	H22	0	0	0	0	0	0	0	6	6	0	0	0	0	0	0	6		
I12	H23	0	0	0	0	0	0	4	6	6	0	0	0	0	0	0	10		
I13	H24	0	0	0	0	0	0	1	4	4	0	0	0	0	0	0	5		
I14	H25	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	2		
I15	H26	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1		
I16	H27	0	0	0	0	0	0	2	4	4	0	0	0	0	0	0	6		
I17	H28	0	0	0	0	0	0	20	50	50	0	0	0	0	0	0	70		
I18	H29	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1		
P1	H30	0	0	0	0	0	0	0	0	42	34	168					284		
P2	H31	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	12					28		
Počet prvkov v jednej stavebnici		10	21	36	120	180	240	43	125	44	88	180							
Cena stavebnice		11,9eur	29,04eur	35,7 eur	88,05 eur	97,58 eur	133,28 eur	15 eur	25eur	35eur	60 eur	100 eur							

Legenda tabuliek 1,2,3,4:

- G1-G11 – prvky stavebnice GRINGO
- I1-I18 – prvky stavebnice IMAGO
- P1-P2 – prvky stavebnice PEDRO
- Si – stroje
- Hj – prvky
- xij – čas použitý na stroji Si na výrobok Hj v sekundách
- bi – max čas akým musí pracovať stroj Si v sekundách
- cj – cena stavebníc Hj v eurách

Pre analýzu výrobného procesu bolo potrebné zaoberať sa časovými údajmi výrobných zariadení pre jednotlivé stavebnice, čo znamenalo určiť maticu časových potrieb jednotlivých strojov na výrobu stavebníc.

Poznáme: Maticu **C** (tab. 5), ktorú tiež nazývame maticou spotreby časov jednotlivých strojov na výrobu prvkov. V stĺpcoch sú uvedené jednotlivé prvky od H1 do H31 a v riadkoch stroje od S1 do S9, pričom políčka v matici sú vyplnené hodnotami výrobných časov na jednotlivých strojoch pri všetkých prvkoch a Maticu **B** (tab. 6) – maticu spotreby jednotlivých prvkov, ktorá obsahuje počty kusov jednotlivých prvkov od H1 do H31 v jednotlivých typoch stavebníc od D1 do D11 na zloženie príslušnej stavebnice.

$$C_{9,31} = (c_{ik}), c_{ik} \dots - \text{spotreba času } i\text{-teho stroja na výrobu } k\text{-teho prvku} \quad (1)$$

Tab. 5 Matica **C**

	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	H31	bi	
S1	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	200	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	200	200	140	140	140	28800	
S2	605	605	605	605	605	605	618	618	1226	618	613	605	605	605	605	605	615	605	615	605	605	605	605	605	605	605	605	613	613	613	605	605	28800
S3	240	240	240	290	290	290	180	180	155	180	0	340	440	415	340	155	155	230	205	280	330	530	180	205	230	505	0	0	180	0	0	28800	
S4	188	188	188	280	290	290	154	154	0	154	154	178	178	154	142	0	142	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	154	0	142	192	192	28800
S5	0	0	0	0	0	0	0	0	133	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28800	
S6	0	0	0	0	0	0	0	0	720	0	0	0	0	0	0	840	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	720	0	0	28800
S7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	720	720	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	720	720	0	0	28800
S8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	145	145	145	145	145	145	145	145	0	0	0	0	0	0	28800
S9	36	36s	36s	36s	36s	36s	36s	36s	36s	36s	36s	36s	36s	36s	36s	36s	36s	36s	36s	36s	36s	36s	36s	36s	36s	36s	36s	36s	36s	36s	36s	28800	

$$B_{31,11} = (b_{kj}), b_{kj} \dots - \text{spotreba } k\text{-teho prvku na } j\text{-tu stavebnicu} \quad (2)$$

Tab. 6 Matica **B**

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11
H1	0	3	4	12	18	24	0	0	0	0	0
H2	1	1	4	12	18	24	0	0	0	0	0
H3	0	1	4	12	16	24	0	0	0	0	0
H4	0	0	1	8	12	16	0	0	0	0	0
H5	1	2	2	12	18	24	0	0	0	0	0
H6	0	0	3	12	18	24	0	0	0	0	0
H7	1	4	4	12	16	24	0	0	0	0	0
H8	0	2	4	12	16	24	0	0	0	0	0
H9	1	2	4	12	16	24	0	0	0	0	0
H10	4	4	4	12	20	24	0	0	0	0	0
H11	2	2	2	4	12	8	0	0	0	0	0
H12	0	0	0	0	0	0	1	6	0	0	0
H13	0	0	0	0	0	0	1	7	0	0	0
H14	0	0	0	0	0	0	2	4	0	0	0
H15	0	0	0	0	0	0	1	4	0	0	0
H16	0	0	0	0	0	0	3	6	0	0	0
H17	0	0	0	0	0	0	4	8	0	0	0
H18	0	0	0	0	0	0	2	4	0	0	0
H19	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0
H20	0	0	0	0	0	0	2	4	0	0	0
H21	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0
H22	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0
H23	0	0	0	0	0	0	4	6	0	0	0
H24	0	0	0	0	0	0	1	4	0	0	0
H25	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
H26	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
H27	0	0	0	0	0	0	2	4	0	0	0
H28	0	0	0	0	0	0	20	50	0	0	0
H29	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
H30	0	0	0	0	0	0	0	0	42	84	168
H31	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	12

Potom matica spotreby času jednotlivých strojov na skompletizovanie stavebníc bola $\mathbf{A}_{9,11} = (a_{ij})$, kde a_{ij} je spotreba času i-teho stroja na skompletizovanie j-tej stavebnice. Z uvedeného vyplynula potreba nájsť tie prvky, ktoré budú definovať maticu \mathbf{A} (tab. 7). Hľadajme prvky a_{ij} .

$$a_{ij} = c_{i1} \cdot b_{1j} + c_{i2} \cdot b_{2j} + \dots + c_{i31} \cdot b_{31j}, \text{ teda}$$

$$\mathbf{A}_{9,11} = \mathbf{C}_{9,31} \times \mathbf{B}_{31,11} \quad (4)$$

Tab. 7 Matica \mathbf{A}

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11
S1	1520	3060	5160	17040	25920	34080	7340	20740	6160	12320	25200
S2	6750	14093	24436	80552	119608	161104	26231	76185	26620	53240	108900
S3	1585	3890	7400	26260	38240	52520	4980	20715	0	0	0
S4	1556	3368	6142	22128	33432	44256	1682	5392	8448	16896	34560
S5	133	266	532	1596	2128	3192	0	0	0	0	0
S6	720	1440	2880	8640	11520	17280	2520	5760	0	0	0
S7	4320	4320	4320	11520	23040	23040	15840	38880	0	0	0
S8	0	0	0	0	0	0	1305	5075	0	0	0
S9	360	756	1296	4320	6480	8640	1548	4500	1584	3168	6840

Matematický model pre analýzu výrobného procesu stavebníc potom vyzeral nasledovne (FELLNEROVÁ, ZIMKA 2000):

$$\max z(\mathbf{x}) = \mathbf{m} \cdot \mathbf{x} \quad (5)$$

$$\text{za podmienok } \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b}, \quad x_j \geq 0 \quad (6)$$

kde vstupné údaje boli:

\mathbf{m} – vektor cien stavebníc

\mathbf{b} – vektor dispozičných časov jednotlivých strojov

\mathbf{A} – matica časovej spotreby strojov na kompletizáciu stavebníc

Výstup je: \mathbf{x} – vektor výrobného programu

x_j – počet D_j

Pre analýzu boli použité programy: PRVYRGIP a VGIPOB

1. LinearProgramming PRVYRGIP (tento program nám optimalizuje výrobný proces, pričom v jeho výstupe máme počet stavebníc vyrobených za mesiac a zisk, ktorý môžeme ich predajom dosiahnuť).

Vstupné údaje do tohto programu sú typu:

$$\{[-\mathbf{m}] \mathbf{A}, \{\mathbf{b}, -1\} \{l_1, l_2, \dots, l_n\}\}, \text{ kde } l_j \leq x_j \quad (7)$$

Ak na stavebnice nie sú kladené žiadne podmienky, alebo by sme chceli dosiahnuť, aby jedna stavebnica bola vyrábaná v určitom počte kusov stavebníc a na ostatné stavebnice nekladíme žiadne podmienky, použijeme tento optimalizačný program.

2. LinearProgramming VGIPOB (tento program nám optimalizuje výrobný proces obmedzovaním niektorých typov stavebníc).

- LEGENDA: ● – MATICA ČASOVEJ SPOTREBY STROJOV NA KOMPLETIZÁCIU STAVEBNÍC
 ● – LINEÁRNE PROGRAMOVANIE
 ● – VEKTOR CIEN SKLADAČIEK
 ● – VEKTOR DISPOZIČNÝCH ČASOV JEDNOTLIVÝCH STROJOV
 ● – VEKTOR OBMEDZUJÚCICH PODMIENOK VÝROBNÉHO PRORGAMU
 ● – MATICA P
 ● – VEKTOR OPTIMÁLNEHO VÝROBNÉHO PROGRAMU
 ● – ZISK ZA MESIAC

Mathematica Version Advisory
 This notebook was created in an earlier version of Mathematica.
 Most notebooks run without change. This tool scans for possible issues and suggests changes.

Scan for possible issues Do not scan this notebook Never scan notebooks

```

Clear[R]
R = {{(1320, 3860, 5160, 17040, 25920, 34080, 7340, 20740, 6160, 12320, 25200), (6750, 14093, 24436, 80552, 119408, 161104, 26231, 76185, 26620, 53240, 108900),
      (1585, 3890, 7400, 26260, 38240, 52520, 4980, 20715, 0, 0, 0), (1556, 3368, 6142, 22128, 33432, 44256, 1682, 5392, 8448, 16896, 34560),
      (133, 266, 532, 1596, 2128, 3192, 0, 0, 0, 0), (720, 1440, 2880, 8640, 11520, 17280, 2520, 5760, 0, 0, 0), (4320, 4320, 4320, 11520, 23040, 23040, 15840, 38880, 0, 0, 0),
      (0, 0, 0, 0, 0, 1305, 5075, 0, 0, 0), (360, 756, 1296, 4320, 6480, 8640, 1548, 4500, 1584, 3168, 6840)}
LinearProgramming[{-11.9, -19.04, -35.7, -88.06, -97.58, -133.28, -15, -25, -35, -60, -100}, R,
  {{(576000, -1), (576000, -1), (576000, -1), (576000, -1), (576000, -1), (576000, -1), (576000, -1)},
  {{(0, 50), (0, 50), (0, 50), (0, 50), (0, 50), (0, 50), (0, 50), (0, 50), (0, 50), (0, 50)},
  P = #.(11.9, 19.04, 35.7, 88.06, 97.58, 133.28, 15, 25, 35, 60, 100);
MatrixForm[P]
{{(1520, 3060, 5160, 17040, 25920, 34080, 7340, 20740, 6160, 12320, 25200), (6750, 14093, 24436, 80552, 119408, 161104, 26231, 76185, 26620, 53240, 108900),
  (1585, 3890, 7400, 26260, 38240, 52520, 4980, 20715, 0, 0, 0), (1556, 3368, 6142, 22128, 33432, 44256, 1682, 5392, 8448, 16896, 34560),
  (133, 266, 532, 1596, 2128, 3192, 0, 0, 0, 0), (720, 1440, 2880, 8640, 11520, 17280, 2520, 5760, 0, 0, 0),
  (4320, 4320, 4320, 11520, 23040, 23040, 15840, 38880, 0, 0, 0), (0, 0, 0, 0, 0, 1305, 5075, 0, 0, 0), (360, 756, 1296, 4320, 6480, 8640, 1548, 4500, 1584, 3168, 6840)}
{50, 0, 9.76019, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}
943.439
  
```

- LEGENDA: ● – MATICA ČASOVEJ SPOTREBY STROJOV NA KOMPLETIZÁCIU STAVEBNÍC
 ● – LINEÁRNE PROGRAMOVANIE
 ● – VEKTOR CIEN SKLADAČIEK
 ● – VEKTOR DISPOZIČNÝCH ČASOV JEDNOTLIVÝCH STROJOV
 ● – VEKTOR OBMEDZUJÚCICH PODMIENOK VÝROBNÉHO PRORGAMU
 ● – MATICA P
 ● – VEKTOR OPTIMÁLNEHO VÝROBNÉHO PROGRAMU
 ● – ZISK ZA MESIAC

Mathematica Version Advisory
 This notebook was created in an earlier version of Mathematica.
 Most notebooks run without change. This tool scans for possible issues and suggests changes.

Scan for possible issues Do not scan this notebook Never scan notebooks

```

Clear[A]
A = {{(1520, 3060, 5160, 17040, 25920, 34080, 7340, 20740, 6160, 12320, 25200), (6750, 14093, 24436, 80552, 119608, 161104, 26231, 76185, 26620, 53240, 108900),
      (1585, 3890, 7400, 26260, 38240, 52520, 4980, 20715, 0, 0, 0), (1556, 3368, 6142, 22128, 33432, 44256, 1602, 5392, 8440, 16896, 34560),
      (133, 266, 532, 1596, 2128, 3192, 0, 0, 0, 0), (720, 1440, 2880, 8640, 11520, 17280, 2520, 5760, 0, 0, 0), (4320, 4320, 4320, 11520, 23040, 23040, 15840, 38880, 0, 0, 0),
      {0, 0, 0, 0, 0, 1305, 5075, 0, 0, 0}, {360, 756, 1296, 4320, 6480, 8640, 1548, 4500, 1584, 3168, 6840}}
LinearProgramming[{-11.9, -19.04, -35.7, -88.06, -97.58, -133.28, -15, -25, -35, -60, -100}, A,
  {(576000, -1), (576000, -1), (576000, -1), (576000, -1), (576000, -1), (576000, -1), (576000, -1), (576000, -1), (576000, -1), (576000, -1)}, {69.7, 0, 0, 0, 0, 4, 0, 0, 0, 0}]
P = 8. {11.9, 19.04, 35.7, 88.06, 97.58, 133.28, 15, 25, 35, 60, 100};
MatrixForm[P]

Out[10]= {{(1520, 3060, 5160, 17040, 25920, 34080, 7340, 20740, 6160, 12320, 25200), (6750, 14093, 24436, 80552, 119608, 161104, 26231, 76185, 26620, 53240, 108900),
          (1585, 3890, 7400, 26260, 38240, 52520, 4980, 20715, 0, 0, 0), (1556, 3368, 6142, 22128, 33432, 44256, 1602, 5392, 8440, 16896, 34560),
          (133, 266, 532, 1596, 2128, 3192, 0, 0, 0, 0), (720, 1440, 2880, 8640, 11520, 17280, 2520, 5760, 0, 0, 0), (4320, 4320, 4320, 11520, 23040, 23040, 15840, 38880, 0, 0, 0),
          {0, 0, 0, 0, 0, 1305, 5075, 0, 0, 0}, {360, 756, 1296, 4320, 6480, 8640, 1548, 4500, 1584, 3168, 6840}}

In[11]:= Out[10] MatrixForm
          890.49

Out[11]= 1815.4666666666667
          = 8. Out[11]

Out[14]= {135435., 576000., 130536., 115320., 9281.94, 60328.1, 364849., 5220., 31316.1}
  
```

- – Doplňený príkaz: $Q = A \cdot \text{Out}[v]$
- – $\text{Out}[v]$ (v tomto prípade 11)

ZÁVER

Z riešenia nastavenia výrobného programu ako aj obmedzujúcich podmienok je zjavné, že nesmieme zabúdať na dispozičný čas strojov, a preto je potrebné pre výrobu zvoliť správny počet strojov, ktorých pracovný čas nebude natoľko obmedzujúci ako pri riešení výroby stavebníc GRINGO, IMAGO a PEDRO. Všetky spomenuté skutočnosti nám potom vytvárajú zisk z predaja, ktorý ale po zhodnotení skutočností, ktorými sú výdavky na zamestnancov, nákup polotovarov, vyťaženie všetkých strojov v tom istom čase, manipulácia s materiálom, vypovedá o tom, že momentálne nastavenie výroby je nerentabilné. Použitím nášho matematického modelu vieme navrhnúť zmenu, ktorá sa týka hlavne strojov, na ktorých sú stavebnice vyrábané. Podmienky, ktoré je možné meniť v prípade používania tohto matematického modelu, je veľmi jednoduché nastaviť vzhľadom na konkrétnu výrobu. Keďže našou úlohou bolo vytvoriť taký matematický model, ktorý by pri podobných typoch výroby poukázal na rentabilitu, slabé miesta vo výrobe a ktorý by sa použitím obmedzujúcich podmienok dal využiť pre nastavenie konkrétnej výroby, je dôležité podotknúť, že tento matematický model vytvorený lineárnym programovaním v programe Matematika spĺňa nami vytýčené ciele.

LITERATÚRA

- [1] KRAJČOVIČOVÁ, M. 2010. *Optimalizácia materiálového toku pri výrobe drevených stavebníc*. Dizertačná práca, 2010, s. 123.
- [2] FELLNEROVÁ, P. – ZIMKA, R. 2000. *Lineárne programovanie v ekonómii*. Banská Bystrica: Ekonomická fakulta UMB, Občianske združenie Ekonómia, 2000. ISBN 80-8055-453-6.

- [3] SUJOVÁ, E. 2006. Matematické modelovanie ako prostriedok manažérskeho rozhodovania v podmienkach rizika. In *Trendy lesníckej, drevárskej a environmentálnej techniky a jej aplikácie vo výrobnom procese* : medzinárodná vedecká konferencia k 10. výročiu vzniku FEVT Zvolen, 5.–7. september 2006. – Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2006. – ISBN 80-228-1649-3. – S. 123–128.
- [4] BIGOŠ, P. – KISS, I. – RITÓK, J. 2002. *Materiálové toky a logistika*. Prešov : Vydavateľstvo Michala Vaška, 2002. ISBN 80-7165-362-4.
- [5] DANTZING, G. B. 2002. Linear programming. In *Operations research*. 2002, 50, p. 42–47.
- [6] DEKRÉT, A. – HUSÁRIK, F. – SENKO, E. 1991. *Matematika I., Lineárna algebra a jej aplikácie*. Zvolen : VŠLD, 1991. ISBN 80-228-0136-4.

Kontaktná adresa:

Ing. Mária Krajčovičová, PhD.
Katedra drevárskych strojov a zariadení
Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky
Technická univerzita vo Zvolene
T. G. Masaryka 24
960 53 Zvolen
e-mail: krajcovicova@vsld.tuzvo.sk

DETERMINATION OF THE OXIDATIVE STABILITY OF VEGETABLE OIL – BASED LUBRICANTS

STANOVENIE OXIDAČNEJ STABILITY MAZÍV NA RASTLINNEJ BÁZE

Marián KUČERA¹⁾ – Miroslav ROUSEK²⁾

ABSTRACT: In this article, two different vegetable oils were oxidized at seven different temperatures (isothermal conditions) by pressure differential scanning calorimetry (PDSC) and Rancimat method. The PDSC and Rancimat experiments were carried out at a temperature in the range of 100–160 °C. From resulting PDSC exotherms their times to reach the peak maximum (τ_{PDSC}) were determined and used for the assessment of the oxidative stability of the samples. Similarly the measured Rancimat induction times (τ_{Rancimat}) were used. As PDSC and Rancimat results were obtained at different temperatures the equations for temperature extrapolations of the values τ_{PDSC} and τ_{Rancimat} have been proposed.

Keywords: vegetables oils, oxidative stability, Pressurized differential scanning calorimetry, Rancimat method

ABSTRAKT: V tomto príspevku boli oxidácií vystavené dva typy rastlinných olejov pri 7 rôznych konštatných teplotách s využitím tlakovej diferenčnej snímacej kalorimetrie (PDSC) a Rancimatovej metódy. Experimenty boli pri oboch metódach vykonané v rozsahu teplôt od 100 do 160 °C. Z výsledných PDSC exoterm boli stanovené časy potrebné k dosiahnutiu maximálnej hodnoty (τ_{PDSC}), ktoré boli následne použité pri hodnotení oxidačnej stability jednotlivých vzoriek. Podobným spôsobom boli namerané aj indukčné časy podľa Rancimata, (τ_{Rancimat}).

Kľúčové slová: rastlinné oleje, oxidačná stabilita, tlaková diferenčná snímacia kalorimetria, metóda podľa Rancimata

1. INTRODUCTION

The total market for all lubricants in Western Europe is about 1,6 billion gallons, according to several published estimations (Bremmer and Plonsker, 2008). Vegetable oils currently provide only about 0,1% of this lubricant market. Due to strict environmental regulations and a concern for depletion of world fossil fuel reserves, there is an increasing demand for environmentally friendly lubricants (Rudnick, 2006; Van Rensselar, 2010; Erhan et al., 2006; Shashidhara and Jayaram, 2010; Pardaul et al., 2011, Rousek, 2005).

Most current lubricants contain petroleum base stocks, which are toxic to environment and difficult to dispose of after use. Environmental concern continues to increase

of pollution from excessive lubricant use and disposal, especially total loss lubricants. Over 60% of the lubricants used in the world are lost to the environment. Vegetable oils have a capability to contribute towards the goal of energy independence and security since they are a renewable resource. Vegetable oils with high oleic content are considered to be potential candidates as substitutes for conventional mineral oil-based lubricating oils and synthetic esters (Campanella et al., 2010; Remmele and Widmann, 1999; Asadauskas et al., 1996).

Vegetable oils as lubricants are environmentally preferred to petroleum-based oil because they are biodegradable and non-toxic (Mendoza et al., 2011; Battersby, 2000). Other advantages include very low volatility due to the high molecular weight of the triglyceride molecule and excellent temperature-viscosity properties. Their polar ester groups are able to adhere to metal surfaces, and therefore, possess good lubricity. In addition, vegetable oils have high solubilizing power for polar contaminants and additive molecules.

On the other hand, vegetable oils have poor oxidative stability (Gapinski et al., 1994; Becker and Knorr, 1996) primarily due to the presence of bis-allylic protons. These active sites are highly susceptible to radical attack and subsequently the molecules undergo oxidative degradation and form polar oxy compounds. This phenomena eventually results in insoluble deposits and increases in oil acidity and viscosity. Vegetable oils also show poor corrosion protection (Ohkawa et al., 1995). The presence of ester functionality renders these oils susceptible to hydrolytic breakdown (Garcés et al., 2011). Excessive water contamination must be prevented since it can result in the formation of emulsions.

1.1 Mechanism of vegetable oil autoxidation

Oxidation stability of triglyceride-based vegetable oils is primarily limited by the degree of unsaturated double bonds. Unsaturated carbon-carbon bonds function as active sites for many reactions, including oxidation (Fox and Stachowiak, 2007)

A majority of triglyceride-based vegetable oils contain unsaturated fatty acids and are susceptible to oxidation. The greater the level of unsaturation, that is, the more double bonds, the more susceptible the oil becomes to oxidation (Adhvaryu et al., 2003). The chemical mechanism for the autoxidation of vegetable oils is well studied and a classical representation of the oil autoxidation mechanism is shown in Tab. 1 (Minami et al., 2009; Pardauil et al., 2011).

Tab. 1 Classical representation of the oil autooxidation mechanism

Initiation	$RH \rightarrow R \cdot + H \cdot$
Propagation	$R \cdot + O_2 \rightarrow ROO \cdot$ $ROO \cdot + RH \rightarrow ROOH + R \cdot$
Branching	$ROOH \rightarrow RO \cdot + \cdot OH$ $RO \cdot + RH + O_2 \rightarrow ROH + ROO \cdot$ $\cdot OH + RH + O_2 \rightarrow H_2O + ROO \cdot$
Termination	$ROO \cdot + ROO \cdot \rightarrow ROOH + O_2$ $ROO \cdot + R \cdot \rightarrow ROOH$ $R \cdot + R \cdot \rightarrow R - R$
Peroxide decomposition	$ROOH \rightarrow$ various lower molecular weight compounds
Polymerisation	$ROOH \rightarrow$ various higher molecular weight compounds

These reactions involve an end of the chain reaction, wherein peroxide decomposes to inert products commonly known as secondary oxidation products and the formation of nonradical products or the disproportionation of radicals occur. In highly oxidized fats and oils, aldehydes, ketones, furanones, lactones, hydrocarbons, organic acids and polymeric compounds are present (Ostrowska-Ligeza et al., 2010). Therefore, this reaction can be characterized by the emergence of sweet and unpleasant odors that worsen progressively until the oil or fat reaches the smell and characteristic of rancid fat (Souza et al., 2004).

Resistance to oxidation of an oil or fat is known as oxidative stability and can be expressed as the period of time necessary for the secondary products of the reaction to be formed and detected under different conditions. This period is known as the induction time, and it leads to a quick increase in the lipid oxidation rate (Zeman et al., 1995; Arain et al., 2009).

Because the oxidation and thermal-oxidative decomposition of oils and fats are exothermal reactions, enthalpic changes by calorimetry or by thermal analysis can be applied to determine the oxidative stability or the thermal-oxidative resistance of greasy materials. The most promising techniques for this application are Differential scanning calorimetry (DSC) and Pressurized differential scanning calorimetry (Kowalski et al., 2004).

Compared to conventional methods, these methods are more advantageous because they are more precise and sensible, require less sample and rapidly produce results (Garcia et al., 2007; Kowalski et al., 1997; Santos et al., 2002; Souza et al., 2004).

Accelerated methods, most commonly used for oxidative stability assessments of edible oils and fats, include the Rancimat method or Oil Stability Index (OSI) Method developed by Hadorn and Zurcher (1974). The Rancimat method determines the amount of time it takes for the maximum alteration to the lipid oxidation rate. This time is determined by the airflow that passes through a sample of heated oil and transfers the volatile compounds of the oxidation reaction to a separate container of deionized water. This shift in the specimens causes an increase in conductivity (Farhoosh et al., 2008). This time, known as the oxidative stability index (OSI), has a direct correlation to the stability measured by different conditions for lipid oxidation (Velasco et al., 2004).

1.2 Oxidation stability

Low oxidation stability is one of the major factors hampering industry acceptance of vegetable oil-based lubricants. The oxidation stability of vegetable oils can be improved. Selective breeding programs and genetic modification can increase stability by reducing the level of unsaturated fatty acids in the oil. Similarly, stability can be increased by chemical modification of the oil structure by techniques such as blending, interesterification, hydrogenation and epoxidation (Adhvaryu et al., 2006; Liu and Brown, 1996; Warner and Knowlton, 1997). Wagner et al. 2001 have presented a thorough review of the techniques available to modify and improve vegetable oil characteristics from a lubricant industry perspective. After modification to the base oil, the stability of the formulations can also be improved by addition of antioxidant packages.

A balance, however, must be met between improving the oxidation stability and preserving the lubricating properties of vegetable oils. Too many modifications may destroy the properties that make vegetable oils useful in the first place. Reducing the level of

unsaturated fatty acids, for example, whilst increasing the oxidation stability, also reduces the effectiveness of the lubricant at low temperatures. Major chemical modifications to the base oil would also significantly raise the cost of the lubricant. Vegetable oils containing a large percentage of monounsaturated fatty acids are the most likely candidates for vegetable-based lubricants. They have a greater oxidation stability than polyunsaturated oils, and also remain as a fluid over a much larger range of temperatures than fully saturated oils. In common oilseed crops, the most abundant monounsaturated fatty acid is oleic acid, an 18-carbon atom chain.

2 MATERIALS AND METHODS

Oxidative stability of oils is one the most important parameters for their quality assessment. A number of the methods for such assessment have been developed. Some of them are based on measuring of induction times (induction periods) of oils oxidation. Among them Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Rancimat method became nowadays very popular as they are frequently used and reviewed (Ostrowska-Ligeza et al., 2010; Tan et al., 2002; Velasco et al., 2004; Farhoosh et al., 2008; Pardaul et al., 2011). It was the purpose of this paper to compare the oxidative stabilities of some vegetable oils determined by PDSC and Rancimat methods.

2.1 Materials – Vegetable oils

Two vegetable oils were used in this study: rapeseed (RO) and sunflower (SO) oil. The factorial oils were fresh and their parameters (acid value (AV) and peroxide value (PV)) are shown in Table 2. All chemicals and reagents used were of the highest purity.

Tab. 2 Acid and peroxide value of vegetable oils

Parameter	Rapessed oil (RO)	Sunflower oil (SO)
Acid value (AV) mg KOH.g ⁻¹	0,27	0,28
Peroxide value (PV) mmolO ₂ .kg ⁻¹	1,06	0,81

2.2 Methods and Apparatus

2.2.1 Pressure Differential scanning calorimetry analysis

The oxidative stability of vegetable oils was determined by a Du Pont differential scanning calorimeter equipped with a pressure cell (PDSC, model No. 902). The equipment was calibrated with pure indium, and the baseline was obtained with an empty open aluminium pan sample. Oil samples of $5,0 \pm 0,5$ mg were weighed into open aluminium pans and were placed in the equipment's sample chamber. Experiments were performed at 100, 110, 120, 130, 140, 150 and 160 °C under 1379 kPa (200 psi) pressure of oxygen and oxygen flow of 100 cm³.min⁻¹. For each oil 6 runs at the given temperature were

performed; the extreme values were rejected and other 4 were analyzed. From the resulting PDSC exotherm the time for reaching its maximum was determined exactly to one of a minute. The differences among the τ_{PDSC} values determined for given oil at the given temperature were less than 3%. Each τ_{PDSC} value listed in Tab. 3 is the average of 4 measurements. The details of the procedure are reported in Kowalski et al. 2000.

2.2.2 Rancimat measurements

The oxidative stability of vegetable oils was evaluated by a Methrom Rancimat model 743 (Herisau, Schitzerland) following the AOCS Official Metod Cd 12b-92, AOCS 1992. All samples were studied at 100, 110, 120, 130, 140, 150 and 160 °C. Air flow rates were set at 20 l.h⁻¹ for all determinations. The induction times were printed automatically by apparatus software with precision of 2 decimal places. The averages of 3 measurements were taken and for given oil at the given temperature the maximal deviation mean value was less than 1%. Each $\tau_{Ranc.}$ value listed in Tab. 3 with precision of one tenth of an hour is the average of 3 determinations.

Tab. 3 Induction times for oxidation of vegetable oils by PDSC and Rancimat methods

Temperature (°C)	Induction times by PDSC τ_{PDSC} (min)		Induction times by Rancimat test $\tau_{Ranc.}$ (h)	
	Rapessed oil (RO)	Sunflower oil (SO)	Rapessed oil (RO)	Sunflower oil (SO)
100	301,9	131,8	21,6	15,2
110	138,9	64,8	11,3	6,8
120	73,8	33,2	5,7	3,8
130	38,4	17,6	3,3	2,1
140	21,7	9,4	1,9	1,3
150	11,1	4,6	0,8	0,5
160	5,7	2,7	0,6	0,2

3 RESULTS AND DISCUSSION

The results of Rancimat and PDSC measurements are listed in Tab. 3. As can be seen from Fig. 1 and Fig. 2 the logarithms of $\tau_{Ranc.}$ and τ_{PDSC} show linear dependencies (correlation coefficients > 0,98) on the exotherm temperatures and they can be described by the following equation:

$$\log \tau_{Ranc.} \text{ or } \log \tau_{PDSC} = a \cdot t + b \quad (1)$$

where a and b are adjustable coefficients and t is the temperature in °C.

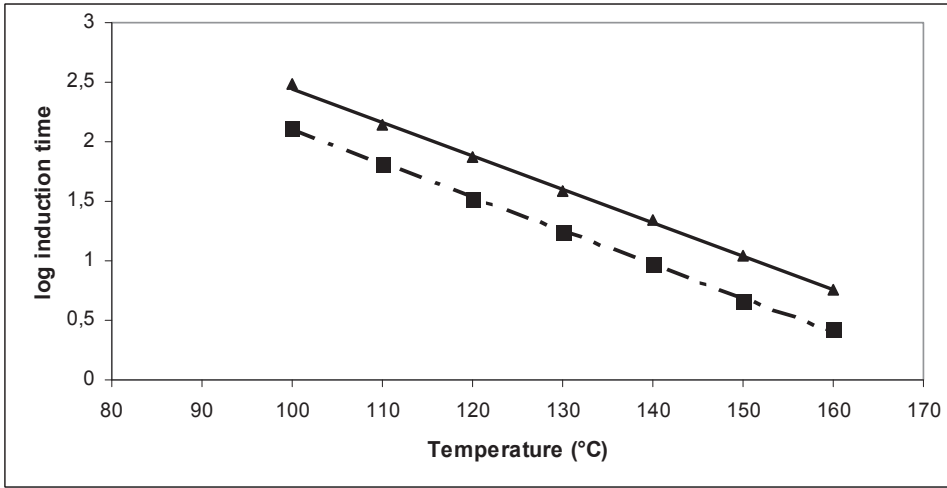


Fig. 1 Log τ_{PDSC} versus temperature for oxidation rapeseed and sunflower oil

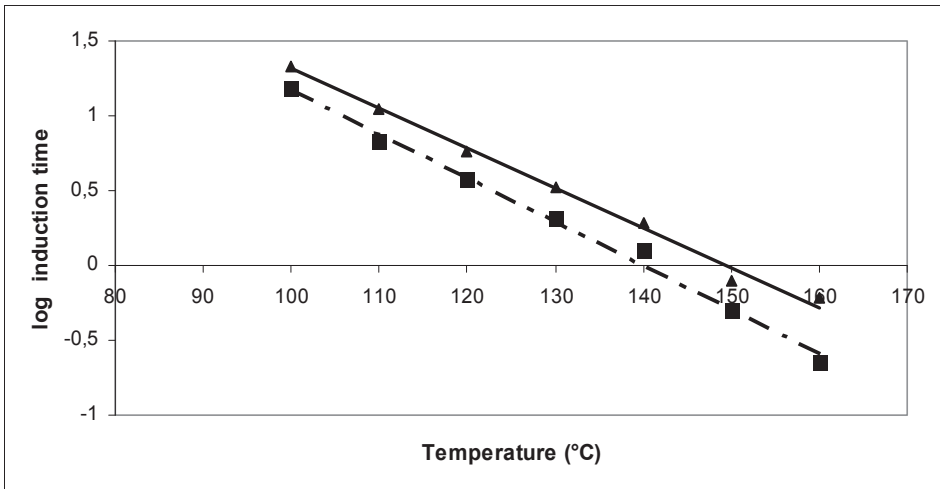


Fig. 2 Log $\tau_{Ranc.}$ versus temperature for oxidation rapeseed and sunflower oil

The coefficients a and b are calculated by simple regression analysis for the oils studied are listed in Tab. 4. From equation 1 the Rancimat and PDSC induction times can be calculated for a given temperature. The oxidative stabilities of oils can be ranked based on the rule: “the longer the induction time the more stable is the oil”. The relative resistances of the oils on their thermal-oxidative degradation depend on temperature.

Tab. 4 Coefficients of equations (1) of vegetable oils oxidation

Parameter	Calculated from PDSC measurements		Calculated from Rancimat measurements	
	Rapeseed oil (RO)	Sunflower oil (SO)	Rapeseed oil (RO)	Sunflower oil (SO)
-a	0,0281	0,0283	0,0265	0,0294
b	5,2568	4,9286	3,9668	4,1154
R ²	0,9987	0,9991	0,9937	0,9929

4 CONCLUSIONS

Low oxidation stability hampers the acceptance of vegetable oils as a potential source of environmentally favourable lubricants. The mechanism of vegetable oil oxidation is well studied slony with methods for improving the oxidation stability, such as antioxidant addition or modification of oil composition. Oxidation has an impact on the lubrication performance of vegetable oils ans quite possibly plays a role in the lubrication process. Correlating studies of oxidation with lubrication performance will lead to greater understanding into the role of oxidation in the lubrication mechanism of vegetable oils. The PDSC and Rancimat method requires very small samples, and with the high degree of automation of modern apparatuses this method is very convenient for studies of vegetable oil oxidation.

The results obtained in this work using the PDSC and the Rancimat methods have appeared to be consistent. The assessment of oils stability for high temperature application based on these methods should lead to similar conclusions and recommendations.

The financial support from the Slovak Grant Agency (VEGA), grants no. 1/0403/11, is gratefully acknowledged.

REFERENCES

- ADHVARYU, A., BIRESAW, G., SHARMA, B. K., ERHAN, S. Z., 2006. Friction behaviour of some seed oils: biobased lubricant applications. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 45, p. 3735–3740. ISSN 0888-5885.
- ADHVARYU, A., ERHAN, S. Z., PEREZ, J. M., 2003. Wax appearance temperatures of vegetable oils determined by differential scanning calorimetry: effect of triacylglycerol structure and its modification. *Thermochimica Acta* 395, pp. 191–200. ISSN 0040-6031.
- ARAIN, S., SHERAZI, S. T. H., BHANGER, M. I., TALPUR, F. N., MAHESAR, S. A., 2009. Oxidative stability assessment of Bauhinia purpurea seed oil in comparison to two conventional vegetable oils by differential scanning calorimetry and Rancimat methods. *Thermochimica Acta* 484, pp. 1–3. ISSN 0040-6031.
- ASADAUSKAS, S., PÉREZ, J. M., DUDA, J. L. 1996. Oxidative stability and antiwear properties of high oleic vegetable oils. *Lubrication Engineering*. 52, pp. 877–882. ISSN 0024-7154.
- BATTERSBY N. S. 2000. The biodegradability and microbial toxicity testing of lubricants: some recommendations. *Chemosphere* 41, pp. 1011–1027. ISSN 0045-6535.
- BECKER, R., KNORR, A. 1996. An evaluation of antioxidants for vegetable oils at elevated temperatures. *Lubrication Science* 8, pp. 95–117. ISSN 0954-0075.

- BREMMER B. J., PLONSKER L.M. 2008. *Bio-based lubricants a Market Opportunity Study Update*. <http://www.soynewuses.com/downloads/reports/BioBasedLubricantsMarketStudy.pdf>
- CAMPANELLA, A., RUSTOY, E., BALDESSARI, A., BALTANÁS, MIQUEL, A. 2010. Lubricants from chemically modified vegetable oils. *Bioresource Technology* 101, pp. 245–254. ISSN 0960-8524.
- ERHAN, S. Z., SHARMA, B. K., PEREZ, J. M. 2006. Oxidation and low temperature stability of vegetable oil-based lubricants. *Industrial Crops and Products* 24, pp. 292–299. ISSN 0926-6690.
- FARHOOSH, R., NIAZMAND, R., REZAEI, M., SARABI, M., 2008. Kinetic parameter determination of vegetable oil oxidation under Rancimat test conditions. *European Journal of Lipid Science and Technology* 110, pp. 587–592. ISSN 1438-7697.
- FOX, N. J., STACHOWIAK, G. W. 2007. Vegetable oil-based lubricants – A review of oxidation. *Tribology International* 40, pp. 1035–1046. ISSN 0301-679X.
- GAPINSKI, R. E., JOSEPH, I. E., LAYZELL, B. D. 1994. A vegetable oil based tractor lubricant. *SAE Tech Paper* 941785, pp. 1–9.
- GARCÉS, R., FORCE, E. M., SALAS, J. J. 2011. Vegetable oil basestock for lubricants. *Grasas y aceites* 62(1), pp. 21–28. ISSN 0017-3495.
- GARCIA, C. C., FRANCO, P. I. B. M., ZUPPA, T. O., ANTONIOSI FILHO, N. R., LELES, M. I. G., 2007. Thermal stability studies of some cerrado plant oils. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 87, pp. 645–648. ISSN 1388-6150.
- HADORN, H., ZURCHER, K., 1974. Zur Bestimmung der Oxydations-stabilität von Ölen und Fetten. *Deutsche Lebensmittel-Rundschau* 70, pp. 57–65. ISSN 0012-0413.
- KOWALSKI, B., GRUCZYNSKA, E., MACIASZEK, K., 2000. Kinetics of rapeseed oil oxidation by pressure differential scanning calorimeter. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 102, p. 337–341. ISSN 1438-7697.
- KOWALSKI, B., RATUSZ, K., MICIULA, A., KRYGIER, K., 1997. Monitoring of rapeseed oil autooxidation with a pressure differential scanning calorimeter. *Thermochimica Acta* 307, pp. 117–121. ISSN 0040-6031.
- LIU, K., BROWN, E. A., 1996. *Food Technology*, 50 (11), p. 67. ISSN 0015-6639.
- MENDOZA, G., IGARTUA, A., FERNANDEZ-DIAZ, B., URQUIOLA, F., VIVANCO, S., ARGUIZONIZ, R. 2011. Vegetable oils as hydraulic fluids for agricultural applications. *Grasas y aceites* 62(1), pp. 29–38. ISSN 0017-3495.
- MINAMI, I., MORI, H., KATOH A., MARUKANE, Y., KOHZU, Y. 2009. Proposal of Lubricant Maintenance by Monitoring Peroxide Value. *Journal of the Japan Petroleum Institute* 52(6), pp. 351–356. ISSN 1346-8804.
- OHKAWA, S. A., KONISHI, H., HATANO, K., TANAKA, K., IWAMURA, M. 1995. Oxidation and corrosion characteristics of vegetable base biodegradable hydraulic oils. *SAE Tech Paper* 951038, pp. 55–63.
- OSTROWSKA-LIGEZA, E., BEKAS, W., KOWALSKA, D., LOBACZ, M., WRONIAK, M., KOWALSKI, B., 2010. Kinetics of commercial olive oil oxidation: Dynamic differential scanning calorimetry and Rancimat studies. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 112, p. 268–274. ISSN 1438-7697.
- PARDAUIL JULIANA, J. R., SOUZA LUIZ, K. C., MOLFETTA VÁBIL, A., ZAMIAN JOSÉ, R., FILHO GERARDO, N. R., C.E.F. DA COSTA. 2011. Determination of the oxidative stability by DSC of vegetable oils from the Amazonian area. *Bioresource Technology* 102, pp. 5873–5877. ISSN 0960-8524.
- REMMELE, E., WIDMANN, B. 1999. Suitability and Environmental Compatibility of Rapeseed Oil Based Hydraulic Fluids for Agricultural Machinery. *Journal of Synthetic Lubrication* 16, pp. 129–145. ISSN 0265-6582.

- ROUSEK, M., 2005. Use of tribo-technical diagnostics methods for quality check of biodegradable oil NAPRO 2003. In: *Opotřebení, spolehlivost, diagnostika 2005*. 1. vyd. Brno: Univerzita obrany, Fakulta vojenských technologií, s. 163–168. ISBN 80-7231-026-7.
- RUDNICK, L. R., 2006. *Synthetics, Mineral Oils and Bio Based Lubricants – Chemistry and Technology*. Taylor & Francis Group, pp. 353–389. ISBN 9781574447231.
- SANTOS, J. C. O., SANTOS, I. M. G., SOUZA, A. G., PRASAD, S., SANTOS, A. V., 2002. Thermal stability and kinetic study on thermal decomposition of commercial edible oils by thermogravimetry. *Journal of Food Science* 67, pp. 1393–1398. ISSN 1750-3841.
- SHASHIDHARA, Y. M., JAYARAM, S. R. 2010. Vegetable oils as a potential cutting fluid – an evolution. *Tribology International* 43, pp. 1073–1081. ISSN 0301-679X.
- SOUZA, A. G., SANTOS, J. C. O., CONCEIÇÃO, M. M., SILVA, M. C. D., PRASAD, S., 2004. A thermoanalytic and kinetic study of sunflower oil. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 21, pp. 265–270. ISSN 0104-6632.
- TAN, C. P., CHE MAN, Y. B., SELAMAT, J., YUSOFF, M. S. A., 2002. Comparative studies of oxidative stability of edible oils by differential scanning calorimetry and oxidative stability index methods. *Food Chemistry* 76, p. 385–389. ISSN 0308-8146.
- VAN RENSSSELAR, J. 2010. Biobased Lubricants: Gearing up for a green world. *Tribology & Lubrication Technology*. 66, 1, pp. 32–41. ISSN 1545-858X.
- VELASCO, J., ANDERSEN, M. L., SKIBSTED, L. H., 2004. Evaluation of oxidative stability of vegetable oils by monitoring the tendency to radical formation. A comparison of electron spin resonance spectroscopy with the Rancimat method and differential scanning calorimetry. *Food Chemistry*, 85, pp. 623–632. ISSN 0308-8146.
- WAGNER, H., LUTHER, R., MANG, T., 2001. *Applied Catalysis A: General*, 221(1–2), p. 429. ISSN 0926-860X.
- WARNER, K., KNOWLTON, S. J., 1997. *Journal of the American Oil Chemists' Society (JAOCS)*, 74(10), p. 1317. ISSN 0003-021X.
- ZEMAN, A., SPRENGEL, A., BIEDERMEIER, D., SPÄTH, M. 1995. Biodegradable lubricants – studies on thermo-oxidation of metal – working and hydraulic fluids by differential scanning calorimetry. *Thermochimica Acta* 268, pp. 9–15. ISSN 0040-6031.

Corresponding authors:

- ¹⁾ doc. Ing. Marián Kučera, Ph.D., Technical university in Zvolen, Faculty Environmental and Manufacturing Technology, Department of Forest and Mobile Technology, T. G. Masaryka, Zvolen 960 53. tel. +421 45 5206 500, kucera@vsld.tuzvo.sk
- ²⁾ prof. Ing. Miroslav Rousek, CSc., Mendel University in Brno, Faculty of Forestry and Wood Technology, Department of Wood Processing, Zemědělská 3, 61300 Brno (Černá Pole), tel. +420 545 134 156, rousek@mendelu.cz

GEOMETRICKÉ ASPEKTY MODELOVANIA PÁSOVÝCH VOZIDIEL V MSC.ADAMS SYSTÉME

GEOMETRIC ASPECTS OF TRACKED VEHICLES MODELING IN MSC.ADAMS/VIEW SYSTEM

Jaroslav MATEJ

ABSTRAKT: Pri modelovaní pásového vozidla v MSC.ADAMS systéme je potrebné navrhnuť reálny mechanizmus, ktorého pohyb je založený na kontakte prvkov mechanizmu a je nevyhnutné navrhnuť jednotlivé členy tak, aby do seba dokonale zapadali a mechanizmus bol plne funkčný, ináč dôjde k jeho zaseknutiu, resp. znefunkčneniu tak, ako by to nastalo aj v reálnom prípade. Príspevok analyzuje možné spôsoby vytvorenia funkčného pásového mechanizmu a predpoklady pre jeho vytvorenie, najmä z pohľadu geometrie.

Kľúčové slová: MSC.ADAMS/View, pásové vozidlo, geometrické aspekty

ABSTRACT: Virtual models created in MSC.ADAMS system requires to be equivalent to real track mechanisms, mainly in relation to geometry of sprocket wheel and track members. It will assure a good function of the mechanism and prevent locked up states. The contribution analyses some approaches for modeling of a sprocket wheel and track members mainly from point of view of geometry.

Keywords: MSC.ADAMS/View, tracked vehicle, geometric aspects

1. ÚVOD

MSC.ADAMS je systém pre dynamickú simuláciu mechanických sústav. Jeho určenie, vlastnosti a iné špecifikácie už boli popísané v iných publikáciách, napr. [1], preto túto časť nebudeme opakovať. Pri modelovaní pásového vozidla v MSC.ADAMS systéme je, v závislosti na zvolenom prístupe, časovo najnáročnejšie vytvorenie samotného pásu a jeho kontaktov s ostatnými časťami pásového mechanizmu. Toto je však len jeden prvok riešenia. Keďže modelujeme reálny mechanizmus, ktorého pohyb je založený na kontakte prvkov mechanizmu, je nevyhnutné navrhnuť jednotlivé členy tak, aby do seba dokonale zapadali a mechanizmus bol plne funkčný, ináč dôjde k jeho zaseknutiu, resp. znefunkčneniu tak, ako by to nastalo aj v reálnom prípade. Je preto nevyhnutné zaoberať sa aspoň elementárnou geometriou tvarového styku jednotlivých komponentov mechanizmu, najmä

hnacím kolesom a pásom, tvoreným jednotlivými článkami, ako aj geometriou mechanizmu ako celku, čo je predmetom tohto príspevku.

2. MATERIÁL A METÓDY

Pre modelovanie hnacieho kolesa a pásu je možné zvoliť viacej prístupov. Najjednoduchším je vynechať generovanie pohybu pásového stroja prostredníctvom hnacieho kolesa a zrealizovať ho iným spôsobom. Toto riešenie vo svojej podstate obchádza problém správnej geometrie hnacieho kolesa a pásu, ale je vhodným riešením pohybu stroja a preto je potrebné ho uviesť. Ponúkajú sa tieto prístupy k riešeniu:

1. definovanie konštantnej počiatkovej rýchlosti rámu stroja,
2. pohyb pomocou sily, ktorá tlačí, resp. ťahá rám vozidla,
3. pohyb pomocou síl pôsobiacich na články pásu v okolí „hnacieho kolesa“.

Prístup č. 1 je síce možný, avšak problémy z dynamikou častí pásového mechanizmu sa takmer určite objavia a to preto, že rám stroja síce má definovanú konštantnú počiatkovú rýchlosť, avšak články pásu nie. Aby toto riešenie bolo použiteľné je potrebné minimálne definovať aj počiatkovú rýchlosť všetkých článkom pásu, avšak riešenie podľa prístupu č. 2 sa javí byť reálnejšie a prínosy aj s nevýhodami rovnaké. Riešenie podľa prístupu č. 2 je podobné, avšak jednoduchšie na realizáciu a pohyb stroja je lepšie ovládateľný. Sila generujúca pohyb môže ležať v ťažisku celého pásového stroja. Keďže všeobecne platí:

$$F = m \cdot a \Rightarrow a = \frac{F}{m},$$

je potrebné obmedziť pôsobenie sily na určitý časový alebo priestorový interval, aby sme zabránili stálemu zvyšovaniu rýchlosti stroja. Tejto požiadavke najlepšie vyhovuje funkcia STEP (STEP5) s časom ako nezávislou premennou v tvare:

STEP5(time, 0.0, 10000.0, 2.0, 0.0)

kde:

time – je čas simulácie,

STEP5 – funkcia pre simuláciu prechodového javu.

Hodnota 0.0 odpovedá počiatkovému času simulácie, 10000.0 – je sila v počiatkovom čase, 2.0 je konečný čas prechodového javu, druhá hodnota 0.0 odpovedá sile v konečnom čase. Jednotky sú podľa zvoleného systému jednotiek, najčastejšie volíme MMKS (mm, kg, s), vtedy bude čas v sekundách [s] a sila v newtonoch [N]. Druhé riešenie spočíva v definovaní intervalu dráhy na ktorej bude pôsobiť hnacia sila. Je potrebné vytvoriť bod v mieste ukončenia pôsobenia sily a definovať pôsobenie hnacej sily pomocou funkcie STEP, takto:

STEP5(DM(MARKER_12, MARKER_23), 0.0, 0.0, 2000.0, 10000.0)

kde:

DM – funkcia pre absolútnu vzdialenosť dvoch bodov,

MARKER_12 – bod na ráme stroja,
MARKER_23 – bod na konci dráhy.

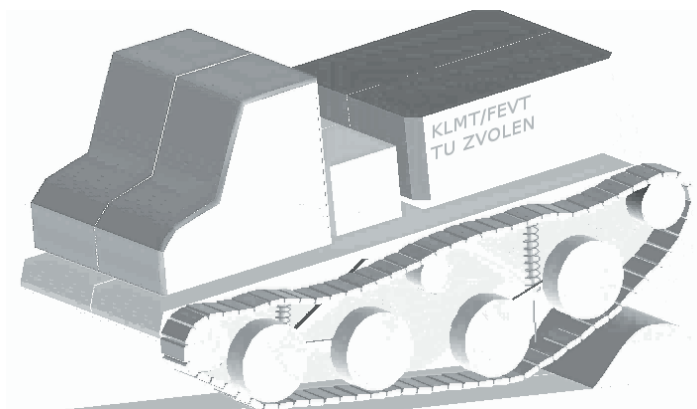
Hodnota 0.0 v tomto prípade zodpovedá nulovej vzdialenosti uvedených bodov, druhá hodnota 0.0 je veľkosť pôsobiacej sily v danom momente, 2000.0 je počiatočná vzdialenosť uvedených bodov, 10000.0 je sila v danom momente.

Prístup č. 3 je zložitejší a bez priamych skúseností, avšak možný a potenciálne výhodný, keďže môže zabezpečiť trvalý kontakt pásu s hnacím kolesom, prirodzené napnutie pásu a jednoduchší a rýchlejší výpočet v porovnaní s generovaním pohybu pomocou tvarového styku.

Prirodzeným riešením je použitie tvarového styku článkov pásu s hnacím kolesom, ktorého pohyb bude riadený s pomocou STEP funkcie pre plynulý rozbeh. Z pohľadu technického riešenia sú možné rôzne prístupy. Je však nevyhnutné zosúladiť vzájomnú geometriu spolu zaberajúcich členov. Niektoré z nich sú uvedené v ďalšej časti.

3. VÝSLEDKY A DISKUSIA

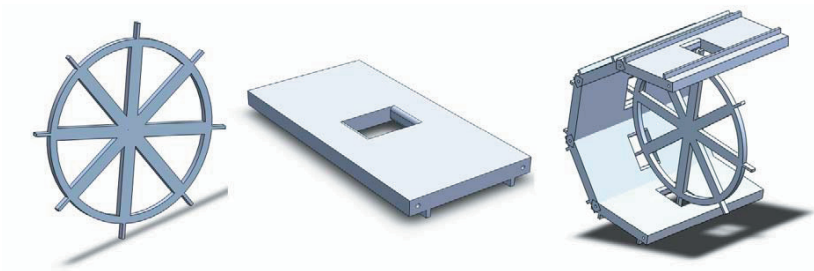
Pri generovaní pohybu pomocou hnacej sily, napr. v ťažisku stroja, sme pomerne jednoducho získali funkčný model stroja tak ako je zobrazený na obrázku 1.



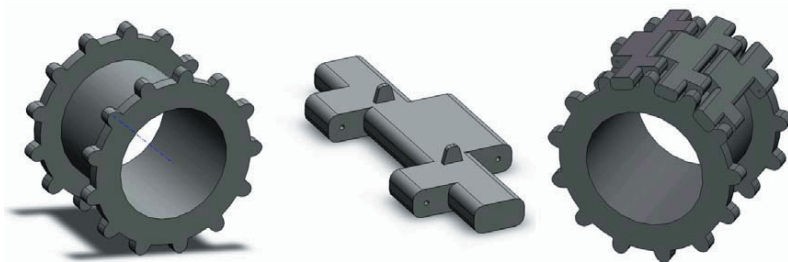
Obrázok 1 Model pásového vozidla poháňaného dočasnou hnacou silou, pôsobiacou v ťažisku stroja

Výhodou tohto prístupu je, že výpočtová náročnosť je najnižšia zo všetkých možností, avšak pás počas pohybu môže byť neprirodzene napnutý, resp. uvoľnený a teda dynamika pohybu stroja nemusí vo všetkých prípadoch zodpovedať realite. Najmä stavy pri zrýchľovaní a spomaľovaní sa ukázali ako nezodpovedajúce realite v porovnaní s pohybom hnacím kolesom.

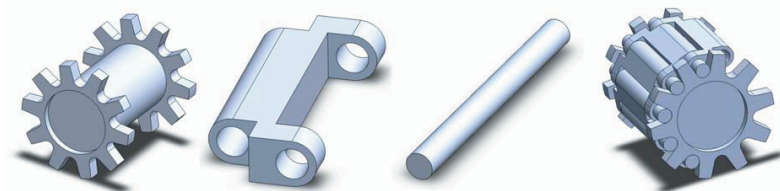
Vizuálne reálne výsledky sme získali až po vytvorení modelov s hnacím kolesom a využitím tvarového styku na pohyb stroja. Výpočtová náročnosť tohto riešenia je však asi dvojnásobná a pri uvažovaní trenia v článkoch pásu až šesťnásobná oproti modelu z obrázku 1. Niektoré prístupy k riešeniu sú zobrazené na obrázkoch 2 až 4.



Obrázok 2 Najjednoduchšie riešenie záberu tvarovým stykom



Obrázok 3 Modifikácia riešenia podľa obrázku 1, so záberom na krajoch článkov



Obrázok 4 Záber pomocou spojovacích čapov

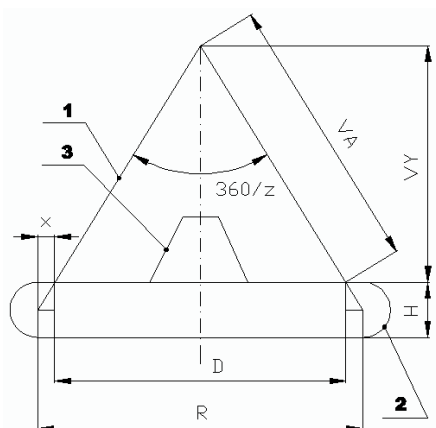
Keďže softvér MSC.ADAMS štandardne pracuje s tuhými, nedeformovateľnými telesami, bez aplikácie metódy konečných prvkov, nemuseli sme sa zaoberať únosnosťou jednotlivých prvkov pásového mechanizmu tak, ako je to vidieť na obrázku 2. Riešenia na obrázkoch 2 až 4 vyžadujú vzájomné prispôsobenie geometrie. Ako najvhodnejší sme rozpoznali tento prístup (pre riešenie z obrázku 4):

1. určiť priemer hnacieho kolesa a počet zahĺbení pre čapy,
2. vytvoriť model hnacieho kolesa a určiť vzdialenosť čapov,
3. podľa hodnoty z bodu 2 vytvoriť model článku.

Pre riešenia z obrázkov 2 a 3 sa javí vhodným tento postup:

1. určiť priemer hnacieho kolesa a počet zubov,
2. vytvoriť model hnacieho kolesa,

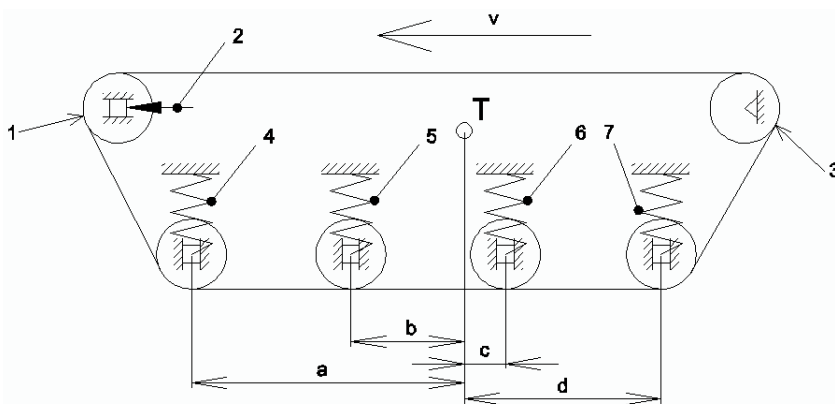
3. vypočítať vzdialenosť odsadenia osí článkov pásu (obrázok 5),
4. podľa hodnoty z bodu 3 vytvoriť model článku.



Obrázok 5 Určenie rozmerov článku pásu. 1 – výsek z hnacieho kolesa, 2 – článok pásu, 3 – výstupok článku
 2, z – počet zubov hnacieho kolesa, H – hrúbka článku pásu, R – vzdialenosť odsadenia osí článkov pásu, D, x, VA, VY – pomocné rozmery

Podľa geometrie vytvoreného hnacieho kolesa, za použitia obrázku 5 a jednoduchých goniometrických funkcií určíme rozmer R, t. j. vzdialenosť odsadenia osí článkov pásu, ktoré sú nevyhnutné pre vytvorenie korektného modelu článku pásu. Týmto spôsobom zaručíme súlad geometrií hnacieho kolesa a článkov pásu a správnu činnosť pásového mechanizmu.

Z pohľadu geometrie celého pásového mechanizmu je potrebné tiež sa zamerať na nastavenie správnych parametrov tuhosti pružín na pojazdvých kolesách tak, ako ich zobrazuje obrázok 6.



Obrázok 6 Geometria celého pásového mechanizmu. 1 – napínacie koleso, 2 – všeobecný napínací mechanizmus, 3 – hnacie koleso, 4, 5, 6, 7 – pružiny pojazdvých koles, T – ťažisko stroja, a, b, c, d – poloha pojazdvých koles vzhľadom na ťažisko

Prvým predpokladom je určenie síl v pružinách (pozície 4 až 7, obrázok 6), ktoré zodpovedajú geometrii modelu na začiatku simulácie, za pomoci elementárnej statiky, s uvažovaním odpružených hmôt modelu. Druhým predpokladom je stanovenie dĺžky uvedených pružín v nezaťaženom stave a následný výpočet ich tuhosti, podľa nasledujúceho vzťahu:

$$k_i = \frac{F_i}{l_{0i} - l_{gi}}$$

kde:

k_i – je tuhosť i -tej pružiny (pozícia 4 až 7, obrázok 6),

F_i – sila v i -tej pružine, určená statickým výpočtom (pozícia 4 až 7, obrázok 6),

l_{0i} – dĺžka nezaťaženej i -tej pružiny (pozícia 4 až 7, obrázok 6),

l_{gi} – dĺžka zaťaženej i -tej pružiny, podľa geometrie modelu (pozícia 4 až 7, obrázok 6).

Uvedenými metódami bolo dosiahnuté vytvorenie plne funkčného pásového mechanizmu, ktorého geometria, po spustení simulácie, sa už nemení vplyvom vnútorných síl, ale iba vplyvom vonkajších síl, ako sú nerovnosti terénu, resp. nerovnomerný pohyb mechanizmu.

4. ZÁVER

V príspevku sme popísali možnosti modelovania hnacieho mechanizmu pásového vozidla a uviedol príklady ich realizácie a základnú podmienku ich vytvorenia z hľadiska geometrie. Vzájomný vzťah geometrie hnacieho kolesa a článkov pásu, podľa obrázku 5, je univerzálny a použiteľný aj pre iné varianty záberu. Cieľom príspevku bolo analyzovať geometriu vzťahu hnacieho kolesa a článkov pásu z hľadiska funkčnosti mechanizmu, k čomu sme uviedli základné fakty, spolu s určením geometrie celého modelu v počiatočnej polohe. Druhým aspektom modelovania záberu je tvar článku a hnacieho kolesa, ktorý tiež vyžaduje geometrický prístup. Vzhľadom na vyššie uvedené aspekty sme sa však týmto v príspevku nezaoberali.

LITERATÚRA

1. MATEJ, Jaroslav: Simulácia pásového mechanizmu mobilného stroja v prostredí MSC.ADAMS/VIEW. In: Kolokvium ku grantovej úlohe č. 1/3545/06, Technická univerzita vo Zvolene, 2008. ISBN 978-80-228-1973-4.
2. MIKLEŠ, Milan – HOLÍK, Ján – MIKLEŠ, Juraj. Projektovanie a výpočet lesných strojov. Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2010. 200 s. ISBN 978-80-228-2096-7.
3. MIKLEŠ, Milan – SUCHOMEL, Jozef. Operating and terrain conditions of forest skidders. In Forest and wood technology vs. environment : proceedings of the international scientific conference Brno, Czech Republic 22–22 November 2000. – Brno : Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2000. ISBN 80-7157-471-6, s. 231–237.

4. BYBLJUK, Nestor Ivanovič – STYRANIVSKYJ, Oleg – DANKO, Branislav. Lesnícke dopravné prostriedky ako zložité dynamické systémy. In Trendy lesníckej, drevárskej a environmentálnej techniky a jej aplikácie vo výrobnom procese : medzinárodná vedecká konferencia 4.–6. september 2001. – Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2001. ISBN 80-228-1061-4, s. 245–250.
5. BEŇO, Pavel – TURIS, Ján. Parametrické konštruovanie – moderný vývojový trend v oblasti CAD. In Acta Facultatis Technicae 2. ISBN 80-228-0706-0, 1997 [1998], s. 5–8.

Kontaktná adresa:

Ing. Jaroslav Matej, PhD., Katedra lesnej a mobilnej techniky,
Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky, Technická univerzita vo Zvolene,
T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen, E-mail: matej@vsld.tuzvo.sk

NÁVRH MODELU REZNÝCH SÍL PRI SÚSTRUŽENÍ POMOCOU UMELÝCH NEURÓNOVÝCH SIETÍ

MODELING THE CUTTING FORCE FOR TURNING TOOL USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Júlia MEČIAROVÁ – Aleš PAVELKA – Lubomír JAVOREK

ABSTRACT: This contribution uses the artificial neural networks (ANN) approach to solve an efficient model for estimation of cutting forces for static and self-propelled rotary tool. The input parameters of the ANN model are the cutting parameters: the type of cutting tool, cutting speed, feed rate, depth of cut and the tool geometry represented by tool cutting edge inclination angle. The output parameters are three process parameters measured during the machining, namely tangential force (cutting force, F_z), radial force (thrust force, F_y) and axial force (feed force, F_x). The training of the network is based on experimental machining data. The model can be used for prediction of the cutting forces in order to establish optimization of machining process.

Key words: neural network, turning, modeling, cutting forces

ABSTRAKT: Článok sa zaoberá návrhom umelej neurónovej siete, ktorá bude slúžiť na predikciu rezných síl pri sústružení nástrojom so statickým a rotujúcim rezným klinom. Parametrami, ktoré vstupujú do navrhnutého modelu, sú rezné parametre ako typ rezného nástroja, rezná rýchlosť, posuv, hĺbka rezu a geometria nástroja reprezentovaná uhlom sklonu reznej hrany. Výstupnými parametrami sú tri parametre merané počas obrábania a to: tangenciálna sila (rezná sila, F_z), radiálna sila (pasívna sila, F_y) a axiálna sila (posuvová sila, F_x). Trénovanie siete je založené na údajoch z prevedených experimentov. Využitie modelu vytvorenej neurónovej siete spočíva v predikcii rezných síl s cieľom optimalizácie procesu rezania.

Kľúčové slová: neurónová sieť, sústruženie, modelovanie, rezné sily

1. ÚVOD

Určenie a modelovanie rezných síl je jedna z hlavných úloh teórie obrábania. Množstvo parametrov, ktoré ovplyvňujú veľkosť reznej sily (rezná rýchlosť, hĺbka rezu, uhly hlavnej a vedľajšej reznej hrany, uhol chrčba, polomer hrotu, uhol čela, uhol sklonu hlavnej reznej hrany, opotrebovanie nástroja, fyzikálne a chemické charakteristiky obrábaného materiálu, typ povlaku nástroja a i.) robia vytvorenie modelu veľmi zložitou a náročnou úlohou.

Rezné sily vznikajúce v procese sústruženia môžu priamo alebo nepriamo ovplyvniť parametre ako je trvanlivosť nástroja, jeho opotrebovanie, kvalitu obrobenej plochy

a pod. Vytvorenie modelu pôsobenia rezných síl tak môže slúžiť ako analytický základ pre plánovanie rezného procesu, návrh rezného nástroja, optimalizáciu geometrie nástroja a kontrolu celého procesu.

Umelé neurónové siete (Artificial Neural Networks – ANN) sú jedným z najviac využívaných modelovacích techník založených na štatistickom princípe a využívaných v mnohých oblastiach. Pri riešení mnohých problémov, ako napr. nelineárneho modelovania, klasifikácie, rozpoznávania obrazu, signálov, apod. sa využívajú vlastnosti ANN ako sú: schopnosť učiť sa/adaptovať, odolnosť proti poruchám, schopnosť zovšeobecňovať a i.

Oblasťou optimalizácie operácií obrábania sa zaoberajú mnohí vedci, napr. (Náprstková, 2006). Takisto v oblasti modelovania rezných síl pomocou neurónových sietí bolo urobených mnoho štúdií, napr. (Cus, 2006; Ezugwu, 2005; Hao, 2006) a rozkladom síl pri oddeľovaní častíc dreva sa zaoberá napr. (Minárik, 2004).

Cieľom tohto príspevku je návrh modelu rezných síl pomocou umelých neurónových sietí.

2. MATERIÁL A METÓDY

Analyticky sa rezná sila určí zo vzťahu (Szecsi, 1999):

$$F_c = C_p \cdot a_p^{x_p} \cdot f_n^{y_p} \cdot v_c^{n_p} \cdot K_{mp} \cdot K_{\kappa p} \cdot K_{\alpha p} \cdot K_{\lambda p} \cdot K_{rp} \cdot K_{VBp} \quad (1)$$

kde:

C_p – je koeficient závislý od použitého materiálu,

a_p – hĺbka rezu [mm],

f_n – posuv na otáčku [min^{-1}],

v_c – rezná rýchlosť [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$],

x_p, y_p, n_p – koeficienty závislé od typu obrábania a materiálu nástroja,

K_{mp} – koeficient závislý od obrábaného materiálu,

$K_{\kappa p}$ – koeficient závislý od uhla hlavnej reznej hrany κ ,

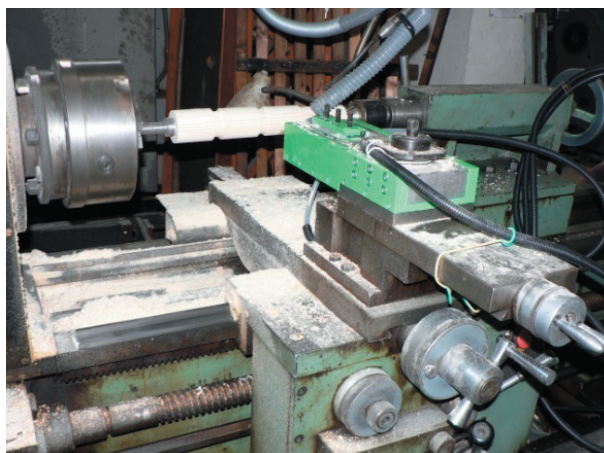
$K_{\alpha p}$ – koeficient závislý od uhla chrbta α ,

$K_{\lambda p}$ – koeficient závislý od uhla sklonu hlavnej reznej hrany λ_s ,

K_{rp} – koeficient závislý od polomeru hrotu r_e ,

K_{VBp} – koeficient závislý od priemernej hodnoty opotrebovania nástroja.

Analytický model však vzhľadom na množstvo koeficientov nedáva komplexný obraz o reznom procese. Preto je návrh modelu postavený na experimentálnych dátach. Experimenty boli vykonané na sústruhu CU 580H, ZMM Sliven. Obrábanym materiálom bol buk. Ako nástroj bol použitý sústružnícky nôž z RO. Sily boli merané piezoelektrickým 3-zložkovým dynamometrom (Obrázok 1).



Obrázok 1 Zapojenie meracej aparatúry

Tabuľka 1 Vstupné parametre

Parameter	Hodnoty
rezná rýchlosť v_c [m.min ⁻¹]	132; 172; 206; 257
posuv na otáčku f_n [mm]	0,05; 0,1; 0,2; 0,4
hĺbka rezu a_p [mm]	1; 2; 3; 4; 5
uhol λ_s [°]	5; 10; 20; 30; 40
nástroj	typ so statickým a rotujúcim rezným klinom

Celkovo bolo vykonaných 80 meraní. Experimenty boli prevedené pri rôznych kombináciách vstupných parametrov. Ich hodnoty sú zobrazené v Tabuľke 1. Z daných hodnôt vychádza 800 rôznych kombinácií.

Tabuľka 2 Časť nameraných hodnôt (Hric, 2010)

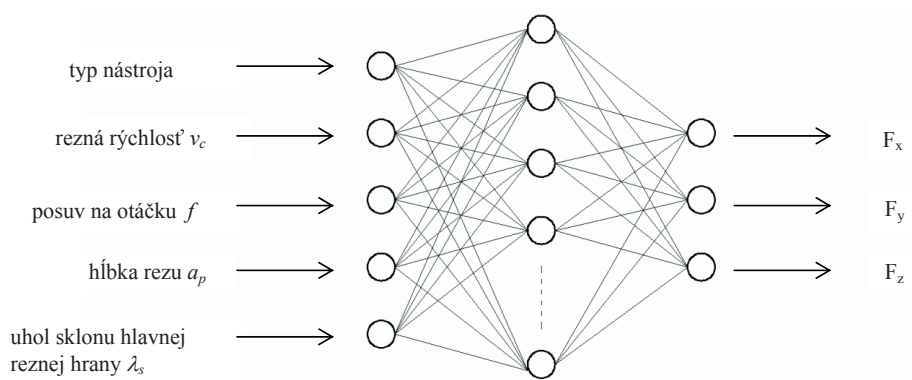
F_x	F_y	F_z	λ	v_c	a_p	f_n	typ
0,655574	1,011861	2,559562	30	257	5	0,5	0
1,703324	3,580057	5,143666	30	257	5	0,5	0
1,713916	3,589211	5,176559	30	257	5	0,5	0
1,768392	3,600128	5,183796	30	257	5	0,5	0
5,276262	3,444518	11,45103	30	257	5	1,5	0
5,278986	3,448999	11,45564	30	257	5	1,5	0
5,279288	3,449739	11,45564	30	257	5	1,5	0
5,279591	3,450518	11,46419	30	257	5	1,5	0
5,281407	3,454304	11,46748	30	257	5	1,5	0

Ako metodika na určenie vplyvu rezných parametrov na výslednú reznú silu a jej zložky v operácii sústruženia bola navrhnutá teória umelých neurónových sietí. Vzhľadom na charakter vstupných a výstupných parametrov bola zvolená dopredná neurónová

sieť. Viacvrstvové dopredné umelé neurónové siete (*Multilayer feed-forward ANN*) sú schopné riešiť aj nelineárne problémy. Dopredné neurónové siete sa vyznačujú tým, že v nich existujú iba dopredné spojenia medzi neurónmi. Každý neurón jednej vrstvy vysieľa signály na každý neurón nasledujúcej vrstvy. Spojenia do predchádzajúcej vrstvy ani v rámci jednej vrstvy neexistujú (Návrat, 2006).

3. NÁVRH ANN

Schematický model vstupných a výstupných veličín navrhnutého modelu je znázornený na Obrázku 2. Vstupným parametrom je typ nástroja, rezná rýchlosť ako rezná rýchlosť v_c , posuv f_n , hĺbka rezu a_p a geometria nástroja reprezentovaná uhlom sklonu reznej hrany λ_s . Výstupnými parametrami sú tri parametre merané počas obrábania a to: tangenciálna sila (rezná sila, F_z), radiálna sila (pasívna sila, F_y) a axiálna sila (posuvová sila, F_x).



Obrázok 2 Štruktúra ANN

Návrh neurónovej siete pozostáva z týchto základných krokov (Beale, 2010):

1. vytvorenie architektúry siete,
2. konfigurácia vstupných parametrov siete,
3. učenie siete,
4. overenie siete,
5. použitie siete.

Na vytvorenie neurónovej siete bol použitý modul Neural Network Toolbox softvéru Matlab®. V prvom kroku bolo potrebné dáta normalizovať na hodnoty v intervale (0, 1). Normalizovaná hodnota (x_i) bola potom pre každý prvotný „nespracovaný“ vstup/výstup (d_i) vypočítaná ako:

$$x_i = \frac{2}{d_{\max} - d_{\min}} (d_i - d_{\min}) - 1 \quad (2)$$

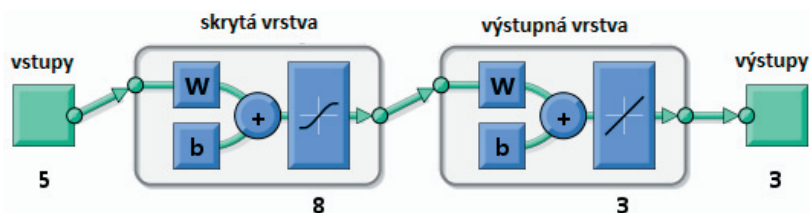
kde:

d_{\max} je maximálna hodnota prvotného údaju,

d_{\min} je minimálna hodnota prvotného údaju (Cus, 2006).

4. VÝSLEDKY

Aby bola sieť funkčná a výkonná, bolo potrebné určiť niekoľko významných faktorov architektúry siete, ako počet neurónov a vrstiev. Pre tento model bola zvolená štandardná viacvrstvová dopredná sieť (*Feed-forward backpropagation NN*) s jednou skrytou vrstvou. Model navrhnutej siete je zobrazený na Obrázku 3.



Obrázok 3 Model navrhnutej siete

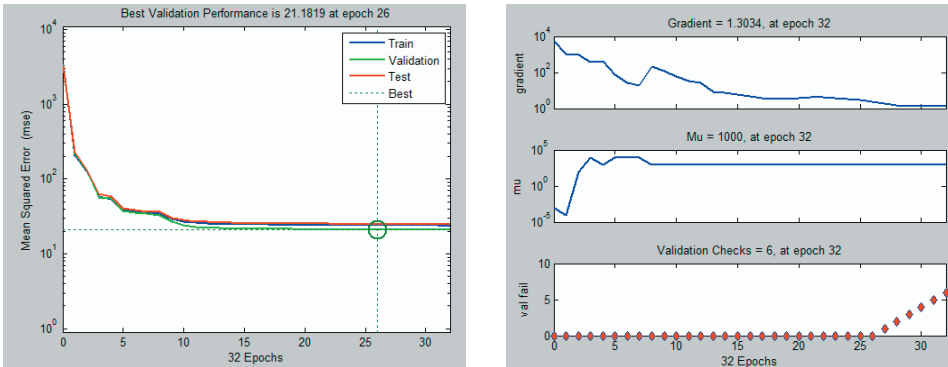
Počet neurónov vo vstupnej a výstupnej vrstve závisí od počtu vstupných a výstupných parametrov. Počet neurónov v skrytej vrstve je základným parametrom architektúry siete a je dôležité ho správne určiť. Nárast počtu vedie k zvýšeniu komplexnosti siete, čím sieť dokáže riešiť komplexné problémy, znižuje však rýchlosť učenia.



Obrázok 4 Závislosť chyby učenia od počtu neurónov

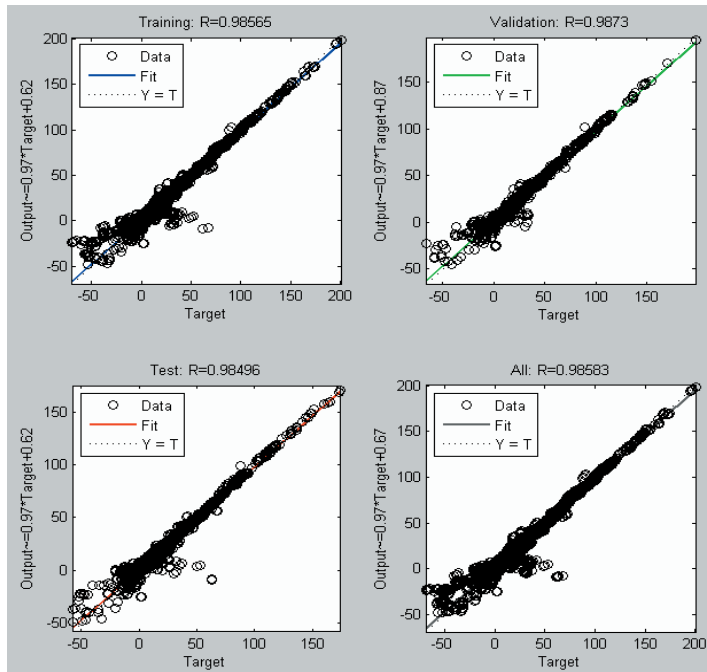
Na obrázku 5 je znázornená závislosť chyby učenia a regresie od počtu neurónov v skrytej vrstve. Chyba učenia (MSE – Mean Squared Error) je priemerná kvadratická hodnota rozdielu medzi vstupmi a výstupmi. Nižšie hodnoty sú lepšie, nula predstavuje žiadnu chybu. Hodnoty regresie R určujú vzájomný vzťah medzi výstupmi a cieľmi. Hodnota 1 znamená blízku závislosť, 0 náhodné príbuzenstvo.

Učenie (Training) siete bolo prevádzané s experimentálnymi údajmi z celkového počtu 3920 vzoriek, ktoré boli zapísané vo forme tabuľky. Ďalších 588 vzoriek bolo použitých na overenie platnosti a testovanie naučenej siete.



Obrázok 5 Výkon a priebeh učenia sa navrhnujej siete

Po viacerých skúškach bolo navrhnutých 8 neurónov v skrytej vrstve. Ako prenosové funkcie boli zvolené: tangenciálna esovitá funkcia „tansig“ pre skrytú vrstvu a lineárna prenosová funkcia „purelin“ pre výstupnú vrstvu. Sieť bola trénovaná Levenberg-Marquardtovým algoritmom.



Obrázok 6 Regresné krivky učenia, testovania, kontroly a všetkých parametrov pre nami zvolenú metódu

5. ZÁVER

Po testovaní viacerých algoritmov učenia neurónových sietí a faktorov vplývajúcich na výslednú presnosť modelu sme zvolili ako najvhodnejšiu viacvrstvovú doprednú sieť (*Feed-forward backpropagation NN*) s jednou skrytou vrstvou. Hodnoty regresie R pre sieť s ôsmymi neurónmi v skrytej vrstve sa blížila k 1, čo znamená blízku závislosť medzi vstupmi a výstupmi. Priemerná chyba učenia je 9,8%. Pomocou tohto modelu je možné určiť, s určitou pravdepodobnosťou, aký bude predpokladaný výstup (veľkosť zložiek reznej sily) na základe zadaných vstupných premenných (rezná rýchlosť, hĺbka rezu, posuv na otáčku, uhol sklonu reznej hrany).

LITERATÚRA

- BEALE, M. H. et al.: 2010. *Neural Network Toolbox™ 7. User's Guide*. Mathworks, Inc., 2010, 951 p.
- CUS, F. et al.: 2006. Dynamic Neural network Approach for Tool Cutting Force Modeling of End Milling Operations. *International Journal of General Systems*, 2006, Vol. 35, Issue 56, p. 603–618. ISSN 0308-1079.
- EZUGWU, E. O. et al.: 2005. Modelling the correlation between cutting and process parameters in high-speed machining of Inconel 718 alloy using an artificial neural network. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, Vol. 45, p. 1375–1385. ISSN 0890-6955.
- HAO, W. et al.: 2006. Prediction of cutting force for self-propelled rotary tool using artificial neural networks. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, Vol. 180, p. 23–29. ISSN 0924-0136.
- HRIC, J.: 2010. Vplyv vybraných faktorov pri sústružení rotujúcim rezným klinom. *Dizertačná práca*. Zvolen : Vydavateľstvo TU, 2010, 130 s.
- MINÁRIK, M.: 2004. Podklady pre konštrukčné riešenie sekačky. In *6. Medzinárodná vedecká konferencia mladých 2004*, konaná 21.–22. októbra 2004. Nitra : SPU, 2004, s. 176–184. ISBN 80-8069-422-2.
- NÁPRSTKOVÁ, N.: 2006. Optimalizace a řízení procesu broušení. In *Automation and CA Systems in Technology Planning and in Manufacturing (International Scientific-Technical Conference for PhD Students)*. Giewartow : PUT Poznan, 2004, s. 193–197. ISBN 83-904877-8-0, ISSN 1335-3799.
- NÁVRAT, P. a kol.: 2006. *Umelá inteligencia*. Bratislava : Vydavateľstvo STU, 2006, s. ISBN 80-227-2354-1.
- SZECSI, T.: 1999. Cutting force modeling using artificial neural networks. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, Vol. 92–93, p. 344–349. ISSN 0924-0136.

Kontaktná adresa:

Ing. Júlia Mečiarová, PhD., KVMT FEVT TU vo Zvolene, Študentská 26, 960 53 Zvolen
Ing. Aleš Pavelka, PhD., ÚPŘT FCHI VŠCHT Praha, Technická 5, Praha 6
doc. Ing. Lubomír Javorek, CSc., KDSZ FEVT TU vo Zvolene, Študentská 26, 960 53 Zvolen

ADAPTÁCIA NÁKLADNÝCH AUTOMOBILOV PRE ODVOZ DREVA

ADAPTATION OF LORRIES FOR TIMBER TRANSPORT

Juraj MIKLEŠ

Abstrakt: Hydraulické nakladacie žeriavy sú základným prostriedkom pre nakladanie a skladanie dreva z nákladných automobilov v LH. V príspevku je naznačený postup, ktorý treba dodržať pri montáži žeriava na nákladný automobil. Je urobený výpočet stability hydraulického nakladacieho žeriavu na automobilovom podvozku pri priečnej polohe žeriava voči pozdĺžnej osi automobilu.

Kľúčové slová: adaptácia nákladných automobilov, hydraulický žeriav, kontrola stability

Abstract: Hydraulic cranes are basic means for loading and offloading of wood from lorry in forestry. In article is methodology, which must be fulfilling by assembly crane on lorry. The calculation was made for stability of hydraulic crane on lorry's chassis at cross position of crane to longitudinal axis of lorry.

Key words: adaptation of Lorries, hydraulic crane, control of stability

ÚVOD

Využitie hydraulických nakladacích žeriavov stúpa v odvoze dreva v rámci LH. Podľa ekonomických prepočtov využitím hydraulického nakladacieho žeriava 8 tm sa dosiahne na 1 t manipulovaného materiálu, úspora 51,5% v porovnaní s východným stavom. (Mikleš; Holík 2005)

Všetky vozidlá si však pred samotnou montážou vyžadujú niektoré úpravy a konštrukčné zásahy, aby sa zabezpečila prevádzka bez porúch a to hydraulického nakladacieho žeriava i samotného automobilu. Tiež treba brať na zreteľ, že sa jedná o zdvíhacie zariadenia, ktoré patria medzi vyhradené technické zariadenia a pri ich konštrukcii montáži, skúšaní i prevádzke sa je potrebné plne riadiť vyhláškami a normami STN 27 0101, 27 0103, 27 0140, 27 0105, 34 1640 a s nimi súvisiace ostatné normy STN.

Na základe takto vypracovanej technickej dokumentácie je, pred montážou potrebný písomný súhlas výrobcu vozidla dávajúci povolenie k montáži. Súhlas k montáži hydraulického nakladacieho žeriava dáva výrobca automobilu po predložení technickej dokumentácie a konštrukčných úprav vozidla. Po obdržaní súhlasu výrobcu vozidla podlieha konštrukčné riešenie montáže hydraulického nakladacieho žeriava a samotné odskúšanie namontovaného zariadenia do kompetencie príslušného inšpektorátu bezpečnosti práce (IBP), do ktorého kompetencie spadá podnik uskutočňujúci montáž.

Z hľadiska spôsobilosti vozidla pre cestnú premávku po vykonaní úprav pri ktorých došlo k zmene vozidla po montáži hydraulického nakladacieho žeriava podlieha toto schvaľovaciemu konaniu príslušného dopravnému inšpektorátu (DI). Až po predpísaných schvaľovacích konaniach možno uviesť hydraulický nakladací žeriav do prevádzky a to iba prototyp. Po prevádzke 200 hod. a opätovnom preverení správnosti všetkých funkcií možno na základe rozhodnutia IBP pristúpiť k sériovej montáži. Uvádzame to preto lebo v súčasnosti sa v prevádzke objavuje veľké množstvo vozidiel kde sa montuje hydraulický žeriav.

1 TECHNICKÝ POPIS KONŠTRUKČNÉHO RIEŠENIA ÚPRAVY PODVOZKU

Hydraulické nakladacie žeriavy všeobecne sú v svojej podstavovej časti opatrené pripevňovacími pätkami, ktoré slúžia k ich pripojeniu na mobilný, prípadne stabilný nosný prostriedok. Pred samotnou montážou je však potrebné vykonať niektoré úpravy a zásahy do jeho konštrukcie.

Spôsob montáže a príprava rámu vozidla sú obsiahnuté v technologickom postupe montáže, ktorý tvorí súčasť technickej dokumentácie.

Pre samotnú montáž má rozhodujúci význam príprava rámu vozidla na uchytenie hydraulického nakladacieho žeriava. Rám automobilu na montáž možno pripraviť v zásade dvoma spôsobmi;

1. úpravou nosného rámu automobilu
2. vytvorením pomocného rámu.

Úprava rámu automobilov TATRA je konštrukčne riešená ako zvarovaný vystužený nosník pozostávajúci z jednej hornej a dvoch spodných pásníc vzájomne prepojených výstužnými rebrami. Jednotlivé súčasti upravovaného rámu sú privárané na nadstavňový rám automobilu a tvoria s ním jeden celok. Z vnútornej strany je medzi horné a dolné pásnice vložená vnútorná výstuž, aby nedošlo vplyvom ohriatia počas zvarovania k deformácii pásníc. Všetky súčasti okrem spodných pásníc vonkajších sú pripojené k nastavnému rámu.

Na zamedzenie horizontálneho pohybu hydraulického nakladacieho žeriava a tiež i za účelom eliminácie namáhania upínacích skrutiek pri brzdení a rozbiehaní automobilu sú na horných pásniciach vedľa upínacích pätiiek navarené záračky, ktoré sa navárajú až po namontovaní hydraulického nakladacieho žeriava.

2 STANOVENIE ZAŤAŽENIA

Pred začatím výpočtu stability a pevnosti jednotlivých komponentov súvisiacich s montážou hydraulického nakladacieho žeriava je nutné v zmysle ustanovení normy STN 27 0103 stanoviť koeficienty zohľadňujúce druh žeriavu, spôsob jeho zaťažovania, prevádzkové parametre a druh prevádzky. Na základe týchto podmienok sa potom stanoví výpočtová hmotnosť žeriavu a zaťažovacieho bremena. U hydraulických nakladacích žeriavov sa stanovenie koeficientov po zaradení do príslušnej žeriavovej skupiny redukuje sa na určenie:

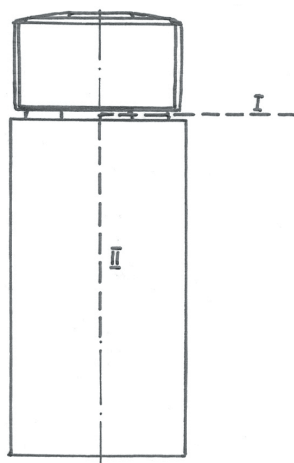
n_g – koeficient zaťaženia od vlastnej hmotnosti

n_Q – súčiniteľ preťaženia od bremena (zohľadňuje nepresnosť dvíhanej záťaže)

ψ – súčiniteľ rýchlosti zdvihu

3 VÝPOČET STABILITY HYDRAULICKÉHO NAKLADACIEHO ŽERIAVA NA AUTOMOBILOVOM PODVOZKU

Stanovenie stability na automobilovom podvozku príslušného vozidla patrí k rozhodujúcim kritériám pri posudzovaní vhodnosti montáže hydraulického nakladacieho žeriava na príslušný druh automobilu alebo iného nosného prostriedku. Stabilitu je potrebné matematicky stanoviť pre najnepriaznivejšie polohy vyloženia, tak ako to vidno z obr. č. 1. Je to predovšetkým poloha kolmá na pozdĺžnu os vozidla a poloha rovnobežná s pozdĺžnou osou automobilu, ktorú je potrebné zvlášť staticky prešetriť pri zadnej montáži. Vzhľadom na to, že počas pracovnej činnosti sa počíta aj s prácou v nerovnom teréne uvažuje sa vo výpočtoch so sklonom vozidla $\varphi = 3^\circ$. (Mikleš et al. 2010, Grečenko 1986; Bibljuk 2004, Leckie et. al. 2010)



Obr. 1 Najpriaznivejšie polohy vyloženia výložníka HŽ

Za základné parametre potrebné na stanovenie stability hydraulického nakladacieho žeriava je nutné považovať:

T – ťažisko

v_T – vzdialenosť ťažiska od osi otáčania výložníka

T' – ťažisko hmotnosti výložníka

l_v – vzdialenosť ťažiska výložníka k osi otáčania

b – vzdialenosť háku pri plnom vyložení k osi otáčania

l – rozchod kolies automobilu

A, B – rázvor náprav automobilu

P – rozstup podpier

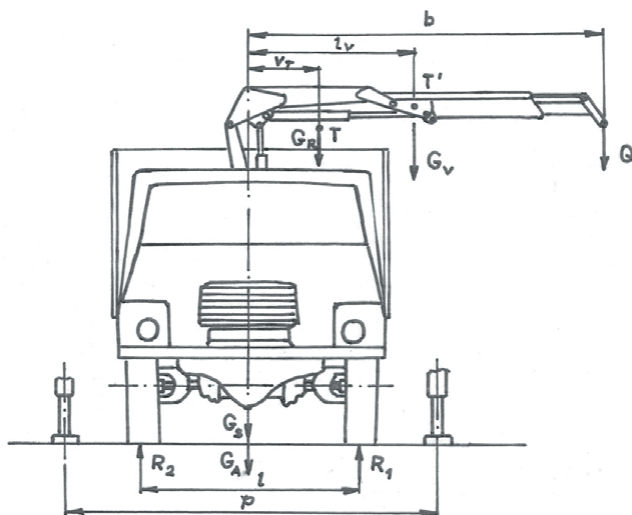
G_v – tiaž výložníka

G_A – pohotovostná tiaž automobilu

G_s – tiaž hydraulického nakladacieho žeriava

R 1, R 2, R 3 – reakcie na vozidlo

M_{\max} – Max. klopný moment hydraulického nakladacieho žeriava pri max. zaťažení
 RI, RII, RIII – tlak na nápravu



Obr. 2 Silové pomery pri priečnom vyložení HRŽ

Z rozloženia síl vid'. obr. č. 2 potom možno vyšetriť stabilitu hydraulického nakladacieho žeriava v smere priečnom t. j., kolmom na pozdĺžnu os vozidla. Je treba pripomenúť, že stabilita je vypočítaná za podmienky bezpodmienečného vysunutia výsuvných podpier počas prevádzky.

Klopný moment potom možno stanoviť zo základných podmienok rovnováhy ku klopnému bodu, ktorým je miesto polohy podpery:

$$Mkl = Q \cdot \left(b - \frac{p}{2} \right) + G_v \cdot \left(l_v - \frac{p}{2} \right) + R_2 \cdot \left(\frac{p+l}{2} \right) + R_1 \cdot \left(\frac{p-l}{2} \right) \quad [\text{Nm}] \quad (1)$$

Moment klopnyšak pri práci na svahu $\varphi = 3$ bude zvýšený o hodnotu:

$$Mkl_s = Mkl \cdot \sin \varphi \quad [\text{Nm}] \quad (2)$$

Hodnota klopného momentu celkom bude:

$$Mklc = Mkl + Mkl_s \quad [\text{Nm}] \quad (3)$$

Stabilitu hydraulického nakladacieho žeriava na automobile budú zabezpečovali sily, ktoré vyvolávajú stabilizačný moment, ktorý možno stanoviť:

$$Mst = G_A \cdot \frac{p}{2} + G_s \cdot \left(\frac{p}{2} - v_r \right) \quad [\text{Nm}] \quad (4)$$

Vzhľadom na prevádzku hydraulického nakladacieho žeriava na svahu so sklonom $\varphi = 3^\circ$ dôjde k jeho zníženiu o hodnotu:

$$M'st = Mst \cdot \sin \varphi \quad [\text{Nm}] \quad (5)$$

Potom celkový stabilizačný moment stanovíme:

$$Mstc = Mst - M'st \quad [\text{Nm}] \quad (6)$$

Hydraulický nakladací žeriav bude na vozidle stabilný v príslušnej polohe za predpokladu, ak bude splnená podmienka:

$$Mstc > Mklc$$

Podmienku stability možno tiež vyjadriť pomocou súčiniteľa stability „s“ pričom keď je:

$s < 1$ je hydraulický nakladací žeriav nestabilný

$s = 1$ je hydraulický nakladací žeriav labilný

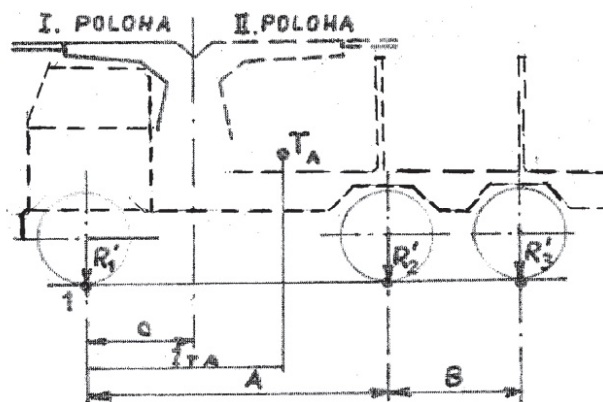
$s > 1$ vtedy je hydraulický nakladací žeriav stabilný

súčiniteľ stability je daný pomerom:

$$s = \frac{Mstc}{Mklc} > 1$$

4 STABILITA HYDRAULICKÉHO NAKLADACIEHO ŽERIAVA NA AUTOMOBILE V POZDĹŽNOM SMERE

Rozloženie silových pomerov pri polohe ramena výložníka v pozdĺžnej osi automobilu možno vidieť na obr. č. 3. Jedná sa o konštrukčné riešenie montáže za kabínou vozidla, a to pri vyklopení ramena pred kabínu.



Obr. 3 Silové pomery pri pozdĺžnom vyložení HRŽ

Klopný moment k bodu č. 1 v tejto polohe možno určiť z rovnice:

$$Mkl = Q(b - c) + R_2 \cdot A + R_3 \cdot (A + B) \quad [\text{Nm}] \quad (7)$$

Zvýšenie klopného momentu pri práci vo svahu $\varphi = 3^\circ$

$$M'_{kl} = M_{kl} \cdot \sin 3^\circ \quad [\text{Nm}] \quad (8)$$

Moment klopný celkový bude:

$$M_{klc} = M_{kl} + M'_{kl} \quad [\text{Nm}] \quad (9)$$

Moment stabilizujúci bude opäť vyvolaný stabilizujúcimi silami:

$$M_{st} = G_A + I_{TA} \quad [\text{Nm}] \quad (10)$$

Pri práci v naklonenom teréne $\varphi = 3^\circ$ dôjde k zníženiu stabilizačného momentu:

$$M'_{st} = M_{st} \cdot \sin 3^\circ \quad [\text{Nm}] \quad (11)$$

Moment stabilizujúci celkový bude:

$$M_{stc} = M_{st} \pm M'_{st} \quad [\text{Nm}] \quad (12)$$

Hodnota stabilizujúceho momentu sa však dá vypočítať aj pomocou povolených nápravových tlakov.

Opätovne, aby bola preukázaná stabilita hydraulického nakladacieho žeriava i v tomto smere bude musieť byť splnená podmienka:

$$M_{stc} > M_{klc} \quad \text{a} \quad s = \frac{M_{stc}}{M_{klc}} > 1$$

5 STANOVENIE NÁPRAVOVÝCH TLAKOV PO NAMONTOVANÍ HYDRAULICKÉHO NAKLADACIEHO ŽERIAVA

Povolené nápravové tlaky predpisuje výrobca automobilu, a to pre prázdny vozidlo a pre vozidlo plne zaťažené. Výrobcovia vozidiel, ktoré sú určené aj pre prácu v teréne predpisujú zvlášť nápravové tlaky pre terén.

Predpokladáme zloženie hydraulického žeriavu, ťažisko HŽ sa nachádza vo vzdialenosti c od osi prednej nápravy.

Zvýšenie tlaku na zadnú dvojnápravu možno vypočítať z rovnice:

$$R_{IIc} \left(A + \frac{B}{2} \right) + G_S \cdot c = 0 \Rightarrow R_{IIc} = \frac{G_S \cdot c}{A + \frac{B}{2}} \quad [\text{N}] \quad (13)$$

R_{IIc} – tlak na váhadlo zadnej dvojnápravy

Z toho tlak / jeho zvýšenie na každú jednotlivú nápravu bude:

$$R_{II} = R_{III} = R_{IIc} / 2$$

Zvýšenie tlaku na prednú nápravu možno určiť z rovnice:

$$R_I = \frac{GR \left(A + \frac{B}{2} - c \right)}{A + \frac{B}{2}} \quad [\text{N}] \quad (14)$$

Putom vzhľadom na zvýšenie nápravových tlakov v dôsledku montáži hydraulického nakladacieho žeriava je nutné znížiť nosnosť vozidla a rozložiť hmotnosť záťaže tak, aby nebola prekročená povolená nosnosť jednotlivých náprav.

ZÁVER

Cieľom príspevku je ukázať na celkovú šírku problematiky, ktorú je nutné riešiť v súvislosti s montážou hydraulických nakladacích žeriavov na nákladné automobily a to najmä s dôrazom na základný okruh podmienok, za ktorých je možné montáž realizovať. Boli vybrané základné kritéria akým je stabilita, dovoľené zaťaženie náprav a postup pri schvaľovacom konaní, ktoré je potrebné vykonať ešte pred začatím montáže.

Uvedený postup výpočtu stability možno použiť aj pri hodnotení statickej stability pracovných strojov. Predovšetkým metódu možno aplikovať pri stavebných a lesných strojoch na kolesovom alebo pásovom podvozku, keď sú vybavené výložníkom, na ktorom je technologické zariadenie.

LITERATÚRA

- BIBLJUK, N.: Lisotranspotni zasobi: Teorija, Lvov, Vydavateľstvo Panorama, 2004, 453 s.
GREČENKO, A.: Metoda určovaní svahové dostupnosti zemědělských vozidel, Zemědělská technika, 32, 1986 (10): 577–598.
LECKIE F.A.; DALBELLO D. J.: Strength and Stiffness of Engineering Systems, New York, Springer Science Bussiness Media, 2009, 690 s.
MIKLEŠ, M.; HOLÍK, J.; MIKLEŠ, J.: Projektovanie a výpočet lesných strojov, Vydavateľstvo TU vo Zvolene, Zvolen, 2010, 200 s.
MIKLEŠ, M.; HOLÍK, J.: Projektovanie a výpočet lesných strojov, Vydavateľstvo TU vo Zvolene, ZVOLEN, 2005, 180 S.
MIKLEŠ, M.: Hodnotenie stability lesného približovacieho traktora vybaveného hydromanipulátorom, In: Zborník z konferencie katediier dopravných, stavebných a zemědělských stroju, Brno, 2011, 5 strán
STN 270103, STN 270140, STN 270105, STN 341640; 1994.

Príspevok je prezentovaný v rámci riešenia vedeckého grantového projektu VEGA MŠ SR č. 1/0048/09.

Kontaktná adresa:

Ing. Juraj Mikleš, PhD., Katedra environmentálnej techniky,
Fakulta environmentálnej a výrobnnej techniky, Technická univerzita vo Zvolene,
T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen, E-mail: jmikles@vsld.tuzvo.sk

STABILITA LESNÝCH TRAKTOROV NA SVAHOCH

STABILITY OF LOGGING TRACTORS ON THE SLOPE

Milan MIKLEŠ

ABSTRACT: The concept of gradeability is not exactly defined so that in some aspects the properties of the machines are underestimated and in other aspects the needed safety is not secured. The proposed method of evaluation is based on partial criteria which emphasize some of the most difficult but standard situations and the technical fitness of the machine. The needed data can be measured or calculated. The technique of an estimation of stability of a four-wheel drive forest tractor provided of hydraulic crane to tumbling is offered at its movement on the slope.

Key words: logging tractor, stability, adaptation of hydraulic crane

ABSTRAKT: Pojem svahovej dostupnosti nie je presne definovaný, takže v niektorom ohľade schopnosti strojov podhodnocuje, v inom ohľade nezaistuje požadovanú bezpečnosť navrhovaná metóda hodnotenia je založená na dielčích kritériách, ktoré zdôrazňujú typické situácie a technickú spôsobilosť stroja. Predložená je metodika hodnotenia stability lesného kolesového traktora vybaveného hydraulickým žeriavom voči prevracaniu pri jeho pohybe na svahu.

Kľúčové slová: lesný traktor, stabilita, adaptácia hydraulických žeriavov

1 ÚVOD

Použitie kolesových približovacích traktorov s hydraulickým žeriavom, obzvlášť menších typorozmerov, v horských podmienkach lesnej ťažby môže sa ukázať ešte viac perspektívnym, pretože viac zodpovedajú požiadavkám a umožňujú tiež vylúčiť ťažnú prácu pri úväzkovom približovaní.

Pri sledovaní procesu zväzkovania kmeňov alebo sortimentov hydraulickým žeriavom kolesového traktora na svahu, je nevyhnutné brať do úvahy rozloženie normálových reakcií na kolesá, od ktorého závisí zaťaženie elementov pojazdovej časti a stabilita stroja.

2 URČENIE REAKCIÍ NA LESNÝ KOLESOVÝ TRAKTOR

Pre riešenie pre určenie normálových reakcií zoberieme nebezpečnú polohu kolesového traktora s hydraulickým žeriavom na svahu (obr. 1), keď pozdĺžna os je zhodná so

smerom pohybu nakladania na pozdĺžno-priečnom sklone dolu svahom pritom hydraulický žeriav začína dvíhať vrchnú časť prvého kmeňa, ležiaceho sprava od traktora v smere jeho pohybu taká situácia môže vzniknúť pri zväzkovaní nákladu a použití technológie s použitím približovacích kolesových traktorov na sústreďovanie dreva (sortimentov, kmeňov) v horských podmienkach. V tomto prípade na lesný kolesový traktor s hydraulickým žeriavom pôsobia nasledovné sily (obr. 1):

G – sila tiaže traktora včítane tiaže hydraulického žeriavu a zverného oplena,

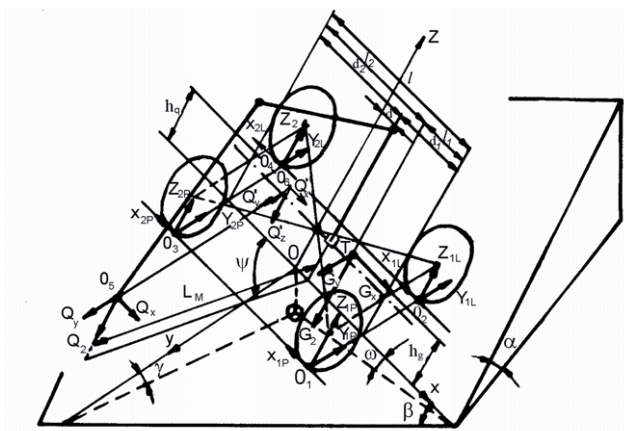
Q – zaťaženie od tiaže kmeňa pri oddelení vrchnej časti kmeňa od Zeme,

Z_{1P} Z_{1L} – normálové reakcie na pravom a ľavom kolese prednej sekcie,

Z_{2P} Z_{2L} – normálové reakcie na pravom a ľavom kolese zadnej sekcie,

X_{1P} X_{1L} a Y_{1P} Y_{1L} – pozdĺžne a priečne reakcie na pravom a ľavom kolese prednej sekcie,

X_{2P} X_{2L} a Y_{2P} Y_{2L} – pozdĺžne a priečne reakcie na pravom a ľavom kolese zadnej sekcie.



Obr. 1 Schéma pôsobenia síl a momentov na traktor s hydraulickým žeriavom na svahu

Na obr. 1 taktiež sú uvedené geometrické rozmery traktora, hydraulického žeriavu a uhly sklonu.

Sila tiaže G traktora a sila Q sú rozložené na zložky:

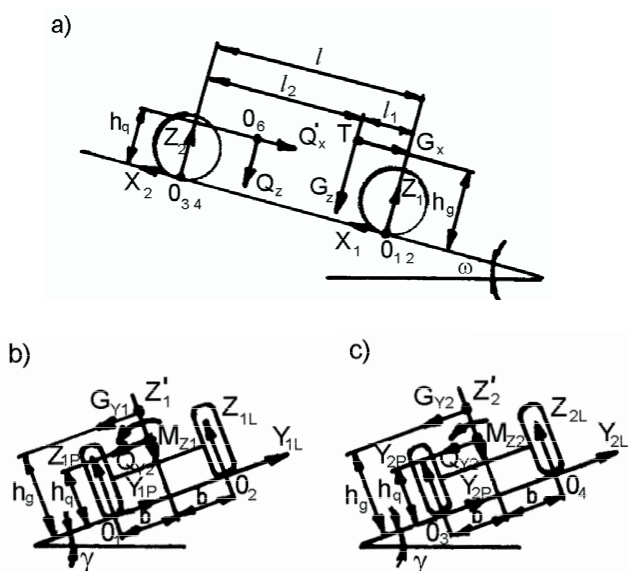
V smere osi $O_x - G_x, Q_x$; v smere osi $O_y - G_y, Q_y$; normálové k opornému povrchu – G_z, Q_z (v smere osi Q_z).

Výsledkom prenesenia zaťaženia od časti kmeňa z bodu O_5 (obr. 1) v línii pôsobenia sily Q_y do bodu O_6 , ležiaceho v rovine xO_z , dostaneme: silu Q'_z , ktorá čo do veľkosti je rovná Q_z ; moment $M_z = Q_z \cdot L_M \cdot \sin \psi$; silu Q'_x , ktorá čo do veľkosti je rovná Q_x , a moment $M_x = Q_x \cdot L_M \cdot \sin \psi$.

Sledovanú polohu traktora na ploche s priečnym sklonom ω (veľičina sa určí z goniometrického vzťahu v závislosti od uhlov α a β : $\sin \omega = \sin \alpha \cdot \sin \beta$), zostavením a riešením momentovej rovnice k bodom $O_{3,4}$ a $O_{1,2}$ (obr. 2a), nájdeme sumárne reakcie na prednú nápravu Z_1 a zadnú nápravu Z_2 :

$$Z_1 = \frac{G_z l_2 + G_x h_g + Q_z (d_2 - L_M \cdot \cos \psi) + Q_x h_q}{l}$$

$$Z_2 = \frac{G_z l_1 - G_x h_g + Q_z (d_1 + L_M \cdot \cos \psi) - Q_x h_q}{l}$$



Obr. 2 Schémy k výpočtu normálových reakcií na kolesá traktora

Pre určenie normálových reakcií na pravých a ľavých kolesách prednej a zadnej sekcie berieme polohu traktora na ploche len s pozdĺžnym sklonom γ (veľčinu možno určiť z goniometrického vzťahu: $\sin \gamma = \sin \alpha \cdot \cos \beta$) obr. 2b a c.

V sledovanej polohe na prednú nápravu traktora pôsobia nasledovné sily a momenty (obr. 2b): sila Z'_1 , ktorá čo do veľkosti je rovná Z_1 , čo do smeru je opačná; priečne sily

$$G_{y1} = \frac{G_y \cdot l_2}{l}; \quad Q_{y1} = \frac{Q_y (d_2 - L_M \cos \varphi)}{l};$$

$$\text{a moment } M_{Z1} = \frac{Q_z (d_2 - L_M \cos \psi) L_M \sin \psi}{l}.$$

Na zadnú nápravu pôsobia (obr. 2c) normálová sila Z'_2 , ktorá je rovná veľkosťou Z_2 a smer má opačný; priečne sily

$$G_{y2} = \frac{G_y \cdot l_1}{l}; \quad Q_{y2} = \frac{Q_y (d_1 + L_M \cos \varphi)}{l};$$

$$\text{a moment } M_{Z2} = \frac{Q_z (d_1 + L_M \cos \psi) \cdot L_M \sin \psi}{l}.$$

Zostavením a riešením momentových rovníc k bodom O_2, O_1, O_4, O_3 (obr. 2), nájdeme normálové reakcie na kolesá traktora:

$$\begin{aligned}
 Z_{1P} &= \frac{G}{2} \left(\frac{l_2 \cos \alpha + h_g \sin \alpha \cdot \sin \beta}{l} + \frac{l_2 h_g \sin \alpha \cdot \cos \beta}{bl} \right) + \\
 &+ \frac{Q}{2} \left[\frac{(d_2 - L_M \cos \psi) \cos \alpha + h_q \sin \alpha \sin \beta}{l} + \frac{(d_2 - L_M \cos \psi)(L_M \sin \psi \cdot \cos \alpha + h_q \sin \alpha \cos \beta)}{bl} \right]; \\
 Z_{2l} &= \frac{G}{2} \left(\frac{l_2 \cos \alpha + h_g \sin \alpha \cdot \sin \beta}{l} - \frac{l_2 h_g \sin \alpha \cdot \cos \beta}{bl} \right) + \\
 &+ \frac{Q}{2} \left[\frac{(d_2 - L_M \cos \psi) \cos \alpha + h_q \sin \alpha \sin \beta}{l} - \frac{(d_2 - L_M \cos \psi)(L_M \sin \psi \cdot \cos \alpha + h_q \sin \alpha \cos \beta)}{bl} \right]; \\
 Z_{2P} &= \frac{G}{2} \left(\frac{l_1 \cos \alpha - h_g \sin \alpha \cdot \sin \beta}{l} + \frac{l_1 h_g \sin \alpha \cdot \cos \beta}{bl} \right) + \\
 &+ \frac{Q}{2} \left[\frac{(d_1 + L_M \cos \psi) \cos \alpha - h_q \sin \alpha \sin \beta}{l} + \frac{(d_1 + L_M \cos \psi)(L_M \sin \psi \cdot \cos \alpha + h_q \sin \alpha \cos \beta)}{bl} \right]; \\
 Z_{2l} &= \frac{G}{2} \left(\frac{l_1 \cos \alpha - h_g \sin \alpha \cdot \sin \beta}{l} - \frac{l_1 h_g \sin \alpha \cdot \cos \beta}{bl} \right) + \\
 &+ \frac{Q}{2} \left[\frac{(d_1 + L_M \cos \psi) \cos \alpha - h_q \sin \alpha \sin \beta}{l} - \frac{(d_1 + L_M \cos \psi)(L_M \sin \psi \cdot \cos \alpha + h_q \sin \alpha \cos \beta)}{bl} \right] \quad (1)
 \end{aligned}$$

3 HODNOTENIE STABILITY STROJA

Pre riešenie získaných závislostí (1) je vhodné zostaviť program pre počítač.

Možno nájsť aj presnú hodnotu uhla β , pri ktorom normálová reakcia Z_{2l} dosahuje minimum a hodnotu uhla β , pri ktorom normálová reakcia Z_{2P} dosahuje maxima. Postup výskumu je, že hľadáme extrémny funkcií $Z_{2l} = f(\beta)$ a $Z_{1P} = f(\beta)$ podľa známych metód matematickej analýzy.

Výsledky tohto výskumu ukázali, že pri

$$\beta = \arctg \frac{(G \cdot h_g + Q h_q) b}{G h_g l_1 + Q h_q (d_1 + L_M \cos \psi)} \quad (2)$$

Normálová reakcia na ľavom kolese zadnej sekcie traktora dosahuje minima, a pri

$$\beta = \arctg \frac{(G \cdot h_g + Q h_q) b}{G h_g l_2 + Q h_q (d_2 - L_M \cos \psi)} \quad (3)$$

Normálová reakcia na pravom kolese prednej sekcie traktora dosahuje maxima.

4 ZÁVER

Takýmto spôsobom rozpracovaná metóda dovoľuje teoretickou cestou určiť normálové reakcie na kolesách približovacieho traktora s hydraulickým žeriavom pri kompletizácii nákladu na svahu. Analýza získaných výrazov ukazuje, že rozdelenie normálových reakcií na kolesá traktora pri nakladaní kmeňov hydraulickým žeriavom závisí od sklonu svahu, polohy stroja na svahu, veľkosti nákladu a parametrov približovacieho traktora s hydraulickým žeriavom. Pomocou získaných výrazov pre normálové reakcie na kolesách možno nájsť nebezpečné polohy približovacieho systému z podmienky stability a zaťaženia náprav, kolies traktora pri práci sústreďovania v horských podmienkach.

LITERATÚRA

- GREČENKO, A.: Podklady k hodnocení svahové dostupnosti zemědělských vozidel: stranový nadhoz na vrstevnici. *Zemědělská technika*, 33, 1987 (12): 707–722.
- GREČENKO, A.: Dynamická stabilita jako součást svahové dostupnosti zemědělských strojů, *Zemědělská technika*, 29, 1983 (11): 643–658.
- GREČENKO, A.: Metoda určování svahové dostupnosti zemědělských vozidel, *Zemědělská technika*, 32, 1986 (10): 577–598.
- MIKLEŠ, J.: Posudzovanie adaptácie nákladných automobilov pre odvoz dreva hydraulickými žeriavmi, In: Zborník z konferencie katedier dopravných, stavebných a zemědělských strojů, Brno, 2011, 8 strán.
- MIKLEŠ, M.; HOLÍK, J.; MIKLEŠ, J.: Projektovanie a výpočet lesných strojov, Vydavateľstvo Technickej univerzity vo Zvolene, Zvolen, 2010, 200 s.
- ŠESTÁK, J; ŠKULAVÍK, L.; SKLENKA, P.; MARKOVIČ, R.: Dynamická stabilita univerzálnej horskej hnacej jednotky MT 8-046, *Zemědělská technika*, 35, 1989 (10): 579–596.
- VLK, F.: Úlohy z dynamiky motorových vozidel, Nakladatelství VLK, Brno, 2001, 221 s.
- VLK, F.: Dynamika motorových vozidel, Nakladatelství a vydavatelství VLK, Brno, 2000, 434 s.

Príspevok vznikol v rámci riešenia grantového projektu VEGA MŠ SR č. 1/0048/09.

Kontaktná adresa:

prof. Ing. Milan Mikleš, DrSc., Katedra lesnej a mobilnej techniky,
Technická univerzita vo Zvolene, Študentská 26, 960 53 Zvolen,
email: mikles@vsld.tuzvo.sk

THE HIGH-SPEED CAMERA IN MACHINING

VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERA V OBRÁBĚNÍ

Martin NOVÁK – Nataša NÁPRSTKOVÁ

ABSTRACT: Presently by taking up of progressive technologies, the new materials of cutting tools, raise of cutting speeds are important information for us about machining process. This process is very dynamic that is why is necessary the description of relative motion of cutting tool and workpiece and information of the chip creation. By the usage of High-speed Camera we have information about shape and size of chip, its motion after tool. These datas are unique for concrete material, cutting conditions a machining technology. At the Faculty of production technology and management of Jan Evangelista Purkyně University in Ústí nad Labem there this device is available, namely it is High-speed Camera Olympus i-speed 3 and the article shows its usage and possibilities for documentation of various types of machining.

Key words: Chip formation, High-speed Camera, machining

ABSTRAKT: V současnosti probíhá velký rozvoj progresivních technologií obrábění, nových materiálů, řezných nástrojů, zvyšují se řezné rychlosti atp. Díky tomu informace o procesu obrábění jsou velmi důležité. Tento proces je velmi dynamický, a proto je třeba popis relativního pohybu řezného nástroje a obrobku a informace o tvorbě třísky. Pro získávání takových informací jsou vhodné například vysokorychlostní kamery. Jedná se hlavně o informace o tvaru a velikosti třísky a o jejím pohybu v okolí nástroje. Tato data jsou vždy jedinečná pro konkrétní materiál, řezné podmínky, technologie obrábění. Na Fakultě výrobních technologií a managementu Univerzity Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem je takové zařízení, konkrétně se jedná o vysokorychlostní kameru Olympus i-speed 3 a článek ukazuje její použití a možnosti pro dokumentaci různých typů obrábění.

1. INTRODUCTION TO MACHINING PROCESSES

With development of modern technologies in machining area are developments new ways and methods like support and get more information about machining process (Novák, Holešovský, 2010, Vondrouš, Katayma, 2011). By the construction of new shape and size machining tools usage of new materials of machining tools are using simulations methods of mutual motion of tool and workpiece. From is information want we get such information about creation of chip its motion on face of cutting tool its size shape. Next area of usage modern method of visualisation of machining process is implementation of machining progressive methods. Raising of cutting speeds (HSC, HSG, HSM methods) using of Hard Machining (HM), Dry Machining (DM) and methods with all stock removal to us change size, shape and quantity of chips (Mádl, 2010, Mádl, Holešovský, 2008). In practical usage and check on pertinence of usage construction elements, material of cutting

tools we can use High-speed Camera for approach to alone visualisation of chip creation and motion. This camera is very useful by high speed of machining.

2. HIGH-SPEED CAMERA USING IN MACHINING

At FPTM JEPU in Ústí nad Labem we're using this device for visualisation of machining process, as for example creation of chip, size and shape and motion at cutting places. The type of this device is High-speed Camera Olympus i-speed 3 (Figure 1). This camera (Olympus, 2011) can be used for recording of process with 150 000 frames per second. This potential can be used just for record of high speed processes that are at machining very often. Length of machining process record is given by size of PC hard disk because camera end PC are joined with LAN cable and transfer of data and their editing is realized by software of Olympus company. Enlarge of pictures was 5x from position of camera location. Resolution of the camera end photos and videos have been 320×240 pix.



Figure 1 High-speed Camera Olympus i-speed 3

3. TRADITIONAL MACHINING OPERATION

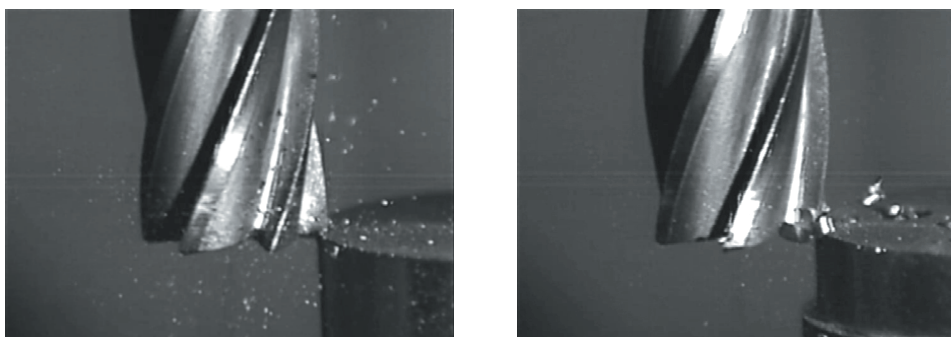
This part of paper will deals with practical shows from machining process by turning of different materials with different cutting conditions and milling of different materials. In pictures are shown chips shapes and sizes by mutual motion of machining tool and workpiece. These pictures (captured form videos) have been created base on the need of visual education support for students of the subject – Machining and Assembly and Theory of Machining like visual samples of machining with different cutting conditions and machining of the different engineering material. These videos can be used like a base of continuing research with focus on chip creations and chips movement in cutting process.

The changes in cutting speed (shown in cutting process) have been the aim of this project. Changes in cutting speed – increased speed (100 m. min^{-1}) and decreased speed

(50 m. min⁻¹) with feed – increased (0,2 mm. rev⁻¹) and decreased (0,05 mm. rev⁻¹). These parameters show the possibilities in cutting speed and feed changes in different materials machining.

3.1 Milling

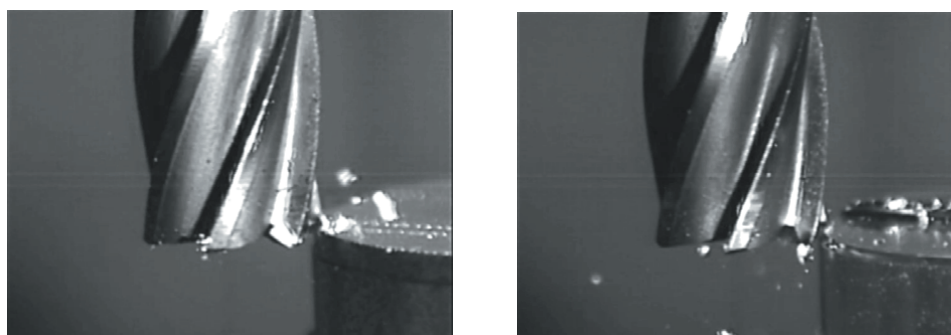
First machining technology, for which documentation was at FPTM used high-speed camera was milling. It is part of machining whereat are workpiece machined with few cutter teeth together. Shape and size of chip is given just shape of cutter teeth and cutting conditions and machined material. In the Figure 2 and Figure 3 are shown milling of materials. Materials are cast iron, ductile iron, aluminium alloy and brass. On these pictures we can see creation and shape and size of chip rising from cutter teeth.



a)

b)

Figure 2 Milling, a) cast iron, b) ductile iron



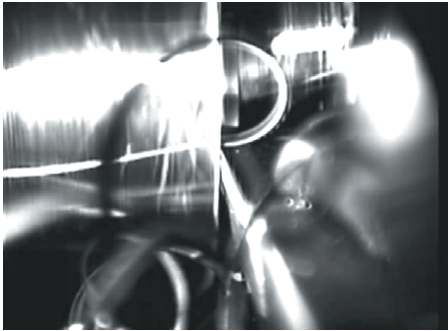
a)

b)

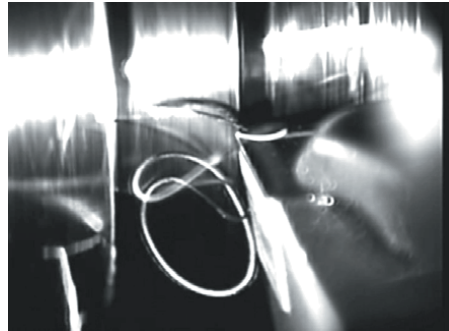
Figure 3 Milling, a) aluminium alloy, b) brass

3.2 Turning

Turning was second documented machining technology. Pictures required by high-speed camera are showing chips during turning process and its shape and size. On Figure 4 we can see shape and size of chip during steel turning.



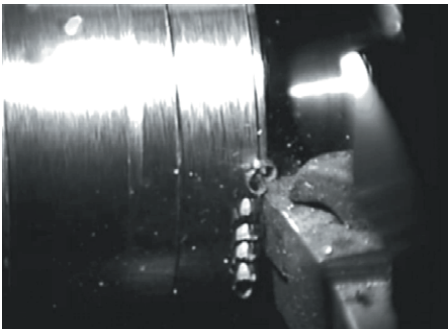
a)



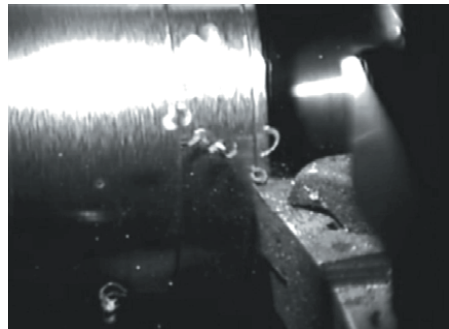
b)

Figure 4 Steel Turning, a) increased cutting condition, b) decreased cutting condition

Figure 5 shows machining of ductile iron. In the Figure 6 we can see turning of cast iron. In the Figure 7 turning of aluminium alloy is shown.

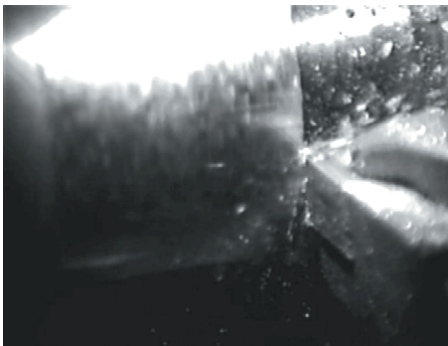


a)

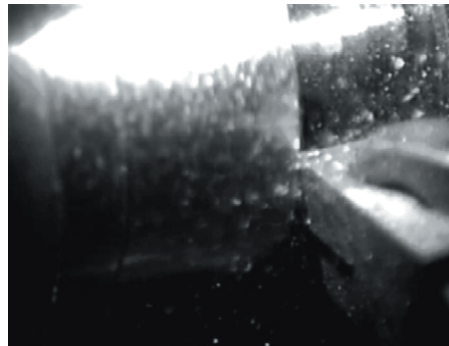


b)

Figure 5 Turning of ductile iron, a) increased cutting condition, b) decreased cutting condition



a)



b)

Figure 6 Turning of cast iron, a) increased cutting condition, b) decreased cutting condition

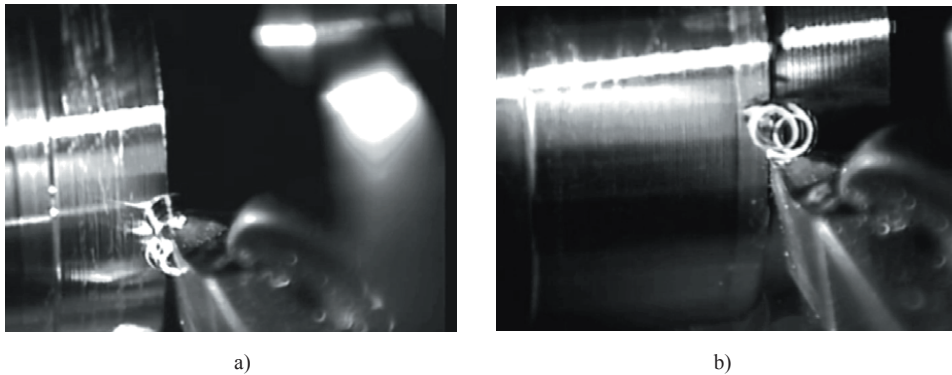


Figure 7 Turning of aluminium alloy, a) increased cutting condition, b) decreased cutting condition

In the Figure 8 is shown turning of brass. For all pictures is rule, that on left side is shown chip by increased cutting conditions and on right side is shown chip shape and size with decreased cutting conditions.

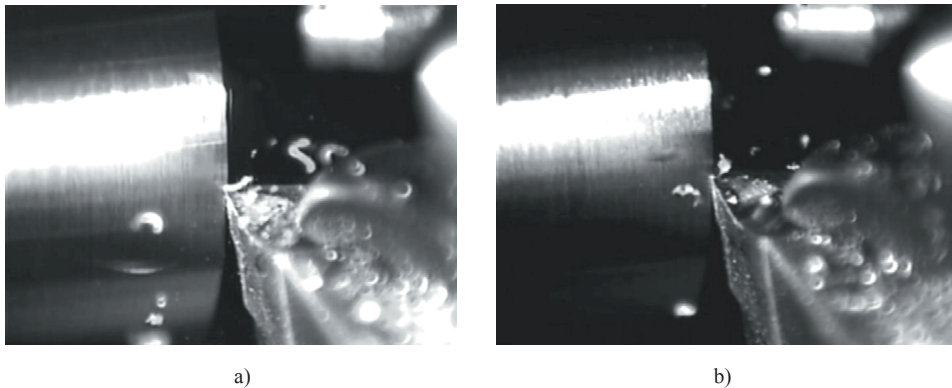


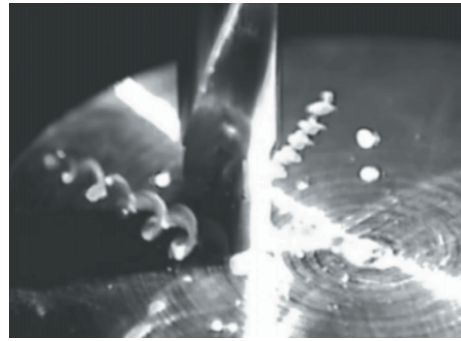
Figure 8 Turning of Brass a) increased cutting condition, b) decreased cutting condition

3.3 Drilling

The drilling is the thirsh documented machining operation by high-speed camera. It is basic operation in machining for the hole creations. There are many factors existing for accuracy of the holes likes shape and quality of edge, move of tool and stiffness of the system. On these pictures (Figure 9–12) you can see creation of chips by the use of different material of the workpiece and different tools especially tip of edge.

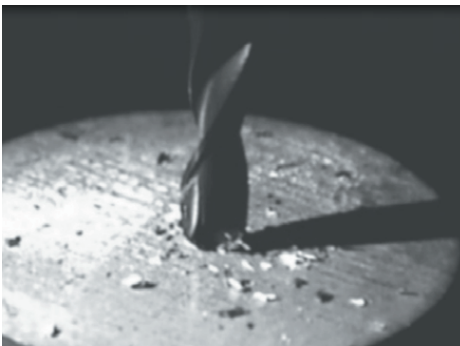


a)

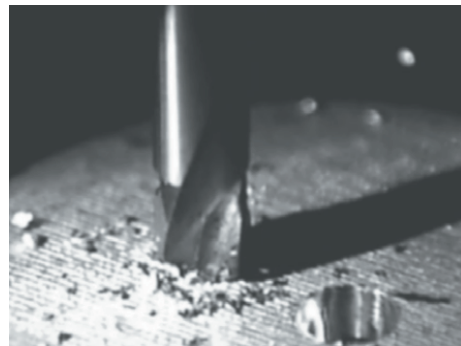


b)

Fig. 9 Aluminium Alloy Drilling, a) HSC Tip, b) SC Tip



a)



b)

Fig. 10 Drilling, a) HSC Tip, b) SC Tip



a)



b)

Fig. 11 Cast Iron Drilling, a) HSC Tip, b) SC Tip

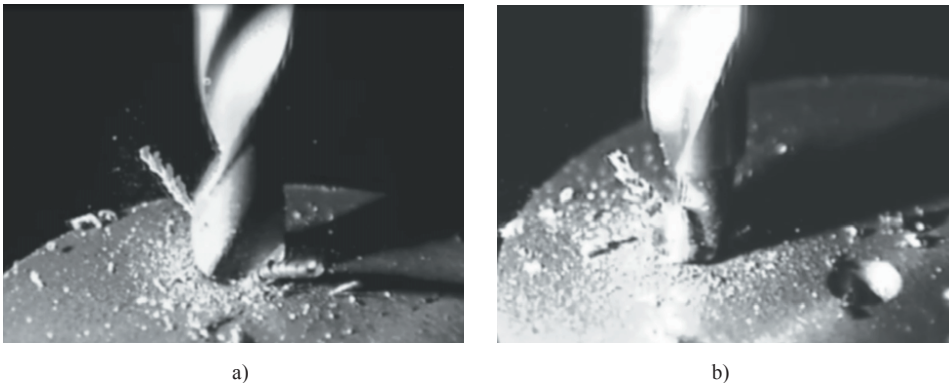


Fig. 12 Ductile Iron Drilling, a) HSC Tip, b) SC Tip

4. CONCLUSION

This paper deals with problems about machining process in terms of creation of chip its size and shape. At machining are very many methods, machining tools, materials of tools and cutting conditions that influencing chip shape and size.

This experiment with usage of high-speed camera shows possibilities of this devices and its usage by machining. Dates shows creations of chip by using specific technological operation with given tool and cutting conditions.

These dates are very important for construction of new machining tools shape and chip formed and other elements that influencing of machining process including waste management.

REFERENCES

- KREHEL, R.: 2008. Meranie drsnosti povrchu obrobnku počas plynulo prebiehajúceho sústružníckeho procesu. In: *Technik*, no. 8 2008, ISSN 1210-616x.
- MÁDL, J.: 2010. Machined surface Properties. In *Manufacturing Engineering*. No. 2, IX, TU Košice, FVT so sídlom v Prešove, Slovensko, ISSN 1335-7972.
- NOVÁK, M. HOLEŠOVSKÝ, F.: 2010. Vybrané parametry jakosti broušeného povrchu u materiálů strojních součástí a dílů automobilového průmyslu. In *Strojírenská technologie XV*, no. 4. FVTM: Ústí n. Labem. pp. 40–47. ISSN 1211-4162.
- OLYMPUS [online], 2011, available at www.olympus-ims.com/cs/ispeed-3/
- VONDROUŠ, P., KATAYMA, S. 2011. Využití vysokorychlostní kamery pro sledování procesu laserového svařování. In *Strojírenská technologie XVI*, no. 1. FVTM: Ústí nad Labem. pp. 39–44. ISSN 1211-4162.

Acknowledgements

Above mentioned results were created by means of national project GA CR No.101/09/0504 and internal grant of J. E. Purkyně University in Usti nad Labem.

Kontaktná adresa:

Ing. Nataša Náprstková, Ph.D.

Katedra technologií a materiálového inženýrství,

Fakulta výrobních technologií a managementu,

Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem, Na Okraji 1001,

400 01, Ústí nad Labem

VPLYV VYBRANÝCH TECHNOLOGICKÝCH PARAMETROV NA DRSNOSŤ OBROBENÉHO POVRCHU PRI SÚSTRUŽENÍ

THE INFLUENCE OF CHOSEN TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS DURING TURNING

Dušan PAULÍNÝ – Ľubomír JAVOREK

ABSTRACT: The purpose of this study was to investigate the effects of changes in technological parameters on the surface roughness after turning with cutting tool with skew cutting edge. In terms of quality of machined surfaces is this method very suitable. Same advantage is also a rising small pressures which occurring on the workpiece, especially at slim and long profiles. With the development of machining technology is inseparably connected to the development of new cutting tools. The last part of the contribution deals with design of cutting tools for turning. We obtained basic characteristics surface roughness after turning with cutting tool with skew cutting edge. The advantage of using tool with skew cutting edge is evident.

Key words: surface roughness, cutting tools, turning, design of cutting tools

ABSTRAKT: V príspevku sú uvedené vplyvy rôznych technologických parametrov na drsnosť povrchu po obrábaní nástrojom s mimobežnou reznou hranou. Z hľadiska kvality obrobenej plochy je táto metóda veľmi vhodná. Istou výhodou sú zvlášť pri štíhlych a dlhých profiloch malé tlaky, ktoré pôsobia na obrobok. S rozvojom technológie obrábania je nerozlučne spojený aj vývoj nových rezných nástrojov. Posledná časť príspevku sa zaoberá konštrukciou sústružníckych nástrojov. Získali sme základné charakteristiky drsnosti povrchu pri sústružení s nástrojom s mimobežnou reznou hranou. Výhody použitia nástroja s mimobežnou reznou hranou sú evidentné.

Kľúčové slová: sústruženie, rezný nástroj, drsnosť povrchu, konštrukcia rezných nástrojov

ÚVOD

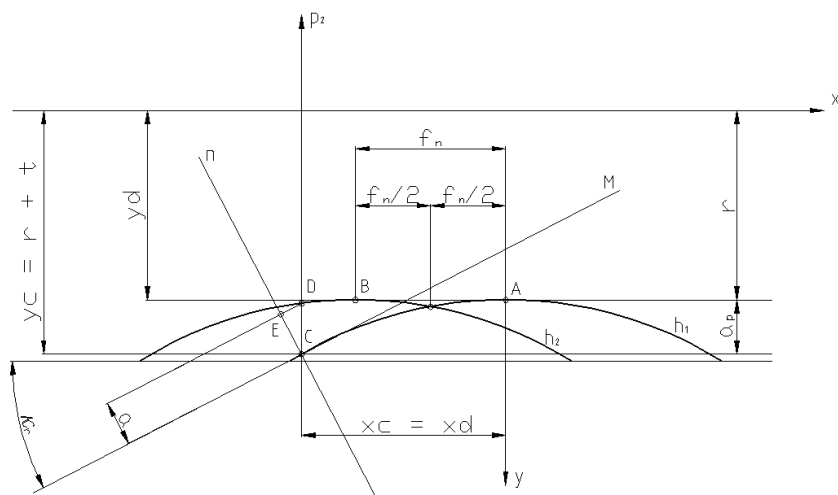
Prvé začiatky vzniku obrábania siahajú do doby kamennej. S vynájdením hrnčiarkeho kruhu súvisí vznik novej technológie – sústruženia. Ďalší významný pokrok je zaznamenaný priemyselnou revolúciou (začiatok 18. storočia), kedy sa začal väčší rozvoj technológií v oblasti obrábania rotačných súčiastok. Avšak rozvoj prebiehal súčasne tak v drevárskom ako aj strojárskom priemysle. Poznanie javov, ktoré popisujú tvorbu triesky, sprievodné javy procesu rezania a vzájomnú interakciu nástroja a obrobku je veľmi dôležité z hľadiska prehĺbenia poznatkov o procese sústruženia. Preto je dôležité prehľbovať

a overovať už poznané a vyvíjať nové technológie, ktoré zvýšia produktivitu práce a zároveň zachovávajú alebo dokonca zvýšia úžitkové vlastnosti výsledného produktu. Zvyšujúcimi sa požiadavkami dochádza k vývoju nových rezných materiálov, rezných nástrojov, vývoju obrábacích strojov, ale pomerne veľkú úlohu zohrávajú aj ekologické trendy. Pri vývoji nových rezných nástrojov neexistujú všeobecné podmienky, pomocou ktorých by bolo možné skonštruovať univerzálne rezné nástroje. Matematický model konštrukčného riešenia vyžaduje znalosť veľkého množstva okrajových podmienok. Pevnostné riešenie rezného nástroja ovplyvňuje spoľahlivú a bezpečnú prácu. Rezný nástroj predstavuje geometricky zložitú teleso, ktorého rezný klin je mechanicky a tepelne namáhaný. Obvykle sa vykonávajú zjednodušené riešenia doplnené experimentálnymi meraniami. (Buda, J., Békés, J.; Šomšáková, Z., Tarasovičová, A.; Hascalik, A., Caydas, U.; Vasilko, K., Simkuliet, V., Kupčík, Š.; Javorek, L., Vacek, V., Divéky, V.)

IDENTIFIKÁCIA OBROBENÉHO POVRCHU

Pri sústružení valcových obrobkov nástrojom s mimobežnou reznou hranou voči osi otáčania vzniká v prechodovej oblasti hyperboloidná plocha. Sústruženie s mimobežnou reznou hranou je vhodné najmä na obrábanie dlhých valcových obrobkov. Na určenie geometrických parametrov obrobku a technologických parametrov treba charakterizovať polohu reznej hrany v priestore, pretože jej poloha je rozhodujúcim činiteľom, ktorý vplyva na kvalitu obrobeného povrchu.

Pri obrábaní nástrojom s mimobežnou reznou hranou, ak uhol nastavenia hlavnej reznej hrany $\kappa_r = 0^\circ$ a uhol sklonu hlavnej reznej hrany $\lambda_s \neq 0^\circ$ pri rotačnom pohybe obrobku, pri zanedbaní posuvu f_n , vzniká prechodová plocha, ktorá je časťou plochy jednodielneho rotačného hyperboloidu. Hrúbku triesky v ľubovoľnom bode reznej hrany určuje minimálna vzdialenosť medzi dvoma hyperboloidnými krivkami (Obr. 1). (Vasilko, K., Tarasovičová, A., Šomšáková, Z.; Vasilko, K., Strojný, M.)



Obr. 1 Schéma tvorby povrchu na určenie hrúbky triesky (Vasilko, K., Strojný, M.)

Nominálna hrúbka prierezu triesky je priemetom úsečky na normálu n podľa (Obr. 1):

$$h_D = \overline{CE} = \overline{CD} \cdot \cos \kappa_r \quad (1)$$

Pri pozdĺžnom sústružení nástrojom s mimobežnou reznou hranou je nominálna hrúbka prierezu triesky menšia ako pri pozdĺžnom sústružení s radiálnym nástrojom pri zvolenom posuve, čo umožňuje použiť väčšie posuvy a tak dosiahnuť vyššiu výkonnosť. Takisto výsledná akosť obrobeného povrchu v porovnaní so sústružením s radiálnym nástrojom je oveľa lepšia.

Najväčšiu výšku nerovností obrobeného povrchu (Obr. 2) určíme nasledujúcou matematickou úpravou:

$$\operatorname{tg} \lambda_s = \frac{2 \cdot m}{f} \quad (2)$$

Odtiaľ:

$$m = \frac{f}{2} \cdot \operatorname{tg} \lambda_s \quad (3)$$

Tiež platí:

$$m^2 = (r + Rz)^2 = r^2 \quad (4)$$

Po úprave:

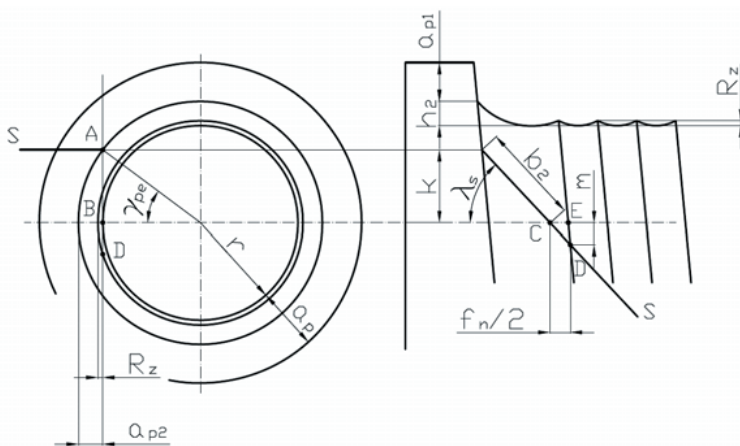
$$r + Rz = \sqrt{m^2 + r^2} - r \quad (5)$$

Po dosadení dostávame výsledný vzťah:

$$Rz = \sqrt{\frac{f^2}{4} \cdot \operatorname{tg}^2 \lambda_s + r^2} - r \quad (6)$$

Dostali sme vzťah, ktorý definuje výšku nerovností profilu, vytvoreného reznou hranou (Vasilko, K.).

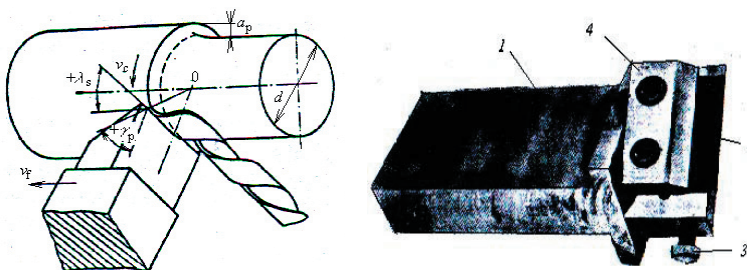
Metóda sústruženia nástrojom s priamočiарou reznou hranou pri nastavení hlavnej reznej hrany, kedy je $\lambda_s \neq 0^\circ$ a $\kappa_r = 0^\circ$ sa vyznačuje niekoľkými špecifickými vlastnosťami, ktoré sa dajú využiť najmä pri obrábaní súčiastok na konečný rozmer (znižujú sa rezné sily, nominálna hrúbka prierezu triesky nie je konštantná a znižuje sa v smere k obrábanej ploche, rezná hrana má jednoduchý priamočiary tvar a ľahko sa prebrusuje).



Obr. 2 Určenie najväčšej výšky nerovnosti profilu (Vasilko, K.)

KONŠTRUKCIA REZNÉHO NÁSTROJA

Základom prístupu je nástroj s mimobežnou reznou hranou sklonený pod uhlom sklonu reznej hrany $\lambda_s = \pm 45^\circ$. Sú dve možnosti aplikácie. Na (Obr. 3) je prípad sústruženie, keď uhol sklonu reznej hrany je kladný, t. j. aktívny úsek reznej hrany je nad osou obrobku. Pracovný uhol čela sa mení z nulovej na maximálnu (kladnú) hodnotu v mieste priesečníka reznej hrany s obrábanou plochou. (Vasilko, K.)

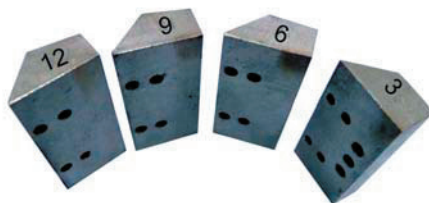


Obr. 3 Schéma obrábania a skúšobný nástroj s lineárnou reznou hranou. 1 – teleso, 2 – rezná platnička, 3 – regulačná skrutka, 4 – úpinka (Vasilko, K.)

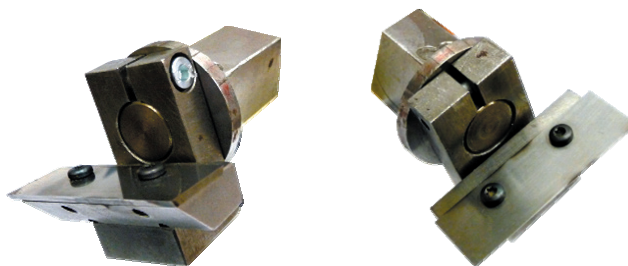
Nástroj s mimobežnou reznou hranou bol použitý s predpokladom zvýšenia kvality obrobenej povrchu tak, aby bolo možné zrušiť následnú technologickú operáciu – brúsenie. Dôvodom pre tento predpoklad je, pri zanedbaní posuvu f_n , vznik prechodovej plochy, ktorá vytvorí plochu jednodielneho rotačného hyperboloidu, ktorého tvoriacou priamkou je lineárna rezná hrana, sklonená o uhol $\lambda_s \neq 0^\circ$.

Konštrukčné riešenie nástroja s mimobežnou reznou hranou má oproti predchádzajúcim konštrukčným riešeniam niekoľko vylepšení (Obr. 5). Každé z konštrukčných riešení zabezpečuje polohovanie nástroja v dvoch rovinách. Pri tomto riešení sme dosiahli

polohovanie reznej platničky natáčaním telesa nástroja na čape držiaka a polohovanie v druhej rovine je zabezpečené odstupňovanými vymeniteľnými vložkami (Obr. 4), na ktorých je samostatne upínaná rezná platnička. Rezná platnička obdĺžnikového tvaru bola upnutá pomocou dvoch skrutiek v lôžku kolísky.



Obr. 4 Vymeniteľné vložky



Obr. 5 Nástroj s mimobežnou reznou hranou – variant III.

METODIKA EXPERIMENTU

Meranie kvality obrobeného povrchu sa uskutočnilo na meracej aparátúre SURFCOM 130A (Obr. 6), ktorá pozostávala z nasledujúcich častí:

- merací stojan;
- zapisovacie a vyhodnocovacie zariadenie s LCD panelom;
- prenosná meracia jednotka;
- prípravok s otočnými podperami.



Obr. 6 Meracia aparátúra SURFCOM 130A

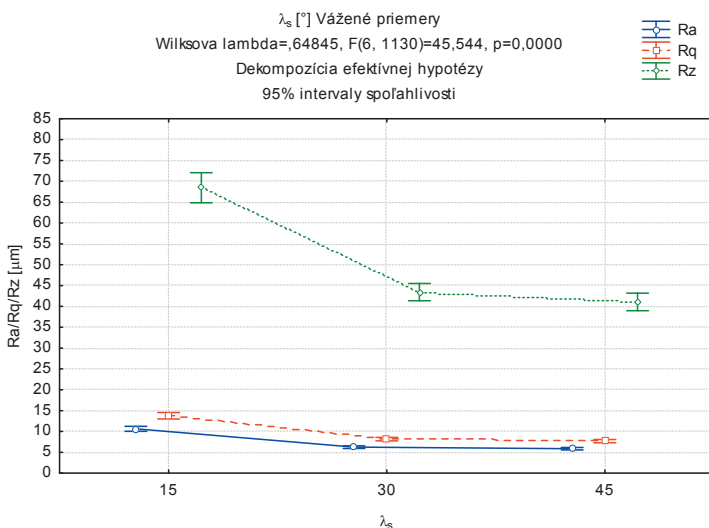
PODMIENKY EXPERIMENTU

- materiál obrobku:
 - buk,
 - vlhkosť $w = 12 \pm 2\%$,
- technologické podmienky obrábania:
 - uhol sklonu reznej hrany: $\lambda_s = (15^\circ, 30^\circ, 45^\circ)$,
 - posuv na otáčku: $f_n = (0,15; 0,30; 0,45)$ mm,
 - otáčky vretena: $n = 800 \text{ min}^{-1}$.

VÝSLEDKY A DISKUSIA

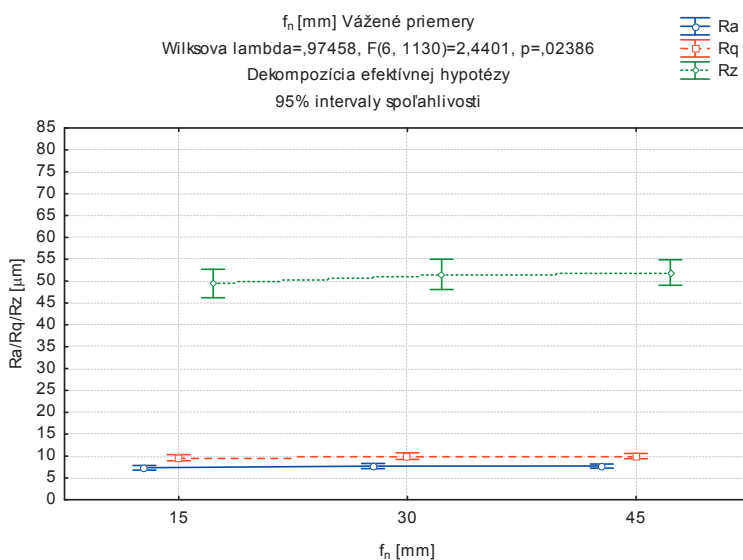
Drsnosť obrobeneho povrchu bola hodnotená pomocou strednej aritmetickej odchýlky profilu drsnosti Ra, strednej kvadratickej odchýlky profilu Rq, najväčšej výšky profilu Rz. Získané hodnoty drsnosti Ra, Rq a Rz boli spracované viacfaktorovou analýzou rozptylu programom STATISTIKA V.6, pri ktorej sa zistil vplyv jednotlivých nezávisle premenných faktorov experimentu na výslednú drsnosť obrobeneho povrchu.

Uhol sklonu reznej hrany λ_s priamo vplýva na aktívnu dĺžku reznej hrany, od ktorej závisí výsledná drsnosť obrobeneho povrchu. Najvýraznejšia zmena drsnosti obrobeneho povrchu sa prejavila už pri zmene uhla sklonu reznej hrany z $\lambda_s = 15^\circ$ na $\lambda_s = 30^\circ$ na čo poukazujú priebehy drsností (Obr. 7). Pri zmene uhla sklonu reznej hrany z $\lambda_s = 30^\circ$ na $\lambda_s = 45^\circ$ došlo tiež k poklesu drsnosti obrobeneho povrchu ale už s miernejšou tendenciou. Pri zmene uhla sklonu reznej hrany z $\lambda_s = 15^\circ$ na $\lambda_s = 45^\circ$ došlo k poklesu parametrov drsnosti nasledovne: pre strednú aritmetickú odchýlku profilu drsnosti Ra došlo až k 44,3% zníženiu drsnosti, pre strednú kvadratickú odchýlku profilu Rq došlo až k 43,5% zníženiu drsnosti a pre najväčšiu výšku profilu Rz došlo k zníženiu drsnosti o 38,7%.



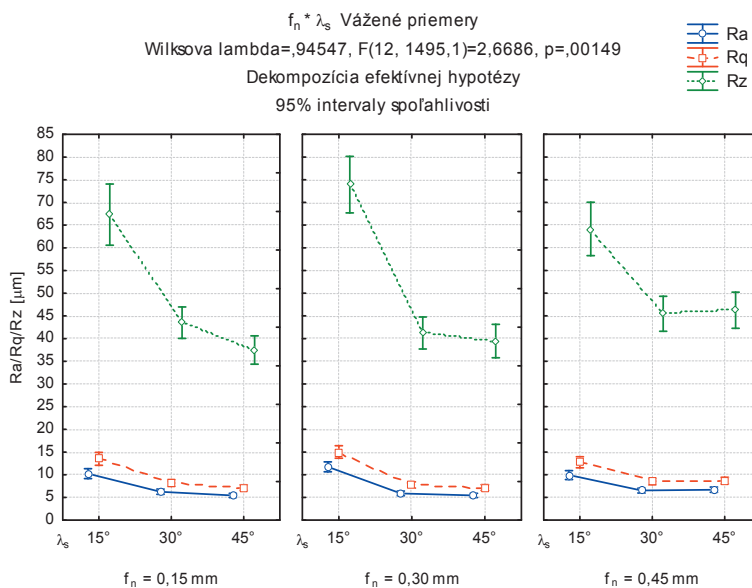
Obr. 7 Vplyv uhla sklonu reznej hrany λ_s na drsnosť obrobeneho povrchu

Z hľadiska geometricko-kinematických pomerov pri obrábaní je obrobeneá plocha vytváraná ako obalová plocha reznej hrany, ktorej profil je určený stopami rezného klinu nástroja. Pri sústružení s radiálnymi reznými nástrojmi uvažujeme s polomerom hrotu r_e a taktiež s posuvom na otáčku f_n ako s hlavnými technologickými parametrami, ktoré priamo vplyvajú na drsnosť obrobeneého povrchu. Pri sústružení s mimobežnou reznou hranou možno polomer hrotu nástroja zanedbať, pretože $r_e = \infty$. Vplyv posuvu na otáčku f_n v závislosti na drsnosti obrobeneého povrchu je na Obr. 8. Priebehy sledovaných parametrov drsnosti obrobeneého povrchu majú v celom rozsahu jednotlivých úrovní faktora lineárny priebeh. Došlo k miernemu zvýšeniu vážených priemerných hodnôt drsnosti povrchu (všetkých troch sledovaných parametrov Ra, Rq, Rz) o 10,3 % pri zmene posuvu na otáčku z $f_n = 0,15$ mm na $f_n = 0,45$ mm.



Obr. 8 Vplyv posuvu na otáčku f_n na drsnosť obrobeneého povrchu

Na (Obr. 9) je znázornená interakcia posuvu na otáčku f_n a uhla sklonu reznej hrany λ_s . Pri konštantnom posuve na otáčku f_n a zmene uhla sklonu reznej hrany λ_s možno zreteľne pozorovať pokles hodnôt parametrov drsnosti povrchu Ra, Rq a Rz; priebehy majú klesajúcu tendenciu. Naopak pri konštantnom uhle sklonu reznej hrany λ_s a zmene posuvu na otáčku možno pozorovať mierne zvýšenie hodnôt drsnosti povrchu.



Obr. 9 Interakcia posuvu na otáčku f_n a uhla sklonu reznej hrany λ_s na drsnosť obrobeného povrchu

ZÁVER

Neustálym zvyšovaním produktivity, rastúcimi požiadavkami na finálny produkt dochádza k rozvoju nových technológií a technických zariadení, ktorými je možné tieto požiadavky dosiahnuť. Vytvárajú sa predpoklady k zavádzaniu nových a ekonomicky výhodnejších spôsobov obrábania. Jedným z takýchto spôsobov obrábania je sústruženie nástrojom s mimobežnou reznou hranou.

Počítačom podporované konštruovanie našlo plnohodnotné uplatnenie v technickej praxi. Modelovanie, simulácie a analýzy v predvýrobných etapách otvárajú nové možnosti zvyšovania produktivity a kvality práce. Vytvárajú sa predpoklady k zavádzaniu nových a ekonomicky výhodnejších spôsobov obrábania. Jedným z takýchto spôsobov obrábania je sústruženie nástrojom s mimobežnou reznou hranou. Táto metóda sústruženia si vyžaduje vývoj nových rezných nástrojov, ktoré splnia požiadavky na ne kladené. Týmto sa otvára priestor pre ďalší vývoj a využívanie CAX technológií v technickej praxi.

LITERATÚRA

- BUDA, J., BÉKÉS, J.: Teoretické základy obrábania kovov, SVTL, Bratislava, 1967, 700 s.
 HASCALIK, A.; CAYDAS, U.: Optimization of turning parameters for surface roughness and tool life based on the Taguchi method. Springer-Verlag London Limited, 2007. 8 s.
 JAVOREK, L.; VACEK, V.; DIVÉKY, V.: Netradičné metódy sústruženia: Tangenciálne sústruženie – I. časť. In: Acta Facultatis Technicae, 1/2003 roč. 7. – s. 29–35.

- ŠOMŠÁKOVÁ, Z.; TARASOVIČOVÁ, A.: Zvyšovanie kvality povrchu aplikáciou nástroja s lineárnou reznou hranou. Transfer inovácií. Technická univerzita v Košiciach, 15/2009, s. 86–89 ISSN 1337-7094.
- TARASOVIČOVÁ, A.; ŠOMŠÁKOVÁ, Z.: Charakteristika drsnosti povrchu pri zvyšovaní produktivity sústruženia. Transfer inovácií. Technická univerzita v Košiciach, 15/2009, s. 90–93 ISSN 1337-7094.
- VASILKO, K.: Analytická teória trieskového obrábania. Prešov FVT, 2007, 481 s., ISBN 978-80-8073-759-7.
- VASILKO, K.: Možnosti zvýšenia produktivity základných metód obrábania (sústruženie, frézovanie). Manufacturing Engineering, Výrobné inžinierstvo, VI, č. 1, 2007, s. 5–8, ISSN 1335-7972.
- VASILKO, K.: Analýza vplyvu reznej rýchlosti na proces obrábania. Manufacturing Engineering, Výrobné inžinierstvo, IX, č. 1, 2010, s. 5–9, ISSN 1335-7972.
- VASILKO, K.: Možnosti zlepšenia kvality povrchu pri sústružení dreva. In Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva 2006, Medzinárodný vedecký seminár: zborník prednášok. Starý Smokovec : Technická univerzita vo Zvolene, 2006. s. 293–298, ISSN 80-228-1674-4.
- VASILKO, K.; STROJNÝ, M.: Progresívne metódy sústruženia. Bratislava:Alfa, 1977. 200 s.
- VASILKO, K.; SIMKULET, V.; KUPČÍK, Š.: Produkčné obrábanie s $Ra \leq 1\mu\text{m}$. Manufacturing Engineering, Výrobné inžinierstvo, IX, č. 1, 2010, s. 14–18, ISSN 1335-7972.

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

Kontaktná adresa:

Ing. Dušan Paulíny, PhD.
Katedra drevárskych strojov a zariadení
Fakulta environmentálnej a výrobnéj techniky
Technická univerzita vo Zvolene
T. G. Masaryka 24, SK – 960 53 Zvolen
e-mail: pauliny@vsld.tuzvo.sk

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

ANALÝZA PRESNOSTI POLOHOVANIA KROKOVÉHO MOTORA V REŽIME DROBENIA

THE STEPPER MOTOR ACCURACY MOVEMENT ANALYSIS IN A MICROSTEPPING

Rudolf PETRÁŠ – Jozef ŠURIANSKY

ABSTRACT: This article describes the analysis of the measured accuracy relating to a stepper motor. The rotary movement was measured by an absolute rotary encoder within 14bit accuracy. There we evaluated the measurement for divided steps from 2^0 to 2^4 . The microcontroller was used in order to obtain data from sensor. The evaluation board controls dividing step-module which is connected to a stepper motor. At the same time the data are processed from an encoder and consequently sent to a PC.

Key words: stepper motor, microstepping, microstepping efficiency

ABSTRAKT: Článok sa zaoberá analýzou presnosti krokového motora. Polohovanie krokového motora bolo merané absolútnym rotačným senzorom s presnosťou 14 bitov. Vyhodnotenie merania sa uskutočnilo pri delení kroku s binárnou kombináciou s rozlíšením do 2^4 . K získaniu údajov zo senzora bol využitý mikrokontrolér. Mikroprocesorový systém riadi modul na delenie kroku, na ktorý je pripojený krokový motor a zároveň ním sú spracovávané údaje získané zo senzora a prenášané do počítača.

Kľúčové slová: krokový motor, drobenie kroku, efektívnosť drobenia kroku

1 ÚVOD

Čoraz vyššie nároky na presnosť polohovania pri práci s motormi v kombinácii s využitím počítačov ovládajúcich príkazy pre požadované pracovné operácie spojené s potrebou presného pohonu si vyžadujú najmä využívanie synchronných strojov. Tieto sa pomerne jednoducho ovládajú (obsluhujú) a spĺňajú podmienky požadovanej presnosti pri naprogramovaných pracovných operáciách.

Krokové motory nachádzajú uplatnenie všade tam, kde je treba nastaviť presnú polohu pri pohone zariadenia a tiež zabezpečiť vysoký statický moment. Môžeme teda konštatovať, že krokové motory sa v súčasnosti využívajú v automatizácii, robotike, pri manipulácii a v ďalších odvetviach, kde sa využívajú kvôli svojim výhodám oproti iným motorom.

Výhodou krokových motorov je možnosť diskretného riadenia, ktorá je výhodná pri otvorených systémoch. Nevýhodou je malá zrýchliteľnosť a nízke otáčky. Výkonovo

zaostávajú za výkonovými parametrami jednosmerných motorov. Zatiaľ sú krokové motory pomerne drahé a preto sa neustále pracuje na výskume a vývoji ich konštrukcie tak, aby sa mohli využívať vo viacerých aplikáciách v praxi.

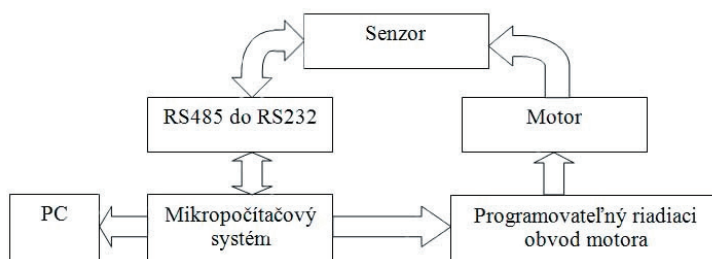
2 MATERIÁL A METÓDY

2.1 Schéma zapojenia

Pre analýzu presnosti krokového motora bol skonštruovaný laboratórny model, ktorý sme využili pri meraní. Model sa skladá z nasledujúcich zariadení:

- Absolútny rotačný senzor.
- Prevodník RS485 do RS232.
- Modul mikrokontroléra.
- Programovateľný riadiaci obvod motora.
- Krokový motor.

Tieto komponenty navzájom medzi sebou komunikujú prostredníctvom vhodných rozhraní. Schéma prepojenia komponentov je zobrazená na nasledujúcom obrázku, v ktorom sú naznačené komunikačné prepojenia jednotlivých prvkov.



Obrázok 1. Schéma zapojenia zariadení

2.2 Absolútny rotačný senzor

Absolútny rotačný senzor poskytuje hodnotu polohy natočenia. Prívlastok absolútny znamená, že v konkrétnom uhle natočenia je definovaná číslcová hodnota. V práci bol využitý senzor Kübler 5870, ktorý má vysokú presnosť merania. Senzor je 14 bitový z toho vyplýva, že natočenie rotora je s rozlíšením 2^{14} a absolútna hodnota rozlíšenia je $0,022^\circ$.

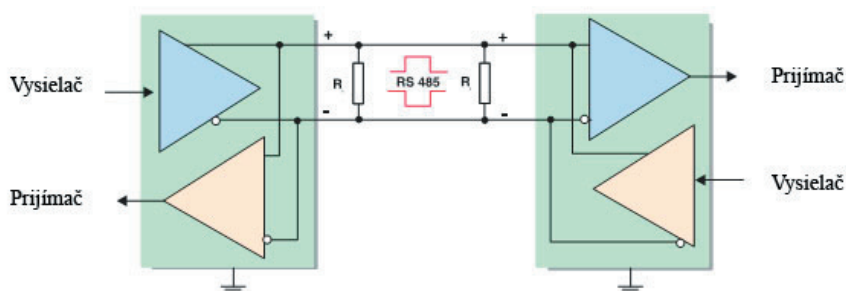


Obrázok 2. Absolútny rotačný senzor Kübler 5870

Pri otáčaní senzora v smere ručičkových hodín na výstupe je vzrastajúca digitálna hodnota a pri opačnom točení hodnota klesá. Senzor na komunikáciu používa štandard RS485, cez ktorý sú vysielané údaje v Grayovom kóde.

2.2.1 Štandard RS485

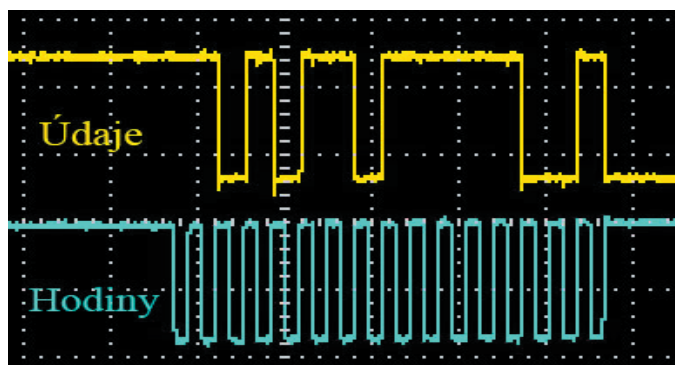
Štandard RS485 je využívaný na prenos informácií najmä v priemysle. Dátové vodiče sa väčšinou označujú D+ a D-. V dátovom vodiči D+ je kladné napätie a vo vodiči D- je záporné napätie. Napät'ová úroveň je vlastne diferencencia medzi kanálmi. Obojsmerná komunikácia je prenášaná v jednom páre vodičov.



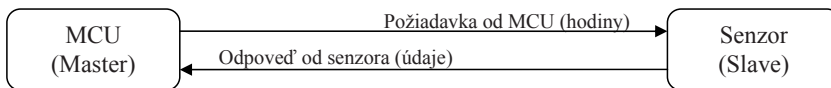
Obrázok 3. Štandard RS485

2.3 Komunikácia medzi mikrokontrolérom a senzorom

Absolútny rotačný senzor komunikuje pomocou asynchrónneho RS485 štandardu. Na komunikáciu s MCU bolo využité SPI (Serial Peripheral Interface Bus). Pri SPI komunikácii je mikroprocesorový systém master a senzor je slave zariadenie. Na komunikáciu využívame dva signály SPI_CLK (SPI clock) a MISO (Master input, slave output). Po vyslaní hodinového signálu, nám slave vráti absolútnu pozíciu v Grayovom kóde.



Obrázok 4. Sekvencia prenosu medzi MCU a senzorom



Obrázok 5. Komunikácia medzi MCU a senzorom

2.4 Drobenie krokov krokového motora

Na účely drobenia krokov sme využili modul MICROCON SD20M, ktorý umožňuje bipolárne riadenie KM (krokový motor). Týmto riadením môžeme dosiahnuť pri zmene veľkosti amplitúdy fázových prúdov motora zvýšený počet stabilných stavov polôh rotora, čo predstavuje zvýšenie rozlišovacej schopnosti a tým aj presnosti polohovania. Elektronicky pomocou regulátora prúdu KM môžeme dosiahnuť symetrické n-kontaktné riadenie, ktoré môžeme zabezpečiť týmito metódami:

- sínusovým priebehom,
- pílovitým priebehom,
- PWM.

Rotačný pohyb motora zabezpečuje výkonová časť modulu. Programovacia jednotka je riadená dvomi signálmi. Jeden signál slúži na pohyb motora a druhý na nastavenie smeru otáčania. Zdrojom signálov sú vstupno-výstupné piny MCU.



Obrázok 6. MICROCON SD20M

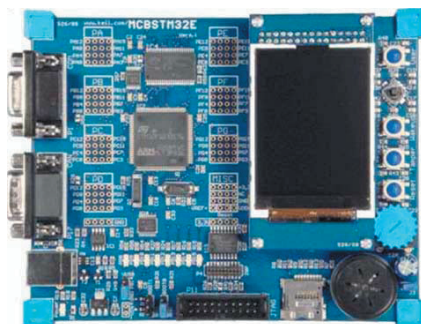
Z riadiacej dosky MICROCON-u sme využili nasledujúce funkcie:

- Riadenie smeru otáčania.
- Nastavovanie delenia krokov 1, 2, 4, 8 a 16.
- Vstup pre impulzy krokovania.

2.5 Modul mikrokontroléra

V práci bol použitý riadiaci modul od firmy Keil MCBSTM32E. Modul je postavený na procesore ARM STM32F103. Z ponúkaných rozhraní využívame USART a SPI. Rozhraním USART posielame namerané údaje do PC na spracovanie a s SPI zabezpečujeme komunikáciu medzi senzorom a mikrokontrolérom. Na obsluhu krokového motora

využívame diskkrétne vstupno-výstupné piny. Tieto piny sa ovládajú pomocou dvoch tlačidiel „Wakeup“ a „Tamper“.



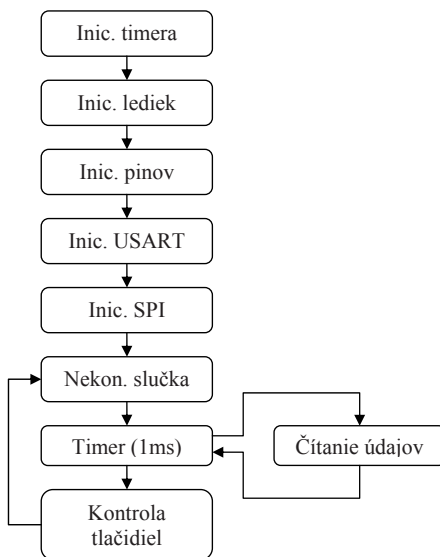
Obrázok 7. Modul Keil MCBSTM32E

2.6 Obslužný program

V riadiacej jednotke bol implementovaný program, ktorý zabezpečuje komunikáciu medzi perifériami. Hlavná časť programu je obslužná metóda časovača, ktorá sa volá každú 1ms. Táto metóda zabezpečuje nasledujúce funkcie:

- Generovanie impulzov pre motor.
- Generovanie hodín pre senzor.
- Načítavanie údajov zo senzora.
- Posielanie načítaných údajov na sériovú zbernicu.

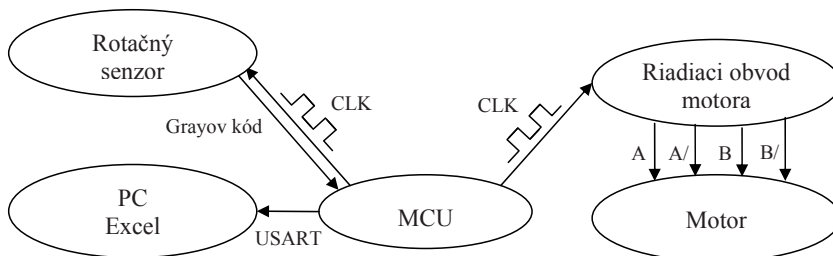
Na obrázku 8 sa nachádza vývojový diagram algoritmu riadiacej jednotky.



Obrázok 8. Vývojový diagram obslužného softvéru

3 VÝSLEDKY

Testovanie presnosti delenia krokov krokového motora boli merané absolútnym senzorom Kübler 5870. Získané hodnoty senzorom, odoslané mikrokontrolérom cez RS232, sú spracovávané vlastným počítačovým programom. Počítačový program vyhodnocuje namerané údaje do grafickej podoby a zároveň ukladá do textového súboru. Vytvorený textový súbor bol spracovaný v programe Microsoft Excel.



Obrázok 9. Komunikačné schéma

Analýza nameraných údajov bola vykonávaná určením neistoty merania. V nasledujúcej tabuľke sú zobrazené chyby merania pri konkrétnom drobení kroku. Z tabuľky a grafu vyplýva závislosť presnosti na drobení kroku. Z údajov získaných z experimentu je zrejmé, že pri zvyšovaní drobenia (pri zvýšenej rozlíšiteľnosti polohovania) kroku narastá neistota, čím sa znižuje presnosť servo pohonu a tým možnosť využitia uvedeného systému v mikropohonoch. Drobenie kroku prináša aj zhoršenie dynamických vlastností ako je zrýchliteľnosť a otáčky motora.

Pre výpočet neistoty bola vypočítaná relatívna chyba (2) pre každý krok za jednu otáčku rotora. Zo všetkých relatívnych chýb bol vypočítaný aritmetický priemer t.j. celková neistota pre konkrétne drobenie. Tento postup sa zopakoval pre delenie s binárnymi kombináciami s rozlíšením do 2^4 .

$$\Delta y = y_s - y_n \quad (1)$$

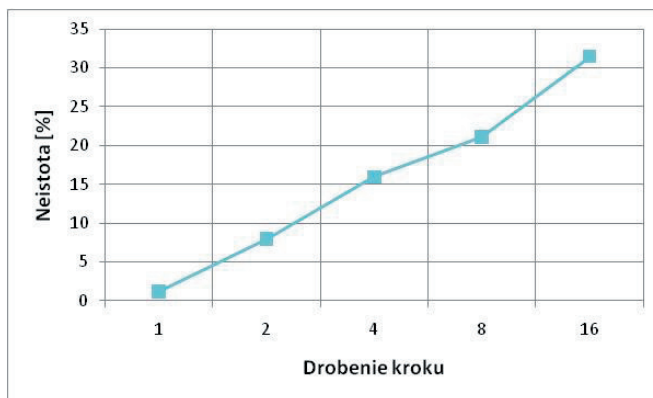
Δy – absolútna chyba,
 y_s – je skutočná hodnota,
 y_n – nameraná hodnota.

$$\varepsilon = \frac{\Delta y}{y_s} * 100\% \quad (2)$$

ε – relatívna chyba.

Tabuľka 1. Neistoty merania pri konkrétnom drobení kroku

Drobenie kroku	Neistota [%]
2^0	1,23
2^1	7,95
2^2	15,97
2^3	21,08
2^4	31,46



Obrázok 10. Neistota v závislosti na delení kroku

4 ZÁVER

V článku bola skúmaná presnosť delenia krokov krokového motora. Presnosť delenia krokov bola meraná otočným absolútnym senzorom, ktorý je prepojený na mikrokontrolér ARM. Delenie krokov nám zabezpečuje modul MICROCON SD20M, na ktorý bol pripojený krokový motor MICROCON SL23.

Vyhodnotenie údajov umožňuje definovať hranicu využitia krokového motora, pri ktorých nedochádza k veľkým neistotám. Z uvedeného hľadiska možno povedať, že krokové motory sú nepoužiteľné pri ovládaní mikropohybov. Taktiež je možné si všimnúť, že chyba s rastúcim delením je takmer lineárna. Pri delení kroku štyrmi už chyba prekračuje 15%. Všeobecne je možné konštatovať, že vyššie delenie kroku nám neprináša vyššiu presnosť polohovania.

5 LITERATÚRA

1. Keil MCBSTM32E [online]. Dostupné na internete: <<http://www.keil.com/mcbstm32EXL/>>, náhľad stránky jún 2011.
2. MICROCON [online]. Dostupné na internete: <<http://www.microcon.cz>>, náhľad stránky jún 2011.
3. Absolute encoders 5870 [online]. Dostupné na internete: <<http://www.kuebler.com/english2/prod-sen-singleturn-5870.html>>, náhľad stránky jún 2011.

4. RS232/RS485 converter [online]. Dostupné na internete: < <http://www.rmv.com/232-485.pdf>>, náhľad stránky jún 2011.
5. ŽALMAN M.: 2003. Akčné členy. Bratislava. Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2003, 209 s. ISBN 80-227-1835-1.

Kontaktná adresa:

Ing. Rudolf Petráš

Technická Univerzita vo Zvolene, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky,
Katedra informatiky a automatizačnej techniky, T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen
e-mail: rudolf.petras@gmail.com

prof. Ing. Jozef Šuriansky, CSc.

Technická Univerzita vo Zvolene, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky,
Katedra informatiky a automatizačnej techniky, T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen
e-mail: surian@vsld.tuzvo.sk

MOŽNOSTI VYUŽITIA INTEGRÁLNYCH TRANSFORMÁCIÍ PRI SLEDOVANÍ CHYBOVOSTI VO VÝROBNOM PROCESE

INTEGRAL TRANSFORMATIONS USING POSSIBILITIES IN FAILURING CHECKING IN PRODUCTION

Elena PIVARČIOVÁ

ABSTRACT: The paper describes possibilities of integral transformations application in aluminium formidables failuring following in production. Target is to design a method for automatic discovering of failures, originated in production of the formidable.

Key words: integral transformations, phase correlation, production

ABSTRAKT: Príspevok popisuje možnosti využitia integrálnych transformácií pri sledovaní chybovosti hliníkových odliatkov vo výrobnom procese. Cieľom bolo navrhnúť metódu, určenú na automatické odhalenie chýb, ktoré vznikli v procese výroby odliatku.

Kľúčové slová: integrálne transformácie, fázová korelácia, výrova

1 ÚVOD

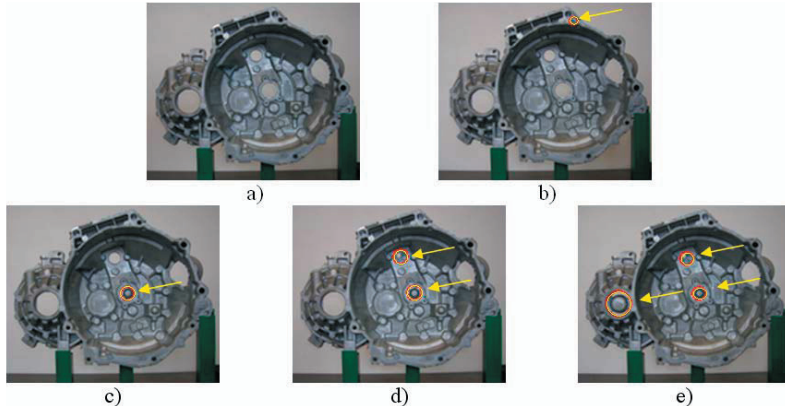
Odborná literatúra dokumentuje nezastupiteľnú úlohu mechanizácie a robotizácie, ako najvyšší stupeň automatizácie vo výrobnej technike nielen pri vývoji a výrobe priemyselných výrobkov, ale aj v oblasti skúšobníctva (Božek, 2007).

Snaha o vyriešenie konkrétneho problému, automatizácie kontroly výskytu chybných výrobkov v reálnych podmienkach výrobného procesu viedla k práci výskumného charakteru, ktorý vyústil do návrhu softwaru určeného pre vyhodnocovanie zosnímaných obrazov výrobkov s cieľom určenia kvantitatívnych ukazovateľov kvality a spoľahlivosti vyrábaných výrobkov.

Dôležitým atribútom sú funkčné parametre výrobku: súbor vlastností vymedzujúcich zmysel, účel, podstatu a použitie výrobku. Vychádzajú z plnenia potrieb širokospektrálnych zákazníkov a v podstate určujú identitu výrobku, napr. výkon, rýchlosť, spoľahlivosť, použiteľnosť, bezpečnosť a v konečnom dôsledku, reálnu využiteľnosť (Božek, 2007).

2 EXPERIMENT

Firma Fagor Ederlan Slovensko a. s., Žiar nad Hronom, sa zaoberá výrobou hliníkových odliatkov technológiou vysokotlakového odlievania. V experimente boli použité odliatky určené pre automobilový priemysel. Denne sa vyrobí približne 9000 odliatkov. Počas výroby môžu vzniknúť rôzne typy chýb (Obrázok 1).



Obrázok 1 Hliníkový odliatok: Skriňa spojky Volkswagen diesel
a) originál, b) nevyvrtaná diera (zlomený trň), c) – e) neupravená diera/diery

2.1 Použitá metóda

Uvažujme dva obrazy $N_1 \times N_2$: $f(n_1, n_2)$ a $g(n_1, n_2)$. Predpokladajme, že indexy sú $n_1 = -M_1 \dots M_1$ ($M_1 > 0$) a $n_2 = -M_2 \dots M_2$ ($M_2 > 0$), teda rozmery sú $N_1 = 2M_1 + 1$ a $N_2 = 2M_2 + 1$.

Nech $F(k_1, k_2)$ a $G(k_1, k_2)$ predstavujú 2D diskrétny Fourierove transformácie obrazov (DFT) $f(n_1, n_2)$ a $g(n_1, n_2)$:

$$F(k_1, k_2) = \sum_{n_1, n_2} f(n_1, n_2) W_{N_1}^{k_1 n_1} W_{N_2}^{k_2 n_2} = A_F(k_1, k_2) e^{j\theta_F(k_1, k_2)}, \quad (1)$$

$$G(k_1, k_2) = \sum_{n_1, n_2} g(n_1, n_2) W_{N_1}^{k_1 n_1} W_{N_2}^{k_2 n_2} = A_G(k_1, k_2) e^{j\theta_G(k_1, k_2)}, \quad (2)$$

kde

$$k_1 = -M_1 \dots M_1, \quad k_2 = -M_2 \dots M_2,$$

$$W_{N_1} = e^{-j\frac{2\pi}{N_1}}, \quad W_{N_2} = e^{-j\frac{2\pi}{N_2}},$$

$$\sum_{n_1, n_2} \text{predstavuje} \sum_{n_1=-M_1}^{M_1} \sum_{n_2=-M_2}^{M_2},$$

$A_F(k_1, k_2)$, $A_G(k_1, k_2)$ – amplitúdové zložky Fourierovej transformácie,

$e^{j\theta_F(k_1, k_2)}$, $e^{j\theta_G(k_1, k_2)}$ – fázové zložky Fourierovej transformácie.

Križové spektrum $R_{FG}(k_1, k_2)$ medzi $F(k_1, k_2)$ a $G(k_1, k_2)$ je dané (Ito et al, 2004):

$$R_{FG}(k_1, k_2) = F(k_1, k_2) \overline{G(k_1, k_2)} = A_F(k_1, k_2) A_G(k_1, k_2) e^{j\theta(k_1, k_2)}, \quad (3)$$

kde $\overline{G(k_1, k_2)}$ predstavuje komplexne združený obraz ku $G(k_1, k_2)$,
 $\theta(k_1, k_2)$ predstavuje fázový rozdiel $\theta_F(k_1, k_2) - \theta_G(k_1, k_2)$.

Štandardná korelačná funkcia $r_{fg}(n_1, n_2)$ je 2D inverzná diskrétna Fourierova transformácia (IDFT) z križového spektra $R_{FG}(k_1, k_2)$ a je daná (Ito et al, 2004):

$$r_{fg}(n_1, n_2) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{k_1 k_2} R_{FG}(k_1, k_2) W_{N_1}^{-k_1 n_1} W_{N_2}^{-k_2 n_2}, \quad (4)$$

kde $\sum_{k_1 k_2}$ predstavuje $\sum_{k_1=-M_1}^{M_1} \sum_{k_2=-M_2}^{M_2}$.

Križové fázové spektrum (alebo normalizované križové spektrum) $\hat{R}_{FG}(k_1, k_2)$ je definované ako (Ito et al, 2004):

$$\hat{R}_{FG}(k_1, k_2) = \frac{F(k_1, k_2) \overline{G(k_1, k_2)}}{|F(k_1, k_2) G(k_1, k_2)|} = e^{j\theta(k_1, k_2)}. \quad (5)$$

Fázová korelačná funkcia $\hat{r}_{fg}(n_1, n_2)$ je 2D inverzná DFT z normalizovaného križového spektra $\hat{R}_{FG}(k_1, k_2)$ a je daná (Ito et al, 2004):

$$\hat{r}_{fg}(n_1, n_2) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{k_1 k_2} \hat{R}_{FG}(k_1, k_2) W_{N_1}^{-k_1 n_1} W_{N_2}^{-k_2 n_2}. \quad (6)$$

Ak obrazy $f(n_1, n_2)$ a $g(n_1, n_2)$ sú rovnaké, t.j. $f(n_1, n_2) = g(n_1, n_2)$, fázová korelačná funkcia bude

$$\hat{r}_{fg}(n_1, n_2) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{k_1 k_2} W_{N_1}^{-k_1 n_1} W_{N_2}^{-k_2 n_2} = \delta(n_1, n_2) = \begin{cases} 1 & \text{ak } n_1 = n_2 = 0, \\ 0 & \text{inak.} \end{cases} \quad (7)$$

Rovnica (7) ukazuje, že fázová korelačná funkcia medzi dvoma identickými obrazmi je delta funkcia $\delta(n_1, n_2)$.

Ak sú dva obrazy podobné, ich funkcia $\hat{r}(n_1, n_2)$ dáva zreteľný ostrý vrchol. Keď dva obrazy nie sú podobné, vrchol významne poklesne. Výška vrcholu môže byť použitá ako miera podobnosti pre porovnávanie obrazov.

Ďalšie dôležité vlastnosti fázovej korelačnej funkcie používané pre porovnávanie obrazov sú: odolnosť voči posunu, zmene jasů a šumu.

Obrázok 2 ukazuje príklad porovnania dvoch obrazov použitím fázovej korelácie. Keď sú dva obrazy podobné, ich fázová korelácia dáva zreteľné maximum. Keď dva obrazy nie sú podobné, vznikne viac nevýznamných maxim. Veľkosť maxima je použitá ako miera podobnosti dvoch obrazov.

3 DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY

Na vyhodnotenie výsledkov porovnávania obrazov bolo použitých niekoľko používaných aj vlastných metrik pre výpočet porovnávacieho skóre, ktoré kvantifikuje podobnosť medzi testovaným a referenčným obrazom. Spomenieme dve najčastejšie používané metriky používané pri porovnávaní obrazov:

- Euklidova vzdialenosť

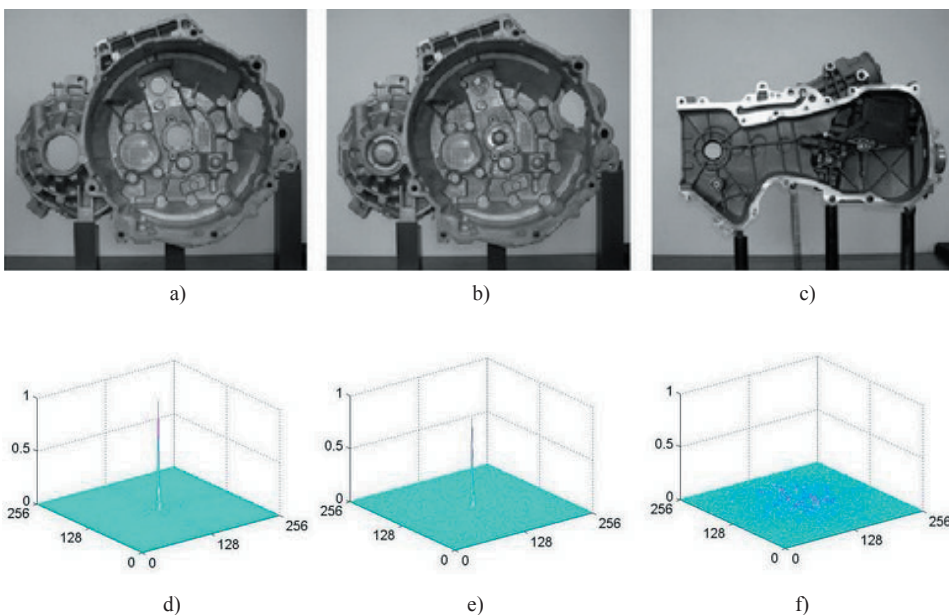
Na základe Euklidovej vzdialenosti, čím je menšia vzdialenosť medzi obrazmi, tým sú podobnejšie. Totožné obrazy majú nulovú Euklidovu vzdialenosť.

Euklidova vzdialenosť medzi obrazmi a , b rozmeru $N \times N$ bola vypočítaná podľa vzťahu:

$$ED = \sqrt{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N (a_{x,y} - b_{x,y})^2} \quad (8)$$

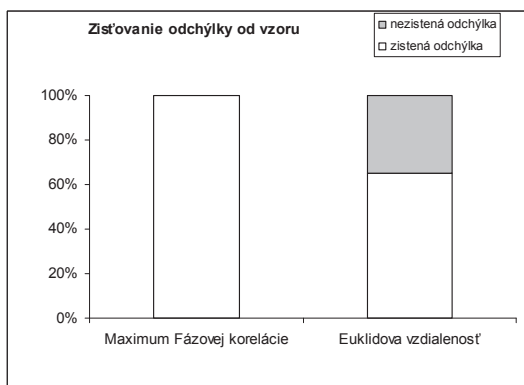
- Maximum fázovej korelácie

Porovnávacie skóre bolo vypočítané ako maximum fázovej korelácie podľa (6) (Ito et al, 2004).



Obrázok 2 Použitie fázovej korelácie

a) referenčný obraz b–c) testované obrazy, d) fázová korelácia medzi dvoma identickými obrazmi (a–a)
e) fázová korelácia medzi dvoma podobnými obrazmi (a–b), f) fázová korelácia medzi dvoma rôznymi obrazmi (a–c)



Obrázok 3 Zisťovanie odchýlky od vzoru

4 ZÁVER

Cieľom bolo navrhnúť metódu, určenú na automatické odhalenie chýb, ktoré vznikli v procese výroby odliatku. Jednou z možností riešenia problému je využitie spektra Fourierovej transformácie a porovnanie obrazov použitím vhodnej metriky a porovnávacích skóre.

Príspevok neposkytuje dostatočnú odpoveď na všetky problémy súvisiace s automatizovaným sledovaním chybných výrobkov. Je však súčasťou ďalších úloh, ktoré je potrebné riešiť v rámci aplikovaného výskumu v oblasti Výrobnej techniky.

V ďalšej etape výskumu je možné pokračovať v súlade s doterajšími výsledkami. Pri analýze možnosti reálneho nasadenia aplikácie vo výrobnom procese je potrebné preskúmať možné varianty zaradenia snímacieho prvku pre snímanie obrazu sledovaného výrobku do výrobného cyklu. Vlastný proces automatizovaného snímania je potrebné zaradiť ako integrovanú súčasť výrobného procesu. Pre získanie presných výsledkov je potrebné počas snímania výrobku zabezpečiť stabilitu (vylúčenie chvenia, rezonancií, pohybu, spôsobu osvetlenia). Následne je potrebné zaznamenané obrazy automatizovane spracovať a následne vyhodnotiť pomocou navrhnutého softwaru.

LITERATÚRA

- BOŽEK, P.: 2007. *Automatizácia a robotizácia procesov sledovania a overovania prevádzkovej spoľahlivosti mechanického systému*. Habilitačná práca, Zvolen, 2007.
- ITO, K., NAKAJIMA, H., KOBAYASHI, K., AOKI, T., HIGUCHI, T.: 2004. A Fingerprint Matching Algorithm Using Phase-Only Correlation. In: *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. E87-A, No. 3, March 2004, pp. 682–691 Dostupné on-line: http://www.aoki.ecei.tohoku.ac.jp/research/docs/e87-a_3_682.pdf [cit. dec. 2009].

Kontaktná adresa

Mgr. Elena Pivarčiová, PhD.

Katedra informatiky a automatizačnej techniky

Technická univerzita vo Zvolene

Masarykova 24, 960 01 Zvolen, Slovensko

tel. 00421 5601 477, e-mail: epivarci@vsld.tuzvo.sk

ANALÝZA DYNAMICKÝCH SÍL VO VRATNOM LANE LESNÍCKEJ LANOVKY POČAS PRIBLIŽOVANIA DOLE SVAHOM

ANALYSIS OF DYNAMIC FORCES AT THE HAUL-BACK ROPE ON FOREST CABLEWAY DURING DOWN THE SLOPES SKIDDING

Martin REMPER – Milan MIKLEŠ

ABSTRACT: The contribution deals with the issue of dynamic loads in haul back rope during down the slopes skidding. Points as a dynamic influence on the size and course of the braking force required to skidding down the slope bole. The article describes the methodology chosen to achieve the objective, measuring the string, as well as the results obtained in measurements in real conditions in work unconventional forestry cableway.

Key words: down the slope skidding, unconventional forestry cableway, dynamic factor

ABSTRAKT: Príspevok pojednáva o problematike dynamického namáhania vratného lana pri približovaní dole svahom. Poukazuje ako dynamický vplyv pôsobí na veľkosť a priebeh sily potrebnej na brzdenie približovaného kmeňa dole svahom. Článok popisuje zvolenú metodiku na dosiahnutie cieľa, merací reťazec ako aj výsledky dosiahnuté pri meraniach v reálnych podmienkach pri práci nekonvenčnej lesníckej lanovky.

Kľúčové slová: približovanie dole svahom, nekonvenčná lesnícka lanovka, dynamický súčiniteľ

1. ÚVOD

Lanové zariadenia vyrábane v dnešnej dobe sú z konštrukčného hľadiska pomerne zložitú, no stále pracujú na jednoduchom princípe pôsobenia ťahovej sily na bremeno, prostredníctvom lana (v LH spravidla oceľové lano), ktoré je týmto účinkom približované. Vznikajúce dynamické sily z rôznych približovacích režimoch sa prenášajú prostredníctvom lán na konštrukčné časti lanovky a tým ich mechanicky namáhajú (Remper, 2010).

Veľkosti a priebehy síl sú do značnej miery ovplyvnené rýchlosťou približovania, veľkosťou bremena, od odporu terénnych prekážok, nepredvídateľného pohybu bremena spôsobeného mikroreliefom podložia, nesprávnou obsluhou stroja a pod. Priebeh týchto dynamických síl sa s ťažkosťou predpokladá a práve tu vidíme potrebu zaberat' sa sledovaním ťažných síl v technologických lanách lesníckej lanovky počas prevádzky.

2. MATERIÁL A METÓDY

2.1 Súčiniteľ dynamického namáhania ocelového lana

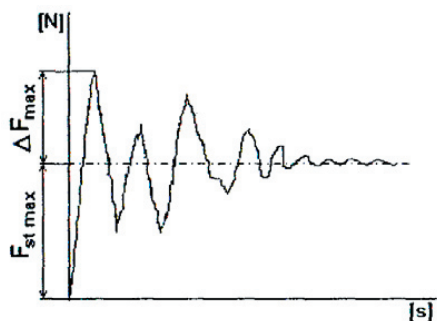
Charakter dynamického zaťaženia je ovplyvňovaný viacerými faktormi ako napríklad:

- modul pružnosti lana,
- vlastnosťami dopravovaného bremena,
- režimom činnosti lanového systému,
- smerom pohybu bremena atď.

Dynamické namáhanie ocelového lana môžeme hodnotiť pomocou súčiniteľa dynamického namáhania, ktorý je daný pomerom súčtu maximálnej nameranej hodnoty nameraného statického zaťaženia a maximálnej amplitúdy k maximálnej hodnote nameraného statického zaťaženia (Boroška a kol., 1996).

$$k_D = \frac{F_{ST\max} + \Delta F_{\max}}{F_{ST\max}} \quad (1)$$

Kde: $F_{ST\max}$ – maximálna skutočná statická sila [N],
 ΔF_{\max} – maximálna amplitúda od maximálnej statickej sily [N].



Obrázok 1 Určenie súčiniteľa dynamického namáhania (Molnár a kol., 2006)

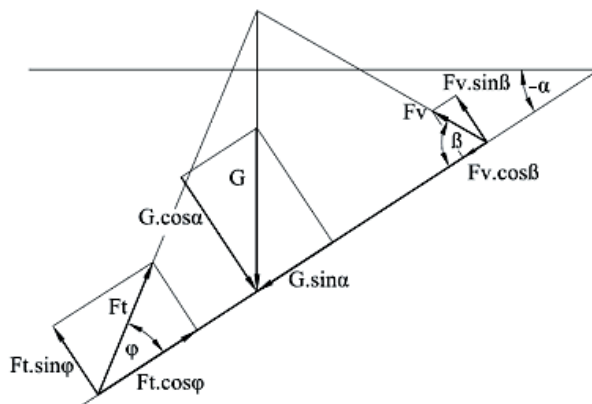
Na základe meraní amplitúd môžeme teda určiť dynamický súčiniteľ v každom bode získaného záznamu.

2.2 Silové pomery pri približovaní kmeňov

Kvôli matematickému vyjadreniu ťažnej resp. brzdnjej sily v lane je dôležité vytvoriť rozbor silových pomerov a to v režime približovania v akom sa kmene približovali pri experimentálnom meraní. Rozbor silových pomerov je založený na princípe rozkladu síl do dvoch smerov, a to na sily kolmé na povrch podložky a síl rovnobežných s terénom. Keďže pri experimentálnych meraniach vytváraných počas prevádzky dochádzalo k približovaniu kmeňov v polozávесе dole svahom nasledujúci silový rozbor sa venuje práve tejto možnosti.

2.2.1 Približovanie kmeňa v polozávесе dole svahom

Ťažná resp. brzdná sila (keď kmeň predbieha vozík) je možné vyjadriť grafickou metódou – obrázok 2.



Obrázok 2 Rozklad síl pri približovaní dole svahom keď náklad predbieha (Horek, 2007)

Z grafického riešenia je teda možné odvodiť tieto vzťahy na základe ktorých môžeme vypočítať potrebnú brzdnú silu vo vratnom lane:

$$F_v^2 = [(1 - q) \cdot G \cdot \cos \alpha]^2 \cdot (1 + f_t^2) \quad (2)$$

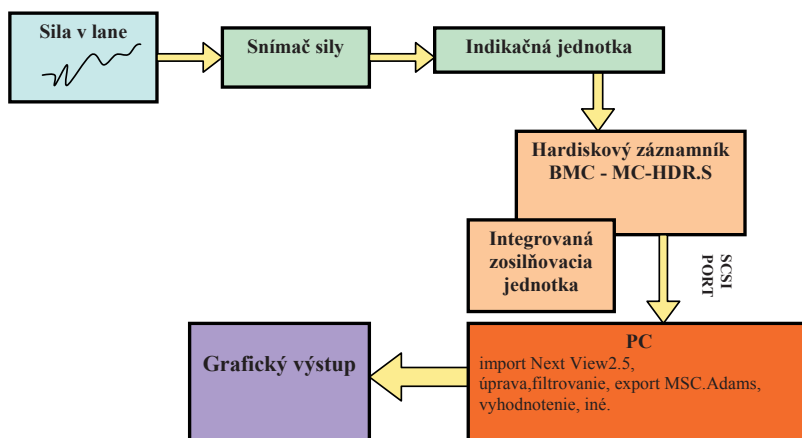
$$\operatorname{tg} \beta = \frac{1}{f_t} \quad (3)$$

$$F_t^2 = F_v^2 + G^2 - 2 \cdot G \cdot F_v \cdot \sin(\beta - \alpha) \quad (4)$$

- kde F_t – sila v ťažnom lane (N),
 φ – uhol nositeľky sily F_t s rovinou svahu ($^\circ$),
 G – tiaž kmeňa (N),
 α – uhol sklonu svahu ($^\circ$),
 F_v – sila v ťažisku vlečenej časti (N),
 β – uhol nositeľky sily F_v s rovinou svahu ($^\circ$),
 q – podiel časti nákladu zavesenom na lane.

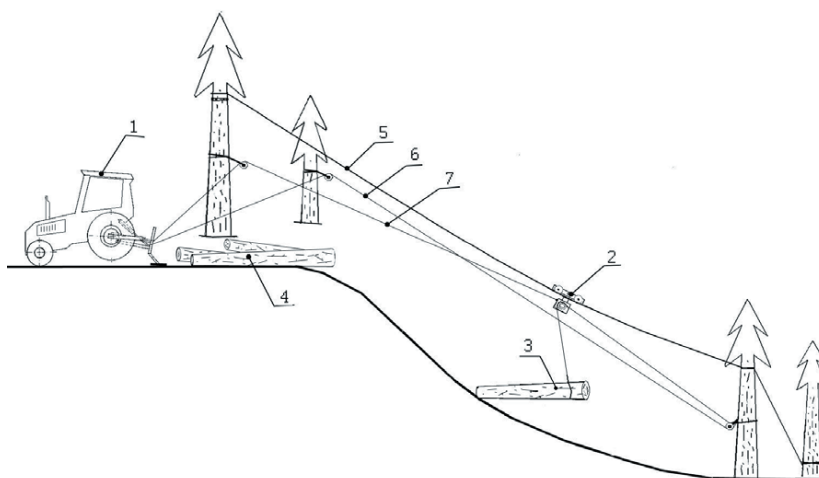
2.3 Metodika merania

Merací reťazec použitý pri experimentálnom meraní je znázornený na obrázok 3.



Obrázok 3 Bloková schéma znázorňujúca experimentálny merací reťazec

Na účel snímania a zaznamenávania priebehov síl bol navrhnutý merací reťazec. Ten pozostával zo snímača ťahovej sily LC-IE – 200 kN spolu s indikačnou jednotkou IJ-3LCD a hardiskovým záznamníkom MC-HDR.S fy BMC. Meranie prebiehalo na svahu o dĺžke 120 m so sklonom 30°, približovalo sa nadol v polozávесе hrubším koncom napred. Z tohto dôvodu bola ťažná sila počítaná z odvodeného vzťahu 4. Počas merania sa menila vzorka približovaného kmeňa o rôznej hmotnosti dĺžka kmeňov bola približne 6 m. Priemerná približovacia rýchlosť bola pri každom meraní 0,95 ms⁻¹. Pre porovnanie nameraných hodnôt bola F_{ST} stanovená zjednodušene a to pre celú trasu ako približovanie v polozávесе, kde uhol sklonu svahu bol $\alpha = 30^\circ$, a koeficient transportu pre polo zavesený kmeň bol $f_t = 0,64$. Takto získané hodnoty slúžili na vyjadrenie dynamického súčiniteľa.

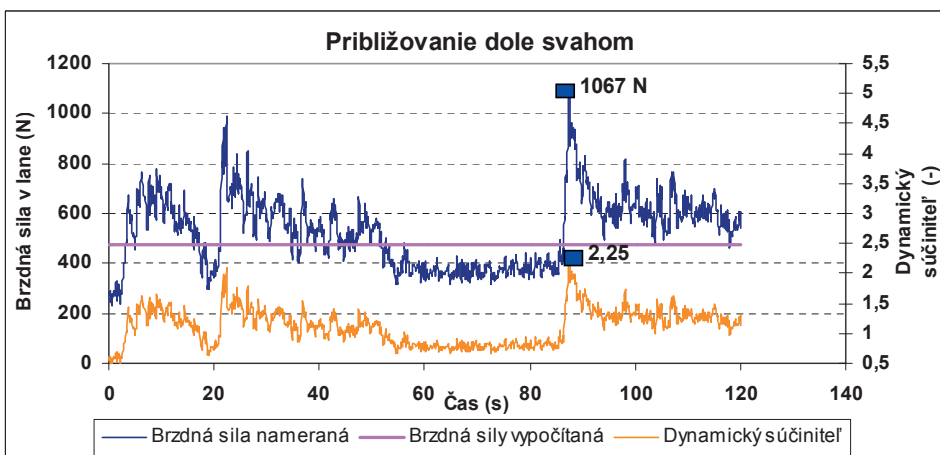


Obrázok 4 Schéma nekonvenčného lanového systému počas prevádzky pri približovaní dole svahom
 1 – lesnícka lanovka v zapojení s UKT, 2 – lanovkový vozík, 3 – približované bremeno v polozávесе,
 4 – skládka dreva, 5 – nosné lano, 6 – ťažné lano, 7 – vratné lano.

3. VÝSLEDKY

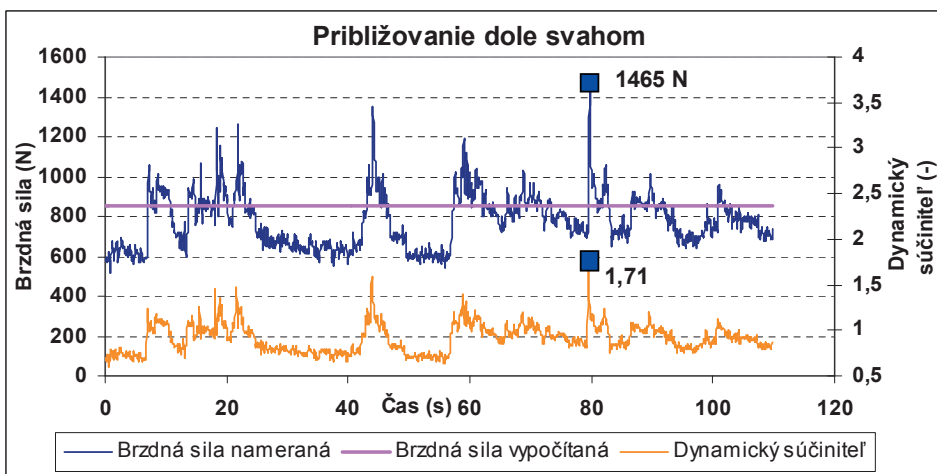
Z vytvorených experimentálnych meraní boli vytvorené grafické priebehy síl počas doby približovania a následne boli grafy doplnené o hodnoty brzdné sily vypočítanej F_{ST} ako aj vypočítaného dynamického súčiniteľa k_D podľa vzťahu 1.

Meranie č. 1 – približovanie kmeňa dole svahom o tiaži 1457,9 N.



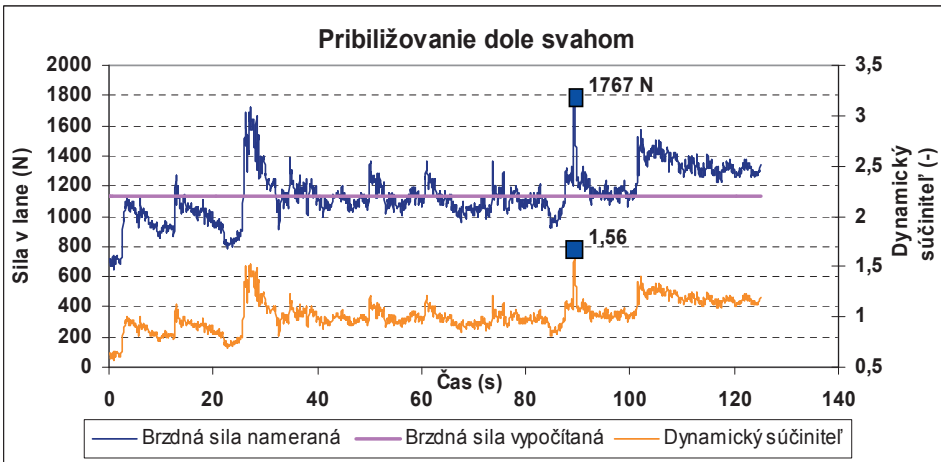
Obrázok 5 Približovanie dole svahom pri tiaži kmeňa 1457,9 N

Meranie č. 2 – približovanie kmeňa dole svahom o tiaži 2623,9 N.



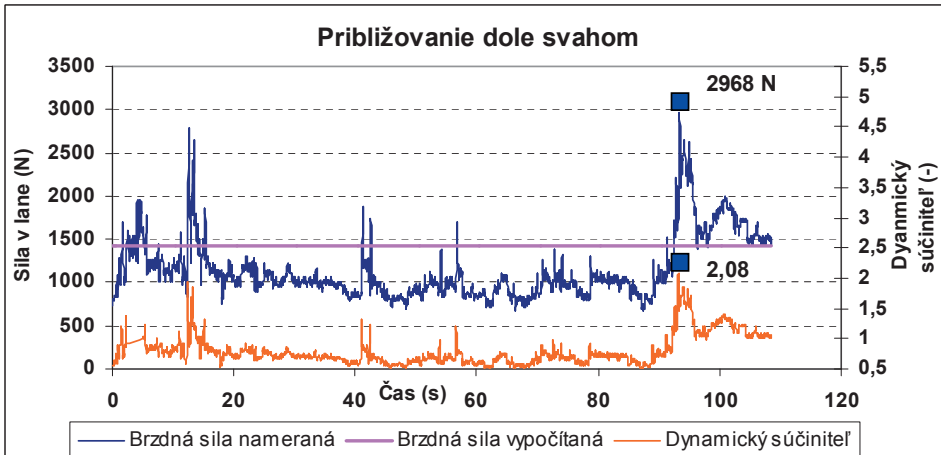
Obrázok 6 Približovanie dole svahom pri tiaži kmeňa 2623,9 N

Meranie č. 3 – približovanie kmeňa dole svahom o tiaži 3466,9 N.



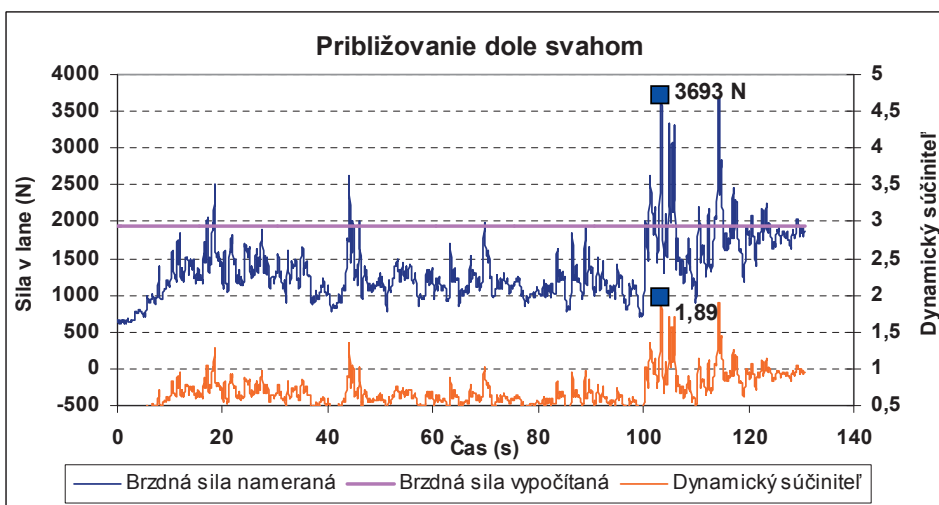
Obrázok 7 Približovanie dole svahom pri tiaži kmeňa 3466,9 N

Meranie č. 4 – približovanie kmeňa dole svahom o tiaži 4385,5 N.



Obrázok 8 Približovanie dole svahom pri tiaži kmeňa 4385,5 N

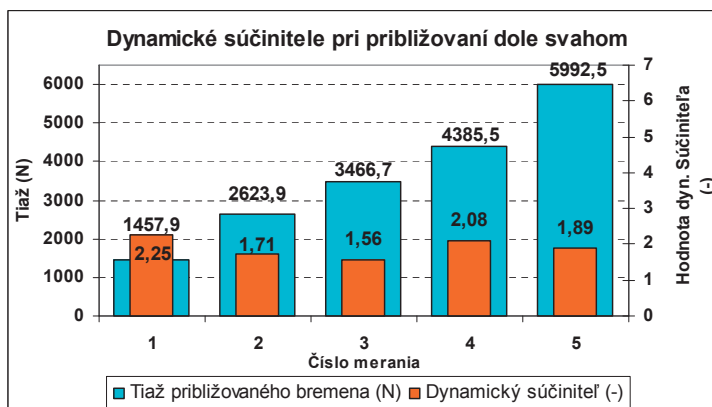
Meranie č. 5 – približovanie kmeňa dole svahom o tiaži 5992,5 N,



Obrázok 9 Približovanie dole svahom pri tiaži kmeňa 5992,5 N

Tab. 1 Hodnoty údajov pri približovaní dole svahom $v_{str} = 0,95 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Približovanie dole svahom, $V_{str} = 0,95 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$					
	Tiaž kmeňa (N)	Nameraná ťahová sila (N)	Statická sila vypočítaná (N)	Dynamický súčiniteľ (-)	Dynamický koeficient bezpečnosti lana (-)
Meranie č. 1	1457,9	1067	474	2,25	68,56
Meranie č. 2	2623,9	1465	853,1	1,71	49,94
Meranie č. 3	3466,7	1767	1127,2	1,56	41,40
Meranie č. 4	4385,5	2968	1425,9	2,08	24,64
Meranie č. 5	5992,5	3693	1948,4	1,89	19,81



Obr. 10 Stanovené maximálne dynamické súčinitele pri približovaní dole svahom $v_{str} = 0,95 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

4. DISKUSIA

Zo získaných údajov a hodnôt stanovených dynamickým koeficientom v etape približovania kmeňov dole svahom pod nosným lanom, je zrejme že najvyššie hodnoty nameraných síl sú spravidla pri konci dopravovanej vzdialenosti v momente keď obsluha začína dopravovaný kmeň spomaľovať za účelom zastavenia. Táto hodnota je ovplyvnená veľkosťou brzdného momentu vytvoreného brzdou a s najväčšou pravdepodobnosťou aj rýchlosťou približovaného kmeňa, čo by bolo vhodné dokázať väčším množstvom meraní pri meniacich sa rýchlostiach približovania. Získané hodnoty dynamického koeficienta sa pohybovali v rozmedzí 1,56 do 2,25 pri priemernej rýchlosti približovania $v_{str} = 0,95 \text{ m.s}^{-1}$.

Pri tejto prevádzkovej činnosti je dôležitá aj prax operátora, tá do značnej miery môže ovplyvniť aj vznik dynamickosti síl. Ako príklad je možné uviesť meranie č. 1, kde vznikol najvyšší koeficient pri najľahšom kmeni.

Vzhľadom na tento fakt a fakt, že zaznamenané merania boli vytvárané na funkčnom vzore, ktorého síce konštrukcia základné funkcie lanovky zabezpečuje, no ešte stále je konštrukčne dopĺňaná a modifikovaná, by bolo vhodné danú problematiku definovania dynamického koeficientu aplikovať aj na moderné a už vyvinuté lesnícke lanovky. Tieto lanovky používajú v dnešnej dobe elektronicky riadené ovládanie bŕzd, ktoré znižuje nie len opotrebenie brzdových obložení, ale hlavne znižuje nevhodné namáhanie lán, keďže brzdný moment je progresívne menený podľa aktuálnej potreby a teda aj vznik dynamických síl je možné predpokladať za nižší.

5. ZÁVER

Získané hodnoty dynamického súčiniteľa namerané pri týchto meraniach poukazujú na značné dynamické rázy a kmity, ktoré krátkodobo zvyšujú potrebnú brzdnú silu o približne dvojnásobok sily vypočítanej. Dosiahnuté výsledky sú jedny z prvotných výsledkov z danej oblasti a preto je potrebné zvolenú metodiku naďalej rozvíjať a bližšie špecifikovať priebehy síl v technologických lanách lesníckych lanoviek.

Pre vytváranie hlbších a podrobnejších záverov je nevyhnutné obdobné merania opakovať s vyšším počtom meraní pri rôznych meniacich sa faktoroch ako je rýchlosť približovania, hmotnosť a rozmery vzoriek, obsluha a pod.

LITERATÚRA

- BOROŠKA, J.; RITÓK, J.; ŠADEROVÁ, J.: Dynamické sily a skutočné zaťaženie oceľových lán v prevádzke. *Acta Montanistica Slovaca*, 1, 1996, s. 296–300.
- HOREK, P. 2007. *Lesní lanovky*. Praha. 2007. s. 101, ISBN : 978-80-87154-10-6.
- MOLNÁR, V., a kol. 2006. *Oceľové laná*. Košice : PONT s.r.o., 2006, 200 s. ISBN 80-8073-629-4.
- REMPER, M. 2010. *Výskum a pevnostná analýza vybraných častí lesníckej lanovky*. [Dizertačná práca], Zvolen, 2010 – Fevt TU Zvolen.

Tento článok je prezentovaný v rámci riešenia vedeckého grantového projektu VEGA č. 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:

Ing. Martin Remper, PhD., prof. Ing. Milan Mikleš, DrSc.,
Katedra lesnej a mobilnej techniky,
Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky, Technická univerzita vo Zvolene,
T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen,
E-mail: mremper@gmail.com, mikles@vsld.tuzvo.sk

HYDRODYNAMICKY MAZANÉ KLZNÉ LOŽISKO S MENIACIM SA UHLOM VSTUPU OLEJA

HYDRODYNAMICALLY LUBRICATED SLIDING BEARING WITH VARIABLE ANGLE OF INLET

Mária SEDNIČKOVÁ – Ján TURIS

ABSTRACT: The article contains experimentally observed values of bearing clearance filling with a lubricating oil during hydrodynamic lubrication of a radial sliding bearing. The lubricating oil is injected into the bearing through solitary gap in angle $\gamma = 0^\circ, 45^\circ$ and 90° from resultant of loading. The oil is injected under pressure from 0,1 to 0,6 MPa.

Key words: radial sliding bearing, liquid friction, limit friction, bearing clearance, lubricating film

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 umiestneným pod uhlom $\gamma = 0^\circ, 45^\circ$ a 90° od výslednice zaťaženia ložiska. Olej je do ložiska privádzaný pod tlakom v rozmedzí od 0,1 do 0,6 MPa.

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

ÚVOD

Šetrenie paliva, surovín, energie a predlžovanie životnosti sú hlavné ciele, na ktoré sa kladie dôraz pri požiadavke bezporuchovej prevádzky nových aj existujúcich strojov.

Vysoká spoľahlivosť, kľudný chod, menšia citlivosť na rázy, možnosť väčšieho zaťažovania, možnosť vysokých otáčok a nenáročnosť konštrukcie sú vlastnosti, pre ktoré sú klzné ložiská používané.

Na spoľahlivosť a nízku energetickú i materiálovú náročnosť majú vplyv:

- použité materiály čapu,
- použité materiály puzdra,
- určenie potrebného množstva mazacieho oleja pre mazanie,
- potrebný prírodný tlak oleja a miesto vstupu oleja do ložiska pri statickom, resp. kvázistatickom zaťažení,
- otáčky čapu,
- veľkosť zaťaženia.

Existuje veľa ďalších činiteľov ovplyvňujúcich chod ložiska, tie však neboli pri tejto úlohe experimentálne zisťované. Pokusy boli realizované na skúšobnom meracom

zariadení. Cieľom výskumu bolo, na základe týchto faktorov, skúmať zaplnenie medzery radiálneho klzného ložiska olejom.

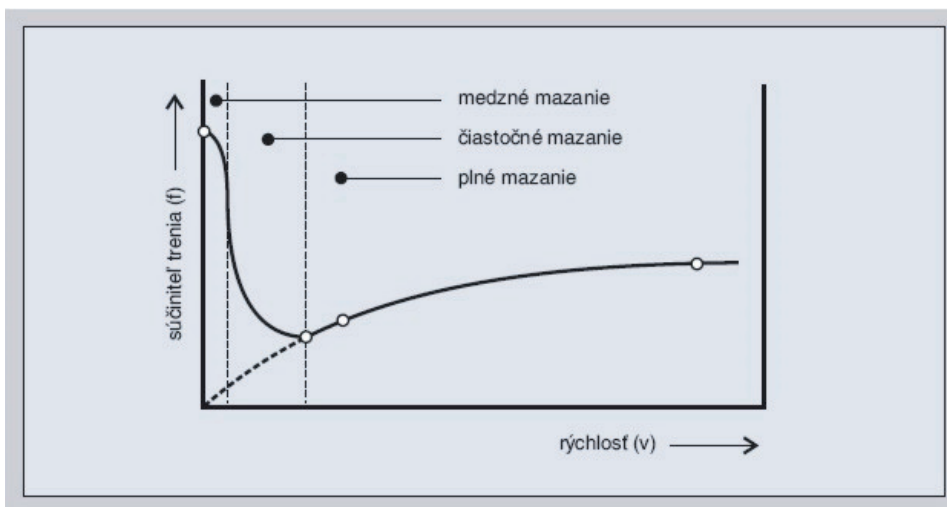
1. MATERIÁL A METÓDY

1.1 Hydrodynamické mazanie

Hydrodynamické mazanie má zabezpečiť, aby sa pri rotácii čapu vytváral čerpací účinok na mazivo privedené do klinovej zbiehajúcej sa medzery, ktorý stačí k dokonalému oddeleniu klzných plôch.

Z hľadiska životnosti a prevádzky technických zariadení s trecími uzlami mazanie s vytvorenou celistvou nosnou vrstvou kvapalinového maziva je najvýhodnejším stavom, ktorý možno dosiahnuť. Tribologický systém, ktorý pracuje v režime hydrodynamického mazania, nevykazuje za predpokladu vytvorenia dostatočne hrubej mazacej vrstvy prakticky žiadne opotrebenie tuhých trecích telies a proces trenia prebieha vnútri mazacej kvapalinovej vrstvy (Sekereš, Turis, 2009).

Aby došlo ku kvapalinovému mazaniu, je nutné pri otáčaní ložiska dosiahnuť primeranú rýchlosť, ktorou sa zabezpečí dostatočný hydrodynamický tlak. Medzi trecími plochami sa vyžaduje radiálna medzera, ktorá má v skutočnosti tvar klina a zužuje sa v smere pohybu hriadeľa. Klzné plochy potom môžu byť od seba oddelené súvislou vrstvou maziva (obr. 1).



Obrázok 1 Pribeh mazania

Pri určitej polohe klzných plôch sa súvislý olejový film udrží len vtedy, keď je príslušná zložka hydrodynamického tlaku v rovnováhe so zaťažením ložiska. Ak sa zväčší zaťaženie, môže dôjsť k porušeniu súvislej vrstvy a režim prejde do polosuchého trenia. Klzná rýchlosť súvisí so zaťažením hriadeľa, teda aj puzdra alebo panvy ložiska. Ihneď po

rozbehnúť sa tlakom pracovnej kvapaliny, resp. mazadla prenáša časť zaťaženia hriadeľa. Keď rýchlosť dosiahne takú hodnotu, pri ktorej sa vznikajúce teplo nestačí z ložiska odvádzať, zmení sa tým viskozita a olej sa môže pre dané ložisko stať nevyhovujúcim. Maximálny merný tlak je závislý od klznej rýchlosti, viskozity oleja a od rýchlosti odvádzania tepla z ložiska. Takýto medzný merný tlak sa pre dané ložisko najlepšie a najpresnejšie určí experimentálnymi meraniami.

Použitie priehľadných materiálov pre puzdro ložiska má pomôcť názorne získať poznatky o chovaní sa olejového filmu vo vnútri klzného ložiska. Na jeho materiál sú kladené požiadavky:

- aby vydržal tlak privádzaného oleja,
- aby vydržal tlak olejovej vrstvy pod hriadeľom,
- aby sa po dobu merania materiál zahrieval minimálne,
- aby materiál nemenil svoj priemer a tvar,
- aby bola priehľadnosť materiálu dostatočujúca.

1.2 Voľba materiálu

Materiálom zvoleným na vyhotovenie puzdier sa stalo plexisklo. Vyrobené puzdrá mali:

- vnútorný priemer 59 mm,
- vonkajší priemer 118 mm,
- hrúbku stien 15 mm,
- šírku 50 mm.

Podmienka zachovania priehľadnosti bola splnená na vyhovujúcej úrovni. Pri stanovenej hrúbke stien sa dalo počítať s určitým skreslením pohľadu, nie však s tak výrazným, aby ovplyvnilo celé meranie.

Puzdro ložiska bolo zaťažované prostredníctvom dvoch oceľových laniiek. Tieto boli zaťažované závažím cez dynamometer, pomocou ktorého bolo ložisko zaťažené silou $F = 2\,000\text{ N}$.

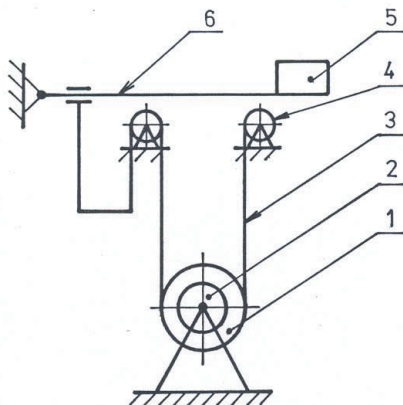
Meranie bolo uskutočňované s meniacim sa uhlom vstupu mazacieho oleja do ložiska:

- 0° ,
- 45° ,
- 90° .

Mazací olej bol do puzdra privádzaný osamelým otvorom pod tlakmi:

- $p_1 = 0,1\text{ MPa}$,
- $p_2 = 0,2\text{ MPa}$,
- $p_3 = 0,3\text{ MPa}$,
- $p_4 = 0,4\text{ MPa}$,
- $p_5 = 0,5\text{ MPa}$,
- $p_6 = 0,6\text{ MPa}$.

Ložisko bolo zaťažované podľa obrázka 2.



Obrázok 2 Zatiažovanie ložiska
1 ložisko, 2 hriadeľ, 3 lanko, 4 kladka, 5 závažie, 6 páka

2. VÝSLEDKY

2.1 Metodika merania

Experiment sa zakladal na meraní dĺžky olejového filmu v medzere ložiska, kde bola meraná dĺžka oblúka zaplneného olejom na vonkajšom priemere puzdra. Koefficient dĺžky olejového filmu v ložiskovej medzere sa stanovil z pomeru vonkajšieho a vnútorného obvodu puzdra:

$$K_1 = \frac{370,52}{185,3} = 2.$$

Postupne sa menili aj hodnoty otáčok, uhlov vstupu a tlaku oleja. Údaje boli zapisované do tabuliek.

Namerané hodnoty boli zaznamenané do grafov (obr. 3, obr. 4, obr. 5), kde sú na zvislých osiach vynesené hodnoty merania dĺžky zaplnenej medzery olejom v mm. Kladné hodnoty predstavujú zaplnenie v pretlakovej zóne. Záporné hodnoty zaplnenie v podtlakovej zóne. Na vodorovnej osi sú vynesené otáčky čapu ložiska.

Tabuľka č. 1 Veľkosť zaplnenia ložiskovej medzery olejom na vonkajšom priemere ložiska pri uhle vstupu oleja 0°

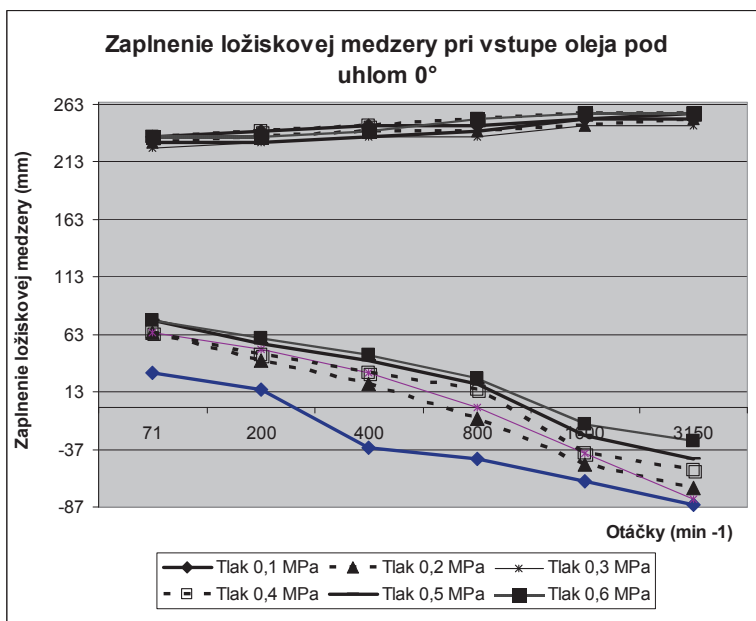
Meranie	Otáčky (min ⁻¹)	Tlak (MPa)					
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
1	71	30/235	65/230	65/225	65/235	75/230	75/235
2	200	15/240	40/235	50/230	45/240	55/230	60/235
3	400	-35/245	20/240	30/235	30/245	40/235	45/240
4	800	-45/245	-10/240	0/235	15/250	20/240	25/250
5	1600	-65/250	-50/245	-40/245	-40/255	-25/250	-15/255
6	3150	-85/250	-70/250	-80/245	-55/255	-45/255	-30/255

Tabuľka č. 2 Veľkosť zaplnenia ložiskovej medzery olejom na vonkajšom priemere ložiska pri uhle vstupu oleja 45°

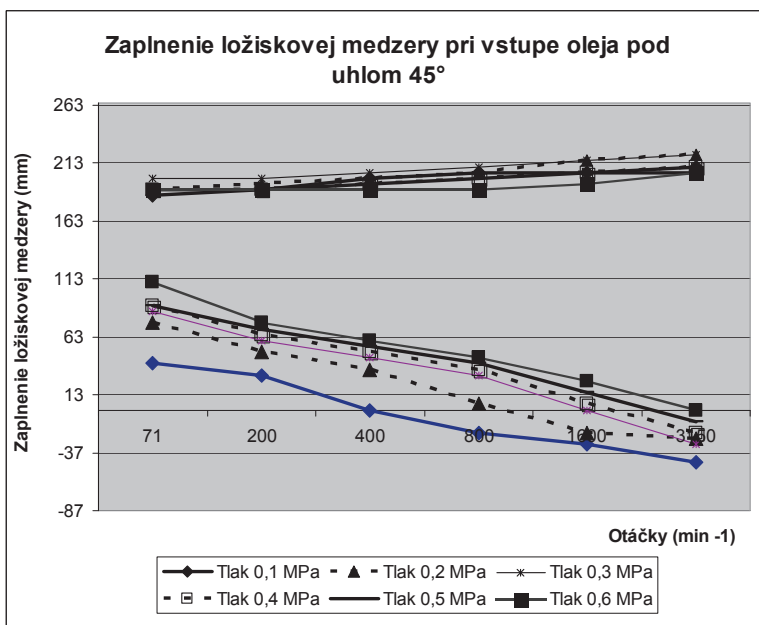
Meranie	Otáčky (min ⁻¹)	Tlak (MPa)					
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
1	71	40/185	75/190	85/200	90/190	90//190	110/190
2	200	30/190	50/195	60/200	65/190	70/190	75/190
3	400	0/200	35/200	45/205	50/195	55/195	60/190
4	800	-20/205	5/205	30/210	35/200	40/200	45/190
5	1600	-30/205	-20/215	0/215	5/205	15/205	25/195
6	3150	-45/210	-25/220	-30/220	-20/210	-10/205	0/205

Tabuľka č. 3 Veľkosť zaplnenia ložiskovej medzery olejom na vonkajšom priemere ložiska pri uhle vstupu oleja 90°

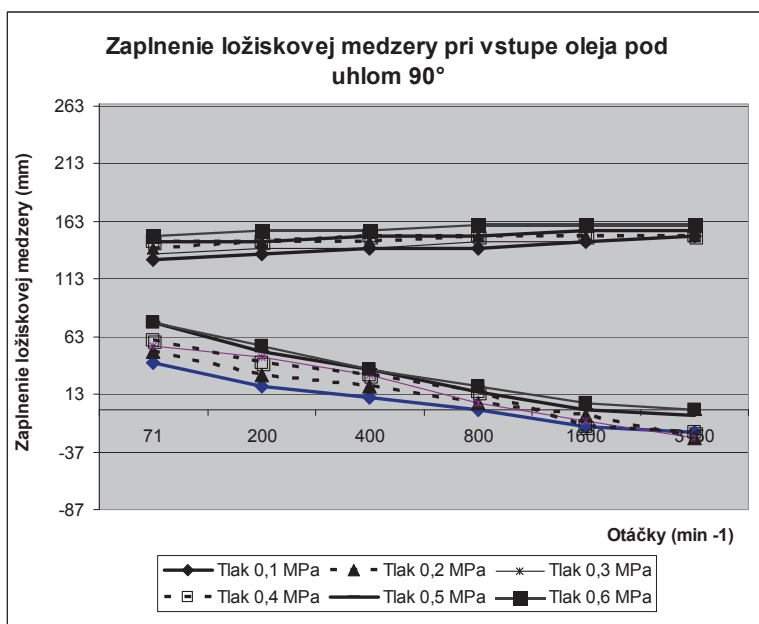
Meranie	Otáčky (min ⁻¹)	Tlak (MPa)					
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
1	71	40/130	50/140	55/135	60/145	75/145	75/150
2	200	20/135	30/145	45/140	40/145	50/145	55/155
3	400	10/140	20/145	30/140	30/150	35/150	35/155
4	800	0/140	5/150	5/145	15/150	15/150	20/160
5	1600	-15/145	-5/150	-10/145	-15/150	0/155	5/160
6	3150	-20/150	-25/150	-25/150	-20/150	-5/155	0/160



Obrázok 3 Graf nameraných hodnôt pre uhol vstupu oleja 0°



Obrázok 4 Graf nameraných hodnôt pre uhol vstupu oleja 45°



Obrázok 5 Graf nameraných hodnôt pre uhol vstupu oleja 90°

3. DISKUSIA

Z tabuliek a grafov vyplýva, že pri malých tlakoch a najvyšších otáčkach je hodnota dĺžky zaplnenia medzery najmenšia. Naopak pri vysokých tlakoch a malých otáčkach je dĺžka zaplnenia medzery najväčšia. Olej bol strhávaný aj do podtlakovej zóny pri vyšších vstupných tlakoch.

4. ZÁVER

Meranie potvrdilo predpoklady, že pri relatívne nižších hydrodynamických tlakoch a vyšších prírodných tlakoch oleja dochádza k častému zaplneniu i podtlakových častí medzery, pričom veľkosť zaplnenia je do istej miery i funkciou polohy prívodu maziva voči zaťaženiu. V rozsahu vykonaných experimentov sa nepodarilo úplne zaplniť podtlakovú časť medzery. Experiment ukázal, že do budúcnosti je potrebné ďalej skúmať zaplnenie medzery v prípade osamelého otvoru aj pri vyšších hodnotách hydrodynamického tlaku tak, aby dochádzalo k zaplneniu celej šírky ložiska a to čím najbližšie k najužšej medzere ložiskovej vôle. Podrobnejší výskum by umožnil kvantifikovať vývoj zaplnenia medzery vo forme, ktorá by bola použiteľná pre praktický výpočet ložiska.

LITERATÚRA

- [1] GÖTTNER, G. H. 1996. *Einführung in die Schmiertechnik. Teil 2*. Düsseldorf: Merklein – Verlag, 1996, 78 s.
- [2] <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:AdpOBtzJM-IJ:www.clanky.freudenberg-simrit.sk/clanok%2520mazanie%2520klznych%2520lozisk.php+hydrodynamic-k%C3%A9+mazanie+klzn%C3%BDch+lo%C5%BE%C3%ADsk&cd=7&hl=sk&ct=clnk&gl=sk>, dňa 25. 01. 2011.
- [3] SEKEREŠ, J. 1999. *Problematika mazania klzných uložení*. Habilitačná práca. Zvolen: TU, 1999, 75 s.
- [4] SEKEREŠ, J. – TURIS, J. 2009. *Tribológia ako súčasť návrhu strojových uzlov*. Zvolen: VTU, 2009, 128 s. ISBN 978-80-228-2089-9.
- [5] STN 02 3400: 1987. *Výpočet staticky zaťažených a hydrodynamicky mazaných radiálnych klzných ložísk*. Praha: Vydavatelství ÚNM, 1987, 72 s.

Článok vznikol na základe výskumného zámeru a riešenia vedeckého grantového projektu: IPA č. 12/2011 „Výskum radiálnych klzných ložísk pre pohony mobilných energetických prostriedkov v oblasti medzného mazania“.

Kontaktná adresa:

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

KVALITA REZNEJ PLOCHY PO REZANÍ ABRAZÍVNÝM VODNÝM LÚČOM

THE QUALITY OF CUTTING SURFACE AFTER BEING CUT BY AN ABRASIVE WATER JET

Miroslava ŤAVODOVÁ

ABSTRACT: Productive technologies using chemical or physical effects for the materials reduction came to the fore in the second half of the last century. Researches and developments about working and application of the new materials were stimuli for their huge forefront. The article deals with the assessment of the coarseness and with the related quality of the surface of the aluminium and steel after being worked or cut by an abrasive water jet (AWJ). It leaves visible growing on a working surface and it has an influence on the dimensional precision and the quality of the surface. The surface after the cut by a water jet consists of two areas: there is a smooth and grooved area which starts in a specific depth below the surface. The appearance of a cutting zone is influenced by various parameters such as operational or technological one. They include the motion speed of a water jet a sort of and the thickness of materials used. The measuring and assessment of sample surface coarseness are effected with the assistance of a tactile and contactless methods.

Key words: progressive technologies, abrasive water jet, quality and roughness of surface, aluminium and steel cutting, touch profilometry

ABSTRAKT: Výrobné technológie, využívajúce pre úber materiálu chemické či fyzikálne javy začali do popredia vystupovať v druhej polovici minulého storočia. Podnetom pre ich prudký nástup boli okrem iného výskum, vývoj a uplatnenie nových materiálov a s ním spojené problémy pri ich opracovaní a obrábaní. Článok sa zaoberá hodnotením drsnosti a s tým spojenou kvalitou plochy po obrobení, resp. rezaní abrazívnym vodným lúčom (AWJ) hliníka a ocele. AWJ lúč zanecháva viditeľné ryhovanie na obrobenej ploche. Ovplyvňuje to rozmerovú presnosť a kvalitu povrchu. Povrch po rezaní vodným lúčom pozostáva z dvoch oblastí. Z hladkej zóny a drsnej, ryhovanej, ktorá začína v určitej hĺbke pod povrchom. Vzhľad reznej zóny je determinovaný rôznymi parametrami, či už prevádzkovými alebo technologickými. Medzi ne patria hlavne rýchlosť posuvu vodného lúča, druh a hrúbka materiálu. Meranie a vyhodnocovanie drsnosti povrchu vzoriek sa uskutočňuje pomocou dotykových alebo bezdotykových metód.

Kľúčové slová: progresívne technológie, abrazívny vodný lúč, kvalita a drsnosť povrchu, rezanie hliníka a ocele, dotykový profilometer

ÚVOD

V odbornej literatúre sa pri technológií obrábania pod prívlastky „nekonvenčný, netradičný, progresívny, špeciálny“ zaraďujú technológie opracovania materiálov, ktoré

nepoužívajú „klasický“ rezný nástroj s určitou alebo neurčitou reznou hranou, ale využívajú pre úber materiálu pôsobenie rôznych fyzikálnych alebo chemických javov, nástroj a obrobok nie sú v priamom kontakte, ale v určitej regulovateľnej vzdialenosti od seba a procesy riadenia, optimalizácie a automatizácie sú ich prirodzenou súčasťou ako inteligentné prostredie riadiaceho systému stroja a procesu.

Progresívne technológie úberu materiálu môžeme klasifikovať v troch skupinách:

- I. podľa hlavného energetického zdroja úberu,
- II. podľa prítomnosti „nástroja“ ako geometrického telesa,
- III. podľa prevládajúceho mechanizmu úberu materiálu.

Delenie podľa hlavného energetického zdroja úberu resp. podľa druhu použitej energie je najviac používané a rozšírené. Podľa prevládajúcej energie, ktorá je zdrojom úberu materiálu rozlišujeme procesy:

- mechanické,
- chemické,
- elektrochemické a/alebo elektrické,
- elektrotepelné a/alebo tepelné (Maňková, I.; 2000).

Obrábanie vodným lúčom patrí do skupiny mechanických procesov, pretože k úberu materiálu dochádza mechanickými účinkami dopadu vodného lúča na jednotku plochy.

1 MATERIÁL A METÓDY

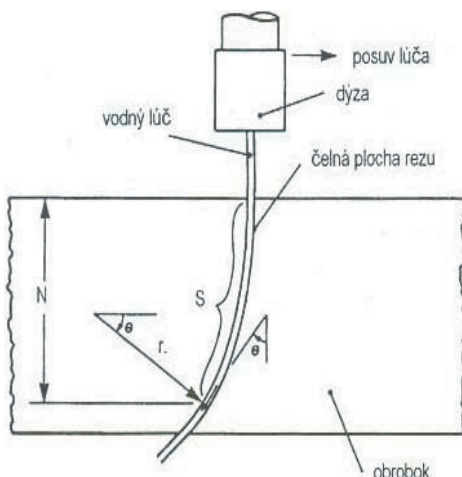
Rezanie a delenie materiálov pomocou vodného lúča pod názvom hydrodynamické obrábanie je známe už niekoľko desaťročí, avšak spoľahlivý, stabilný a účinný vodný lúč na opracovanie sa začal používať začiatkom roku 1970 na delenie dreva a plastov (Maňková, I; 2000). Z hľadiska použitého pracovného média je v praxi známe využitie dvoch základných metód:

- WJM – Water Jet Machining – čistý vodný lúč – hydrodynamické obrábanie,
- AWJM – Abrasive Water Jet Machining – obrábanie abrazívnym vodným lúčom, t.j. s pridaním jemného brusiva – abrazíva.

1.1 Princíp rezania AWJ

Rezanie abrazívnym vodným lúčom je definované ako vysokorýchlostný erozívny proces – riadený proces erozívneho opotrebenia. Odoberanie materiálu sa uskutočňuje mechanickým účinkom dopadu úzkeho vodného prúdu s vysokou rýchlosťou a kinetickou energiou na jednotku plochy. Abrazívne rezné médium je usmernené do úzkeho lúča s vysokou reznou účinnosťou a znásobuje mechanické účinky dopadu vodného lúča.

Lúč je generovaný vysokým tlakom vody, prechádzajúci otvorom dýzy s priemerom cca 0,3 mm. Lúč vody preniká do obrobku, postupne stráca svoju kinetickú energiu a vychýľuje sa. Pritom sa v každom bode pohybuje po zaoblenej dráhe, ktorej polomer sa mení s predchádzajúcou dĺžkou oblúka (Wilkins, R. J., Graham, E. E.; 1993). Vychýľovanie a zároveň spomaľovanie lúča v reze je dôsledkom trenia medzi povrchom vodného lúča a povrchom materiálu obrobku (obr. 1).



- N – vzdialenosť, ktorú vo zvislom smere prejde lúč za čas t ;
- r – polomer zaoblenia lúča;
- S – dĺžka stopy lúča podľa čelnej plochy rezu;
- Θ – uhol vychýlenia lúča medzi skutočným smerom lúča v reze a východiskovým smerom.

Obr. 1 Schematické znázornenie procesu rezania vodným lúčom a dráhy lúča (Wilkins, R. J., Graham, E. E.; 1993)

Hydraulické parametre technológie vysokotlakového lúča vychádzajú z teórie mechaniky tekutín. Tlak kvapaliny je v procese vodného lúča určený Bernoulliho rovnicou (1) pre prúdenie nestlačenej kvapaliny:

$$v^2 = \frac{2p}{\rho} \quad (1)$$

kde: v – rýchlosť prúdenia [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

p – tlak kvapaliny [MPa]

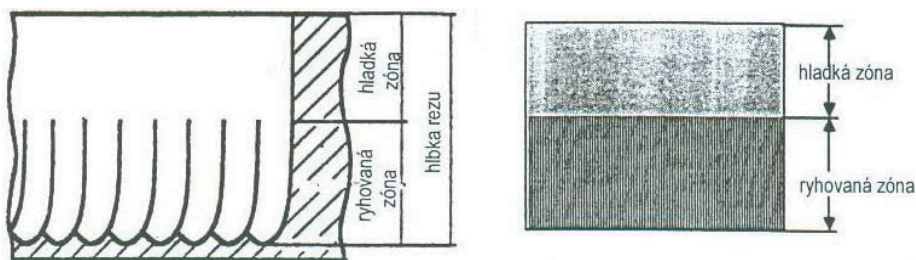
ρ – hustota kvapalného média [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

Čím je tlak vodného lúča vyšší, tým je vyššia kinetická energia molekúl vody a oveľa lepšie sa porušujú molekulárne väzby materiálu obrobku.

1.2 Vlastnosti povrchu po AWJM

Základným princípom rezania a oddeľovania AWJ z hľadiska tribológie je spolupôsobenie dvoch médií, kde úber materiálu sa uskutočňuje ako výsledok opotrebenia procesom erózie. Jav erózie predstavuje proces opotrebenia, ktorý je spojený s nárazom pevnej častice na povrch pevného materiálu. Eróznny proces závisí na uhle nárazu častice na povrch a na pevnostných vlastnostiach materiálu. Pre rezanie vodným lúčom je uhol nárazu určený medzi lúčom a rovinnou obrobku. Povrch po rezaní AWJ má dve zóny:

- *hladkú* – horná časť rezu, výsledok zóny rezného opotrebenia,
- *ryhovanú* – spodná časť, dôsledok deformačného opotrebenia (obr. 2) (Maňková, I.; 2000).



Obr. 2 Charakteristické zóny, vznikajúce po rezaní abrazívnym vodným lúčom (Maňková, I.; 2000)

V zóne opotrebovania rezaním je materiál rezaný – mikrorytý abrazívnymi časticami. Častica naráža na materiál, vyrýva do neho dráhu a odráža sa resp. vychádza zo záberu.

V zóne opotrebovania deformáciou je materiál dopadom abrazívnej častice, ktorú nesie prúd vody deformovaný. V tejto oblasti nadmerná deformácia narážajúcej častice spôsobuje spevnenie materiálu a jeho následné štiepenie, vylamovanie nárazom nasledujúcej častice. Pri krehkých materiáloch sa tvoria v tejto zóne trhliny, ktoré sa rýchlo šíria. Čiastočky materiálu sú vylamované a úber nastáva ich vyplavením.

Hodnoty drsnosti povrchu rezaného materiálu nie sú rovnaké. V hornej časti rezu – v zóne opotrebovania, kde má lúč ešte dostatočnú kinetickú energiu pre rezanie, je drsnosť materiálu nižšia. V spodnej časti, kde je materiál deformovaný, sú zaznamenávané vyššie hodnoty drsnosti.

Existencia dvoch zón pri rezaní AWJ a meniace sa hodnoty drsnosti povrchu nasvedčujú tomu, že druh rezaného materiálu, jeho mechanické vlastnosti ako sú napr. húževnatosť a tvrdosť nie je možné zanedbať, pretože ovplyvňuje prienik lúča a tým aj hĺbku rezu. Inú textúru v zóne rezu má relatívne mäkký hliník a inú ocele (Maňková, I.; 2000). Okrem kvality rezanej plochy, ak je operácia AWJ konečnou, ovplyvňujú tieto poznatky voľbu prídavku pre prípadné ďalšie technologické operácie, nasledujúce po rezaní abrazívnym vodným lúčom.

Medzi základné prevádzkové charakteristiky AWJ, vplyvajúce na úber materiálu, kvalitu opracovania povrchu a účinnosť procesu patria:

- tlak vody, rýchlosť prúdenia a rozmery otvoru dýzy,
- vzdialenosť medzi dýzou a obrobkom,
- uhol sklonu lúča,
- druh a veľkosť abrazíva (Fabiánová, J.; 2007).

Abrazívny vodný lúč je schopný rezať všetky druhy materiálov. Obmedzené možnosti sú len pri delení tvrdeného skla. Medzi jeho najväčšie prednosti z pohľadu kvality, vplyvu na materiál v zóne rezu a využitia, patria:

- rez je bez viditeľnej tepelne ovplyvnenej zóny – „studený rez“, vhodný pre rezanie materiálu s nedostatočným odvodom tepla (plasty, Ni, Ti, Co, kompozity);
- v zóne rezu nie sú pozorované tepelné zmeny v materiáli, na povrchu nie sú trhlinky;
- bezprašný proces – pri rezaní materiálov ako sú azbest, sklotextil, sklo sa neuvolňujú žiadne karcinogénne, jedovaté a prašné látky;
- rezná hrana bez otrepov, dobrá kvalita rezu, bez straty materiálu v reze a odpadu, šírka rezanej medzery je cca 0,1–0,3 mm, vhodné pre delenie drahých materiálov;

- vysoká rýchlosť rezania, možnosť rezania v rôznych smeroch bez straty účinnosti lúča, možnosť rezania materiálu aj pod vodnou hladinou;
- delenie Ti, W, Ta, U, extrémne tvrdých materiálov, kompozitov, výroba tvarovo zložitých súčiastok, lopatiek motorov a turbín, rezanie vláknitých materiálov;
- delenie výbušných látok (dynamit) (Maňková, I.; 2000), (Fabiánová, J.; 2007).

1.3 Hodnotenie kvality reznej plochy

Pri hodnotení kvality povrchu po rezaní abrazívnym vodným lúčom boli vybrané dva materiály. Prvým bola zliatina hliníka AlMg3, využívaná v potravinárskom a chemickom priemysle, v strojárstve, na stavbu dopravných prostriedkov a lodí, na nosné konštrukcie, výmenníky tepla, ochranné kryty, na prvky vnútornej a vonkajšej architektúry. Je to materiál stredne pevný ($R_m = 140-150$ MPa), veľmi dobre odolný voči korózii, morskej vode a tropickým podmienkam. Má veľmi dobrú chemickú odolnosť, leštiteľnosť a dobrú zvariteľnosť všetkými spôsobmi. Obrobiteľnosť reznými nástrojmi je nevyhovujúca v mäkkom stave, vyhovujúca v tvrdšom stave. Ťažnosť A = 5 %, tvrdosť je udávaná 50 HBS (Kalincová, D.; 2010), (Lexikón kovov; 2009).

Druhým materiálom bola oceľ triedy 11, konkrétne 11 373. Je to konštrukčná oceľ, vhodná pre jednoduchšie súčiastky konštrukcii a strojov menších hrúbok, namáhané staticky a mierne dynamicky. Využíva sa pre vtokové objekty vodných turbín, stavidla, menej namáhané zvarané potrubia, ploché, klenuté a lemované vysokotlaké dna. Má zaručenú tavitelnú zvariteľnosť. Medza pevnosti sa udáva $R_m = 340-470$ MPa a ťažnosť A = 25 %, (Lexikón kovov; 2009).

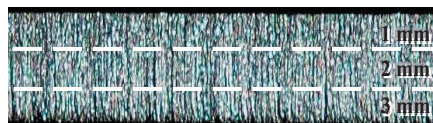
Ostatné technologické parametre, zvolené pri experimente:

Tlak vody:	$p = 400$ bar;
Priemer diamantovej štrbiny vodnej dýzy:	$d_0 = 0,33$ mm;
Vzdialenosť dýzy nad obrobkom:	$x = 4,0$ mm;
Hmotnostný tok abrazíva:	$m_a = 400$ g.min ⁻¹ ;
Materiál abrazíva:	indický granát.

Cieľom experimentu bolo zistiť hodnoty drsnosti pre zvolené materiály, za účelom hodnotenia kvality reznej zóny. Pri rovnakej hrúbke uvedených rezaných materiálov bola menená posuvová rýchlosť v_f . Experiment sa uskutočnil vo firme DEMA s. r. o. Zvolen.



Obr. 3 Dotykový profilometer Surfcom 130A (Kráľ, E.; 2011)

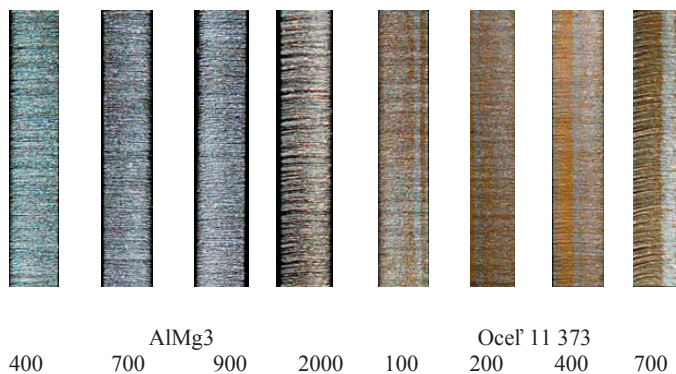


Obr. 4 Merané úrovne – hĺbky vzorky, príklad

Hodnoty drsnosti povrchu vybraných materiálov (obr. 4) boli merané dotykovým profilometrom (drsnomerom) Surfcom 130 A, Carl Zeiss (obr. 3). Prístroj sa skladá z meracieho zariadenia a z prístroja s dotykovou obrazovkou. Merací diamantový hrot so snímačom sa pohybuje po povrchu vzorky. Pomocou A/D prevodníka sú nerovnosti povrchu – výchylky hrotu premenené na digitálny signál, ktorý je spracovaný vo vyhodnocovacom zariadení. Posuv hrotu sa na začiatku merania nastaví na zobrazovacom zariadení. Profilometer je uchytený na stĺpovom vedení. Vzorka je upevnená vo zveráku, ktorý je umiestnený na granitovej doske. Rýchlosť merania je možné nastaviť od 0,3 do 3,0 mm.min⁻¹.

2 VÝSLEDKY A VYHODNOTENIE

Podľa teoretického modelu erózie častice, navrhnutého (Hashish, M.; 1991), sa hodnoty drsnosti menia s hĺbkou prenikania lúča do materiálu. Lúč stráca svoju kinetickú energiu, spomaľuje a vychýľuje sa. Hodnoty drsnosti v hornej a dolnej zóne opotrebenia sa líšia. Závisí to od uhla dopadu – nárazu častice (vodného lúča). Konečná štruktúra v zóne rezu je ovplyvnená hlavne odporom materiálu, ktorý je determinovaný jeho mechanickými vlastnosťami ako je napr. tvrdosť a rýchlosťou posuvu vodného lúča.



Obr. 5 Povrch materiálov po rezaní AWJ pri rôznych v_f (Kráľ, E.; 2011)

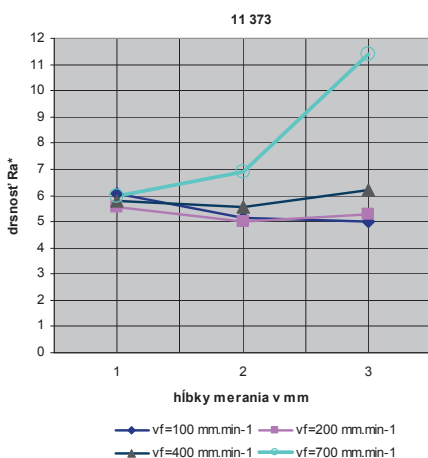
Na obr. 5 sú zachytené zmeny v textúre ocele a AlMg3 pri rôznych rýchlostiach posuvu v_f .

Drsnosť povrchu bola meraná v troch úrovniach, hĺbkach materiálu. Rozdelenie bolo uskutočnené po jednom milimetri, teda v hĺbke 1 mm, 2 mm a 3 mm (obr. 4). Meranie sa uskutočnilo na každom mieste 5 krát a priemerná hodnota drsnosti Ra^* bola zapísaná do tabuľky. Z nich bola vypočítaná celková priemerná hodnota drsnosti Ra pri jednotlivých zvolených posuvových rýchlostiach v_f . Zistené hodnoty drsností pre oceľ 11 373 a hliníkovú zliatinu AlMg3 sú v tabuľke 1.

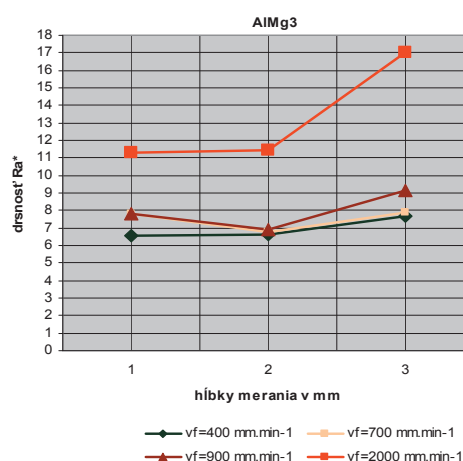
Tab. 1 Namerané hodnoty drsnosti Ra rezaných materiálov (Kráľ, Ľ.; 2011)

Materiál Hrúbka	Posuvová rýchlosť v_f (mm.min ⁻¹)	Hodnoty drsnosti Ra*, meraných v rôznych zvolených hĺbkach materiálov			Priemerná hodnota Ra
		1 mm	2 mm	3 mm	
Oceľ 11 373 4 mm	100	6,06	5,14	5,01	5,40
	200	5,58	5,0	5,30	5,31
	400	5,80	5,56	6,22	5,86
	700	5,99	6,89	11,42	8,10
AlMg3 4 mm		1 mm	2 mm	3 mm	
	400	6,53	6,64	7,65	6,94
	700	7,84	6,75	7,88	7,49
	900	7,82	6,92	9,14	7,96
	2000	11,31	11,46	17,02	13,27

Grafické vyjadrenie nameraných čiastkových hodnôt drsností v jednotlivých hĺbkach materiálu je uvedené v grafoch na obrázkoch 6 a 7.



Obr. 6 Drsnosť povrchu v závislosti od hĺbky preniku lúča do ocele 11 373

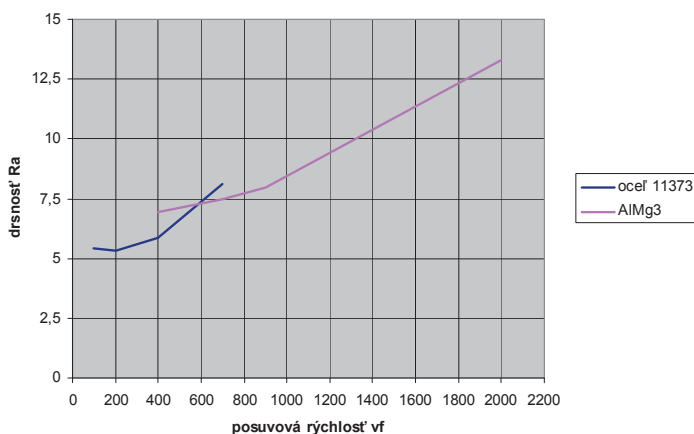


Obr. 7 Drsnosť povrchu v závislosti od hĺbky preniku lúča do AlMg3

Skúmaný povrch po rezaní AWJ bol hodnotený v troch úrovniach, hĺbkach 1 až 3 mm. Teoreticky sa povrch delí na dve zóny – hladkú, reznú opotrebenie a ryhovanú, deformačné opotrebenie (obr. 2). V prvej zóne, ktorá sa vyskytuje do určitej hĺbky – do jednej tretiny až polovice hrúbky materiálu, býva drsnosť nižšia a v druhej sú zaznamenávané hodnoty Ra vyššie. Grafy na obr. 6 a 7 to aj potvrdili. Avšak v strede rezaného materiálu, teda takmer na rozhraní týchto dvoch zón, drsnosť povrchu mierne klesla. Pri rezaní ocele to bolo pri $v_f = 100, 200$ a 400 mm.min⁻¹ a v dvoch prípadoch pri materiáli AlMg3, pri $v_f = 700$ a 900 mm.min⁻¹. Celkom sa tým nepotvrdila očakávaná, kontinuálna závislosť stúpania drsnosti pri prenikaní lúča do materiálu. Je tu predpoklad potvrdenia teoretického

modelu (Hashish, M.; 1991) a (Maňková, I.; 2000), ktorí uvádzajú, že pod hranicu rezného opotrebenia rezania postupuje lúč cyklickým spôsobom a stáva sa na čas stabilným, ustáleným. Potom sa lúč postupnými krokmi zaoblúje a mení smer, čím mení aj uhol dopadu častíc. Pri vyšších posuvových rýchlostiach, kde sa predpokladá väčší odpor materiálu, pri postupnej strate rýchlosti lúča, sú priebehy kriviek v grafoch na obr. 6 a 7 lineárne.

Pri porovnaní drsnosti na začiatku a konci rezania, teda keď lúč vniká do materiálu a následne ho opúšťa, sú hodnoty drsnosti vyššie, pri oceli takmer porovnateľné ako v strede materiálu. Tiež to môžeme pripísať už skôr popísaným poznatkom.



Obr. 8 Závislosť drsnosti na posuvových rýchlostiach pri rezaní ocele a zliatiny Al AWJ

Celkové porovnanie závislosti drsnosti na posuvovej rýchlosti obidvoch rezaných materiálov je na obr. 8. Aj keď sú ich mechanické vlastnosti rôzne, môžeme konštatovať, že sa potvrdili známe poznatky, že so zvyšujúcou sa reznou, posuvovou rýchlosťou drsnosť povrchu materiálu rastie. Zrejme je to z grafu na obr. 8 a tabuľky 1, pri hodnotení drsnosti pre rovnaké, teda úplne porovnateľné posuvové rýchlosti $v_f = 400$ a 700 mm.min⁻¹.

ZÁVER

Pri uplatňovaní progresívnej technológie – rezania abrazívnym vodným lúčom je potrebné pre hodnotenie kvality povrchu cez parameter drsnosť Ra, brať do úvahy okrem technologických parametrov aj druh rezaného materiálu.

Z výsledkov, vyplývajúcich z experimentu a zo známych teoretických poznatkov o AWJM vyplýva, že technologický parameter ako je posuvová rýchlosť vplyva na drsnosť povrchu v zóne rezu. So zvyšujúcou sa posuvovou rýchlosťou, drsnosť v zóne rezu rastie. Keďže sa rezná zóna delí na dve, reznú a deformačnú, pri jej podrobnejšom skúmaní môžeme konštatovať, že pri určitých rýchlostiach sa prejavil mierny pokles drsnosti na rozhraní uvedených zón.

Druh materiálu, delený AWJ, tak isto vplýva na konečnú kvalitu rezanej plochy. Tvrdšia oceľ 11 373 má pri rovnakých rezných parametroch horšiu kvalitu povrchu ako mäkkšia zliatina hliníka AlMg3. Je to hlavne v zóne deformačného opotrebenia, teda vtedy keď AWJ opúšťa materiál. Najvyššie zvolené posuvové rýchlosti – oceľ $v_f = 700 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a AlMg3 $v_f = 2000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ zvýšili drsnosť, čo potvrdilo, že so zvyšujúcou sa posuvovou rýchlosťou drsnosť rezaného povrchu narastá.

Pri správnej voľbe posuvovej rýchlosti je predpoklad, že kvalita povrchu rezaného materiálu v celom jeho priereze uspokojí požiadavky kladené na progresívnu technológiu výroby – AWJM.

LITERATÚRA

- FABIANOVÁ J.: Význam skúmania vplyvu rezných parametrov pri rezaní vodným lúčom, *Výrobné inžinierstvo*, Číslo 2, ročník VI, 2007, s. 53–55.
- HASHISH, M.: *The Effect of Beam Angle in Abrasive-Waterjet Machining*, ASME J. of Engineering of Industry, Vol 113, feb. 1991 pp. 29–37.
- MAŇKOVÁ, I.: *Progresívne technológie*, Viena Košice, 2000, ISBN 80-70099-430-4, str. 63–89.
- KALINCOVÁ, D.: *Technické materiály*, 2010, TU vo Zvolene, 190 s., ISBN 978-80-228-2086-8.
- KALINCOVÁ, D.: Skúšanie mechanických vlastností materiálov – prehľad meracích metód a zariadení. In *Zvyšovanie efektívnosti vzdelávacieho procesu prostredníctvom inováčných prostriedkov : zborník vedeckých príspevkov, vydaný pri príležitosti ukončenia projektu KEGA 3/6370/08 s názvom „Inovatívne postupy výučby výrobných technológií a materiálov na báze elektronického vzdelávania“*. – Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2010. ISBN 978-80-228-2166-7, s. 13–26.
- KRÁL, L.: Hodnotenie kvality povrchu vybraných materiálov pri obrábaní abrazívnym vodným lúčom, *Diplomová práca*, 2011, KVTM FEVT TU vo Zvolene.
- Lexikón kovov: verzia 1. 8, 2009, VERLAG DASHÖFER, Praha.
- WILKINS, R.J.; GRAHAM, E.E.: An Erosion Model of Waterjet Cutting, ASME J. of Engineering for Industry, Vol 115 feb. 1993 pp. 57–61.

Kontaktná adresa:

Ing. Miroslava Ťavodová, PhD.

Katedra výrobných technológií a materiálov, Fakulta environmentálnej a výrobnej techniky, Technická univerzita vo Zvolene, Študentská 26, 960 53, Zvolen, tavodova@vsld.tuzvo.sk