

A F T
**ACTA
FACULTATIS
TECHNICAЕ**



TECHNICKÁ UNIVERZITA VO ZVOLENE

1

ROČNÍK: XVI

ZVOLEN 2011

OBSAH

VEDECKÉ ČLÁNKY

ZÍSKAVANIE ENERGIE Z PROSTREDIA S VYUŽITÍM TEPELNÉHO GRADIENTU ENERGY HARVESTING FROM ENVIRONMENTNT WITH UTILIZATION OF THERMAL GRADIENT	7
Miroslav Adamík, Jozef Šuriansky	
METÓDY TRIBOTECHNICKEJ DIAGNOSTIKY PRE HODNOTENIE POUŽITÝCH MOTOROVÝCH OLEJOV TRIBOTECHNICAL DIAGNOSTIC METHODS FOR EVALUATION OF USER MOTOR OILS	17
Jozef Čuchran, Marián Kučera, Matúš Franta	
POSTPROCESOROVÁ ANALÝZA NAPĚTÍ VÝLOŽNÍKA NAKLADAČA POČAS PRACOVNÉHO REŽIMU A POSTPROCESSOR ANALYSIS OF THE STRESS STRUCTURE OF THE LOADER DURING TECHNOLOGICAL OPERATION	27
Branislav Danko	
PRODUCT LIFE CYCLE COST MANAGEMENT RIADENIE NÁKLADOV ŽIVOTNÉHO CYKLU VÝROBKU	35
František Freiberg, Erika Sujová	
VYBRANÉ METÓDY KRUŽNICOVEJ INTERPOLÁCIE SELECTED METHODS OF CIRCULAR INTERPOLATION	45
Peter Koleda, Ľubomír Naščák	
ANALÝZA INTENZITY PORÚCH U LESNÝCH ŤAŽBOVÝCH A DOPRAVNÝCH STROJOV THE ANALYSIS OF FAILURE INTENSITY AT FOREST FELLING AND SKIDDING MACHINES	55
Ján Kováč, Katarína Kováčová	
ANALYSIS OF THE FRICTIONAL COEFFICIENT AT THE PULLING LOAD ON THE TILTED PLAIN ANALÝZA SÚČINITEĽA TRENIA PRI ŤAHANÍ BREMENA NA NAKLONENEJ ROVINE	65
Ján Kováč, Martin Remper, Jozef Krilek	
MOŽNOSTI VYUŽITIA LASEROVÉHO ANALYZÁTORA LASERNET FINES-C V TRIBOTECHNICKEJ DIAGNOSTIKE MAZÍV POSSIBILITY OF USING LASER ANALYZER LASERNET FINES-C IN TRIBOTECHNICAL DIAGNOSTICS LUBRICANTS	73
Marian Kučera, Zdeněk Aleš, Martin Pexa, Michaela Černeyová	

ELEKTRICKÉ CHARAKTERISTIKY MODIFIKOVANÝCH DREVOCEMENTOVÝCH DOSIEK V PÁSME NÍZKYCH FREKVENCÍ ELECTRIC CHARACTERISTICS OF MODIFIED WOODCEMENT BOARDS IN BAND OF LOW FREQUENCY	81
Ivan Makovíny, Ľubomír Pavlík	
SOFTVÉROVÁ APLIKÁCIA PRE PODPORU MODELOVANIA PÁSOVÝCH VOZIDIEL V MSC.ADAMS/VIEW A SOFTWARE APPLICATION FOR SUPPORT OF TRACKED VEHICLES MODELING IN MSC.ADAMS/VIEW	89
Jaroslav Matej	
ŤAHOVÉ SKÚŠKY A VLASTNOSTI Špeciálneho lesného traktora TRACTION TEST AND PROPERTIES OF SPECIAL FOREST WHEELED TRACTOR....	95
Juraj Mikleš	
KINEMATIKA OTÁČANIA Špeciálneho lesného kolesového traktora v lesnom teréne s nákladom KINEMATICS OF TURNING, OF SPECIAL FOREST WHEELED TRACTOR IN THE TERRAIN WITH LOAD – SIZE	107
Milan Mikleš	
PRENOS ÚDAJOV VYUŽITÍM GSM MODULU DATA TRANSMISSION THROUGH GSM MODUL	117
Rudolf Petráš – Jozef Šuriensky	
VPLYV POLOHY KOMPENZAČNÝCH DRÁŽOK, MEDENÝCH NITOV V TELE PÍLOVÉHO KOTÚČA A NEROVNOMERNÉHO ROZSTUPU ZUBOV NA KRITICKÉ OTÁČKY THE EFFECT OF THE POSITION OF THE COMPENSATING SLOTS, THE COPPER CORKS IN THE BODY OF A CIRCULAR SAW BLADE AND THE UNBALANCED PITCH OF SEVERAL TEETH ON CRITICAL SPEED.....	125
Ján Svoreň	
ZVÝŠENIE PRESNOSTI SENZOROV POLOHY NA BÁZE MAGNETOSTRIKCIE A WIEDEMANOVHO JAVU INCREASE OF ACCURACY OF SENSORS POSITION BASED ON MAGNETOSTRICTION AND WIEDEMANN EFFECT	133
Jozef Šuriensky ml., Ľubomír Naščák	
POSÚDENIE SPÔSOBILOSTI MERADLA APPRAISAL OF METER CAPABILITY	143
Miroslava Ťavodová	
ANALÝZA TEPLOTNÝCH POLÍ V OKOLÍ OHRIEVANÉHO TELESÁ ANALYSIS OF TEMPERATURE FIELDS IN THE VICINITY OF THE HEATED BODY ...	153
Karina Valentová, Jozef Černecký	

VEDECKÉ ČLÁNKY

ZÍSKAVANIE ENERGIE Z PROSTREDIA S VYUŽITÍM TEPELNÉHO GRADIENTU

ENERGY HARVESTING FROM ENVIRONMENTNT WITH UTILIZATION OF THERMAL GRADIENT

Miroslav ADAMÍK – Jozef ŠURIANSKY

ABSTRACT: This article deals with the field of energy harvesting on the base of thermal gradient for purposes to autonomous supply of the wireless sensor nodes. In this respect, the measure on the thermoelectric cell presents the base of information's for definition of power requirement for application load in the place where thermal difference is available. The article is analyzing the structure of integrated circuit that is designed to conversion level of harvested voltage and energy storage. Simultaneously it performs power management of microprocessor system and structures of sensors.

Keywords: energy harvesting, thermal gradient, thermoelectric cell, energy managements

ABSTRAKT: Článok sa zaoberá problematikou získavania energie z prostredia na základe tepelného gradientu pre účely autonómneho napájania bezdrôtových senzorových uzlov. Meranie na termoelektrickom článku poskytuje údajovú základňu pre určenie energetickej disponibility pre aplikáciu v prostredí s dostupnou teplotnou diferenciou. Analyzuje štruktúru obvodu určeného pre konverziu napäťových úrovní a akumuláciu energie pre manažment napájania mikroprocesorového systému a senzorovej štruktúry.

Kľúčové slová: získavanie energie, tepelný gradient, termoelektrický článok, energetický manažment

1. ÚVOD

V riadiacich systémoch priemyselnej automatizácie sa ako (vstupný) prvok spätnej väzby používajú decentralizované senzorové uzly, ktoré snímajú informácie pre riadenie výrobného procesu. V mnohých prípadoch ich prevádzkového umiestnenia je požiadavkou bezdrôtová komunikácia s centrálnym riadiacim systémom. Pritom sa vyžaduje autonómnosť tak na úrovni napájania, ako aj na úrovni dátovej komunikácie.

S postupným vývojom elektrických komponentov na báze polovodičov a s ich rastúcou integráciou klesá elektrický príkon na úroveň rádovo μW . To je podnetom pre riešenie otázok ich napájania zberom okolitej energie v rôznych formách. Rekuperáciou zvyškovej

energie produkovanej priamo výrobným procesom je možné odstrániť servisné zásahy údržby pri výmene alebo dobíjaní batérií, čo umožňuje odstránenie poslednej prekážky ich autonómnej prevádzky.

Pracovné a životné prostredie človeka oplýva množstvom energie, ktoré má slúžiť pre vytvorenie jeho ideálnych pracovných podmienok, pre komunikáciu, pre pretvorenie hmoty a dokonca aj človek je sám jej zdrojom. V procese toku energie na ceste k jej využitiu prejde mnohými transformáciami, ktoré v reálnom prípade nedosahujú 100% účinnosť a stávajú sa zdrojmi iných foriem energie, ktoré je možné spätne previesť do najčistejšej formy energie akou je elektrická energia. Tabuľka 1. (Šuriansky, Hrková 2010) rozoberá disponibilitu zdrojov rôznych foriem energie a možný výkonový zisk pri účinnosti daného prevodu.

Tab. 1 Prehľad voľných energetických zdrojov a možný výkonový zisk

Zdroj energie	Charakteristiky zdroja	Účinnosť [%]	Výkonový zisk [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]
Mechanické vibrácie priemysel	1 m/s s frekvenciou 5 Hz 10 m/s ² s frekv. 1 kHz		100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Mechanické vibrácie živé organizmy	0,5 m/s s frekvenciou 1 Hz 1 m/s ² s frekv. 50 Hz		4 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Fotovoltaické články exteriér	100 mW/cm ²	10–24	10 mW/cm ²
Fotovoltaické články interiéru	0,1 mW/cm ²	10–24	10 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Tepelná energia priemysel	100 mW/cm ²	3	10 mW/cm ²
Tepelná energia živé organizmy	20 mW/cm ²	0,1	25 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
EM pole 0,9 GHz	0,3 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	50	0,1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
GSM 1,8 GHz	0,1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$		
Elektromagnetické pole WiFi	10 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	50	0,01 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Z týchto foriem energie je špecifická práve tepelná energia, dôležitá pre život, technologické postupy, býva často konečným zvyškovým produktom každej stratovej transformácie. Disponuje veľkým potenciálom a kvôli nízkej účinnosti prevodu nám „uniká pomedzi prsty“. Pre vlastnosť šírenia sa v prostredí všetkými smermi umožňuje transport a jej zber priamo na mieste jej využitia. Tento článok sa zaoberá metódami získavania energie transformáciou tepelného toku v prostredí s vytvoreným teplotným gradientom a rieši úpravu hladín napájacích veličín pre napájanie obvodov s CMOS technológiou.

2. MATERIÁL A METÓDY

2.1 Tepelná energia

Nenulová termodynamická teplota telesa je mierou energie, ktorú pri teplotnej výmene odovzdá teplejšie teleso chladnejšiemu. Tepelná energia sa prejavuje neustálym kmitavým pohybom častíc látky okolo svojich rovnovážnych polôh v kryštálovej mriežke.

Každá stavebná jednotka disponuje energiou, ktorá sa pri jej kmitavom pohybe rozkladá, a striedavo transformuje z kinetickej na potenciálnu a naopak. Častice v kryštálovej mriežke medzi sebou pôsobia príťažlivými a odpudivými silami, a spôsobujú prenos celkovej energie v smere jej záporného gradientu.

Následkom kmitania častíc telesa je elektromagnetické vlnenie, ktorého frekvencia je úmerná energii a teda rýchlosti kmitania týchto častíc. Pri nižších hladinách energie ide o infračervené žiarenie, pri vysokých hladinách energie (teplotách) je vyžiarený fotón, ktorého vlnová dĺžka je v oblasti viditeľného svetla.

Prenos tepelnej energie, čiže tepelná výmena (tepelný tok) nastáva medzi dvomi telesami, medzi ktorými je teplotný rozdiel až do stavu rovnováhy. Z predchádzajúceho rozboru vyplývajú mechanizmy prenosu energie vo forme tepla a to vedením (tuhé látky), prúdením (tekutiny) a žiarením.

2.2 Metódy získavania tepelnej energie

Je mnoho princípov, ktorými sa snímajú prejavy tepelnej energie pôsobením na fyzikálne vlastnosti vybraných materiálov (objem, elektrický odpor, vyžarovanie) a poskytujú tak informáciu o skutočnom energetickom stave telesa, ktorý je ekvivalentný jeho teplote. Prejavy tepelného zdroja pri mechanizme prenosu tepelnej energie prostredím je možné využitím fyzikálnych javov aktívne transformovať na iný druh energie s určitou účinnosťou.

- Transformáciou na mechanickú energiu využitím teplotnej dilatácie a prúdenia:
 - Bimetalické spojenie dvoch rôznych materiálov,
 - expanzia plynu v pracovnom priestore tepelného motora (Stirlingov motor),
 - tepelná turbína poháňaná prúdením zohriateho vzduchu.
- Transformácia na elektrickú energiu:
 - Využitím tepelného toku Φ_Q v zápornom smere teplotného gradientu, termoelektrickým článkom,
 - snímaním širokopásmového tepelného žiarenia E_T pyrodetektorom, fotoelektrickým článkom (viditeľné žiarenie).

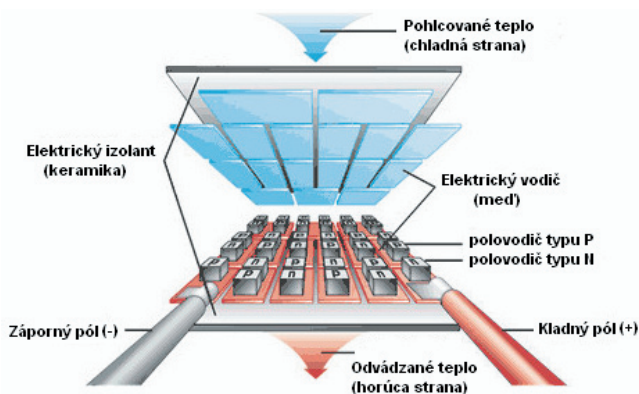
2.3 Termoelektrický článok (Peltierov)

Peltierov článok je polovodičový prvok, ktorý po pripojení jednosmerného zdroja nízkeho napätia začne prevádzať teplo z jednej strany na druhú. Teda pri prechode prúdu článkom sa na jeho stykových plochách vytvorí vzájomný teplotný rozdiel (Peltierov jav). V dôsledku jeho recipročnej podstaty je možné pozorovať aj opačný efekt. Teda po vytvorení teplotného rozdielu na stykové plochy Peltierovho článku sa vytvorí tepelný tok, a článok začne generovať elektrické napätie, ktoré vyvolá elektrický prúd záťažou (Seebeckov jav r. 1821). Seebeckov jav je definovaný na termočlánku, ktorý je zostavený z dvojice spojov dvoch rôznych kovov (polovodičov), na ktorých vznikol teplotný rozdiel. Napätie termočlánku naprázdno je dané vzťahom:

$$U = \int_{T_1}^{T_2} ((S_A(T) - S_B(T)) dT \quad (1)$$

- U – napätie naprázdno generované termočlánkom,
 T_1, T_2 – teploty meracieho a porovnávacieho spoja termočlánku,
 $S_A(T), S_B(T)$ – Seebeckove koeficienty pre použité materiály v závislosti na teplote.

Termoelektrický článok (Obr. 1) (Univerzita Pardubice 2010) sa skladá z veľkého počtu elementov z polovodičov typu P a N, ktoré sú striedavo spájané do termočlánkov prispájkovaním na vodivé plôšky stykových dosiek z keramiky. Termočlánky sú vzhľadom na elektrický prúd zoradené v sérii, vzhľadom na tepelný tok paralelne a zároveň tak, aby sa všetky merné (teplé) spoje orientovali na jednu stranu článku, a všetky referenčné spoje (studené) na druhú stranu článku.



Obr. 1 Štruktúra termoelektrického článku

Z praktického hľadiska predstavuje Peltierov článok akúsi tepelnú pumpu teda element, ktorý nútene prevádza teplo v smere určenom polaritou privedeného napájacieho napätia. V režime generátora reaguje na každú nepatrnú zmenu teplotného potenciálu generovaním výstupného napätia s polaritou určenou smerom tepelného toku. Zariadenie pracuje s relatívne nízkou účinnosťou, väčšinou v pomere (ohrievací/chladiaci výkon) 1,5 až 2,5 pri nulovom teplotnom rozdieli. Pri zväčšovaní teplotného rozdielu, sa zväčšuje aj tento pomer a znižuje účinnosť. Joulove teplo vytvorené prechodom prúdu a teplo prejdené z chladnej strany sa hromadí na teplej strane a vyžaduje si nútený odvod tepla. Prekročenie teploty 138 °C by spôsobilo rozpájanie spájkovaných spojov. Peltierov článok pre svoju veľkú dynamiku a jednoduchú reguláciu poskytuje vhodný prvok pre budenie podobného článku v režime generátora pre účely merania.

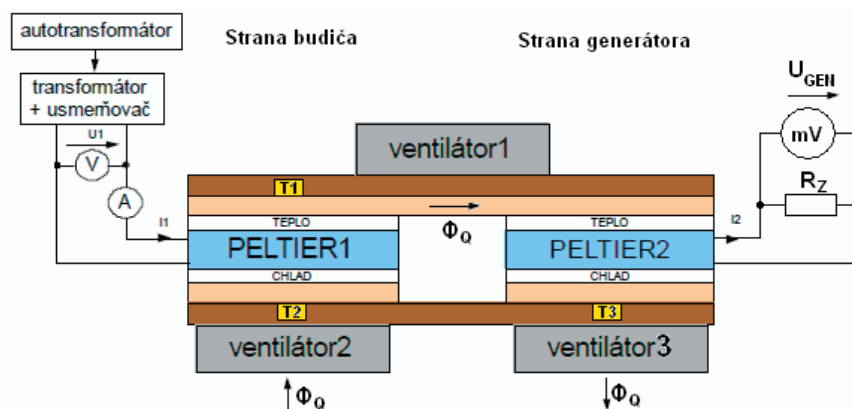
2.4 Meranie na termoelektrickom článku

Meranie prevodovej charakteristiky a množstva generovaného výkonu termoelektrickým (TE) článkom bolo vykonané na sústave dvoch Peltierových článkov znázornenej na obrázku (Obr. 2). Sú použité články TEC1-12708 s výkonom 80W a TEC1-12730 s výkonom 260W, pričom jeden vo funkcii budiča teplotného rozdielu a druhý vo funkcii termoelektrického generátora. Ich technické parametre sú v tabuľke (Tab. 2).

Tab. 2 Technické parametre použitých peltierových článkov

Typ:	TEC1-12708		TEC1-12730	
Teplota teplej strany [°C]	25 °C	50 °C	25 °C	50 °C
Teplota $Q_{\max}$ [W]	71	79	257	282
Teplotný rozdiel $\Delta t_{\max}$ [°C]	66	75	68	79
Budiaci prúd [A]	8,5	8,4	30,5	30,5
Budiace napätie [V]	15,4	17,5	15,6	17,8
Vnútorý odpor [Ω]	1,5	1,8	0,27	0,31

Teplný obvod sústavy je premostený cez medené platne pevne spojené k stykovým plochám článkov, ktoré tak rozdeľujú celú sústavu na teplú a studenú stranu. Pre teplotnú stabilizáciu sústavy sú na platniach uchytené ventilátory. Teplotné pomery sústavy sledujú integrované teplotné senzory LM35, ktorých analógový výstup je vyhodnocovaný 8 bitovým A/D prevodníkom mikroprocesorovej vyhodnocovacej jednotky.



Obr. 2 Sústava Peltierových článkov

Elektrickú časť sústavy tvorí obvod napájania budiaceho článku tvorený autotransfómatorom, a usmerňovačom. Pre sledovanie budiaceho výkonu je zaradený kontrolný voltmeter a ampérmetr. Na strane generátora je použitý digitálny milivoltmeter s pripojenou odporovou záťažou 1 k Ω .

Pri meraní sa vychádza sa z tepelnej rovnováhy celej sústavy. Po pripojení regulovateľného napájacieho zdroja na budiaci článok je teplo z prostredia s teplotou T_2 odoberané a prevádzané na teplú stranu s teplotou T_1 a medenou platňou privedené na článok generátora. Teplo po prechode generátorom je ventilátorom odvedené späť do prostredia. Postupným zvyšovaním budiaceho výkonu a teplotného gradientu bolo zaznamenávané výstupné napätie generátora odčítaním z milivoltmetra (rádovo mV). Z dôvodu akumulácie tepla na strane T_3 bola veľkosť dosiahnutého teplotného rozdielu ovplyvnená rýchlosťou

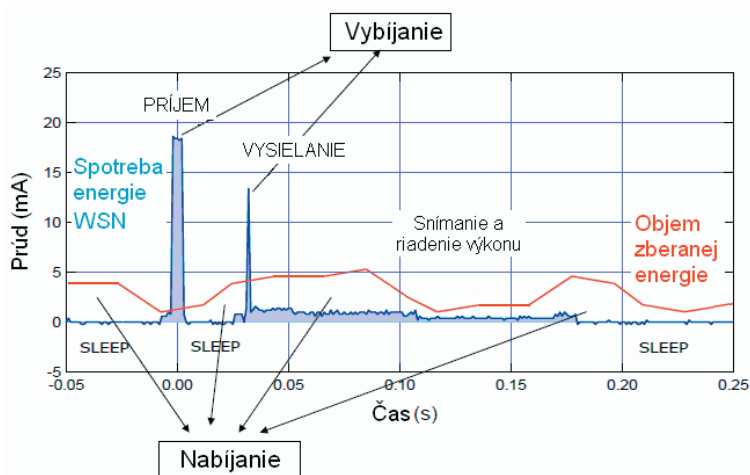
postupu merania. Hranica teploty teplej strany bola 80 °C. Celý postup bol realizovaný aj po výmene funkcií termoelektrických článkov.

2.5 Napäťová konverzia

Kvôli nízkym napäťovým úrovňam výstupu TE článku je nutné použiť vysoko účinnú DC/DC konverziu pre získanie úrovne napätí použiteľných pre CMOS technológiu. Pre tento účel je použitý obvod LTC3109. Je to DC/DC konvertor s vysokou integráciou určený pre odvod energie získanej z extrémne nízkonapäťových zdrojov ako sú termoelektrické generátory a termočlánky (Linear Technology 2010). Tento obvod pozostáva z vlastnej auto-polaritovej architektúry, ktorá umožňuje jeho činnosť už od vstupného napätia nižšieho ako 30 mV ($\Delta T < 1\text{ }^{\circ}\text{C}$) bez ohľadu na polaritu. Použitím dvoch kompaktných zvyšujúcich transformátorov a externého zásobníka energie (Superkapacitora) tento obvod umožňuje kompletný manažment napájania zariadení pre bezdrôtové snímanie a zhromažďovanie dát ako sú bezdrôtové senzorové uzly (wireless sensor nodes WSN).

2.5.1 Charakteristika záťaže WSN

Pre názornosť je v ďalšom uvedený charakteristický profil prúdových (výkonových) zaťažovacích režimov (Obr. 3) (Vullers 2008) štandardného senzorového uzla, ktorým zodpovedajú jeho štyri základné režimy činnosti. V prevádzke sa tieto režimy cyklicky opakujú s navrhnutou periódou T . V režime spánku (SLEEP), a v režime snímania a zhromažďovania informácií zo senzorov zostáva dostatok času pre akumuláciu energie potrebnej pre činnosť bloku bezdrôtovej komunikácie. Z toho vyplýva, že celková energetická bilancia zberu energie (nabíjanie) hodnotená za stanovený časový úsek T musí plošne pokryť nároky impulznej činnosti WSN (vybíjanie) s určitou pridanou energetickou rezervou pre zabezpečenie spoľahlivosti systému.

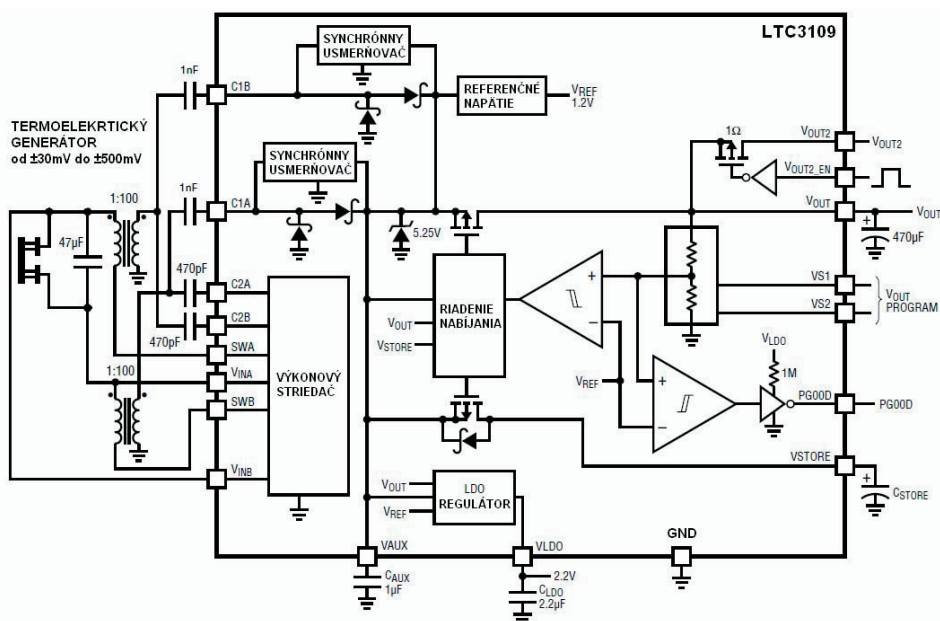


Obr. 3 Profil spotreby bezdrôtového senzorového uzla v konfrontácii s energetickým ziskom

2.5.2 Analýza činnosti obvodu LTC3109

Obvod LTC3109 (Obr. 4) využíva MOSFET výkonový striedač vo funkcii budiča rezonančného zosilňovacieho oscilátora tvoreného externými transformátormi a malými väzobnými kondenzátormi (C2A, C2B). Frekvencia oscilátora je určená indukčnosťou sekundárneho vinutia transformátora a je v rozsahu od 10 kHz do 100 kHz. Pre vstupné napätie nižšie ako 30 mV je odporúčaný transformačný pomer okolo 1 : 100 a môže byť znížený pri vyššom vstupnom napätí.

Striedavý výstup sekundárneho vinutia transformátora je zosilnený externými kondenzátormi nábojovej pumpy (vývody C1A, C1B) a usmernený vnútorným usmerňovačom. Hladina usmerneného napätia nabíja externý kondenzátor C_{AUX} (min. 1 μF) pripojený na výstup VAUX a slúži ako referenčná úroveň sily zdroja. Ak VAUX prekročí 2,5 V, V_{OUT} sa pripojí pre nabíjanie zásobníka. Synchronný usmerňovač je zapojený ku každej usmerňovacej dióde paralelne, a z dôvodu zlepšenia účinnosti preberá funkciu usmerňovania vstupného napätia po prekročení úrovne VAUX 2 V. V tom okamihu je aktivovaný zdroj referenčného napätia U_{REF} , pre presnú reguláciu výstupného napätia. Nízkostratový LDO regulátor (max. 5mA) je určený pre reguláciu napätia 2,2 V pre napájanie nízkonábojových procesorov alebo iných integrovaných obvodov. Je napájaný vyššou z úrovni VAUX, alebo V_{OUT} . V prípade skokového zaťaženia výstupu LDO napájanie podporí V_{OUT} akumulčný kondenzátor. Výstup LDO požaduje 2,2 μF kondenzátor pre udržanie stability.



Obr. 4 Bloková štruktúra LTC3109 a jeho externé obvodové prvky

Obvod LTC3109 je navrhnutý pre riadenie nabíjania a reguláciu viacerých napájacích výstupov pričom sa predpokladá impulzný charakter činnosti pripojenej záťaže. Výstupom obvodu LTC3109 sú dve úrovne výstupných napätí. Napätie VLDO 2,2 V je určené pre napájanie externého mikroprocesora. Hlavný výstup V_{OUT} je užívateľsky programovateľný na štyri pevné úrovne napätia pomocou vývodov VS1 a VS2 pripojením na funkčný vývod VAUX (Tab. 3). Každý vyšší prúdový zaťažovací impulz musí byť do-
tovaný zo zásobovacieho kondenzátora pripojeného na tento vývod (okolo 500 μ F).

Tab. 3 Konfigurácia výstupného napätia regulátora V_{OUT}

VS2	VS1	V_{OUT}
GND	GND	2,35 V
GND	VAUX	3,3 V
VAUX	GND	4,1 V
VAUX	VAUX	5,0 V

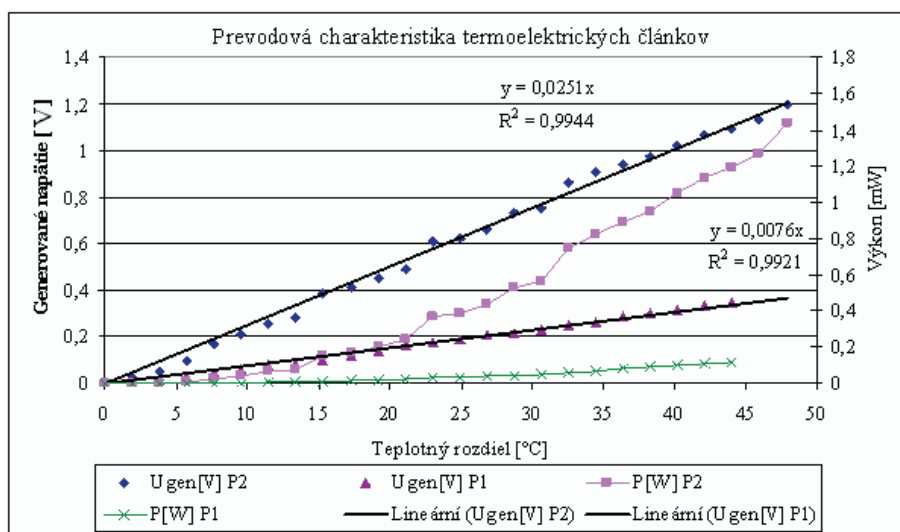
Spínaný výstup konvertora V_{OUT2} je pripojený na V_{OUT} cez odpor 1 Ω a spínací MOS tranzistor s kanálom typu P spínaného úrovňou log. 1 privedenej na vývod V_{OUT_EN} . Je určený na spínanie napájania pre obvody, ktorých výkon sa v čase nedostatku energie nedá regulovať (SLEEP režim) ako sú senzory, alebo zosilňovače.

Obvod zahŕňa detektor úrovne výstupného napätia V_{OUT} , ktorého výstupom je vývod PGOOD. Ak napätie stúpne nad 7,5 % nastavenej úrovne, výstupom je log. 1. Ak napätie klesne v dôsledku vyčerpania zásobníka pod 9 % nastavenej úrovne, výstupom je log. 0. Vývod PGOOD je navrhnutý pre riadenie režimu mikroprocesora. Výstup VSTORE môže byť použitý pre nabíjanie kondenzátora s vysokou kapacitou (superkapacitora), alebo nabíjateľnej batérie. Ak napätie V_{OUT} dosiahne spodnú úroveň regulácie, výstup VSTORE dobíja VAUX (5,25 V) a akumulčný prvok na VSTORE môže byť použitý pre napájanie systému pri dočasnej absencii zdroja pokojového prúdu. Extrémne nízky pokojový prúd a vysoká účinnosť maximalizuje objem energie dostupnej pre aplikáciu.

3. VYHODNOTENIE

Bolo vykonané meranie na sústave TE článkov opísané v podkapitole 2.4. Grafické vyhodnotenie nameraných hodnôt (Obr. 5) znázorňuje prevodové charakteristiky TE článkov spolu s ich výkonovým ziskom pri záťaži 1 k Ω .

Meranie nám poskytlo údajovú základňu pre vyčíslenie napäťového a výkonového zisku termoelektrických článkov v závislosti na veľkosti teplotného gradientu, s ktorým môžeme rátať v mieste ich prevádzkového umiestnenia. Maximálne namerané hodnoty a konštanty sú uvedené v tabuľke (Tab. 4).



Obr. 5 Graf nameraných a vypočítaných hodnôt

Tab. 4 Výsledky merania na Peltierových článkoch

Typ:	TEC1-12708	TEC1-12730
Teplota teplej strany T_{max} [°C]	80	80
Teplotný rozdiel ΔT_{max} [°C]	47,925	44,091
Generované napätie U_{max} [mV]	1197,8	346,9
Využitelný výkon P_{max} [mW]	1,4347	0,1203
Citlivosť [mV/Δ°C]	25,1	7,6

Pri porovnaní termoelektrických článkov poskytoval lepšie výsledky typ TEC1-12708, ktorý dosahoval výkonový zisk 1,43 mW pri napätí 1,2 V a citlivosti 25,1 mV na 1° teplotného rozdielu. Tento výkon je postačujúci dokonca aj pre kontinuálnu prevádzku nízkoпрíkonového mikroprocesora. Podľa literatúry (Armstrong 2010) je nízka účinnosť výkonnejšieho typu TE článku zapríčinená veľkým vnútorným odporom veľkého počtu sériovo radených termočlánkov. Pre dosiahnutie vyššieho výkonového zisku sa odporúča namiesto zvyšovania výkonu jedného termoelektrického článku paralelné radenie viacerých TE článkov s nižším výkonom.

4. ZÁVER

Meranie na termoelektrickom článku dokazuje využiteľnosť generovaného výkonu pre napájanie systému bezdrôtových senzorových uzlov. Neoddeliteľným a pokrokovým prvkom bloku autonómneho napájania je obvod LTC3109 a jeho bezstratová napäťová

DC/DC konverzia, ktorá v obvode zlučuje komplexný manažment získavaného výkonu pre jeho akumuláciu a distribúciu k aplikačným obvodom.

LITERATÚRA

- ARMSTRONG, T.; LT Corporation.: 2010. *Aircraft Structures Take Advantage of Energy Harvesting implementation*. [online]. ©2010, [cit. 2011-01-30]. Dostupné na internete: http://www.highfrequencyelectronics.com/Archives/May10/HFE0510_Armstrong.pdf.
- LINEAR TECHNOLOGY.: 2010. *LTC3109 – Auto-polarity, Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager*. [online katalógový list], ©2010, [cit. 2011-01-30], Dostupné na internete: <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/3109f.pdf>.
- ŠURIANSKY, J.; HRČKOVÁ, M.: 2010. *Mikrozdroje elektrickej energie pre napájanie autonómnych senzorických systémov*. TU vo Zvolene 2010. 6s. [cit. 2011-01-30].
- UNIVERZITA PARDUBICE.: 2010. *Termoelektrické materiály*, [online], Aktualiz. 2010-09-08, [cit. 2011-01-30]. Dostupné na internete: <http://www.upce.cz/fcht/slchpl/vyzkum/termo-materialy.html>.
- VULLRES, R.: 2008. *Energy harvesting or Micropower generation for wireless Autonomous sensors*. [online], ©2008, [cit. 2011-02-16]. Dostupné na internete: http://www.materialsday.be/Documents/Materialsday09_imec.pdf.
- Wikipédia Slobodná encyklopédia: 2010. *Teplo*. [online]. Aktualiz. 2011-02-16. [cit. 2011-01-30] Dostupné na internete: <http://sk.wikipedia.org/wiki/Teplo>.
- Wikipédia Slobodná encyklopédia: 2011. *Peltierov článok*. [online]. Aktualiz. 2010-09-20. [cit. 2011-01-30]. Dostupné na internete: http://sk.wikipedia.org/wiki/Peltierov_%C4%8D%C3%A1nok.

Kontaktná adresa:

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

METÓDY TRIBOTECHNICKEJ DIAGNOSTIKY PRE HODNOTENIE POUŽITÝCH MOTOROVÝCH OLEJOV

TRIBOTECHNICAL DIAGNOSTIC METHODS FOR EVALUATION OF USER MOTOR OILS

Jozef ČUCHRAN – Marián KUČERA – Matúš FRANTA

ABSTRACT: The article presents suitability of tribodiagnostic analysis as one of the methods for early detection of disorders of the machine and determine its technical condition and the status of oil change in this machine. The article is an example of practice highlighting the real danger due to sudden failure, which, while can not always be avoided, but with early analysis of the oil filling it can often be prevented.

Keywords: motor oil, tribotechnical diagnostics, oil pollution

ABSTRAKT: Príspevok má poukázať na vhodnosť tribodiagnostickéj analýzy, ako jednej z metód na včasné odhalenie poruchy stroja a určenie jeho technického stavu ako aj stavu olejovej náplne použitej v tomto pracovnom prostriedku. V príspevku je na príklade z praxe poukázané na možné nebezpečenstvo zapríčinené náhlou poruchou, ktorej síce nemožno vždy zabrániť, ale včasnou analýzou olejovej náplne jej možno často predchádzať.

Kľúčové slová: motorový olej, tribotechnická diagnostika, znečistenie oleja

1 ÚVOD

Tribotechnické prvky sú zložkami väčších mechanických systémov a preto vzájomné pôsobenie medzi prvkami tribologického systému a ostatnými zložkami je rozhodujúce pre jeho správanie sa (Sekereš, 2009).

Rozvoj elektroniky, výpočtovej techniky a telematiky umožnil rýchly rozvoj nedeštruktívnych a bezdemontážnych metód technickej diagnostiky, realizovaných v reálnom čase. Medzi rozšírené a perspektívne metódy patrí tribotechnická diagnostika, ktorá využíva mazacie médium ako zdroj viacrozmerných komplexných informácií o technickom stave a režime opotrebovania sústavy, resp. o skutočnom stave mazacieho média (Stodola, 2007).

Najčastejší výber mazacích médií je na základe odporúčaní výrobcu, ceny a na základe dosiahnutia možno čo najdlhších výmenných intervalov olejovej náplne uvádzaných výrobcami olejových náplní. S týmito intervalmi však v praxi možno rátať, len ak nedôjde

k náhlej poruche. Týmto spôsobom je možné včas získať informácie o vznikajúcej poruche.

Analýzou mazacích olejov počas prevádzky motora je možné stanoviť a zistiť:

- pravdepodobnosť zlyhania mazania funkčných častí,
- vhodnosť daného typu oleja,
- stupeň opotrebovania oleja,
- stanovenie optimálneho intervalu výmeny oleja,
- zhodnotenie technického stavu funkčných častí (Al Hakim, 2009).

2 MATERIÁL A METODIKA

2.1 Diagnostikované motorové vozidlá

Vzorky boli odobrané z dvoch vozidiel TATRA 815 upravených na odvoz dreva, obrázok 1. Ide o vzduchom chladené preplňované dieselové motory. V olejovom systéme sa nachádzal motorový olej TRYSK TOP TIR, ktorého základná špecifikácia je uvedená v tabuľke. 1. Základné údaje o odobraných vzorkách oleja sú uvedené v tabuľke 2.



Obrázok 1 Diagnostikovaná odvozná súprava

Tabuľka 1 Motorový olej používaný vo vozidlách TATRA

Parameter	TRYSK TOP TIR
Špecifikácia	MB 228.3/229.1, MAN 3275, VOLVO VDS-3, Cummins 20076/7/8, DHD-1, DLD-3
Viskozitná trieda	SAE 15W-40
Kinematická viskozita pri 100 °C ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	12,5 až 16,3
Hustota pri 15 °C ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	880
Bod vzplanutia (°C)	nad 210
Bod tuhnutia (°C)	-27

Tabuľka 2 Základné údaje o odoberaných vzorkách oleja TRYSK TOP TIR

Číslo vzorky	Celkový počet odjazdených km vozidla	Počet odjazdených km od výmeny oleja	Celkový počet Mth. vozidla ²⁾	Počet Mth. od výmeny oleja
1	273 025	8 823	10 999	412
2	19 267 ¹⁾	4 267 ³⁾	9 142	100 ³⁾

¹⁾ výmena tachografu po poruche,

²⁾ výmenné intervaly nie sú riadené podľa Mth.

³⁾ hodnoty nie sú presné, majú skôr informatívny charakter

2.2 Metódy na hodnotenie stavu použitého oleja

K hlavným parametrom, prostredníctvom ktorých sledujeme stav olejovej náplne v použitých motorových olejoch môžeme zaradiť:

- kinematickú viskozitu pri 40 °C,
- celkové nečistoty (CN),
- bod vzplanutia oleja,
- obsah vody.

2.2.1 Stanovenie kinematickej viskozity

Metóda vychádza z normy STN EN ISO 3104+AC (STN 65 6216) a spočíva v stanovení doby prietoku daného objemu skúšanej kvapaliny kalibrovaným skleneným kapilárnym viskozimetrom pri konštantnej teplote. Meranie kinematickej viskozity sa vykonávalo pomocou Ubbelohde viskozimetra zobrazeného na obrázku 2.

Kinematická viskozita v $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ sa vypočíta podľa vzťahu:

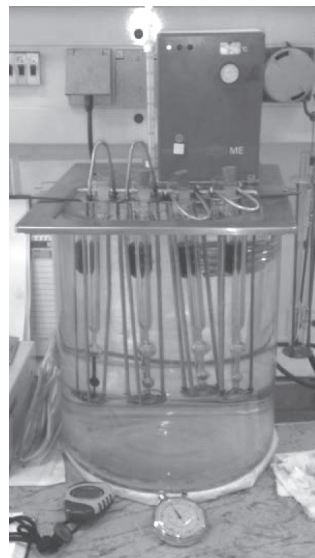
$$\nu = c \cdot t \quad (1)$$

ν – kinematická viskozita ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$),

c – konštanta viskozimetra ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$),

t – aritmetický priemer doby prietoku skúšobnej vzorky viskozimetrom (s).

Výsledkom skúšky je vypočítaná hodnota kinematickej viskozity v $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ zaokrúhlená na dve desatinné miesta (Interný predpis ŽSR).



Obrázok 2 Zariadenie pre stanovenie viskozity pomocou Ubbelohdeovho viskozimetra

2.2.2 Stanovenie nečistôt v motorovom oleji fotometrickou metódou – metóda CN

Metóda je určená na stanovenie obsahu mechanických nečistôt z použitého motorového oleja, zisťuje sa ňou znečistenie oleja uhlíkovými produktmi (karbónom). Nevieťme ňou určiť nečistoty zadieracieho charakteru – obsah oterových kovov a kremíka.

Merací prístroj, ktorý meria a zobrazuje znečistenie motorového oleja pracuje na princípe merania intenzity svetla odrazeného od meranej vzorky, obrázok 3.



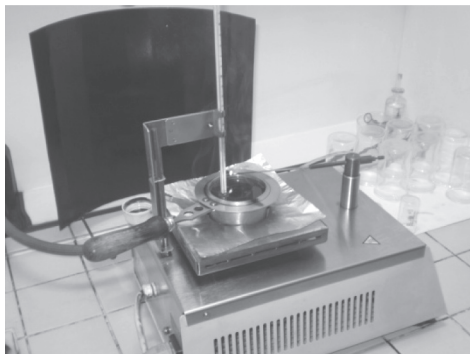
Obrázok 3 Merací prístroj REO 31

Nečistoty sa zachytia na chromatografickej vrstve fólie. Usmernené svetlo sa v prístroji odráža od vzorky na prvok citlivý na svetlo. Vstupná elektronika vyhodnocuje intenzitu a premieňa ju na úroveň jednosmerného napätia tak, aby zobrazovacia jednotka vykazovala znečistenie priamo v percentách (Interný predpis ŽSR).

Hodnota odčítaná na displeji prístroja udáva % obsahu nečistôt. Hodnota $0,00 \pm 0,01\%$ zodpovedá čistej chromatografickej fólii. Za olej vyhovujúci pre ďalšie použitie sa považuje hodnota $\geq 3,5 \pm 0,1\%$ (Interný predpis ŽSR).

2.2.3 Stanovenie bodu vzplanutia v otvorenom téglíku podľa Clevelanda

Skúška vychádza z normy STN EN ISO 2592 (STN 65 6212) a je určená pre kvapalné ropné produkty s bodom vzplanutia nad 79°C . Metóda spočíva v rovnomernom zohrievaní skúšaného oleja v otvorenom téglíku predpísanou rýchlosťou do prvého vzplanutia pár vzorky nad hladinou po priblížení skúšobného plameňa, obrázok 4. Teplota, pri ktorej pary na ktoromkoľvek mieste na povrchu skúšaného oleja vzplanú, je bod vzplanutia (Interný predpis ŽSR).



Obrázok 4 Prístroj na stanovenie bodu vzplanutia HFP 386 od firmy WALTER HERZOG, GmbH

2.2.4 Informatívne stanovenie vody v oleji

Prítomnosť vody v oleji sa zisťuje súbežne so stanovením bodu vzplanutia. Je potrebné dodržať podmienky stanovenia bodu vzplanutia. Ak olej obsahuje vodu, pri stanovení bodu vzplanutia dochádza v oblasti teplôt okolo 100 °C k peneniu až vystrekovaniu oleja zo skúšobného teglika. Pri vyššom obsahu vody nemožno stanoviť bod vzplanutia.

Pozn. Kvantitatívne sa obsah vody v oleji stanovuje podľa STN 65 0330 Stanovenie obsahu vody podľa Karla Fischera (Interný predpis ŽSR).

2.3 Metóda na určenie režimu trenia a opotrebovania funkčných častí motora – ferografická analýza

2.3.1 Analytická ferografia

Princípom ferografie je rozdelenie kovových oterových častíc podľa ich veľkosti v silnom magnetickom poli. Slúži pre posúdenie intenzity opotrebenia trecích uzlov agregátu. Vzorka skúmaného maziva steká po šikmej podložke, ktorá je umiestnená v magnetickom poli. Najväčšie častice sa usadzujú na začiatku podložky a ďalej sa častice usadzujú postupne podľa svojej veľkosti a tvaru. Dôležitá je taktiež orientácia na ferograme, povrch a tvar častíc.



Obrázok 5 Príprava ferogramu a jeho vyhodnotenie

Pripravený ferogram sa vyhodnocuje pod mikroskopom, obrázok 5, pričom sa vyhodnocovanie začína na pozícii L (veľkých) častíc.

2.3.2 Ferografia s priamym odčítaním

Princíp ferografie s priamym odčítaním zostáva rovnaký, ako pri vyššie uvedenej metóde, len namiesto sklička je použitá tenkostenná sklenená kapilára zafixovaná v divergentnom magnetickom poli špeciálneho magnetu. Kapilárou preteká skúšaný olej. V dvoch miestach, kde sa usadzujú veľké a malé častice, sú napevno zabudované zdroje

žiarenia a snímače, ktoré snímajú úbytok intenzity žiarenia. Ten je priamo úmerný stupňu pokrytia steny kapiláry časticami. Na ferografe s priamym odčítaním trvá analýza 1. vzorky asi 7 až 10 minút (Interný predpis ŽSR).



Obrázok 6 Kapilárny ferograf PMA 90S

Vyhodnotenie sa vykonáva z hodnôt odčítaných na displeji prístroja pre veľké častice D_L a malé častice D_S .

$$WPC = \frac{D_L + D_S}{1800} \times 100 (\%) \quad (2)$$

$$PLP = \frac{D_L \times k}{D_L + D_S} \times 100 (\%) \quad (3)$$

WPC – hladina opotrebovania,
 PLP – intenzita opotrebovania,
 k – koeficient udávajúci intenzitu opotrebovania.

V prípade, že počet veľkých oterových častíc $D_L \leq 100$, potom je koeficient intenzity opotrebovania $k = 0,01$. Ak počet veľkých oterových častíc D_L je v intervale 100 až 900, potom sa hodnota koeficienta pohybuje v rozsahu $k = 0,1$ až $0,9$ (napríklad ak $D_L = 500$, potom $k = 0,5$) (Dobránsky et al., 2007).

3 VÝSLEDKY

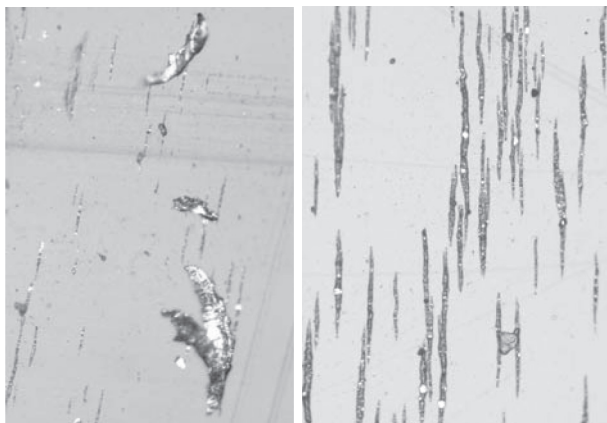
Výsledky jednotlivých testov sú uvedené v tabuľke 3 a na obrázku 7 je ferografický záznam sledovaných vzoriek použitého motorového oleja.

Tabuľka 3 Namerané hodnoty stavu motorového oleja TRYSK TOP TIR

Vzorka č.	Kinematická viskozita pri 40 °C (mm ² .s ⁻¹)	Celkové nečistoty CN (%)	Bod vzplanutia (°C)	Obsah vody (bublínkový test)	Ferografická analýza	
					D _L častice	D _S častice
Nový	101,13	–	232	negatívny	–	–
1	25,95	0,53	130	negatívny	47	51
2	67,08	0,71	206	negatívny	42	50

Ferografia s priamym odčítaním

- vzorka č. 1 – hladina opotrebovania (WPC) = 5,44 % a intenzita opotrebovania (PLP) = 0,48 %,
- vzorka č. 2 – hladina opotrebovania (WPC) = 5,11 % a intenzita opotrebovania (PLP) = 0,46 %.



Obrázok 7 Ferrografický záznam
vľavo pozícia L, vzorka č. 1 častice únavového opotrebovania veľkosti až 140 μm,
vpravo pozícia L, vzorka č. 2 zvýšený obsah adhézných častíc veľkosti do 25 μm

4 DISKUSIA

Vo všeobecnosti sa za najdôležitejšie metódy pre určenie stavu olejovej náplne považujú bod vzplanutia a určenie celkového znečistenia oleja. Viskozita je parametrom maziva, ktorý vplyva na únosnosť, zaťažiteľnosť a hrúbku mazacej vrstvy, na prietokové množstvo, trecie straty, vznik tepla, tesniacu schopnosť a čerpatelnosť. Na určenie opotrebovania trecích uzlov sa väčšinou používajú metódy kvantitatívne, ako napríklad priamočítajúca ferografia, atómová absorpčná spektroskopia a pod., a metódy kvalitatívne ku ktorým môžeme zaradiť analytickú ferografiu.

Stanovením bodu vzplanutia sa určuje prítomnosť cudzích látok v olejovej náplni ako napríklad palivo a voda, resp. chladiaca kvapalina. Kritická hodnota bodu vzplanutia

je podľa literatúry 180 °C. Vzorka č. 1 mala bod vzplanutia hlboko pod kritickou hodnotou uvedenou vyššie. Pri tak nízkej hodnote bodu vzplanutia hrozilo vznietenie výparov, keďže vzduchom chladené motory pracujú veľakrát pri prevádzkových teplotách blízkyh tejto teplote, hlavne u motorov pracujúcich stacionárne. Vzorka č. 2 mala hodnotu bodu vzplanutia v norme.

Stanovenie prítomnosti vody malo skôr informatívny charakter, pretože sa jedná o vzduchom chladené motory, avšak voda sa môže v oleji nachádzať v dôsledku vonkajšieho znečistenia, netesnosti vozidla, ale aj kondenzácie vzdušnej vlhkosti. Obe vzorky boli pri bublinkovom teste negatívne.

Určenie celkového znečistenia oleja fotometrickou metódou má za úlohu určiť, či nie je olej znečistený nad prípustnú mieru, čo predstavuje hodnotu $\geq 3,5 \pm 0,1 \%$ (niektorí autori uvádzajú nižšie hodnoty). Obidve vzorky mali vyhovujúce hodnoty, tabuľka 3.

Keďže hraničná hodnota bola stanovená na maximálny pokles viskozity o $\pm 20 \%$, boli pri meraní kinematickej viskozity zistené nedostatky u obidvoch spomínaných vozidiel. Vzorka č. 1 vykazovala značné zníženie hodnoty viskozity, vid'. tabuľka 3, čo mohlo mať za následok zhoršenie procesu trenia. U vzorky č. 2 bol pokles viskozity menší a s prihliadnutím na hodnotu bodu vzplanutia možno tento pokles prisúdiť aj kondenzácii vzdušnej vlhkosti pri studenom štarte a značnom zaťažení, ktorému sú vystavené tieto vozidlá pri ich práci v lesnom poraste. Taktiež môže byť tento pokles spôsobený prítomnosťou určitého množstva paliva, čo môže naznačovať aj pokles bodu vzplanutia.

Použitím priamočítajúcej ferografie bolo možné na základe získaných hodnôt a dosadením do vzťahov popísaných Al Hakimom zistiť hladinu a intenzitu opotrebenia. Tieto vzťahy umožňujú posunúť túto metódu medzi základné metódy spolu s analytickou ferografiou na určenie a prognostikovanie vývoja opotrebenia trecích uzlov. Podľa autora sú povolené hodnoty maximálne 20 %. Hodnoty obidvoch ukazovateľov neboli prekročené.

Analytickou ferografiou bolo preukázané zvýšené zaťaženie u oboch vozidiel tvorením zvýšeného množstva adhézných častíc veľkosti do 30 μm . Vo vzorke č. 1 sa na začiatku ferogramu nachádzali častice veľkosti až 140 μm .

5 ZÁVER

U vozidla, z ktorého bola odobraná vzorka č. 1, boli vykonané opravy palivového systému. Vymenili sa palivové prepadové rúrky a dopravné palivové čerpadlo. Aj napriek zhoršenému mazaniu, ktoré bolo spôsobené rozriedením oleja palivom, nebolo až na výnimky pozorované väčšie množstvo veľkých únavových častíc. Dá sa teda predpokladať, že sa včasným zásahom zabránilo vzniku väčšej poruchy, ktorej odstránenie by si vyžadovalo vyššie investičné náklady. Ráta sa aj s opätovnou kontrolou vzorky oleja na zistenie prítomnosti paliva v oleji.

Vo vozidle, z ktorého bola odobratá vzorka č. 2 neboli vykonané žiadne úpravy aj napriek nevyhovujúcej hodnote viskozity, pretože sa počítalo s výmenou olejovej náplne.

Uvedený príspevok poukázal na vhodnosť tribotechnickej diagnostiky ako metódy na odhalenie poruchy na základe odobranej vzorky maziva.

LITERATÚRA

1. AL HAKIM, H. – MIHALČOVÁ, J. 2009. Tribotechnická diagnostika v automobilovom priemysle. In: Tribotechnika 1/2009. Vydavateľstvo Techpark, o. z., 2009, s. 29–31.
2. DOBRÁNSKY, J. – RUŽBARSKÝ, J. – AL HAKIM, H. 2007. Analýza stavu opotrebenia prevodového mechanizmu linky na balenie tavených syrov počas zábehovej prevádzky. In Výrobné inžinierstvo [online]. Košice: Technická univerzita Košice. 2007, roč. 6, č. 1, s. 47–48 [cit. 2009-04-14]. Dostupné na internete: < <http://web.tuke.sk/fvtpo/casopis/skindex.htm>>. ISSN 1335-7972.
3. SEKEREŠ, J. – TURIS, J. 2009. Tribológia ako súčasť návrhu strojových uzlov. Vedecké štúdie 3/2009/A. Technická univerzita vo Zvolene: Zvolen: 2009, s. 73. ISBN 978-80-228-2089-9.
4. STODOLA, J. 2007. Tribodiagnostika hnacího agregátu tanku T-72M4 CZ. In: 9. Medzinárodná vedecká konferencia TRANSFER 2007. Trenčianska univerzita v Trenčíne: Trenčín, 2007, s. 433–436. ISSN 1336-9695. ISBN 978-80-8075-236-1.
5. Železnice Slovenskej republiky. Motorová nafta, motorové oleje pre naftové motory mimozáručných hnacích dráhových vozidiel. 48 s.
6. VALMAN SK. Základné vlastnosti mazacích olejov. [cit. 2011-01-30]. Dostupné na internete: <http://www.valman.sk/podpora/technicka/zakladne-vlastnosti-mazacich-olejov/>.

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

Kontaktná adresa:

Ing. Jozef Čuchran, doc. Ing. Marián Kučera, PhD., Ing. Matúš Franta
Katedra lesnej a mobilnej techniky, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky,
Technická univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen,
e-mail: jozef25@pobox.sk

POSTPROCESSOROVÁ ANALÝZA NAPĚTÍ VÝLOŽNÍKA NAKLADAČA POČAS PRACOVNÉHO REŽIMU

A POSTPROCESSOR ANALYSIS OF THE STRESS STRUCTURE OF THE LOADER DURING TECHNOLOGICAL OPERATION

Branislav DANKO

ABSTRACT: The paper presents the possibility of detection voltage structure of mobile construction machinery articulated loader type UNK 501, through technology, MSS (English Multibody System Simulation) and “postprocessing” MSC.ADAMS Environment Programme. Major part of the contribution is the compilation of a virtual machine model with geometric and kinematics linkages, simulation script, which corresponds to the technology of the machine to determine the response load on the construction of dynamic simulation option. Using modules A/Durability for determining stress rigid bodies and A/A/Autoflex for creating pliable structure is formed over a housing coupled mechanical system, ready for a virtual dynamic simulation. Results are presented in tabular and graphical features in the module A/PostProcessor.

Key words: a postprocessor analysis, a stress, a virtual simulation

ABSTRAKT: Príspevok prezentuje možnosť zisťovania napätí nosnej konštrukcie stavebného mobilného stroja – kĺbového nakladača typu UNK 501, prostredníctvom technológie MSS (anglicky: Multibody System Simulation) a „postprocessingu“ prostredia programu MSC.ADAMS. Hlavnú časť príspevku tvorí zostavenie virtuálneho modelu stroja s geometrickými a kinematickými väzbami, simulačný skript, ktorý odpovedá technologickej činnosti stroja pre stanovenie odozvy zaťaženia konštrukcie dynamickou simuláciou s možnosťou. Využitím modulov A/Durability pre stanovenie napätí poddajných telies a A/A/Autoflex pre vytvorenie poddajnej konštrukcie je vytvorená viac telesová viazaná mechanická sústava, pripravená na virtuálnu dynamickú simuláciu. Výsledky sú prezentované tabuľkovou formou a grafickými charakteristikami v module A/PostProcessor.

Kľúčové slová: post procesorová analýza, napätie, virtuálna simulácia

1. ÚVOD

Ťažisko práce spočíva v zistení napätí nosnej konštrukcie zemného mobilného stroja od zaťaženia a výsledkov postprocesorovej analýzy ekvivalentného virtuálneho prototypu

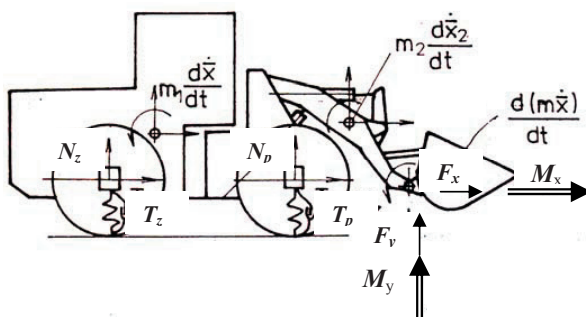
v prostredí simulačného programu MSC.ADAMS, jeho modulov A/View, A/PostProcessor, A/Autoflex, A/Durability.

2. MATERIÁL A METODIKA

2.1 Dynamický model stroja

Fyzikálny model stroja (obrázok 1) značne zjednodušuje reálnu, zväčša zložitú mechanickú sústavu stroja a zároveň predstavuje vonkajšie zovšeobecnené sily. Odpor prostredia lopaty a vektor zotrvačných síl premenlivej hmotnosti naberaného materiálu predstavuje vektor so zložkami síl F_x , F_y a tromi zložkami momentov M_x , M_y , M_z .

Mechanické vlastnosti stroja sa prejavujú na prevádzkovom zaťažení tým, že odozva na výslednú silu na lopate je ovplyvnená zotrvačnými silami od pohybu stroja po nerovnej podložke, zmenami polohy mechanizmu, hmotnosťou naberaného materiálu a hysteréziou.



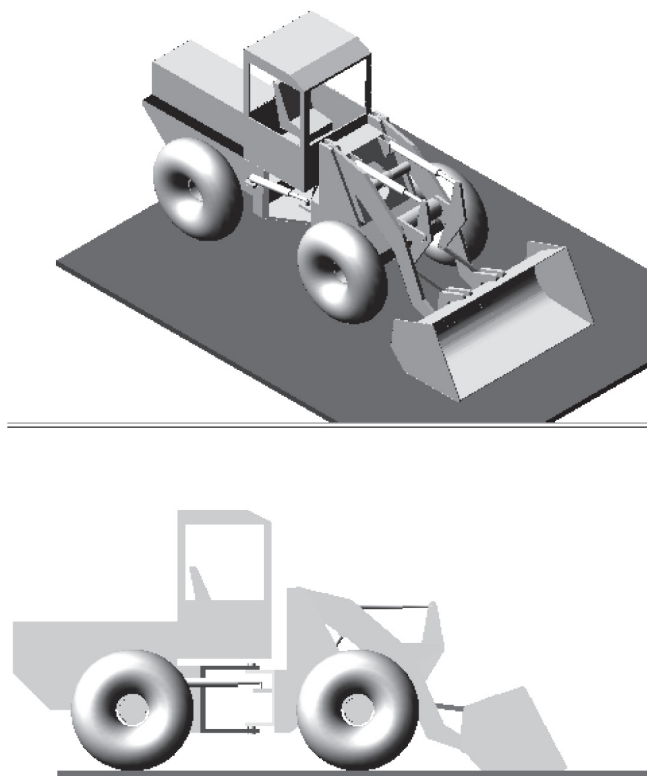
Obrázok 1 Dynamický model stroja

2.2 Virtuálny model stroja

K získaniu a porovnaniu výsledkov zaťaženia nosnej konštrukcie zemného stroja bol vytvorený virtuálny model – mechanická sústava viazaných telies pre dynamickú simuláciu pracovného cyklu stroja typu UNK501 s ekvivalentnými hmotnostnými a geometrickými parametrami. Virtuálny model stroja je na obrázku 2.

Vytvorená mechanická sústava zemného stroja je namodelovaná v module A/View geometrickými a kinematickými väzbami, rozmermi, silami, momentmi a kontaktmi, ktoré definujú zotrvačné a dynamické vlastnosti v simulačnom prostredí MSC.ADMAS. Zostavený simulačný skript odpovedá pracovnému režimu stroja.

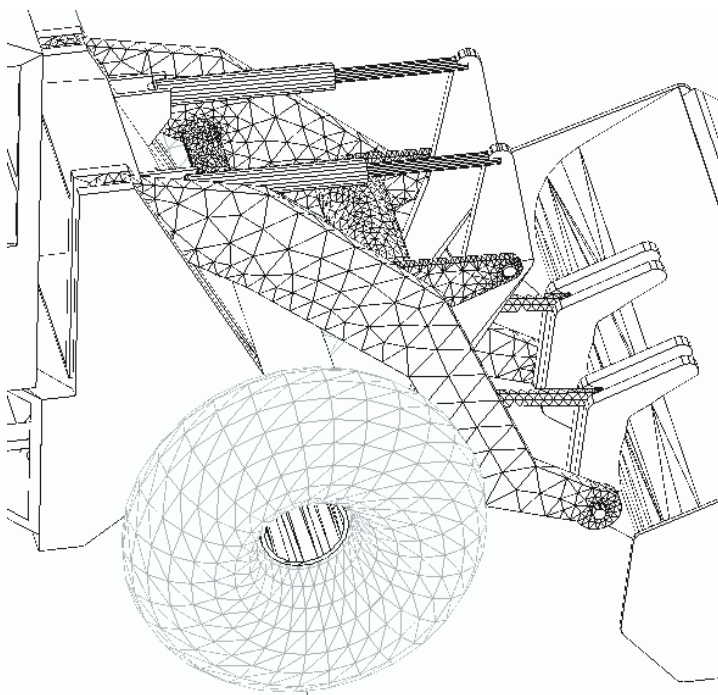
V meracích miestach stroja sú vymodelované virtuálne snímače pre porovnanie s experimentálnymi výsledkami. Nosná konštrukcia stroja je nahradená poddajnými telesami.



Obrázok 2 Virtuálny model stroja

2.1 Vytvorenie poddajného telesa

Nosná konštrukcia výložníka a tiahlá, sú poddajné telesá, vymodelované modulom A/AutoFlex objemového tvaru parasolid. Tento aplikáciou metódy modálnej reprezentácie poddajných vlastností telesa umožnil vygenerovať MNF (anglicky: Modal Neutral File) súbor, priamo v pracovnom prostredí. Výsledná deformácia poddajného telesa je lineárna superpozícia vlastných tvarov v každom časovom kroku. Nakoľko FEA (anglicky: Finite Element Analysis) analýza poddajného prvku neposkytuje potrebné údaje o vplyve vonkajších prípojných väzieb. Minimálny počet vlastných tvarov určí modifikovaná Craig-Bamptonova metóda (Component Mode Synthesis, CMS) v module A/Solver. Poddajné telesá nakladača UNK 501 vidíme na obrázku 3.



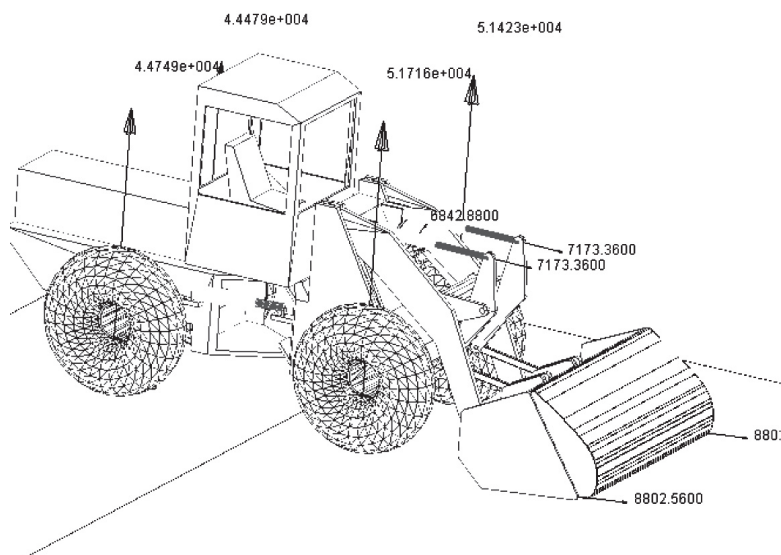
Obrázok 3 Poddajne namodelovaný výložník a ťahlá stroja

Grafické zobrazenie vektorov síl počas pracovného cyklu (pozri obrázok 4) a výsledky napäťových hodnôt poddajných telies sú v časti VÝSLEDKY tohto príspevku.

3. VÝSLEDKY

3.1 Výsledky dynamickej simulácie

Postprocesorová analýza napätí je generovaná v module A/Durability a A/PostProcessor simulačného prostredia MSC.ADAMS. Nakladač – zemný stroj sa virtuálne pohybuje rýchlosťou cca $1,8 \text{ km.h}^{-1}$, z maximálnym zrýchlením $2,5 \text{ m.s}^{-2}$ a prejde na jeden pracovný cyklus vzdialenosť celkom 20,3 m. Pracovný cyklus, charakterizovaný simulačným skriptom, je vykonaný pre porovnanie s tuhými a poddajnými telesami nosnej konštrukcie stroja (lopata, výložník). Nosnosť nákladu je simulovaná pri hmotnosti $m = 1335 \text{ kg}$ a pri $m = 5469 \text{ kg}$. Odozva maximálnych napätí v nódoch, poddajných telies nosnej konštrukcie virtuálneho zemného stroja je uvedená v tabuľkách 1 a 2.



Obrázok 4 Okamih simulačného skriptu pracovného cyklu stroja typu UNK501

Tabuľka 1 Tabuľka napätí v tiahlach pri hmotnosti nákladu $m = 1335 \text{ kg}$

VON MISES Hot Spots for Flexible_Body_1						
Model= .UNK501		Analysis= sim_cela_FLEX_TIAHLA		Date= 2011-01-26 13:48:56		
Top 10 Hot Spots			Radius= 1.0 mm			
Hot Spot	Stress	Node	Time	Location wrt LPRF (mm)		
#	(newton/mm**2)	id	(sec)	X	Y	Z
1	128.012	8	54.18	1468.25	810.309	335
2	108.677	61	54.18	1485.58	821.324	335
3	105.416	62	54.18	1476.64	820.665	365
4	100.479	14	54.18	679.518	901.345	365
5	98.2252	47	54.18	1497.95	817.972	365
6	93.0084	60	54.18	665.257	921.412	365
7	80.4796	59	54.18	665.583	919.614	335
8	68.3014	15	54.18	683.397	935.113	335
9	60.0749	54	54.18	1448.79	806.854	335
10	57.4092	63	54.18	702.39	906.28	365

Tabuľka 2 Tabuľka napätí v tiahlach pri maximálnej nosnosti nákladu $m = 5469$ kg

VON MISES Hot Spots for Flexible_Body_1						
Model= .UNK501		Analysis= sim_full_FLEX_TIAHLA_max_nosnost		Date= 2010-01-27 08:38:05		
Top 10 Hot Spots			Radius = 1.0 mm			
Hot Spot	Stress	Node	Time	Location wrt LPRF (mm)		
#	(newton/mm**2)	id	(sec)	X	Y	Z
1	642.057	8	0.135424	1468.25	810.309	335
2	545.959	61	0.135424	1485.58	821.324	335
3	532.287	62	0.135424	1476.64	820.665	365
4	505.74	14	0.135424	679.518	901.345	365
5	496.033	47	0.135424	1497.95	817.972	365
6	470.686	60	0.135424	665.257	921.412	365
7	403.531	59	0.135424	665.583	919.614	335
8	344.005	15	0.135424	683.397	935.113	335
9	299.518	54	0.135424	1448.79	806.854	335
10	290.728	63	0.135424	702.39	906.28	365

Hodnoty napätí výložníka stroja možno po ustálení predpokladať v rozmedzí 370 až 550 MPa, ktoré prevyšujú, prípadne sú hraničné s medzou klzu použitého materiálu konštrukcie.

Tabuľka 3 Tabuľka maximálnych hodnôt síl a napätí simulácie virtuálneho modelu stroja

Typ simulácie	Sila v čape výložníka F [kN]		Sila v tiahle lopaty F [kN]		Napätie σ [MPa]	Max. rozkmit $\Delta\sigma_{\max}$ [MPa]
	pravý	ľavý	x	y		
Poddajné tiahlo lopaty pri pracovnom cykle a nosnosti $m = 1335$ kg	1,25E 005	1,25E 005	25 až 81,2	1,25 až -25	125	50
Poddajné tiahlo lopaty pri pracovnom cykle a nosnosti $m = 5469$ kg	1,85E 003	1,4E 003	250	-100	430	180
Poddajné tiahlo lopaty a výložníka stroja pri naberaní a nosnosti $m = 5469$ kg	2,5E 002	3,0E 002	200	25	350 až 550	250

4. DISKUSIA A ZÁVER

Zistené hodnoty napätí nosnej konštrukcie výložníka virtuálneho modelu dynamic-kou simuláciou s využitím MSS technológie, nemôžu obsiahnuť všetky vonkajšie vplyvy, prerušenia v pracovnom cykle, ale sú porovnateľné s hodnotami napätí konštrukcie experimentálnym meraním a pre prvotný obraz odozvy zaťaženia sú dostatočné. Môžeme povedať, že odozva zaťaženia virtuálneho modelu a jeho dynamická simulácia pracovného cyklu závisí od priebehu relevantne zistených charakteristík síl, nahradenia tuhých telies poddajnými, terénnych podmienok a iných faktorov, ktoré v konečnom dôsledku ovplyvňujú ekvivalenciu zistených hodnôt a posúdenie prevádzkovej životnosti, resp. stanovenie únavovej pevnosti.

Relevantné odozvy zaťaženia nosnej konštrukcie získame nahradením tuhých telies poddajnými, ktoré eliminujú rázové skoky síl a napätí v konštrukcii a tým aj hodnoty vrcholového rozkmitu, resp. stanovenie výpočtovej únavovej pevnosti a životnosti nosnej konštrukcie zemného stroja. Využitelnosť získaných poznatkov môžeme aplikovať pre mobilné zemné stroje s periodickým pracovným cyklom ťaženia a nakladania hornín.

LITERATÚRA

- DANKO, B.: *Vplyv a porovnanie oziev zaťaženia nosnej konštrukcie zemného mobilného stroja na jej dynamickú pevnosť a životnosť*. Habilitačná práca. Zvolen: TU vo Zvolene, 2006. 196 s.
- DANKO, B.: 2006. Príspevok k stanoveniu dynamickej pevnosti a životnosti nosnej konštrukcie mobilného stroja odhadom a meraním. In: *Opořebení, spolehlivost, diagnostika, Vědecká konference*, 29.–31. októbra 2006, Brno: ES Brno, 2006, s. 31–36. ISBN 80-7231-165-4
- FILIP, M.; PLAČEK, J.: *Únavová zkouška nosné konstrukce nakladače UNK501*, VUSZ, Brno, 1990
- PALČÁK, F.: Možnosti využitia virtuálnych prototypov pre potreby strojárskoho priemyslu. In: *Konštrukčná kancelária*, Zborník príspevkov z II. konferencie, Nitra, 1998, s. 27.
- PALČÁK, F.; HULLA, M.: Determination of dynamical loads and boundary conditions for FEA via mechanical system simulation technology, In: *Zborník príspevkov z 36. medzinárodnej konferencie – Experimentálna analýza napätia*, Acta Mechanica Slovaca, 2. Ročník, 1998, s. 103
- MSC.SOFTWARE. *User's Guide MSC.ADAMS View*. [on line]. 2003. Dostupné na internete: <http://www.mssoftware.com>, <http://www.mssoftware.com/kb/>.

Kontaktná adresa:

doc. Ing. Branislav Danko, Ph.D.,
Katedra mechaniky a strojnictva, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky,
Technická univerzita vo Zvolene, Študentská 26, 960 53 Zvolen,
e-mail: danko@vsld.tuzvo.sk

PRODUCT LIFE CYCLE COST MANAGEMENT

RIADENIE NÁKLADOV ŽIVOTNÉHO CYKLU VÝROBKU

František FREIBERG – Erika SUJOVÁ

ABSTRACT: The management of life cycle costing represents an approach facilitating sustainable development and an effective utilisation of corporation resources. It serves to ensure product value optimisation in relation to resources used. The contribution deals mainly with cost aspects of life cycle management. Cost management based on life cycle is shown to be a valuable approach for comparing alternative product designs. The contribution describes the substance of life cycle management and costing, identifies some important steps in life cycle costing, approaches the question of life cycle cost drivers and characterizes the limitations on life cycle costs implementation.

Key words: product life cycle, cost, management, analysis, estimation

ABSTRAKT: Riadenie nákladov životného cyklu predstavuje prístup napomáhajúci udržateľnému rozvoju a efektívnemu využívaniu podnikových zdrojov. To slúži na zabezpečenie optimalizácie hodnoty výrobku s ohľadom na použité zdroje. Článok sa zaoberá predovšetkým nákladovými aspektmi riadenia životného cyklu produktu. Riadenie nákladov založené na životnom cykle je zobrazované ako užitočný prístup pre porovnanie alternatívnych návrhov výrobkov. Príspevok opisuje podstatu riadenia životného cyklu a celoživotných nákladov výrobku, uvádza niektoré dôležité kroky v kalkulácii nákladov životného cyklu, približuje otázku hybných síl nákladov životného cyklu a charakterizuje limity zavádzania nákladov životného cyklu.

Kľúčové slová: životný cyklus výrobku, náklady, riadenie, analýza, ocenenie

1. INTRODUCTION

The product life cycle is most frequently understood to mean the life cycle of a particular product on the market. From this perspective the product life cycle involves multiple stages from product introduction onto the market, through the stages of growth, maturity and decline to the actual taking out of the product from the company's manufacturing programme. However, if we are to respect the requirements of customers and society in a comprehensive manner, we need a broader concept of the product life cycle that also involves the value the product brings to customers and society. Life cycle management in this broader sense focuses on three main areas in the management of product life cycle cost: the costs incurred by the company (manufacturer), user costs and society costs, (Prasad, 1999). These areas and the corresponding main cost items are illustrated in Figure 1.

The objective of product life cycle cost management is to maximise the value (benefits) of a product while controlling the costs on the part of the manufacturer, user and society. The manufacturer's costs include the costs of activities carried out, for example, as part of product planning, design, development, assembly, distribution and servicing. These are all costs incurred from the moment of a request for product delivery until the moment of dispatching the product to the customer. The user costs entail the costs of activities carried out by the user. They cover the period from delivering the product until termination of its economic life span. This may also include the recycling and disposal costs that are paid by the user. Society costs comprise the costs that constitute a burden to society at the product manufacturing and use stages, particularly the costs related to the recycling of materials and the impact of the manufacturing and use of the product on the environment.

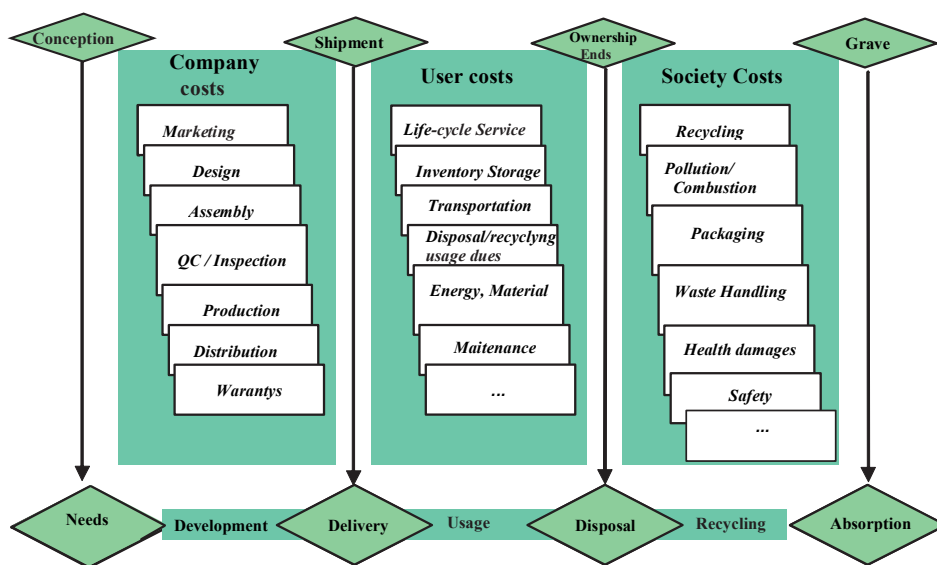


Fig. 1 Areas of Life Cycle Cost Management

2. THE IMPORTANCE OF AN ANALYSIS OF PRODUCT LIFE CYCLE COST

Product life cycle cost analysis forms an important part of product life cycle management. This is a technique for comprehensive assessment of the product costs from the product idea stage to termination of its life cycle. This makes it possible to analyse product costs throughout the various stages of its life span, as well as the interaction between the cost elements with a view to identify an optimal choice for the product variant in terms of cost. Incorporating life cycle costs as a parameter into the product development process (systems, facilities, projects) facilitates the development of cost-effective products that are

interesting for the buyer both in terms of the purchasing price and in terms of operational and logistical costs as well as recycling or disposal costs.

In the future manufacturers of machinery and equipment will have to assume a greater degree of responsibility for activities related to the life cycle of their products, not only during the manufacturing and sales stages but also during the stages following product delivery and installation. In a situation where the sum of operating, maintenance, redevelopment, repair and disposal costs associated with some products is often many times higher than the cost of procurement, a cost analysis targeted at product use is constantly gaining in importance.

Product life cycle cost analysis is always needed where there are various problem solving alternatives and a decision must be made as to which alternative is more favourable. The analysis may be used in many situations. For example, it may concern assessment of possible ways of using the product in operation, maintenance policies and logistics support solutions, product design configurations, ways of product manufacturing, ways of product distribution and transport and ways of its disposal and recycling, (Fabricky 1991).

If product cycle costs are to be used as a system development parameter, it is necessary to design and implement a programme that would make it possible to define the activities necessary for setting the cost objectives and their fulfilment. It is necessary to identify who will carry out the analysis, who will be responsible for utilisation of the outcomes of the product life cycle cost analysis, how the database for estimating product life cycle costs will be established and maintained, what will be the ways of reporting the results of the analysis, how the necessary corrective measures will be initiated, etc.

3. THE DATABASE FOR PRODUCT LIFE CYCLE COST ANALYSIS

One of the key success factors in life cycle management is the availability of information about the technical, market and economic parameters of the product life cycle. It is clear that there is commonly a mismatch between the information available and that required. This gap between the need for information and its availability is the widest at the initial stages of the product life cycle. The development of the difference between demand for information about product life cycle and its availability in the course of the product life cycle is well illustrated by Figure 2, (Westkaempfer, Niemann and Dauensteiner, 2001) and (Westkaempfer, 2002).

The success of the product life cycle analysis depends on the availability of suitable data concerning a range of areas and activities that relate to the product life cycle. These are, for example, data that are associated with product design and development, pre-manufacturing activities, the manufacturing of the product, its use, maintenance, recycling and disposal. Companies normally have various extensive cost-related data. However, their use for the life cycle analysis tends to be problematic. In most cases there is not the required amount and structure of the data, they are not relevant or appropriate for the problem being solved, and they are not comprehensive. It is also common for data to be maintained in several isolated information systems without the possibility of their interconnection at system level.

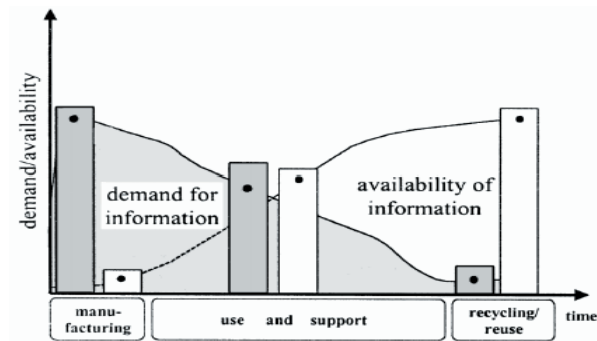


Fig. 2 Demand for information about product life cycle in relation to availability of the information

Historical data constitute a relatively accessible and important source of data for an analysis and forecast of product life cycle costs. However, even the possible ways of using historical data are often limited. The biggest problem is that there are not always historical data about a comparable product or its components. New products are often more efficient, of higher quality and more reliable, which understandably distinguishes them from their predecessors in many respects – e.g. the cost structure, operating costs and maintenance costs.

In addition to historical data, what is also indispensable is forecasts of future trends concerning technologies, materials, product components, operating strategies, market development and competition, research, anticipated demand, requirements of product users, etc. When developing special databases for product life cycle cost analyses it is necessary to take account, above all, of data accessibility, serviceability of defined needs, adaptability to changed requirements, etc.

3.1 Calculation of product life cycle costs

The procedure for calculating product life cycle costs is illustrated in Figure 3, (Woodward, 1997).

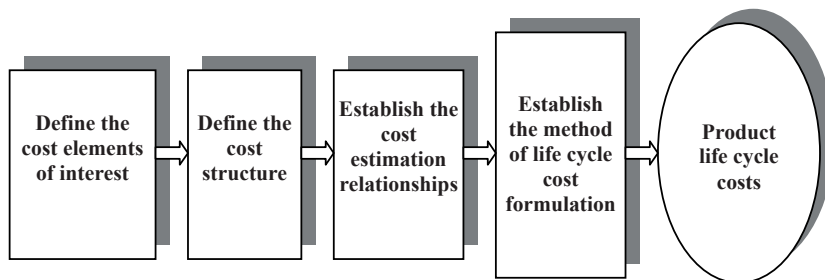


Fig. 3 Product life cycle costing

The cost items we track include all costs that arise from the instant of product conception until its disposal at the end of its life cycle. The cost items should be structured so as to facilitate identification of potential links between them with a view to identifying the appropriate level of product life cycle costs. The cost item structure will always depend on the nature of the specific product. It should always allow for carrying out a product life cycle costs analysis. The objective of the cost estimation is to try to identify cost items as a function of one or more independent variables. The last stage of the costing procedure consists in defining an approach to calculating life cycle costs. For example, (Kaufman, 1970) presents a method comprising eight steps:

- Establishing the operating profile: description of the periodic cycle the product (e.g. a piece of manufacturing equipment) will go through. As part of this step the operating modes for the entire life span of the product are defined.
- Establishing the utilisation factors: while the operating profile captures the proportion of time during which the equipment will be operating or not operating, utilisation factors indicate the way in which the equipment will be functioning within the various operating modes (continuously, intermittently,...).
- Identifying all the cost elements.
- Determining the critical cost parameters: determining the parameters that affect the equipment's life cycle costs. For example, the time period between failures, repairs, overhauls, scheduled maintenance, etc.
- Calculation of all costs at current prices.
- Increasing current costs to accommodate inflation.
- Discounting all costs to the base period.
- Summing up the discounted costs.

Another example of the structure and sequence of steps as part of product life cycle cost analysis may be found in (Wynholds and Scraft, 1997):

- Developing a representative cost structure (identification of cost items).
- Collection of data to support the cost structure.
- Establishing appropriate connections for cost estimation for each cost component.
- Developing a comprehensive cost model (life cycle cost calculation).
- Testing and use of the model (carrying out a sensitivity analysis).

3.2 The key influence of the design and development stage on product life cycle costs

The greatest opportunity for reducing life cycle costs and improving the product parameters and performance can be identified in the initial stages of the product life cycle (the design and development phase). The costs incurred at this stage are not so high when compared to the overall life cycle costs of the product. However, decisions taken during this phase have a considerable impact on costs during the manufacturing and operational stages. At the manufacturing stage, and even more so at the operational stage, any modifications and attempts to influence manufacturing and operating costs are considerably limited. This is well illustrated in Figure 4, (Wrobel and Laudanski, 2008).

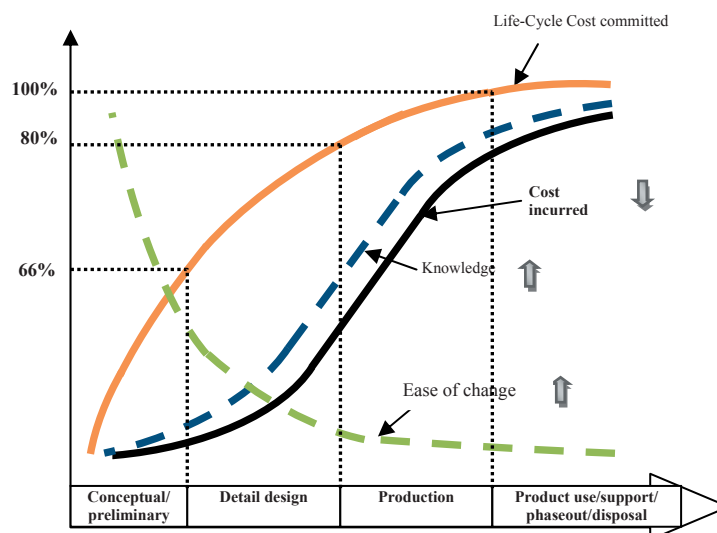


Fig. 4 Incurred and planned expenditures along with know-how

The importance of the implementation of life cycle cost analysis at the stage of product design and development is obvious. However, an effective analysis requires suitable instruments for evaluation of the economic aspects of various technical solutions. The extensive space for influencing product life cycle costs at the design and development stage is reduced by the fact that it is difficult to predict how various design and development alternatives will affect the costs incurred during the manufacturing and operational stages of the product life cycle. At the design and development stage it is not yet possible to specify the manufacturing and operational features of the product, maintenance policies, production volume, logistical solutions, etc.

4. METHODS OF PRODUCT LIFE CYCLE COST ESTIMATION

An analysis of product life cycle costs requires an appropriate level of knowledge and cost data related to the product under development. Efforts to predict costs at early stages of product development suffer from a considerable lack of information about the economic, manufacturing and operational characteristics of the product. The degree of precision in cost estimation increases as the new product project progresses to further stages. For example, at the phase of technical preparation for manufacturing it is possible to estimate the product manufacturing costs with a relatively good degree of precision. It is more difficult to obtain data about redevelopment and maintenance, operating costs such as material costs, sub-contracting, energy, labour, the anticipated operation lifespan, etc.

The limited data inputs that occur to the largest degree at early stages of product development require that a choice should be made concerning specific methods of cost estimation. These methods are not targeted at the costs of all stages of the product life

cycle. They only focus on some of them – normally they concern an estimation concerning the costs of the procurement (manufacturing) stage. In specialist literature we may find various approaches to the classification of approximation methods suitable for estimating costs at early stages of product development. The following is an example of a traditional classification, (Ficko, Drstvenšek, Bresočnik, Balič, and Vaupotic, 2005).

- Intuitive methods: the degree of precision of the cost estimate depends on the expert's capabilities.
- Analogue methods: costs are assessed based on similarity with other products, sets or components.
- Parametric methods: evaluation of the costs is based on the relationship between the costs and the product parameters that have a major impact on costs.
- Analytical methods: costs are assessed on the basis of predicting the costs of individual product components and manufacturing processes.

Employment of these methods in relation to the product life cycle stages is illustrated in Figure 5, (Ficko, Drstvenšek, Bresočnik, Balič, and Vaupotic, 2005).

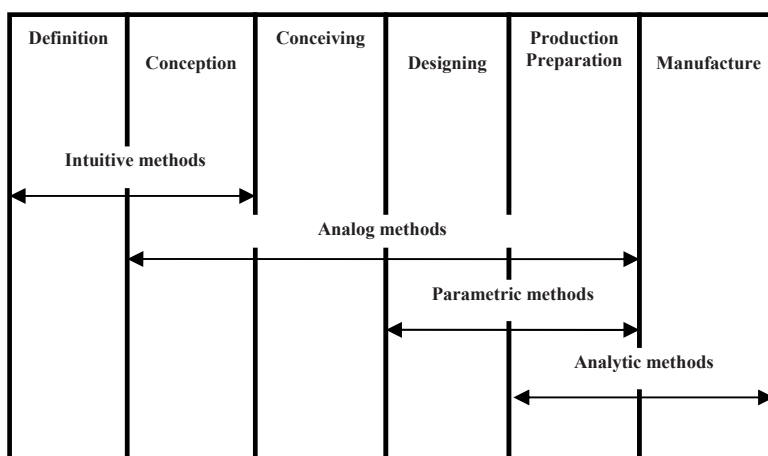


Fig. 5. Area of use of cost prediction methods

Most methods for cost prediction are deterministic – they overlook the uncertainties and variability of the real world. If the uncertainty as regards cost and other information is high, the life cycle cost analysis is of low significance. In these cases it is necessary to assess the degree of uncertainty that is attached to product life cycle cost estimation, and this uncertainty must be taken into account in decision-making.

CONCLUSIONS

There are still many products (equipment, systems) that are designed, manufactured and operated with little or no emphasis on a life cycle cost analysis. If life cycle costs

are tracked, this takes place largely in an isolated manner in selected life cycle stages (research and development, design, testing, manufacturing, operation by user, service...) without a comprehensive approach.

There are a number of causes for the generally low level of acceptance of the life cycle costing method in business practices. The most important ones include (S.A. Assaf, 2002) and (A. Boussabaine, 2004) and (Fabrycky and Blanchart, 1991):

- Lack of motivation for applying the life cycle cost methodology in practice. The reason may be insufficient trust in the results and success of the methodology. There is often unwillingness to change behaviour patterns and to commit the relevant time and effort.
- Management problems. It is the company management's task to tackle the low level of acceptance of the life cycle costing methodology. However, the management itself must have sufficient trust in its benefits. This entails overcoming the current situation where products are predominantly judged according to procurement costs and where the relationship between procurement and future costs is being ignored. The current situation is also characterised by preference for short-term effects and a lack of the relevant knowledge of life cycle costing methods and ways of their utilisation.
- Implementation of the life cycle costing methodology runs up against, above all, lack of reliable information, scarcity of generally applicable methods and difficulties in their application, and shortage of skilled staff and appropriate software. There is also a lack of standard methods for data collection, storage and analysis. Moreover, for many parts, components and systems there is missing data about lifespan performance (data on maintenance, lifespan, part and component replacement patterns, performance and time aspects of operations, etc.).

On the basis of factors and methods analysis for calculating life-cycle costs of products can be recommended a procedure what would help to increase the acceptance of this issue in enterprise practice. We have recommended determining the LCC in enterprises based on known data, which are:

- the length of product life cycle – the period when the product will be produced and distributed – it primarily depends on the success of the product on the market, it can be predicted,
- the assessment of the sale volume of the product throughout the life cycle – it represents more important step because it influences income from sale, total variable costs, total and average fixed costs and the criteria derived of them,
- the expected development of price – it is necessary to take into account a number of factors which are influenceable and also non – influenceable by enterprise,
- the assessment of the total costs associated with the product – these costs load mainly research and development costs, establishment of production costs, production costs and sales costs.

In the initial phase of the life cycle costing the cost assessment interlocks on the system of plans and budgets, mainly on tactical and strategic cost budgets for operating costs and the expected standards of consumption in field of unit costs.

REFERENCES

- ASSAF, S. A., 2002. Assessment of the Problems of Application of Life Cycle Costing in Construction Projects, *Cost Engineering*, Vol. 44/No. 2, February 2002.
- BOUSSABAIN, A., 2004. Whole Life-cycle Costing, *Oxford: Blackwell Publishing*, 2004. 246 p. ISBN-101-4051-0786-0.
- FABRYCKY, W., BLANCHARD, B., BENJAMIN, B., 1991. Life Cycle Cost and Economic Analysis, *New Jersey: Prentice Hall*, 1991, 384 p. ISBN 0-13-538323-4.
- FICKO, M., DRSTVENŠEK, I., BRESOČNIK, M., BALIČ, J., VAUPOTIC, B., 2005. Prediction of total manufacturing cost for stamping on the basis of CAD-model of the finished product. *Journal of materials processing technology*, 2005. pp. 1327–1335, 2005.
- KAUFMAN, R. J., 1970. Life cycle costing: a decision-making tool for capital equipment acquisition, *Cost and management*, 1970. March/April, pp. 21–28.
- PRASAD, B. A., 1999. Model for Optimizing Performance based on Reliability, Life Cycle Cost and other Measurements, *Production Planning & Kontrol*, 1999. Vol. 10, NO. 3, pp. 286–300.
- WESTKAEMPFER, E., NIEMANN, J., DAUENSTEINER, A., 2001. Economic and Ecological Aspects in Product Life Cycle Evaluation. Keynote paper, CIRP General Assembly, Sydney, *Proc Instn Mech Engrs*, 2001. Vol. 215 Part B.
- WESTKAEMPFER, E., 2002. Life Cycle Management and Assessment: approaches and visions towards sustainable manufacturing, Keynote paper, CIRP General Assembly, Sydney, *Proc Instn Mech Engrs*, 2002. Vol. 215 Part B.
- WOODWARD, D. G., 1997. “Life Cycle Costing – Theory, Information Acquisition and Application”, *International Journal of Project Management*, 1997. Vol. 15, No 6, pp. 335–344.
- WROBEL, J., LAUDANSKI, M., 2008. Cost assessment in design of low volume manufacture machines”, *Automation in Construction*, 2008. 17, pp. 265–270.
- WYNHOLDS, H. W., SKRAFT, J. P., 1977. Weapon System Parametric LCC Analysis”, *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 1977. pp. 303–309.

Contact addresses:

prof. Ing. František Freiberg, CSc.,
Technical university in Zvolen, Faculty of Environmental and Manufacturing Technology,
Department of Manufacturing Technology and Materials,
Studentska 26, 960 53 Zvolen, tel. +421 45 5206 692

MSc. Erika Sujová, PhD.,
Technical university in Zvolen, Faculty of Environmental and Manufacturing Technology,
Department of Manufacturing Technology and Materials, Studentska 26, 960 53 Zvolen,
email: esujova@vsld.tuzvo.sk, tel. +421 45 5206 877

VYBRANÉ METÓDY KRUŽNICOVEJ INTERPOLÁCIE

SELECTED METHODS OF CIRCULAR INTERPOLATION

Peter KOLEDA – Ľubomír NAŠČÁK

ABSTRACT: This article deals with possibilities of circular interpolation by substitution of trajectory of circular shape. Trajectory deviations and speed courses of different methods of circular interpolation in proportional units are derived, wherein emphasis is placed on using during control of positioning system with two degrees of freedom. In the last part of article the criteria for selection of specific interpolation method are described.

Key words: interpolation, circular interpolation, parameterisation of actuating variables

ABSTRAKT: Článok sa zaoberá možnosťami a návrhmi kruhovej interpolácie pri nahrádzaní trajektórie kružnicového tvaru. Sú v ňom odvodené odchýlky a priebehy rýchlostí rôznych metód kružnicovej interpolácie v pomerných jednotkách, pričom sa dôraz kladie na využitie pri riadení polohovacieho systému s dvomi stupňami voľnosti. V poslednej časti článku sú opísané kritériá pre výber konkrétnej metódy interpolácie.

Kľúčové slová: interpolácia, kružnicová interpolácia, parametrizácia akčných veličín

1. ÚVOD

Pri riadení pohybu robota, príp. manipulátora či iného polohovacieho systému, vzniká potreba popisu jeho dráhy, ktorej najjednoduchší variant v rovine tvoria lineárne a kružnicové úseky. Daný popis musí byť vhodný z pohľadu možných vykonateľných pohybov, radiacích algoritmov a náročnosti ich spracovania najmä z hľadiska výpočtových operácií s relevantnými údajmi.

V prípade dvojosového rovinného mechanizmu, ak je možné súčasné riadenie rýchlosti v oboch osiach, existujú rôzne metódy lineárnej a kružnicovej interpolácie. Kružnica je nahrádzaná lineárnymi úsekmi, ktoré dvojosový systém dokáže vykonávať riadením rýchlosti pohybu v príslušných osiach podľa strmosti tohto úseku. Z uvedeného vyplýva aj podstata interpolácie potrebnej pre interpolovanie lineárnych častí žiadanej trajektórie.

2. INTERPOLÁCIA TRAJEKTÓRIE TVARU KRUŽNICE

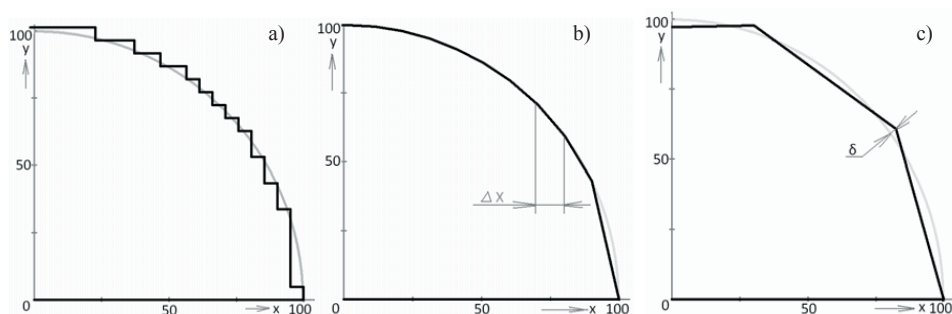
Trajektória, ktorá má tvar celej kružnice, príp. jej časti, sa môže nahradiť rôznymi metódami. Tvar náhradnej trajektórie sa približuje ideálnej kružnici, a to až do takej

miery, že táto trajektória sa môže považovať za ideálnu kružnicu pri dodržaní stanovených kritérií. Metódy kružnicovej interpolácie, ktoré sú založené na možnostiach jednoduchého analytického popisu kružnice, sa dajú vyjadriť nasledovne:

- **pravouhlá interpolácia** – kružnicovú trajektóriu tvoria lineárne pravouhlé úseky,
- **interpolácia s konštantnou dĺžkou kroku v jednej z osí** – kružnicovú trajektóriu tvoria lineárne úseky, ich priemet do jednej z osí je konštantný,
- **interpolácia s maximálnou odchýlkou δ** – trajektóriu tvoria lineárne úseky, určujúcou podmienkou pre jej výpočet je dodržanie maximálnej odchýlky.

Vývojové diagramy v prílohách na konci príspevku zobrazujú priebeh algoritmov pre vyššie uvedené metódy kružnicovej interpolácie a výpočet príslušných údajov (súradníc interpolačných bodov).

Obrázok 1 ilustruje popísané druhy kružnicovej interpolácie pre trajektóriu, ktorá má tvar kružnicového oblúka so stredovým uhlom $\alpha = 90^\circ$. Voliteľné parametre sú zadané tak, aby boli viditeľné tvarové odlišnosti jednotlivých náhradných trajektórií.



Obrázok 1 a) Kružnicová interpolácia pravouhlá: krok $K = 5$ mm, polomer $R = 100$ mm;
b) Kružnicová interpolácia s konštantnou dĺžkou kroku: krok $X_K = 10$ mm, $R = 100$ mm;
c) Kružnicová interpolácia, maximálna odchýlka $\delta = 5$ mm, $R = 100$ mm¹

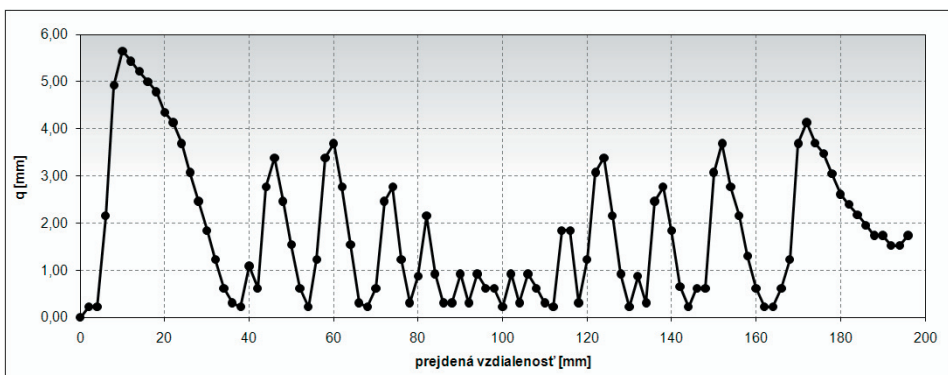
Z obrázku 1 je zrejmé, že každý algoritmus výpočtu akčných veličín, ktoré predstavujú rýchlosti pohybu v príslušných osiach, má odlišné vlastnosti charakterizujúce metódu interpolácie. Sú to najmä odchýlky od žiadaných trajektórií, skutočne prejdené celkové vzdialenosti a rýchlosti translačných pohybov v osiach x a y . Miera podobnosti s ideálnou kružnicou je vyjadrená odchýlkou skutočnej od žiadanej trajektórie a v pravouhlom súradnicovom systéme sa dá vypočítať napr. pomocou kvadratickej vzdialenosti

$$q_i = \sqrt{(X_{REALi} - X_{VYPi})^2 + (Y_{REALi} - Y_{VYPi})^2} \quad (1)$$

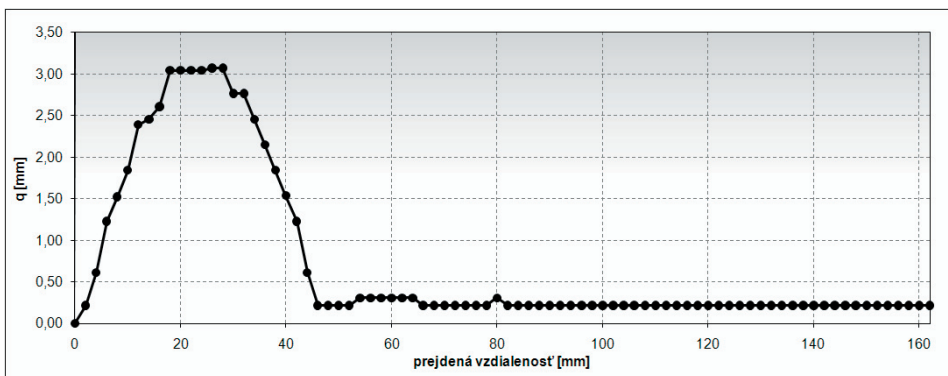
X_{REALi}, Y_{REALi} – súradnice nájdeného bodu na interpolovanej trajektórii, index i určuje poradie krokov,

X_{VYPi}, Y_{VYPi} – súradnice bodu na interpolačnej trajektórii, ktorý je najbližší k bodu so súradnicami X_{REALi} a Y_{REALi} v príslušnom kroku i .

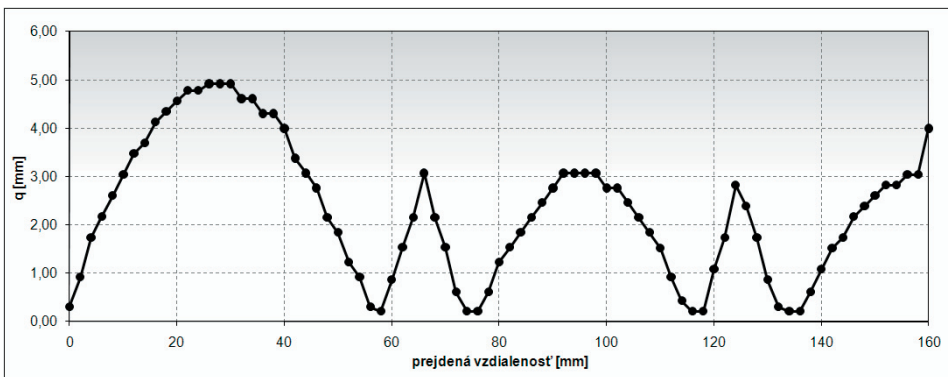
¹ Dimenzie jednotlivých parametrov sú zvolené s ohľadom na viditeľnosť interpolovaných častí kružnice



Obrázok 2 Odchýlka pri pravouhlej interpolácii



Obrázok 3 Odchýlka pri interpolácii s konštantnou dĺžkou kroku



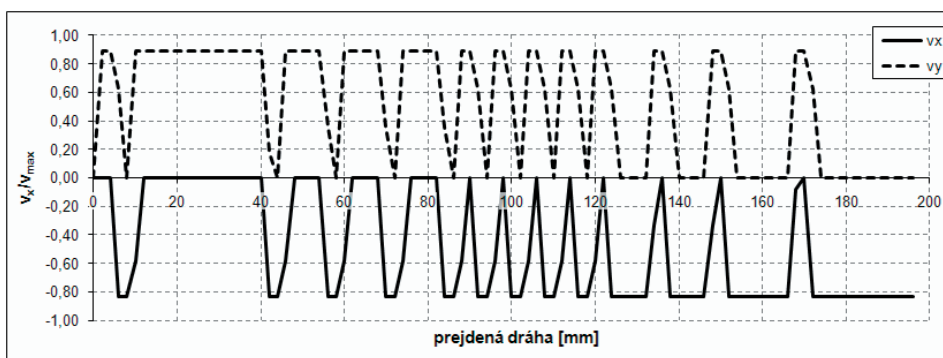
Obrázok 4 Odchýlka pri interpolácii s maximálnou odchýlkou

Zistené maximálne kvadratické odchýlky a dĺžka interpolovanej trajektórie sú uvedené v tab. 1. Najmenšiu odchýlku vykazuje trajektória vypočítaná algoritmom s konštantnou dĺžkou kroku, a aj táto odchýlka je vytvorená na začiatku trajektórie. Je to dané strmou lineárnou úseku, ktorá by sa dala vyjadriť pomerom $\Delta y/\Delta x$, pričom Δx je konštantné. V úsekoch, kde je tento pomer veľký, budú aj odchýlky od žiadanej trajektórie najväčšie. Najkratšia prejdená dráha je pri trajektórii vypočítanej algoritmom konštantnej dĺžky kroku a maximálnej odchýlky. Takto vypočítané trajektórie sa svojim tvarom najviac približujú ideálnej kružnici.

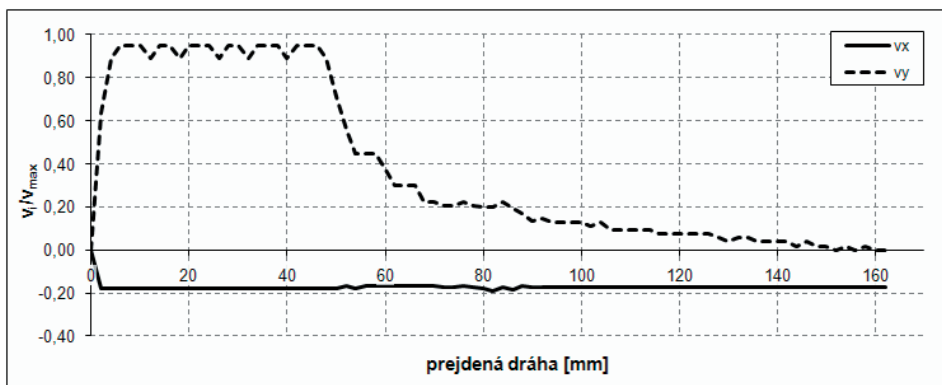
Tabuľka 1 Zistené kvalitatívne parametre interpolačných algoritmov

Metóda interpolácie	q_{max} [mm]	prejdená dráha [mm]
pravouhlá interpolácia, krok $K = 5$ mm	5,65	196
konštantná dĺžka kroku $X_K = 10$ mm	3,07	162
maximálna odchýlka $\delta = 5$ mm	4,92	160

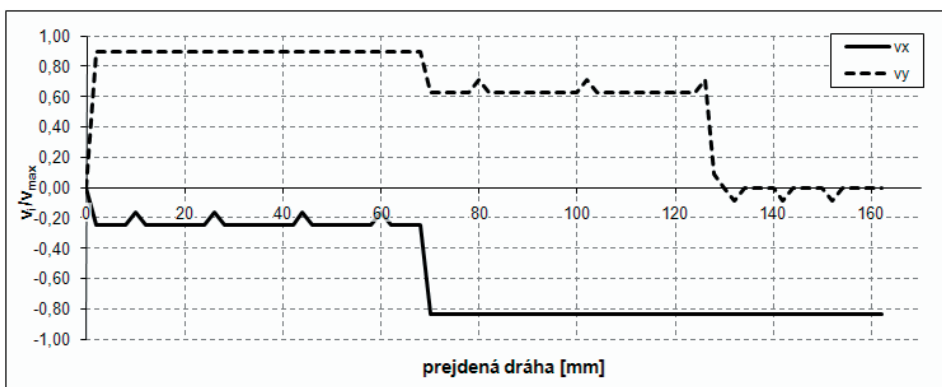
Ďalším parametrom z hľadiska presného sledovania zvolenej trajektórie je posuvná rýchlosť v príslušných osiach. Ak počiatkový bod trajektórie leží na kružnici a jej stred je zároveň stredom súradnicového systému, tak v prvom kvadrante bude rýchlosť v_x záporná a rýchlosť v_y kladná pri všetkých metódach interpolácie. Priebeh rýchlostí pre jednotlivé interpolačné algoritmy sú zobrazené na obrázkoch 5 až 7. Tieto rýchlosti sú odvodené z derivácií zmien dráhy podľa času. Rýchlosť je udávaná v pomerných jednotkách, jej presné stanovenie závisí od konkrétneho správania sa pohybového systému, hlavne od jeho dynamiky a zotrvačnosti.



Obrázok 5 Priebeh rýchlostí pri pravouhlej interpolácii



Obrázok 6 Priebeh rýchlostí pri interpolácii s konštantnou dĺžkou kroku



Obrázok 7 Priebeh rýchlostí pri interpolácii s maximálnou odchýlkou

Pri metóde pravouhlej interpolácie (obr. 5) môžu vzniknúť problémy s dynamikou systému z dôvodu častého nárastu a poklesu rýchlosti a značných zrýchlení. Pre dosiahnutie čo najväčšej presnosti sa musí predpokladať veľký počet týchto cyklov. Plynulejší priebeh rýchlostí je viditeľný pri ostatných dvoch metódach, kde sa postupnou zmenou rýchlosti dosiahne žiadaná poloha a minimalizuje sa odchýlka od ideálneho stavu.

Dôležité kritériá pre výber trajektórie sa môžu zhrnúť nasledovne:

- **najmenšia odchýlka od žiadanej dráhy** – najvýznamnejšie kritérium pre dosiahnutie presného sledovania zvolenej krivky. Limitným faktorom je rozlíšenie snímača použitého v spätnej väzbe.
- **najkratšia prejdená dráha** – závisí od zvoleného interpolačného algoritmu, ktorým je nahradená žiadaná trajektória.
- **najkratší čas chodu** – čas potrebný na prejdenie celej trajektórie alebo len jej časti; je závislý na rýchlosti pohybu a dĺžke trajektórie.

- **najnižšia spotreba energie potrebnej na premiestnenie** – tejto podmienke môžu vyhovovať aj predchádzajúce kritériá, keďže najkratšia trajektória, príp. trajektória, pri ktorej je najkratší čas chodu, môžu mať aj najnižšiu spotrebu energie. Pre jej splnenie však musí byť navrhnutá účinná metóda pre meranie spotrebovanej energie.

Optimálna trajektória by mala vyvážené zohľadňovať všetky spomenuté kritériá. Ak by sa zvolilo za najvýznamnejšie kritérium najkratšieho času chodu, mohlo by to výrazne ovplyvniť a zhoršiť presnosť polohy, kedy by sa do značnej miery prejavila dynamika a zotrvačnosť systému. Treba podotknúť, že pre výpočet optimálnych režimov činnosti systému sa odporúča vytvoriť matematický popis alebo model tohto systému (Kirk, 2004).

3. PRENOS INFORMÁCIÍ

Ak je navrhnutý riadiaci systém, ktorého časťami je riadiaci počítač (mikropočítač), riadený systém (polohovacie zariadenie, akčné členy, senzory, elektronika,...) a nadradený počítač, ktorý predstavuje periférne zariadenie pre styk s obsluhujúcim personálom, je možné rozlíšiť dva postupy prenosu informácií z nadradeného počítača do riadiaceho počítača:

- 1) Interpolácia zvolenej trajektórie sa vykoná už v nadradenom počítači, pričom sa získa súbor parametrov (sklon lineárneho úseku a jeho veľkosť alebo súradnice interpolačných bodov). V priebehu výpočtu sa tieto údaje zapisujú do jednorozmernej štruktúrovanej premennej alebo do viacrozmernej premennej. Po zrealizovaní celého výpočtu nasleduje samotné odoslanie celého získaného súboru do riadiaceho počítača, ktorého úlohou je riadiť sústavu tak, aby sa postupne dosiahli všetky interpolované body v správnom poradí. Počas riadenia sústavy riadiaci počítač odosiela informácie o skutočnom umiestnení polohovacieho zariadenia do nadradeného počítača.
- 2) Interpolácia vybranej trajektórie sa vykoná v riadiacom počítači, a to len potom, čo sú z nadradeného počítača odoslané informácie o žiadanom polomere kružnicovej trajektórie a vybranej metóde interpolácie. Súbor parametrov popisujúci interpolovanú trajektóriu sa získa výpočtom v riadiacom počítači, ktorého úloha je následne rovnaká ako v predchádzajúcom bode, tzn., že riadi sústavu podľa interpolačných bodov a odosiela údaje o polohe do nadradeného počítača.

Obidva opísané spôsoby sa líšia predovšetkým v množstve prenášaných informácií medzi nadradeným a riadiacim počítačom. V prvom prípade je objem týchto informácií väčší, pretože sa z nadradeného počítača odosiela celý súbor parametrov opisujúcich interpolovanú trajektóriu. Na druhej strane sa v druhom prípade vyžaduje väčší výpočtový výkon riadiaceho počítača, keďže sa v ňom realizuje celý algoritmus interpolácie.

V súčasnej dobe je možnosť výberu z rôznych komunikačných rozhraní, ktoré zaisťujú prenos informácií medzi oboma počítačmi. S dôrazom na možnosti komunikácie štandardného osobného počítača (nadradený počítač), sú najviac vhodné najmä USART, USB a Ethernet, pričom každé z nich je charakterizované svojimi štandardami, prenosovými rýchlosťami a formátom prenášaných správ.

4. ZÁVER

Opísané interpolačné metódy a algoritmy ich výpočtu pri nahrádzaní kružnicových častí trajektórie sú navrhnuté tak, aby ich bolo možné použiť v navrhovanom polohovacom zariadení s dvomi stupňami voľnosti. Porovnanie priebehov odchýlok a rýchlostí ilustruje a načrtáva možnosti zlepšenia presnosti príslušných metód, ich skutočné tvary je potrebné prakticky odskúšať. Zároveň je z týchto priebehov zrejmá aj možnosť a spôsob parametrizácie akčných veličín. Ak sa bude vychádzať z opísaných interpolačných metód, príp. sa odvodí nové, môžu sa navrhnúť účinné a presné interpolačné postupy, ktoré budú nahrádzať trajektóriu ľubovoľného tvaru.

LITERATÚRA

- KIRK, D. E. 2004. *Optimal Control Theory : An Introduction*. Mineola, NY : Dover, 2004. 464 s. ISBN 0-486-43484-2
- STMicroelectronics. 2010. *STM32F101xx, STM32F102xx, STM32F103xx, STM32F105xx and STM32F107xx advanced ARM-based 32-bit MCU's : Referenčný manuál* [online]. STMicroelectronics, aktualizované apríl 2010 [cit. júl 2010]. Dostupné na internete <<http://www.st.com/stonline/products/literature/rm/13902.pdf>>.
- STRNAD, O., NOVÁK, L. 2009. *Preference ve výrobě*. Ostrava : Linde nakladatelství, 2. vydanie, 2009. 102 s. ISBN 80-56899-65-4

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

Kontaktná adresa:

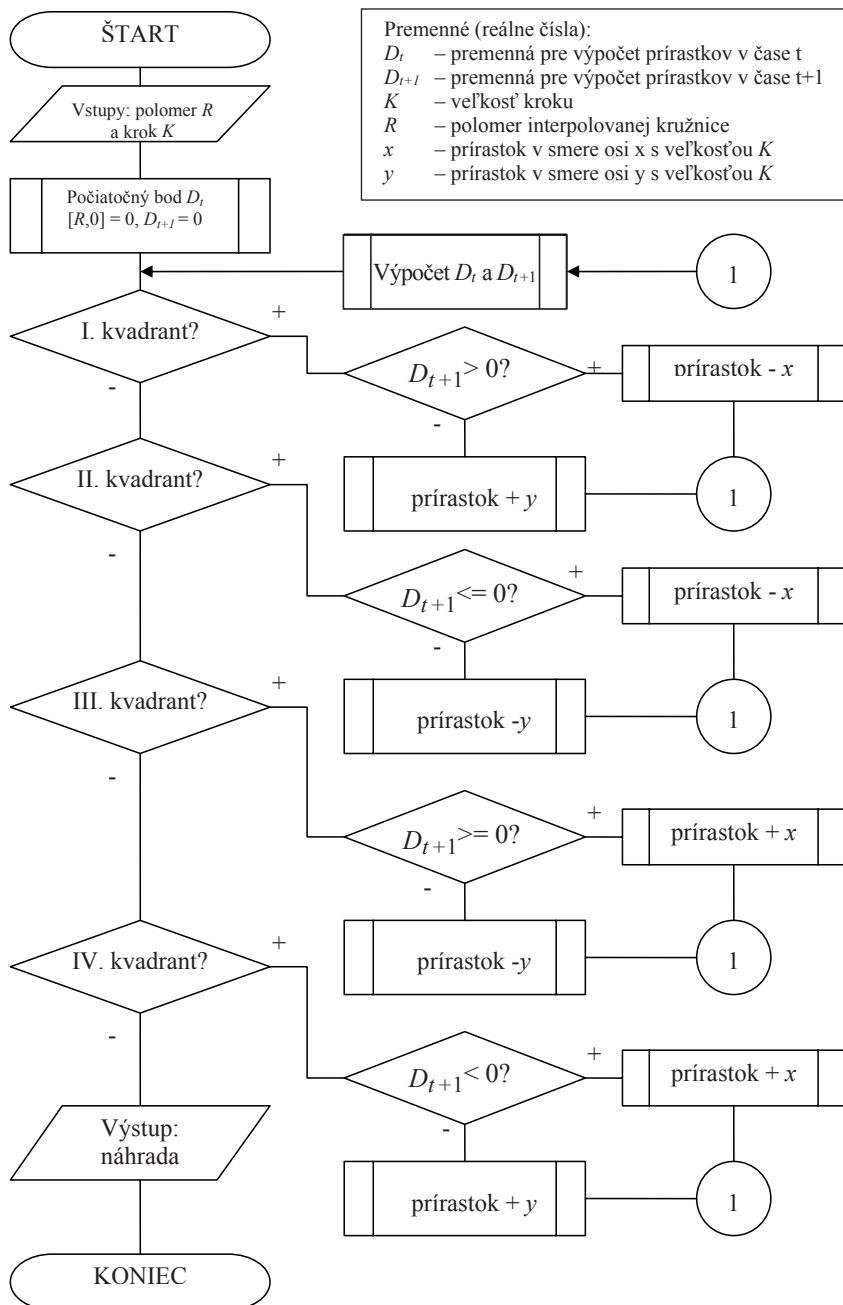
Ing. Peter Koleda
Katedra informatiky a automatizačnej techniky,
Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky,
Technická univerzita vo Zvolene, Študentská 26, 960 53 Zvolen

doc. Ing. Ľubomír Naščák, CSc.
Katedra informatiky a automatizačnej techniky,
Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky,
Technická univerzita vo Zvolene, Študentská 26, 960 53 Zvolen

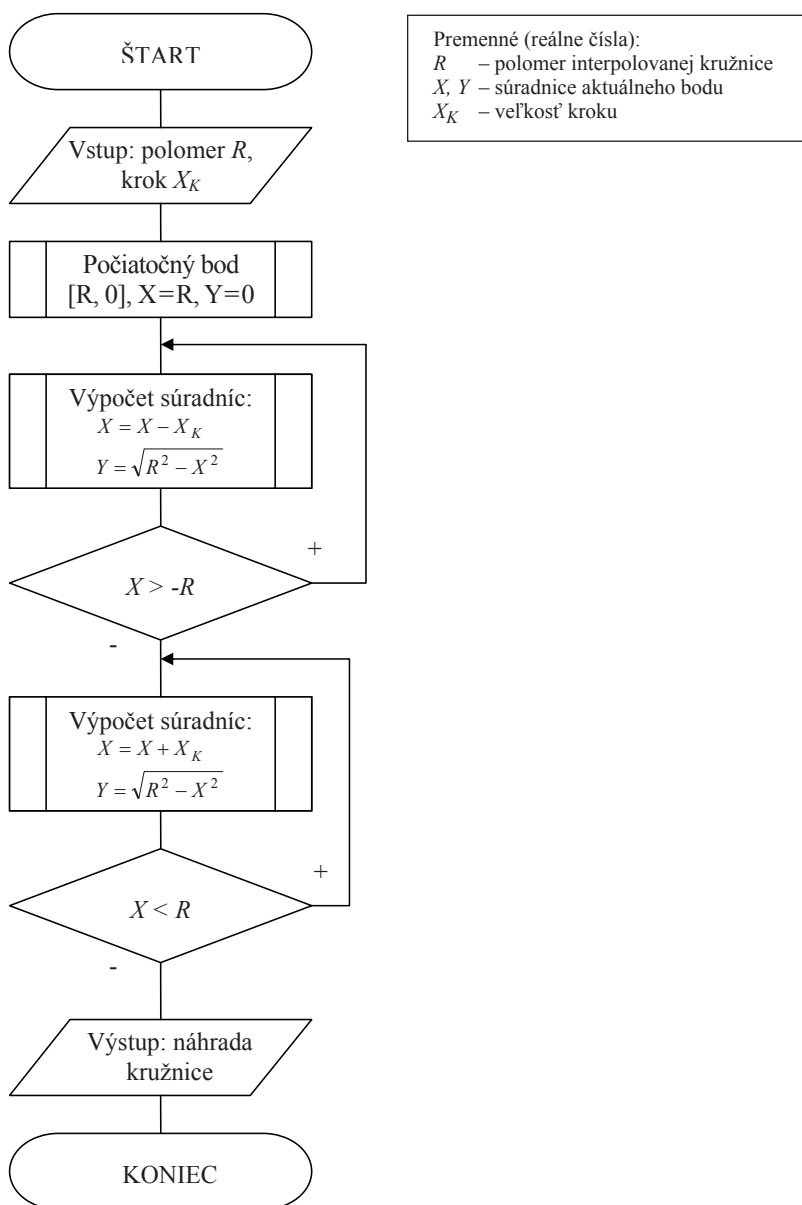
PRÍLOHY

Príloha A: Vývojový diagram pre pravouhlú kružnicovú interpoláciu

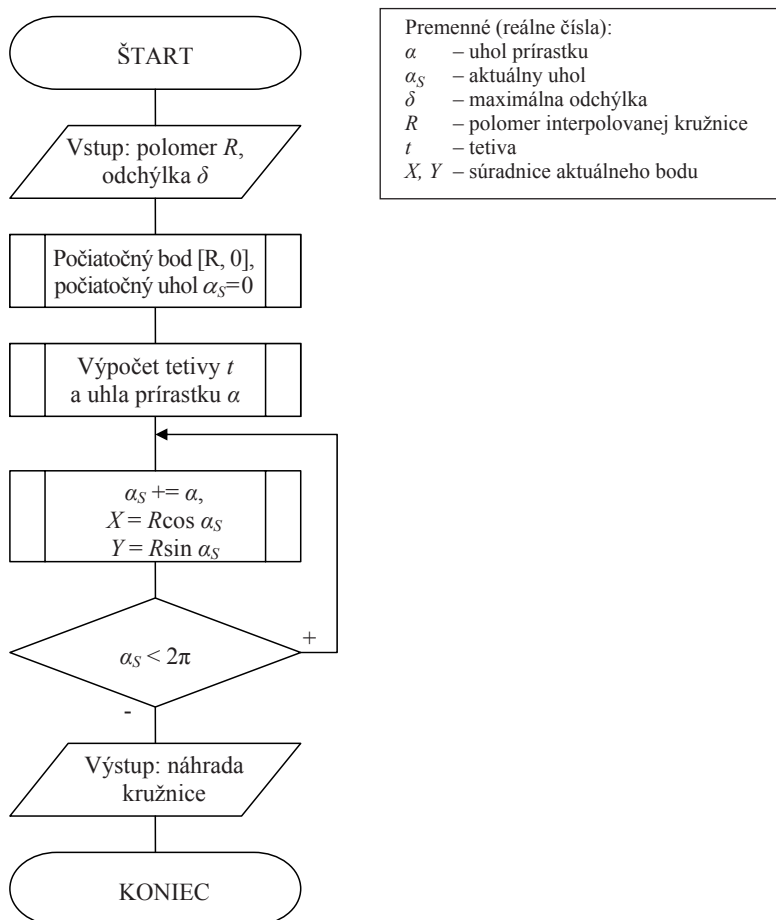
Pozn.: Uvedený vývojový diagram predpokladá, že trajektória má tvar kružnice so stredom v bode $[0, 0]$.



Príloha B: Vývojový diagram pre kružnicovú interpoláciu s konštantnou veľkosťou kroku



Príloha C: Vývojový diagram pre kružnicovú interpoláciu s maximálnou odchýlkou



ANALÝZA INTENZITY PORÚCH U LESNÝCH ŤAŽBOVÝCH A DOPRAVNÝCH STROJOV

THE ANALYSIS OF FAILURE INTENSITY AT FOREST FELLING AND SKIDDING MACHINES

Ján KOVÁČ – Katarína KOVÁČOVÁ

ABSTRACT: The paper deals with the analysis of one operational reliability parameter of observed forest felling and skidding machines. It analyses the failure intensity of harvesters and forwarders by John Deere. The paper reflects the problems of present forestry connected to reliability of used machines. The failure intensity shows the way of failure appearance of individual observed machines.

Key words: harvester, forwarder, failure intensity, operational reliability

ABSTRAKT: Článok sa zaoberá analýzou jedného ukazovateľa prevádzkovej spoľahlivosti pozorovaných lesných ťažbových a dopravných strojov. Analyzuje intenzitu porúch harvesterov a forwarderov John Deere. Článok reflektuje problémy súčasného lesníctva spojené so spoľahlivosťou používaných strojov. Intenzita porúch udáva trend vývoja poruchovosti jednotlivých skúmaných strojov.

Kľúčové slová: harvester, forwarder, intenzita porúch, prevádzková spoľahlivosť

1. ÚVOD

Ťažba dreva je proces získavania drevnej hmoty stromov ich stínkou. Ťažba sa môže vykonávať sekerou, pílou, motorovou pílou, alebo strojom zvaným harvester. Kmeň stromu sa odrezáva vo výške cca 20 cm od povrchu zeme, no záleží pri tom o aký druh stromu ide a aké má proporcie. Kmene stromov sa následne zbavia konárov a rozrežú na menšie časti, alebo sa odtiahnu na jedno miesto k lesným cestám. Kmene sa k cestám dopravujú špeciálnymi lesnými traktormi, vývoznými súpravami, vyvážacími strojmi alebo s využitím ťažných koní. Niekedy sa už priamo v lese odstraňuje aj kôra stromu. Z lesa sú potom kmene odvážané špeciálnymi nákladnými autami na ďalšie spracovanie.

Stroje, ktoré okrem spiľovania môžu vykonávať ešte aspoň jednu ďalšiu operáciu sa označujú termínom harvestory. (RÓNAY, E. – DEJMAL, J., 1991)

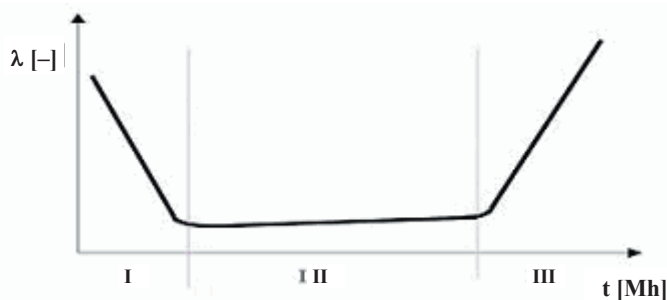
Harvester je viacoperačný ťažbový stroj, ktorý okrem samostatného pohybu po teréne spiľuje, odvetvuje, spiľuje stromy a ukladá drevo na viac alebo menej sformované hromady. Všetky pracovné operácie sa vykonávajú v jednom cykle, pričom niektoré

operácie môžu prebiehať súbežne (napr. premiestňovanie, odvetvenie, spílenie kmeňa). Pracovný cyklus môže byť automatizovaný alebo je plne mechanizovaný a riadený operátorom v reálnom čase. (DVOŘÁK, J., MALÍK, V., 2007)

Sústredňovacie prostriedky, ktorých základnou funkciou je doprava dreva z pracovnej linky harvestory a uloženie dreva do hromád pripravených na odvoz, môžeme rozdeliť do dvoch základných skupín:

- *Vývážacia súprava (vývozná súprava)* je to sústredňovací prostriedok tvorený dvomi samostatnými vozidlami (ťahačom a privesom). Súčasťou privesu je spravidla aj nakladacie zariadenie (hydromanipulátor), pričom klanicový prives je rýchlospojками napojený na energetický systém (elektrika, hydraulika, kardanový hriadeľ) ťahača. Ťažným vozidlom je spravidla univerzálny traktor, ktorý sa môže od privesu odpojiť a pracovať samostatne, alebo ako ťažná a pohonná jednotka iného prídavného zariadenia.
- *Vývážací stroj (vyvážač, forwarder)* je kompaktný dvoj až štvornápravový stroj, kde ťažná sekcia je klanicovou nadstavbou pevne spojená s kĺbovou sústavou. Kĺbová sústava umožňuje pohonnej jednotke aj nadstavbe s nákladom samostatne kopírovať terén počas jazdy. U väčšiny forwarderov špeciálne zariadenie umožňuje aretovať kĺb, čím sa spojí pevne ťažná časť s nadstavbou. Takto získaná tuhosť celého stroja, zvyšuje stabilitu pri práci s hydromanipulátorom, ktorý je vždy súčasťou forwardera. (DVOŘÁK, J., MALÍK, V., 2007)

Technický život zariadenia môžeme rozdeliť do troch oblastí podľa obrázka 1 na *oblasť I.*, ktorá charakterizuje dobu zábehu zariadenia, kde sa môžu vyskytovať určité nedostatky zariadenia, ktoré však plynulo prechádzajú do *oblasti II.*, ktoré je charakteristické normálnym priebehom funkčnosti zariadenia bez zvýšenej poruchovosti a *oblasť III.*, ktorou rozumieme ukončenie technického života zariadenia. Stroj je v ideálnom stave v oblasti II., kde vykazuje najvyššiu mieru spoľahlivosti.

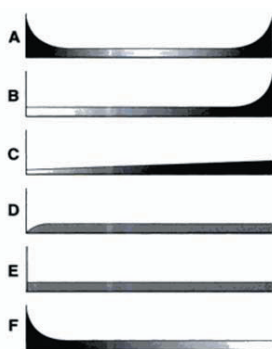


Obrázok 1 Krivka ukazovateľov života objektu (vaňová krivka) – krivka predikcie porúch
 λ – intenzita porúch, t – doba skúšania jedného objektu

Je veľmi jednoduché, keď výrobca stroja vyhlási „naše stroje sú spoľahlivé“, ale za tým vyhlásením sa schováva zložitá overovanie a analýzy spoľahlivosti. Každá analýza obsahuje podrobnú znalostnú funkciu a všetky možné dostupné poruchy analyzovaného zariadenia, poruchovosti jednotlivých komponentov a pod.

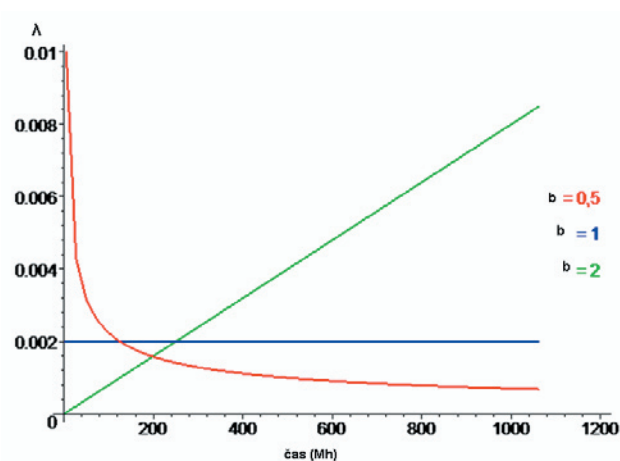
Krivka na obrázku 1 je typická len pre niektoré druhy jednoduchých zariadení. Priebeh obdobia porúch dožitím je napr. často ovplyvnený opotrebením.

Teória vaňovej krivky opisuje aj priebeh porúch a údržby z historického hľadiska. Všeobecne platí, že dnešné zariadenia sú omnoho zložitejšie ako boli pred dvadsiatimi rokmi. Z toho vyplýva, že priebehy kriviek ukazovateľov života sa menia – obrázok 2. Krivky na obrázku znázorňujú priebeh poruchovosti rôznych elektrických a mechanických prvkov v závislosti od doby prevádzky (krivka A popisuje správanie sa asi 4 % objektov, B – 2 %, C – 5 %, D – 7 %, E – 14 % a krivka F – asi 68 %). Hoci relatívne zastúpenie objektov s rôznym správaním sa (kriviek typu A až F) nie je v priemyselných odvetviach rovnaké, priebehy poruchovosti zariadení sa s ich rastúcou zložitou stále viac približujú krivkám typu E a F. (MOUBRAY, J., 1997)



Obrázok 2 Krivky znázorňujúce priebeh poruchovosti v závislosti od doby prevádzky
(Zdroj: MOUBRAY, J., 1997)

Tvar kriviek intenzity porúch λ v závislosti od parametra tvaru b pri Weibullovom rozdelení môže nadobúdať tvar uvedený na obrázku 3.



Obrázok 3 Tvar kriviek intenzity porúch λ v závislosti na veľkosti parametra b pri Weibullovom rozdelení

2. METÓDY A MATERIÁL

Pomocou pozorovania sledovaných objektov a štatistických metód boli dosiahnuté výsledky, ktoré vedú k uspokojeniu potrieb daného výrobku a podniku a zefektívneniu využívania pozorovaných zariadení v prevádzkových podmienkach.

Materiál možno rozdeliť nasledovne:

- a) *pozorované objekty*: 3 harvestory (1070D), 4 forwardery (810D) John Deere
- b) *charakteristika pozorovaných strojov* (Tabuľka 1) *v zmysle STN 01 0606 (Spôľahlivosť v technike, postup nomenklatúry normovaných ukazovateľov spoľahlivosti)*

Tabuľka 1 Charakteristika posudzovaných strojov v zmysle STN 01 0606

	Harvester 1070D	Forwarder 810D
Trieda výrobku	kód: 3 (obnovované výrobky)	kód: 3 (obnovované výrobky)
Časový režim prevádzky	obecný	obecný
Následky poruchy – skupina spoľahlivosti	II. (materiálna škoda z nesplnenej úlohy alebo prestoja zrovnateľná s hodnotou výrobku)	II. (materiálna škoda z nesplnenej úlohy alebo prestoja zrovnateľná s hodnotou výrobku)
Zásada obmedzenia doby používania	plánované	plánované

- c) *skúšobný plán*: [n, R, t]
- d) *štatistické metódy*: ANOVA

Táto práca bola riešená v spolupráci s prevádzkovateľom a servisným strediskom strojárkej výroby v spoločnosti *Lesy SR, a.s., OZLT Banská Bystrica*. Jeho úlohou je údržba a opravy lesnej a mobilnej techniky.

3. VÝSLEDKY A DISKUSIA

Intenzity porúch $\lambda(t)$ boli vypočítané pomocou Weibullovoho rozdelenia pre harvestory h1070D-770 (Obr. 4), h1070D-1070 (Obr. 5), h1070D-770 (Obr. 6) a forwardery f810D-829 (Obr. 7), f810D-136 (Obr. 8), f810D-001 (Obr. 9), f810D-002 (Obr. 10), f810D-1110 (Obr. 11).

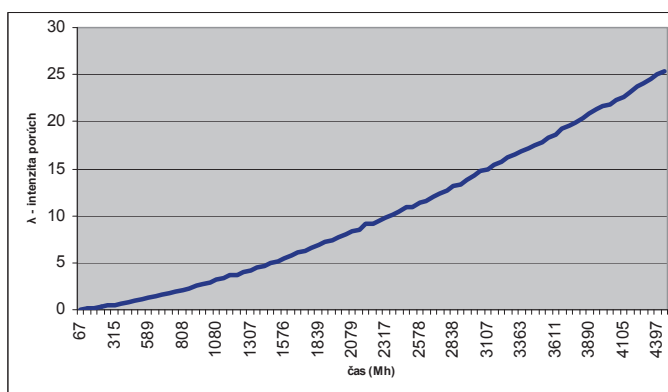
Výpočet vychádzal zo vzťahu pre výpočet intenzity porúch $\lambda(t)$ Weibullovoho dvojparametrického rozdelenia (iba pre parameter veľkosti a , parameter tvaru b , lebo parameter polohy $c = 0$), kde $t \geq 0$:

$$\lambda(t) = \frac{b}{a} \cdot \left(\frac{t}{a} \right)^{b-1} \quad (1)$$

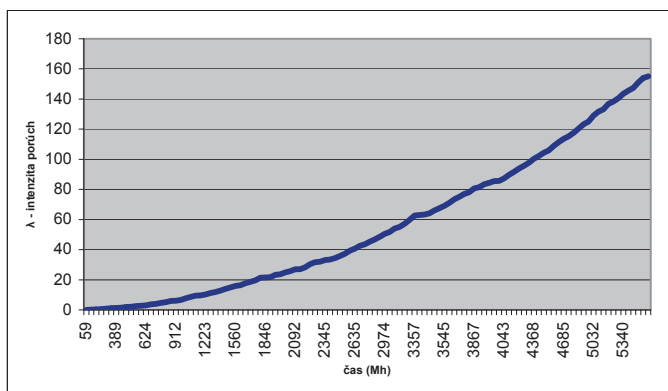
Parametre Weibullovoho rozdelenia pre druhy strojov a jednotlivé stroje uvádza Tabuľka 2.

Tabuľka 2 Parametre Weibullovoho rozdelenia

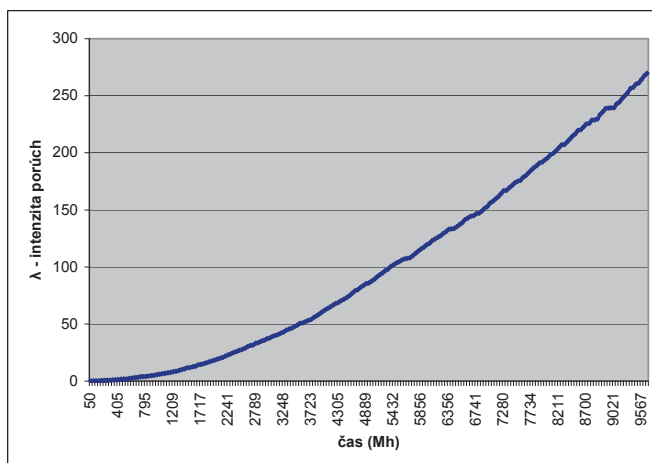
druh/číslo stroja	Parameter veľkosti a	Parameter tvaru b	Parameter polohy c	Počet meraní n
h1070D-770	58,1178	2,4733	0	87
h1070D-1070	59,3918	2,784	0	114
h1070-1270	56,7171	2,6826	0	203
h	57,7619	2,6646	0	404
f810D-829	178,543	1,1435	0	39
f810D-136	283,99	1,0134	0	16
f810D-001	134,8187	0,7729	0	15
f810D-002	108,1099	0,7914	0	21
f810D-1110	378,4651	1,0782	0	26
f	210,4088	0,9006	0	117



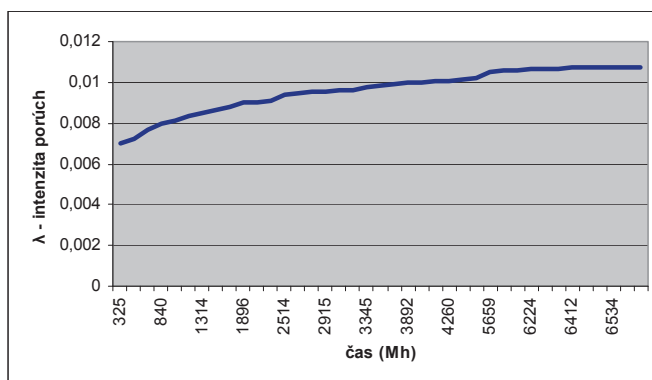
Obrázok 4 Intenzita porúch harvestor h1070D-770



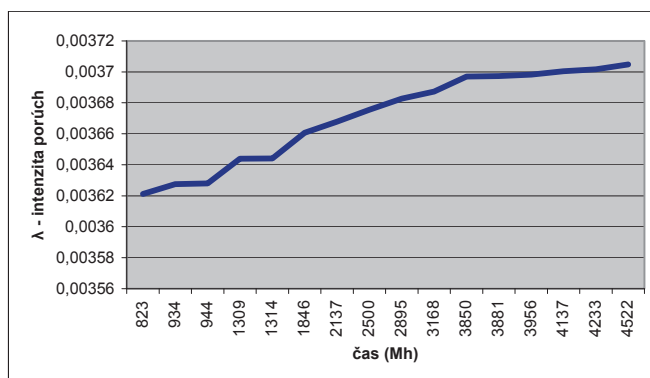
Obrázok 5 Intenzita porúch harvestor h1070D-1070



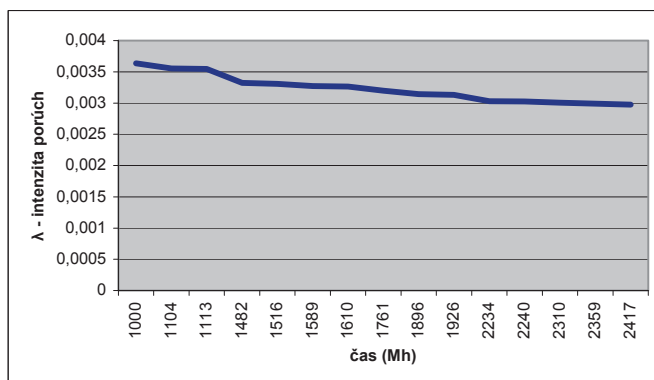
Obrázok 6 Intenzita porúch harvester h1070D-1270



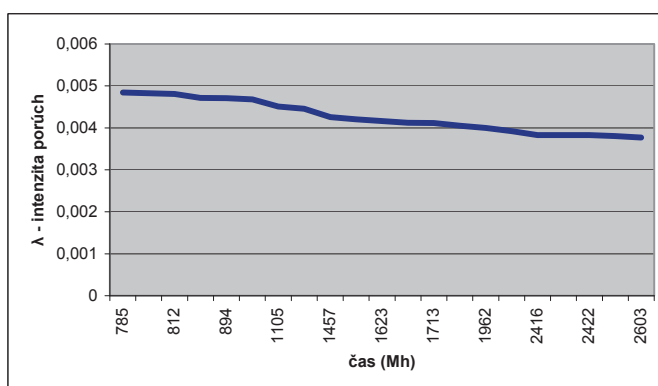
Obrázok 7 Intenzita porúch forwarder f810D-829



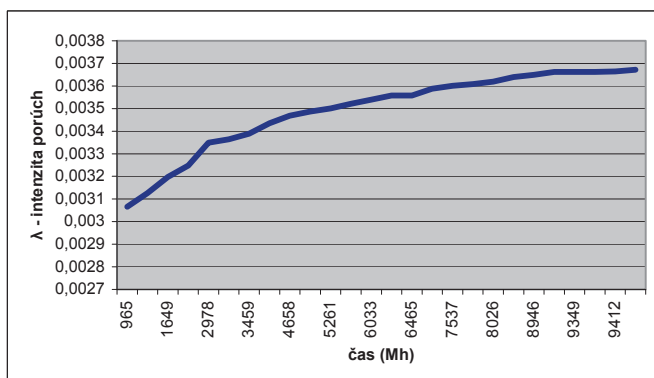
Obrázok 8 Intenzita porúch forwarder f810D-136



Obrázok 9 Intenzita porúch forwarder f810D-001



Obrázok 10 Intenzita porúch forwarder f810D-002



Obrázok 11 Intenzita porúch forwarder f810D-1110

Z priebehov kriviek intenzity porúch je vidieť, že všetky harvestory majú tendenciu so zvyšujúcim sa časom nasadenia do prevádzky aj zvyšovať intenzitu porúch. Opačný stav nastal u niektorých forwarderov, a to konkrétne forwardery 810D-001 a 810D-002 majú jemne klesajúcu intenzitu vzniku porúch so stúpajúcim časom zaradenia do prevádzky. Ostatné forwardery taktiež majú stúpajúce intenzity porúch. Takýto prejav je dôsledkom vysokého nasadzovania strojov do prevádzky.

4. ZÁVER

Súbor užívateľských vlastností produktu zabezpečovaných v zhode s vopred definovanými vlastnosťami charakterizujúcimi jeho kvalitu má mať z hľadiska užívateľa istú časovú trvanlivosť. V priebehu vývoja a počas technického života výrobku sa táto trvanlivosť overuje a potvrdzuje spravidla štatistickými metódami. Pojem kvality sa rozvíja do jeho pridruženého pojmu prevádzková spoľahlivosť. Pojem kvality výrobku tým nadobúda teda aj svoj časový rozmer.

V súčasnosti sa v lesnej ťažbe používajú v čoraz väčšej miere rôzne typy lesných ťažbových strojov. Tieto stroje sú charakterizované zložitým technologickým vybavením, ktorého vývoj predstavuje z technického a ekonomického hľadiska zložitú úlohu. V tejto súvislosti prebieha v posledných rokoch výskum možností riešenia spoľahlivosti a prevádzkyschopnosti týchto strojov.

Zabezpečovanie spoľahlivosti výrobku so všetkými jeho aspektmi vyžaduje systém založený minimálne na systéme údržby. Potom údržba nie je cieľom, ale prostriedkom na dosiahnutie cieľa.

LITERATÚRA

1. ARTEMIEV, J. N., HRUBEC, J. 1984. *Prevádzková spoľahlivosť poľnohospodárskych strojov*. Bratislava: PRÍRODA, 1984. 204 s.
2. DVOŘÁK, J., ULRICH, R. 2004. *Harvestorové technologie a podmínky pro jejich nasazení v lesním hospodářství*, In: Harvestorové technologie v lesním hospodářství v rámci programu SAPARD, Kostelec nad Černými lesy: ČZU v Praze, 2004, s. 25–37. ISBN 80-213-1154-1.
3. DVOŘÁK, J., MALÍK, V. 2007. *Harvesterové technologie a vliv na lesní porosty*. Praha: Lesnická práce s. r. o., 2007. 84 s. ISBN 978-80-86386-92-8.
4. LUKÁČ, T. 2005. *Viacoperačné stroje v lesnom hospodárstve*. Zvolen: Vydavateľstvo TU vo Zvolene, 2005. 137 s. ISBN 80-228-1348-6.
5. MOUBRAY J. 1997. *Reliability-centred Maintenance* (2nd ed.). London: Butterworth Heinemann, 1997. 652 s. ISBN 80-1562-458-0.
6. MYKISKA, A. 2006. *Bezpečnost a spolehlivost technických systémů*. Praha: ČVUT v Praze, 2006. 206 s. ISBN 80-0102868-2.
7. PAČAIOVÁ, H. 2006. *Riadenie údržby (Vývoj, stratégie, postupy a metódy v rámci integrovaných systémov manažérstva)*. Košice: TU v Košiciach, Katedra bezpečnosti a kvality produkcie, Strojnícka fakulta, 2006. 127 s. ISBN 978-80-8073-751-1.
8. RÓNAY, E., DEJMAL, J. 1991. *Lesná ťažba*. Bratislava: Západoslovenské tlačiarne, z.p. 1991. 359 s. ISBN 80-07-00432-7.

Kontaktná adresa:

Ing. Ján Kováč, PhD.

Ing. Katarína Kováčová,

Katedra lesnej a mobilnej techniky, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky,

Technická univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen,

E-mail: kovac@vsld.tuzvo.sk, kzaborska@gmail.com

ANALYSIS OF THE FRICTIONAL COEFFICIENT AT THE PULLING LOAD ON THE TILTED PLAIN

ANALÝZA SÚČINITEL'A TRENIA PRI ŤAHANÍ BREMENA NA NAKLONENEJ ROVINE

Ján KOVÁČ – Martin REMPER – Jozef KRILEK

ABSTRACT: The part of gravity acting on timber is transferred on the pad while pulling on a the tilted plain. It is necessary to overtake the appropriate part of gravity and frictional force while moving. The article shows the problem of static parameter for skidding friction, which significantly influences the size and course of pulling force in the cable while pulling a load from the scrub.

Key words tensile: pulling force, steel ropes, frictional coefficient, cable systems

ABSTRAKT: Pri ťahaní dreva po naklonenej rovine sa prenáša časť tiaže dreva na podložku. Pri pohybe je potrebné prekonať príslušnú zložku tiaže a treciu silu dreva. Článok poukazuje na problematiku zisťovania statického súčiniteľa šmykového trenia, ktorý do značnej miery ovplyvňuje veľkosť a priebeh ťažnej sily v lane pri vyťahovaní kmeňa z porastu.

Kľúčové slová: ťahová sila, oceľové laná, súčiniteľ trenia, lanové systémy

1. ÚVOD

Dôležitou a zložitou fázou ťažbovo-dopravného procesu pri výrobe dreva sa považuje jeho sústreďovanie. Okrem iného je to aj preto, že pri sústreďovaní sa musí prekonať množstvo prekážok s ťažkým bremenom, čo často spôsobuje poškodenie stojaceho porastu a vznikajúceho podrastu (HNILICA, R., DADO, M., KUČERA, M., 2010).

Aj napriek množstvu negatívnych vplyvov v dnešnej dobe sa stále v najväčšej miere používa technológia približovania za pomoci LKT alebo UKT v zapojení s lanovými navijakmi (Tabuľka 1).

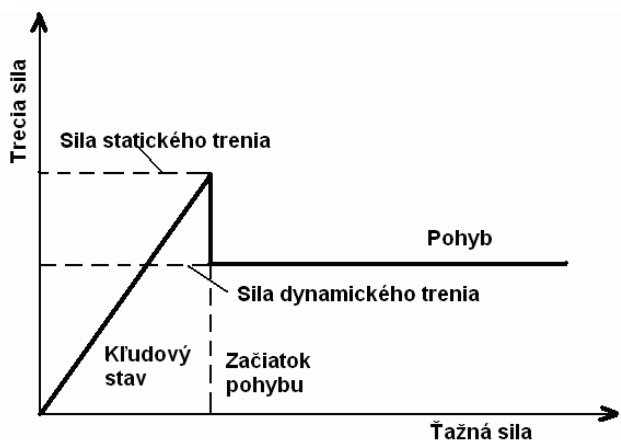
Lanové navijaky pracujú na jednoduchom princípe pôsobenia ťahovej sily prostredníctvom lana na bremeno, ktoré je následne približované. Z hľadiska návrhu konštrukcie, inovácie alebo optimalizácie lanového navijaka je dôležité poznať faktory, ktoré ovplyvňujú vznik, veľkosť a priebeh ťažnej sily. Jeden z faktorov ovplyvňujúcich veľkosť ťažnej sily je súčiniteľ trenia, a to medzi bremenom a podložkou.

Tabuľka 1 Podiel sústred'ovania drevnej hmoty v štátnych organizáciách (REMPER, M., 2010)

Sústred'ovacie prostriedky		Rok (%)				
		1995	2000	2005	2006	2007
Kone		3,4	11,8	2,7	25,9	0,4
Navijaky prenosné a samohybné		–	0,03	–	–	–
Lesnícke lanovky		1,4	2,5	13,9	2,9	21,3
Traktory	pásové	1,5	–	0,1	–	–
	univerzálne kolesové	30,7	14,0	22,0	30,1	4,9
	lesnícke kolesové	62,8	68,5	62,2	25,0	59,0
Vyvážacie súpravy		0,2	0,6	0,9	15,8	14,4

1.1 Trenie medzi stykovými plochami

Z obrázku 1 plynie známa skutočnosť z praxe, že ak ťaháme bremeno, musíme naň pôsobiť značne vyššou silou, kým sa neuvedie do pohybu. Po prekonaní určitej maximálnej sily pri ktorej sa dá bremeno do pohybu je sila, potrebná k jeho ďalšiemu pohybu už menšia (TUHÁRSKY, J., HOLÝ, T., REMPER, M., 2010).



Obrázok 1 Ideálny stav závislosti sily trenia (súčiniteľa trenia) na ťažnej sile (čase)

Trecia sila nezávisí od plošného obsahu styčných plôch, ale závisí od ich akosti. V lesníckej praxi sú to najmä typy podložka a druh dreviny (povrchová drsnosť kmeňa). Teleso pôsobí na podložku normálovou silou F_n , ktorá je kolmá na podložku. Ak je podložka vodorovná, normálová sila sa teda rovná tiaži telesa. Veľkosť trecej sily je priamo úmerná veľkosti normálovej sily (BOROŠKA, J., HULÍN, J., LESŇÁK, O., 1982):

$$F_t = f \cdot F_n \quad (1)$$

kde f – súčiniteľom šmykového trenia.

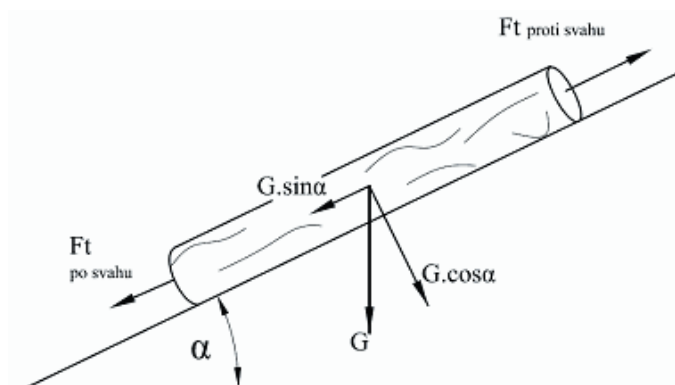
Súčiniteľ trenia je väčší pri drsných plochách, a menší pri hladkých plochách. Je tiež závislý od rýchlosti akou sa telesá po sebe posúvajú, ale vo všeobecnosti sa považuje za konštantný. Pri zvyšovaní rýchlosti sa súčiniteľ trenia znižuje. Sila potrebná na uvedenie telesa do pohybu je vyššia ako sila, ktorá teleso udržuje v rovnomernom pohybe. Z čoho vyplýva, že v pokoji pôsobí medzi telesom a podložkou statický súčiniteľ trenia. Pokiaľ sa telesá voči sebe pohybujú pôsobí medzi nimi dynamický súčiniteľ trenia, ktorý je nižší ako statický.

1.2 Rozbor síl pri ťahaní bremena

Kľúčovou výrobnou fázou v lesníctve je sústreďovanie dreva, ktorého prvú časť tvorí vyťahovanie dreva z porastu na približovaciu linku (cestu). Druhú časť tvorí približovanie dreva z miesta vytiahnutia na lesný sklad (odvozné miesto). Pri sústreďovaní dreva sa musí prekonať veľa prekážok s ťažkým bremenom, pričom sa často poškodzuje okolitý stojaci porast, následný podrast a narušením pôdy vlečeným kmeňom vzniká tzv. ťažbovo-dopravná erózia (MIKLEŠ, M. – MARKO, J., 1992, MIKLEŠ, M., HOLÍK J., 2003).

Pri návrhu konštrukcie lanového systému pre približovanie kmeňov sa vychádza z rozboru síl pri vlečení kmeňov po, resp. proti svahu, za hrubší alebo tenší koniec, v polozávese alebo vlečení. Veľkosť ťažnej sily je ovplyvnená nie len veľkosťou bremena a stúpavosťou terénu, ale aj súčiniteľom trenia.

Tiaž kmeňa G sa na svahu rozkladá na sily, kolmú a rovnobežnú s terénom. Rozklad síl pri pohybe na svahu je znázornený na obrázku 2.



Obrázok 2 Pôsobenie síl pri ťahaní bremena po svahu (HOREK, P., 2007)

Výpočet ťažnej sily pri ťahaní proti svahu potom môžeme odvodiť nasledovne:

$$F_t = G \cdot (\sin \alpha + f_v \cdot \cos \alpha) \quad (2)$$

kde F_t – ťažná sila (N),

G – tiaž kmeňa (N),

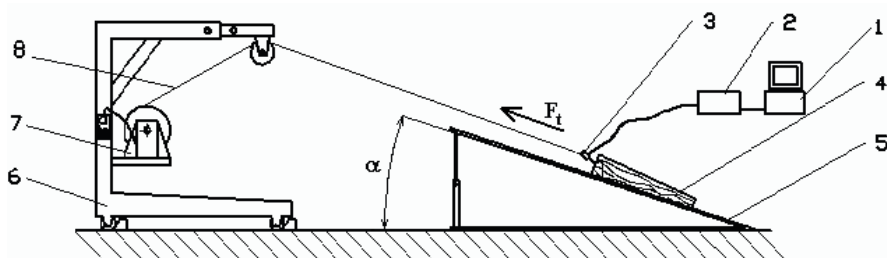
α – uhol sklonu svahu (°),

f_v – súčiniteľ trenia pri vlečení (–).

Sila F_t (N) je ovplyvnená aj veľkosťou trenia medzi povrchom terénu a povrchom kmeňa. Súčiniteľ trenia nadobúda rôzne hodnoty podľa charakteru pôdneho povrchu (povrchu podložky).

2 MATERIÁL A METÓDY

Na meranie ťahových síl v oceľových lanách bolo vyvinuté experimentálne meracie zariadenie v rámci riešenia projektu IPA č. 07/09. Zariadenie (Obrázok 3) počas svojej činnosti sníma veľkosť ťahovej sily pôsobiacej v lane pri simulovanom procese približovania dreva. Ako nosný prvok slúži vhodne upravený hydraulický dielenský žeriav 6, na ktorom je upevnený elektrický lanový navijak, slúžiaci na vytvorenie ťahovej sily v oceľovom lane 8, ktoré zabezpečuje približovanie bremena 4. Naklonená rovina s meniteľným uhlom sklonu 5, zabezpečuje simuláciu rôznej svažitosti (svahové podmienky), čím umožňuje skúmať rôzne závislé parametre na sklone podložky. Na meranie a vyhodnotenie ťahovej sily v lane je použitý snímač ťahovej sily 3, ktorého výstupný signál následne spracuje vo vyhodnocovacom zariadení 2 a zaznamená sa na harddisk osobného počítača 1. Tieto údaje sú spracované pomocou softvéru OM-Link.

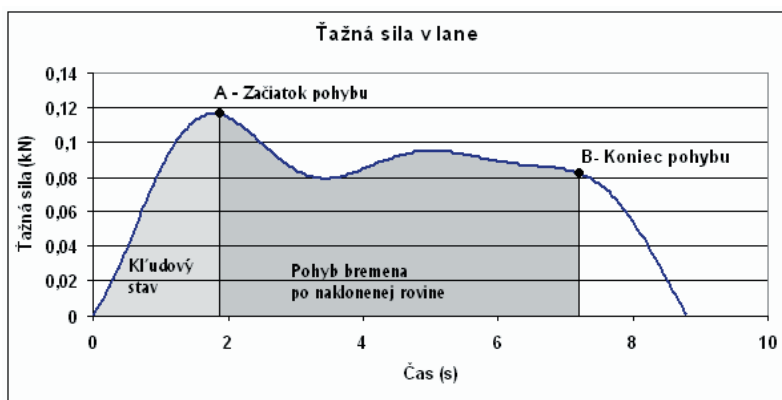


Obrázok 3 Schéma experimentálneho meracieho zariadenia pre meranie ťahových síl v oceľových lanách

Na zistenie statického súčiniteľa trenia boli použité dve meracie vzorky drevn buk a smrek o rozmeroch $\varnothing 0,16 \times 1,5$ m. Tiaž bukovej vzorky bola 193 N a smrekovej vzorky 126 N. Jednotlivé merania prebiehali pri sklone $\alpha 0^\circ, 12,5^\circ$ a 25° . Ťažné lano a povrch naklonenej roviny bol vo všetkých meraniach rovnobežný.

Výkonaný experiment sa zaoberá problematikou zisťovania statického súčiniteľa šmykového trenia, ktorý ovplyvňuje veľkosť a počiatočný priebeh ťažnej sily pri vyťahovaní kmeňa z porastu, čo dokazuje jeho matematické vyjadrenie vzorec 2. Zo všeobecného

záznamu získaného na meracom zariadení je možné vidieť priebeh ťažnej sily pri vlečení bremena na vzdialenosť 3,5 m (Obrázok 4). Ťažná sila narastá až na hodnotu bodu A, kde sa bremeno uvedie do pohybu. Zníženie veľkosti sily je spôsobené prekonaním počiatočného odporu, ktorý je závislý na statickom súčiniteli trenia. Následný pokles ťažnej sily je zapríčinený zmenou statického súčiniteľa trenia na dynamický, ktorého hodnota je výrazne nižšia.

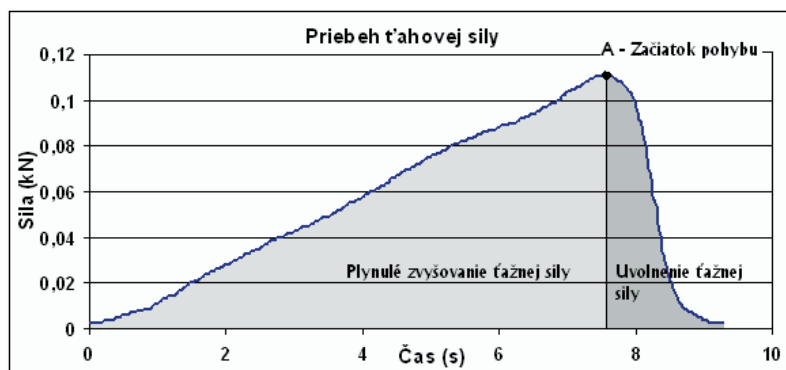


Obrázok 4 Priebeh ťažnej sily pri ťahaní bremena po naklonenej rovine

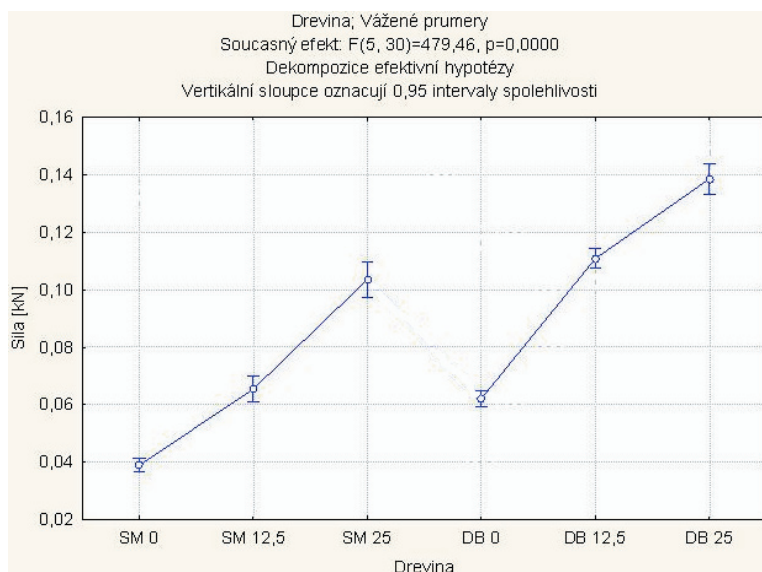
3 VÝSLEDKY A DISKUSIA

Pre správnosť návrhu konštrukcie stroja, napr. lesníckeho navijaka a overovanie statickými výpočtami je dôležité poznať maximálne hodnoty zaťaženia. Aj z tohto dôvodu je nutné poznať a stanoviť veľkosť súčiniteľa statického trenia.

V dôsledku toho bola navrhnutá metodika pre stanovenie statického súčiniteľa trenia. Na bremeno umiestnené na šikmej rovine bola plynule vyvíjaná ťažná sila, do momentu kým sa kmeň nedostal do pohybu. Tento stav opisuje bod A na obrázku 5.



Obrázok 5 Pôsobenie ťahovej sily na bremeno do pohybového stavu bremena



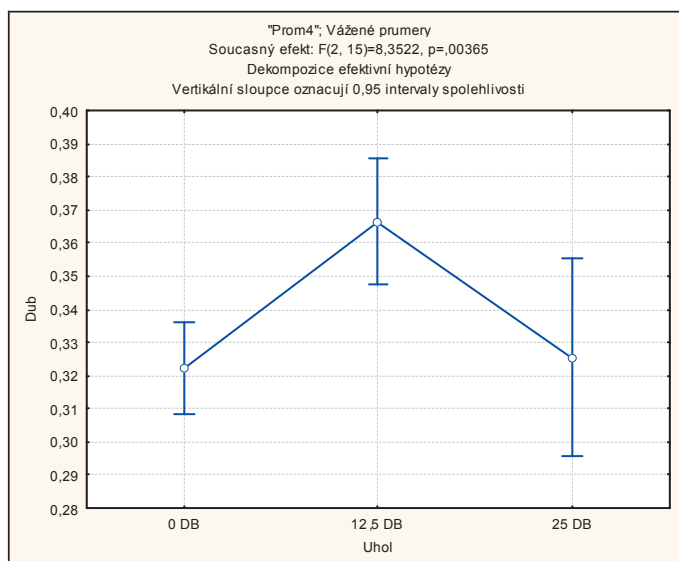
Obrázok 6 Graf priemerných hodnôt ťahových síl pri vlečení oboch drevín so sklonom naklonenej roviny 0°, 12,5°, 25°

Na základe nameraných veľkostí statických ťažných síl, ktoré sa spracovali jednofaktorovou analýzou rozptylu (obrázok 6), sa vypočítali hodnoty súčiniteľa statického trenia (Tabuľka 2). Hodnoty statického súčiniteľa trenia boli podmienené materiálom podložky (drevovláknitá doska) a materiálom meracej vzorky, čo vyplýva z vyššie uvedenej teórie.

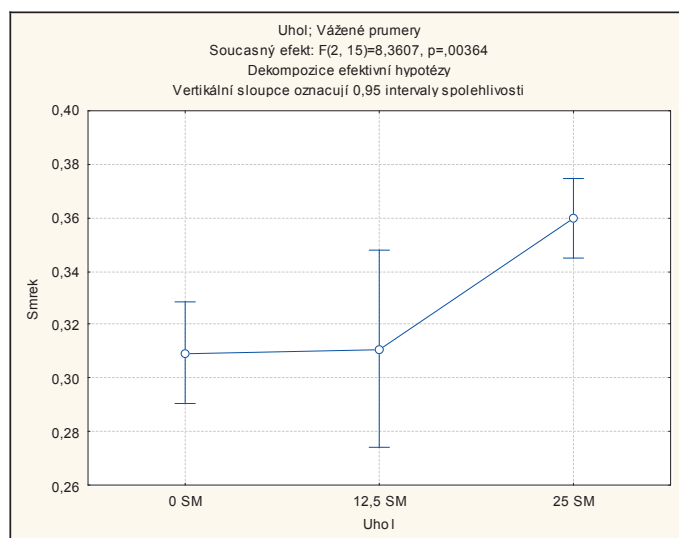
Tabuľka 2 Priemerné hodnoty súčiniteľov statického trenia

Uhol	Súčiniteľ statického trenia		Ťažná sila (kN)	
	Smrek	Dub	Smrek	Dub
0°	0,309	0,322	0,039	0,062
12,5°	0,311	0,367	0,065	0,110
25°	0,359	0,325	0,103	0,138
Priemer	0,327	0,338		

Z dosiahnutých výsledkov vyplýva, že uhol sklonu naklonenej roviny na veľkosť statického súčiniteľa trenia nemá výrazný vplyv. Obrázok 7 a 8 znázorňuje rozptyl zistených hodnôt súčiniteľa trenia vzhľadom na uhol sklonu. K menším rozdielom jednotlivých súčiniteľov, došlo pravdepodobne v dôsledku možného pootočenia meracích vzoriek (kmeňov) na podložke v priebehu ťahania. Uvedené výsledky potvrdzujú známu teóriu šmykového trenia, ktorú možno aplikovať aj v problematike približovania drevnej hmoty za pomoci lanových zariadení.



Obrázok 7 Graf priemerných hodnôt súčiniteľa statického trenia pri vlečení oboch drevín so sklonom naklonenej roviny 0°, 12,5°, 25°



Obrázok 8 Graf priemerných hodnôt súčiniteľa statického trenia pri vlečení oboch drevín so sklonom naklonenej roviny 0°, 12,5°, 25°

ZÁVER

Pri návrhu konštrukcie lesníckeho navijaka je dôležité poznať maximálne hodnoty zaťaženia pri ťahaní bremena (kmeňov). Z tohto dôvodu je nutné poznať a stanoviť veľkosť statického súčiniteľa trenia.

Dosiahnuté výsledky poukazujú na to, že z meniacim sa uhlom sklonu podložky sa statický súčiniteľ trenia mení s minimálnymi rozdielmi, pri ideálnych podmienkach merania (tvar kmeňov, valcovitosť, kužeľovitost'...) by sa tento rozdiel nevyskytoval.

Uvedené meranie a s toho vyplývajúce výsledky sú len čiastkovou úlohou, ktorá sa realizovala na danom experimentálnom zariadení. Pre ďalšie možnosti merania statického súčiniteľa trenia a ostatných parametrov súvisiacich s ťahaním bremena je uvažované do budúcnosti.

LITERATÚRA

1. BOROŠKA, J. – HULÍN, J. – LESŇÁK, O., 1982: Oceľové lana. Alfa Bratislava. 1982. 479 s.
2. HNILICA, R. – DADO, M. – KUČERA, M. 2010: Technológia približovania dreva stavebným lanovým systémom adaptovaným na LKT 82C, In: Kolokvium ku grantovej úlohe č. 1/0221/08 – zborník, Technická univerzita vo Zvolene, 2010. s. 15–26. ISBN 978-80-228-2048-6.
3. HOREK, P., 2007: Lesní lanovky. Lesnícká práce, 2007. 104 s. ISBN 978-80-87154-10-6.
4. MIKLEŠ, M. – MARKO, J., 1992: Teória a stavba lesných strojov I., TU Zvolen, 1992.
5. MIKLEŠ, M. – HOLÍK J., 2003: Lanové dopravné zariadenia. TU vo Zvolene, 2003. 212 s. ISBN 80-228-1291-9.
6. TUHÁRSKY, J. – HOLÝ, T. – REMPER, M., 2010: Pomiar dynamicznego obciążenia kolejek linowych, In: Prace komisji nauk rolniczych, lesnych i weterynaryjnych pau, Polska akademia umiejtnosci, 2010. ISSN 1733-5183.
7. REMPER, M., 2010: Výskum a pevnostná analýza vybraných častí lesníckej lanovky. Dizertačná práca, Zvolen, 2010. FEVT Zvolen.

Kontaktná adresa:

Ing. Ján Kováč, PhD., Ing. Martin Remper, Ing. Jozef Krilek, PhD.,
Katedra lesnej a mobilnej techniky, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky,
Technická univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen,
E-mail: kovac@vsld.tuzvo.sk, mremper@gmail.com, jkrilek@gmail.com

MOŽNOSTI VYUŽITIA LASEROVÉHO ANALYZÁTORA LASERNET FINES-C V TRIBOTECHNICKEJ DIAGNOSTIKE MAZÍV

POSSIBILITY OF USING LASER ANALYZER LASERNET FINES-C IN TRIBOTECHNICAL DIAGNOSTICS LUBRICANTS

Marian KUČERA¹⁾ – Zdeněk ALEŠ²⁾ – Martin PEXA²⁾ – Michaela ČERNEYOVÁ¹⁾

ABSTRACT: Disorder and disruption caused by their machines are caused by a whole range of influences and processes that operate and run directly on machines. These impacts result in changes to the properties of machine parts. In order to determine the state of lubricant and operational parts of machinery, it is possible to use laser particle analyzer LaserNet Fines-C. This device is able to determine types of particles (adhesive, abrasive, fatigue, nonmetallic) freely spread in lubricant. Besides that it is possible to get information about cleanliness code of analyzed lubricant. At the same time the number and size of particles is considered the state of wear of the machine, which can predict breakdown of the machine or influence of the production accuracy of particular equipment. The paper describes examples of lubricant analysis motor and transmission oil.

Keywords: particle counter, lubricants, wear, cleanliness code

ABSTRAKT: Poruchy a nimi vyvolané prerušenia prevádzky strojov sú spôsobené celou radou vplyvov a procesov, ktoré pôsobia a prebiehajú priamo v strojoch. Tieto vplyvy majú za následok zmeny vlastností strojných súčastí. Pre hodnotenie stavu olejových náplní a častí strojného zariadenia je použitý moderný laserový analyzátor častíc LaserNet Fines-C. Zariadenie analyzuje vyšetrované mazivo a v ňom unášané častice klasifikuje do skupín na adhezívne, abrazívne, únavové a nekovové častice. V závislosti na zistenom počte častíc stanovuje analyzovanej vzorke olejovej náplne kód čistoty. Súčasne sa podľa počtu a rozmeru jednotlivých sledovaných častíc posudzuje stav opotrebenia strojného zariadenia, čím je možné predikovať blížiacu sa haváriu stroja alebo ovplyvnenie presnosti výrobného zariadenia. V predloženom príspevku sú uvedené príklady rozborov motorového a prevodového oleja.

Kľúčové slová: čítač častíc, mazivá, opotrebenie, kód čistoty

1 ÚVOD

Sledovanie technického stavu strojov (napr. motorov) založené na analýze oleja je mimoriadne dôležité pre optimalizáciu riadenia údržby. Produkty opotrebenia a znečistenia

použitého oleja dávajú relatívne komplexné informácie pre prehliadky, nápravné opatrenia a údržbu [1].

Opotrebenie je nežiadúca zmena povrchu alebo rozmerov tuhých telies spôsobená buď vzájomným pôsobením funkčných povrchov alebo funkčného povrchu a média, ktoré opotrebenie vyvoláva. Prejavuje sa odstraňovaním alebo premiestňovaním častíc hmoty z funkčného povrchu mechanickými účinkami (niekedy sprevádzanými i inými vplyvmi napr. chemickými, elektrochemickými). Norma STN 01 50 50 pozná šesť základných druhov opotrebenia; adhezívne, abrazívne, erozívne, kavitačné, únavové a vibračné (ďalej sú popísané iba opotrebenia, ktoré dokáže vyhodnotiť použitý laserový analyzátor LaserNet Fines-C).

Adhezívne opotrebenie je charakterizované oddeľovaním a premiestňovaním častíc materiálu v miestach, v ktorých dochádza pri vzájomnom pohybe k tesnému priblíženiu stykových plôch. Častice vytrhávané z materiálu môžu naspäť prilnúť k 1. alebo 2. funkčnému povrchu alebo pohybovať sa medzi funkčnými povrchmi. Adhezívne opotrebenie je najčastejším spôsob opotrebenia súčiastok. Prejavuje sa ako zadretia. Preto na adhezívne opotrebenie má zásadný vplyv prítomnosť maziva medzi funkčnými plochami. Ak hrúbka maziva prekročí súčet najväčších výšok nerovností oboch povrchov – proces adhezívneho opotrebenia zaniká [2].

Abrazívne opotrebenie je charakterizované oddeľovaním častíc z funkčného povrchu účinkom tvrdého a drsného povrchu druhého telesa. Typickým poškodením povrchu pri abrazívnom opotrebení sú ryhy. Opotrebenie je tým menšie, čím je tvrdší funkčný povrch [4].

Únavové opotrebenie je charakterizované kumuláciou (hromadením) poškodenia v povrchovej vrstve materiálu pri cyklickom namáhaní. V povrchovej vrstve, napr. v mieste oslabenia prierezu, vznikne trhlinka, ktorá sa opakovaným cyklickým namáhaním šíri, až dochádza k únavovému lomu [3].

Ako je teda možné zisťovať u strojov o aký druh opotrebenia sa jedná, keď ho nemôžeme pravidelne celý demontovať a kontrolovať jeho jednotlivé časti? Jednou z možností je analýza olejovej náplne, ktoré je v kontakte s funkčnými plochami súčastí a z týchto miest vynáša častice opotrebovania. Na základe vhodnej analýzy (napríklad za použitia laserového analyzátoru častíc LaserNet Fines-C) je možné zistiť, aký druh opotrebovania na funkčných plochách súčastí prebieha a či hrozí havarijná porucha. V príspevku je uvedený príklad analýzy motorového oleja Mogul GX-FE 10W-40 z motora po celkovej generálnej oprave a štandardného prevodového oleja na ropnom základe Gyrogate PP 90 z koncových prevodov kolesového traktora.

2 MATERIÁL A METÓDY

2.1 Analyzátor častíc LaserNet Fines-C (LNF-C)

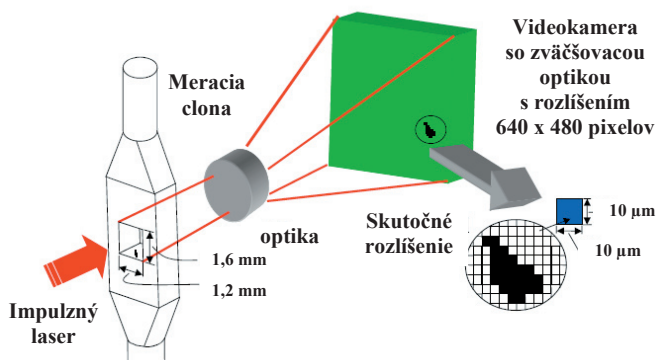
Pre stanovenie počtu a druhu častíc v oleji sa používa stolný laserový čítač a klasifikátor častíc LNF-C. Tento analytický prístroj je schopný analyzovať hydraulické kvapaliny a mazacie oleje z rôznych typov strojov a zariadení a na základe týchto analýz posúdiť ich aktuálny technický stav a navrhnúť prípadné opatrenia týkajúce sa ich údržby. Toto

sledovanie je založené na vyhodnotení morfológie a počtu častíc opotrebovania, ktoré vznikajú pri prevádzke strojov a zariadení. LNF-C sa skladá z dvoch komponentov. Prvou časťou je samotný analyzátor, ktorý analyzuje odobranú vzorku (obr. 1). Druhou časťou je osobný počítač, ktorý je potrebný pre analytické vyhodnotenie dát z analyzátora.



Obr. 1 Analyzátor častíc LaserNet Fines-C (LNF-C)

Činnosť LNF-C je založená na technológií, ktorá v sebe zlučuje zobrazenie s využitím laserového lúča a inteligentný program na báze neurónových sietí pre charakterizáciu oterových častíc a iných mechanických kontaminantov. Z mazacieho systému sa odoberá reprezentatívna vzorka oleja k analýze, ktorá prechádza meracou clonou. Tá je ožarovaná impulznou laserovou diódou, ktorá zachytí pohyb častice v intervale 1 až 350 μ s. Obraz sníma videokamera so zväčšovacou optikou. Za 1 sekundu sa zaznamená 30 obrazov (obr. 2). Tieto obrazy sú potom vyhodnocované inteligentným programom, ktorý určí typ častíc a histogram početností výskytu častíc jednotlivých tried [5].



Obr. 2 Princíp činnosti laserového analyzátora LNF-C

Príprava vzorky oleja pre analýzu spočíva v dokonalom pretrepaní a odstránení vzduchových bublín v ultrazvukovom kúpeľi. Po vybratí vzorky z kúpeľa a zadaní potrebných

údajov o analyzovanej vzorke do počítača sa uskutoční analýza. Vlastná analýza trvá približne tri minúty a po vyhodnotení analyzovanej vzorky je obsluhu analyzátora zobrazený výsledok analýzy. Výsledok analýzy poskytuje komplexnú informáciu o:

- analýze tvaru oterových častíc a ich identifikáciu,
- množstve častíc v rozmedzí od 4 do 100 μm ,
- kategorizácii vzorky podľa kódu čistoty na základe hodnotenia podľa noriem NAS 1638, ISO 4406 : 1999, NAVAIR 01-1A-17, SAE AS4059, (software umožňuje i vlastné nastavenie sledovaných veľkostných rozsahov častíc),
- klasifikácia častíc väčších než 20 μm (adhezívne, abrazívne, únavové, nekovové),
- obsahu sadzí a vody.

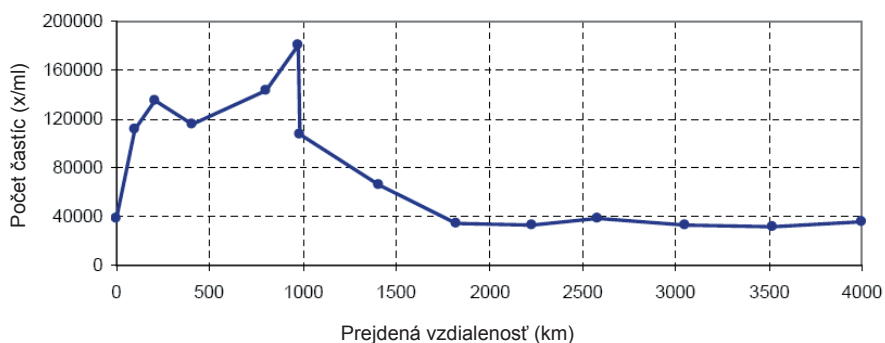
3 VÝSLEDKY A DISKUSIA

Prvý experiment je zameraný na sledovanie motorového polysyntetického oleje Mogul GX-FE 10W-40 (API SL/CF) v motore po celkovej generálnej oprave. Bližšia špecifikácia sledovaného oleja je uvedená v tabuľke 1.

Tab. 1 Technická špecifikácia motorového oleja

Vlastnosť	Mogul GX-FE
Hustota pri 20 °C	0,868 g.cm ⁻³
Kinematická viskozita pri 100 °C	13–16 mm ² .s ⁻¹
Bod vzplanutia	210 °C
Teplota tuhnutia	–27 °C
Výkonnostná špecifikácia API	SL/CF

Vývoj počtu častíc v oleji je uvedený na obrázku 3 po odjazdených 4000 km, kedy prebiehal zábeh. Z obrázku 3 je zrejmé, že v priebehu prvých 1000 km dochádza k prudkému nárastu počtu častíc, kedy dochádza k výraznému opotrebeniu motoru v priebehu zábehu. Po prvých 1000 km bola uskutočnená výmena oleja. Po ďalších 1000 km sa počet častíc ustálil (prebehla najintenzívnejšia fáza zábehu motora). Nasledujúcich 2000 km už motor vykazuje konštantný priebeh celkového počtu častíc. Uvedený trend korešpondoval s pôvodnou hypotézou, iba je treba doplniť, že opotrebovanie prebieha ďalej v oveľa menšej intenzite a na konštantnom priebehu sa premieta tiež priebežné filtrovanie motorového oleja. Z hľadiska motorového oleja sú dôležité tiež informácie o množstve vody a sadzí. Množstvo vody bola za prvých 4000 km neustále 0 ppm a u sadzí sa to v posledných 1000 km zmenilo z 0 na 0,01 %.



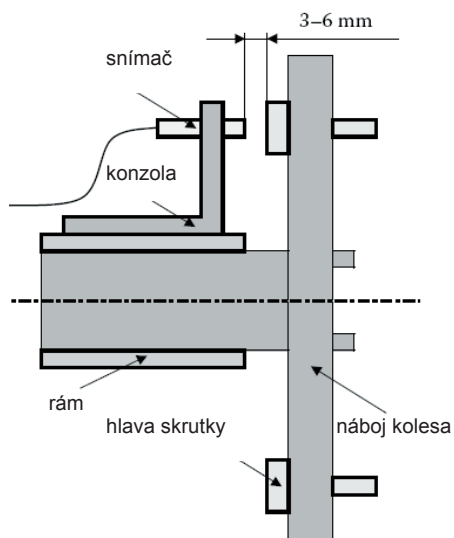
Obr. 3 Vývoj celkového počtu častíc motorového oleja Mogul GX-FE

Druhý experiment, pri ktorom bol použitý laserový analyzátor častíc LNF-C bol zameraný na vyhodnocovanie množstva častíc v prevodovom oleji na ropnej báze v závislosti na dobe prevádzky koncového prevodu kolesového traktora. Pre presné meranie doby prevádzky koncového prevodu bol použitý palubný počítač MPH II (obr. 4).



Obr. 4 Palubný počítač MPH II

Toto zariadenie dokáže zaznamenávať aktuálne dáta o prejdenej vzdialenosti mobilného energetického prostriedku. Celé meracie zariadenie sa skladá zo snímača otáčok, konzoly pre uchytanie snímača otáčok, palubného počítača a elektrickej inštalácie. Pri montáži snímača na energetický prostriedok je potrebné dodržať predpísanú vôľu medzi snímačom a hlavou skrutky (obr. 5).



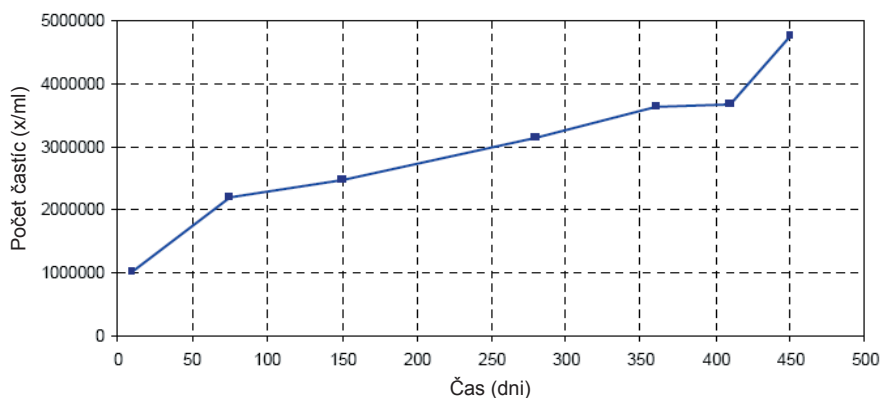
Obr. 5 Zapojenie snímača otáčok na energetický prostriedok

V koncovom prevode kolesového traktora bol použitý štandardný prevodový olej Gyrogate PP 90. Jeho bližšia technická špecifikácia je uvedená v tabuľke 2. V priebehu celého experimentu bola zaznamenávaná doba prevádzky koncového prevodu, ktorá je vyjadrená ako prejdená vzdialenosť kolesového traktora. Koncový prevod bol sledovaný 450 dní, čo predstavuje prejdenú vzdialenosť cca 7000 km.

Tab. 2 Technická špecifikácia prevodového oleja na ropnom základe

Vlastnosť	Gyrogate PP 90
Hustota pri 20 °C	0,880–0,950 g.cm ⁻³
Kinematická viskozita pri 40 °C	145,0–150,0 mm ² .s ⁻¹
Kinematická viskozita pri 100 °C	14,5 mm ² .s ⁻¹
Bod vzplanutia	240 °C
Teplota tuhnutia	–28 °C
Viskozitný index	95
Výkonnostná špecifikácia API	GL-4

Celkom bolo uskutočnených sedem odberov vzoriek prevodového oleja a tieto vzorky boli podrobené analýze. Výsledky analýz reprezentované celkovým počtom častíc sú uvedené na obr. 6.



Obr. 6 Vývoj celkového počtu častíc prevodového oleja PP 90

ZÁVER

Laserový analyzátor častíc umožňuje analyzovať častice opotrebovania v pracovných kvapalinách strojov a ich kvantifikáciu do rôznych tried podľa veľkosti a druhu opotrebovania v krátkom čase so záverom o kóde čistoty.

Priklad rozboru motorového oleja bol sledovaný v motore po generálnej oprave. Úplne zrejmé je postupný nárast opotrebovania v prvej fáze zábehu a naopak po ukončení intenzívnom zábehu je viditeľné ustálenie opotrebovania (počtu častíc). V prípade rozboru prevodového oleja z nameraných dát vyplýva, že v priebehu experimentu došlo k takmer päťnásobnému nárastu celkových častíc. Na základe týchto výsledkov je možno posúdiť, či je potrebné olejovú náplň pracovného stroja vymeniť. Uvedené výsledky analýz olejov z LNF-C sú prezentované iba v meradle celkového počtu častíc. Analyzátor však umožňuje oveľa podrobnejšie a presnejšie rozbor, ktoré slúžia k detailnejšej diagnostike maziva.

LITERATÚRA

- [1] SCHERGE, M. – MARTIN, J. M. – PÖHLMANN, K. Characterization of wear debris of systems operated under low wear-rate conditions. In: *Wear* 260 (2006), pp. 458–461. ISSN 0043-1648.
- [2] TUNG, C. S. – MCMILLAN, M. L. Automotive tribology overview of current advances and challenges for the future. In: *Tribology International*, 2004, The New Trends and Frontiers in Tribology, pp. 517–536. ISSN 0301-679X.
- [3] POŠTA, J. Provozuschopnost strojů. ČZU v Praze, 2. vydání, Praha, 2006. ISBN 80-213-0966-0.
- [4] KRŽAN, B. – VIŽITIN, J. Tribological properties of an environmentally adopted universal tractor transmission oil based on vegetable oil. In: *Centre for Tribology and Technical Diagnostics*, University of Ljubljana, 2003, Slovenia, 827–833. ISSN 1221-4590.

- [5] SMITH, M. Oil analysis vs. microscopic debris analysis: When and Why to Choose, In: Practicing Oil Anal. Mag. (5) (2004).

Kontaktná adresa:

¹⁾ doc. Ing. Marian Kučera, Ph.D., Ing. Michaela Černeyová,
Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky,
Technická univerzita vo Zvolene, Študentská 26, 960 53 Zvolen,
Slovenská republika, e-mail: kucera@vsld.tuzvo.sk

²⁾ Ing. Zdeněk Aleš Ph.D., Ing. Martin Pexa Ph.D.,
Technická fakulta, Česká zemědělská univerzita v Praze,
Kamýcká 129, 16500 Praha 6-Suchbát, e-mail: ales.zdenek@email.cz

ELEKTRICKÉ CHARAKTERISTIKY MODIFIKOVANÝCH DREVOCEMENTOVÝCH DOSIEK V PÁSME NÍZKYCH FREKVENCÍ

ELECTRIC CHARACTERISTICS OF MODIFIED WOODCEMENT BOARDS IN BAND OF LOW FREQUENCY

Ivan MAKOVÍNY – Ľubomír PAVLÍK

ABSTRACT: In the development of modified wood-cement composites (WCC) designated for the purpose of shielding electro-magnetic radiation the significant role play frequency characteristics of conductivity, loss number and permittivity. Those characteristics were investigated by the bridge method in band of low frequency (100 Hz–20 kHz) at various carbon concentrations. There was reached significant increase in mentioned characteristics by rising of carbon concentration.

Key words: carbon, electric characteristics, band of low frequency, wood-cement composites

ABSTRAKT: Pri vývoji modifikovaných drevoementových kompozitov (DCK), určených na tienenie elektromagnetických polí, majú významnú úlohu frekvenčné charakteristiky konduktivity, stratového čísla a permitivity. Tieto charakteristiky sme zisťovali mostíkovou metódou v pásme nízkych frekvencií (100 Hz až 20 kHz) pri rôznych koncentráciách uhlíka. S rastúcou koncentráciou uhlíka sa sledované charakteristiky rádozo zvyšovali.

Kľúčové slová: elektrické charakteristiky, nízke frekvencie, drevoementové kompozity, uhlík

ÚVOD

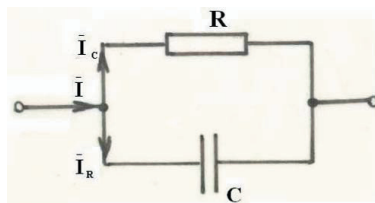
Drevoementové kompozitné (DCK) dosky sa v stavebnej praxi úspešne používajú ako materiál s výbornými tepelnoizolačnými a zvukovo izolačnými vlastnosťami. DCK dosky sa výhodne aplikujú na vonkajšie obklady budov a tiež vnútorné obklady stien. Správanie sa DCK v elektromagnetickom poli závisí od dielektrických vlastností, preto je dôležité ich poznať. Modifikovaním ich elektrických vlastností je možné dosiahnuť vysoké hodnoty ich útlmových vlastností pre elektromagnetické žiarenie na širokom pásme frekvencií. Pre tento účel boli DCR modifikované použitím elektricky vodivej prísady – práškovým uhlíkom.

Cieľom tejto práce bolo skúmanie vplyvu rôznych koncentrácií uhlíka na elektrickú vodivosť a dielektrické vlastnosti modifikovaných drevocementových kompozitov v pásme nízkych frekvencií.

Fyzikálne základy merania elektrických vlastností v pásme nízkych frekvencií

Drevocementové dosky z drevnej vlny predstavujú izolanty s nízkymi hodnotami elektrofyzikálnych vlastností. Merná jednosmerná elektrická vodivosť je menšia ako 10^{-9}S.m^{-1} . Použitie elektricky vodivých prísad útlmu drevných aglomerovaných materiálov sa aplikovalo na zlepšenie – preglejok drevotrieskových dosiek (Nagasawa et al. 1989, 1993). (Wang et al. 2006 a Wang – LiLui et al. 2006). V pásme nf frekvencií platí, že dielektrické vlastnosti: relatívna permitivita ϵ' a stratové číslo ϵ'' dosahujú veľkosť len o málo vyššiu ako jedna. Modifikovaným DCK práškovým uhlíkom, ktorý má vysokú elektrickú vodivosť (Makoviny 2008) sa dajú elektrofyzikálne vlastnosti podstatne zvyšovať. Správanie sa DCK v elektromagnetickom poli závisí od dielektrických vlastností.

Po vložení DCK do striedavého elektrického poľa prebiehajú v tomto materiáli v závislosti od frekvencie relaxačné a deformačné polarizačné deje. Striedavá vodivosť materiálu – DCK – admitancia $\bar{Y}$, sa dá vyjadriť z náhradného obvodu zo stratového kondenzátora dielektrikom.



Obr. 1 Náhradný elektrický obvod kondenzátora na so stratovým dielektrikom – DCK, C – kapacita a R – ohmický odpor

Pre admitanciu pre obvod podľa obr. 8.5 platí vzťah

$$\bar{Y} = \frac{1}{R} + \frac{1}{-jX_C} = G - jB \quad (1)$$

kde R je odpor, X_C – kapacitná reaktancia, G – konduktancia, B – susceptancia.

Pre prípad doskového kondenzátora s plochou elektródou S , vzdialenosťou elektród h , relatívnou komplexnou permitivitou ϵ^* , pričom platí $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$.

Platí, že elektrická kapacita bude

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon' \cdot \frac{S}{h} = \frac{\gamma''}{\omega} \cdot \frac{S}{h} \quad (2)$$

resp. elektrický odpor

$$R = \frac{1}{\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon''} \cdot \frac{h}{S} = \frac{1}{\gamma'} \cdot \frac{h}{S} \quad (3)$$

úpravou rovnice (1) a použitím vzťahu (2) a (3) dostaneme

$$\bar{Y} = -j\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon^* \cdot \frac{S}{h} = \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'' \cdot \frac{S}{h} - j\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon' \cdot \frac{S}{h} = \gamma' \cdot \frac{S}{h} - j\gamma'' \cdot \frac{S}{h} = \gamma^* \cdot \frac{S}{h} \quad (4)$$

kde γ^* je komplexná, striedavá konduktivita, γ' – činná zložka komplexnej konduktivity a γ'' – jalová zložka komplexnej konduktivity. Pre vzájomný vzťah veličín ε^* a γ^* platí

$$\gamma^* = \gamma' - j\gamma'' = \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'' - j \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon' \quad (5)$$

potom platí tiež

$$\gamma' = \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'' = 2\pi f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'' \quad (6)$$

$$\gamma'' = \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon' = 2\pi f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon' \quad (7)$$

Použitím rov. (5) a (7) môžeme rozpísať zložky admitancie rov. (4) nasledovne

$$G = \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'' \cdot \frac{S}{h} = 2\pi f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'' \cdot \frac{S}{h} \quad (8)$$

resp.

$$B = \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon' \cdot \frac{S}{h} = 2\pi f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon' \cdot \frac{S}{h} \quad (9)$$

Keď sa merajú zložky admitancie G a B, tak sa dielektrické ε^* veličiny, ε' , ε'' , resp. $\tan \delta = \varepsilon''/\varepsilon'$, dajú vypočítať podľa rov. (8) a (9).

Meranie v pásme nízkych frekvencií

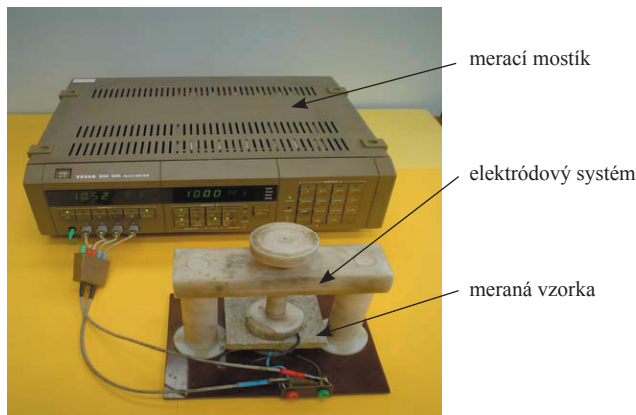
Metóda a materiál

V pásme nízkych frekvencií sme na merania elektrických parametrov kapacity C, konduktancie G, susceptancie B a a impedancie Z, použil mostík BM 595. Je to automatický mikroprocesorom riadený prístroj pre meranie na frekvenciách v rozsahu 100 Hz až 20 kHz.

Z uvedených veličín sme vypočítali veľkosti zložiek komplexnej konduktivity γ' a γ'' a komplexná konduktivita γ a tiež dielektrické vlastnosti permitivity ε' a stratového čísla ε'' .

Na meranie sa použili vzorky DCK s koncentráciou uhlíka 0; 5; 10 a 15 (hm.%).

Pri každej koncentrácii sa meralo 6 ks telies. Meranie susceptancie sa daným prístrojom dalo uskutočniť len na vzorkách s koncentráciou max. 20 hm.% a konduktancie max. do 15 hm.%.

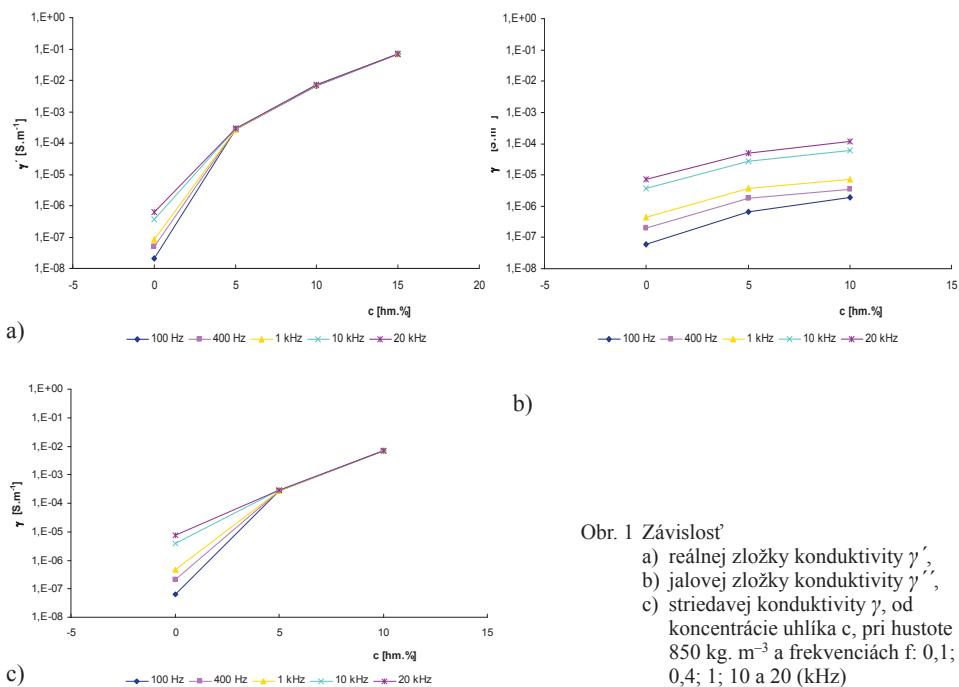


Obr. 2 Meracia aparátúra pre meranie elektrických vlastností materiálov v pásme frekvencií 100 Hz až 20 kHz

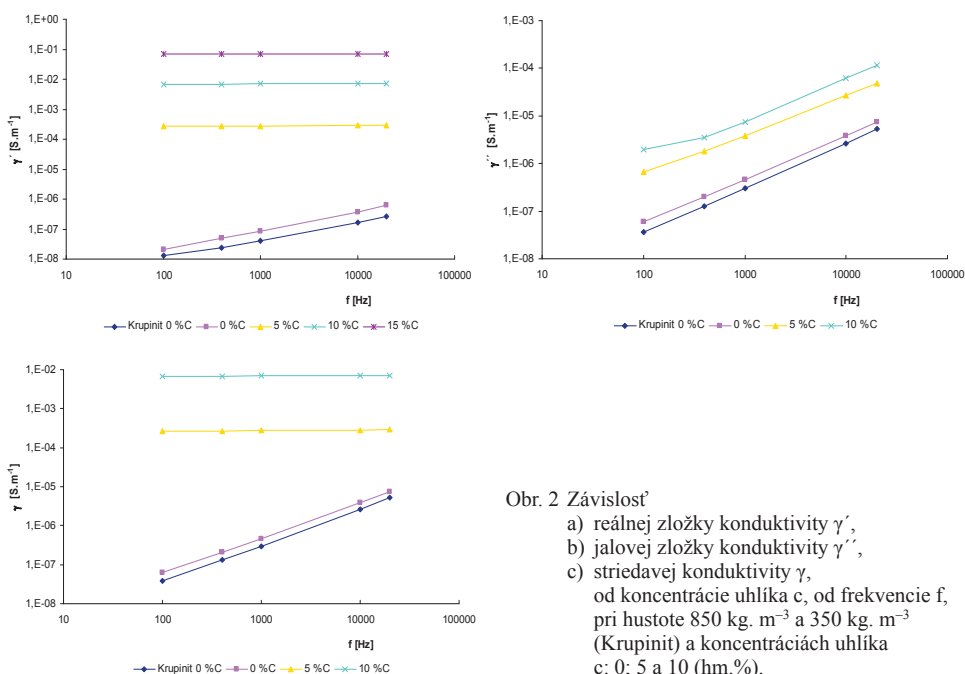
Príprava laboratórnych vzoriek uhlíkom modifikovaných drevocementových dosiek spočívala v tom, že laboratórne sa do foriem nanášala vrstva zo zmesi – drevná vlňa, portlandský cement, práškový uhlík, voda a chlorid vápenatý ktorá sa zalisovala a nechala sa vytvrdnúť. Takto sa pripravovali vzorky o rozmeroch $1000 \times 500 \times 12$ mm. Základná receptúra (hmotnosť cementu, drevnjej vlne a vody) pre výrobu jednej vzorky DCK uvedených rozmerov bola rovnaká, menila sa len koncentrácia uhlíka. Dosky sa vyrábali s rôznou koncentráciou elektricky vodivej prísady – práškového uhlíka 0; 5; 10 a 25 (hm.%) vzťahovanej k hmotnosti cementu. Ako elektrickú vodivú prísadu pre dosiahnutie vysokého celkového vloženého útlmu drevocementovej kompozitnej dosky sme použili zvolili práškový uhlík, priemyselne používaný pri výrobe automobilových pneumatík. Jednosmerná konduktivita uhlíka bola 10^{-1} S.m^{-1} . Vlhkosť vzoriek bola v intervale $6 \div 8$ (%). Na výrobu sme použili drevnú vlňu zo smrekového dreva pozostávajúcu z prúžkov s geometrickými rozmermi $500 \times 5 \times 0,3$ mm. Okrem uvedených vzoriek sa pri koncentráciách uhlíka 0, použili aj vzorky z Krupinitu (komerčne vyrábaná doska), rovnakých geometrických rozmerov s hustotou 350 kg.m^{-3} . Merania elektrických vlastností sa vykonali pomocou dvoj-elektrodového systému na vzorkách o rozmeroch $100 \times 100 \times 15$ mm.

VÝSLEDKY, DISKUSIA A ZÁVERY

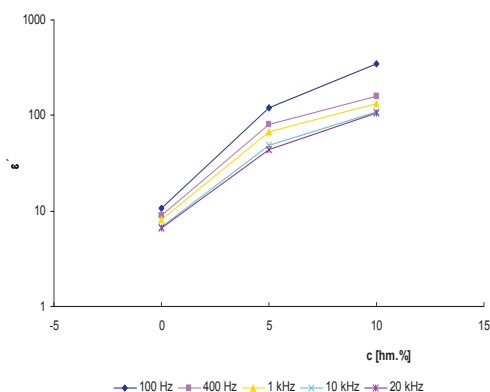
Výsledky meraní uvedené na obr. 1 až obr. 6



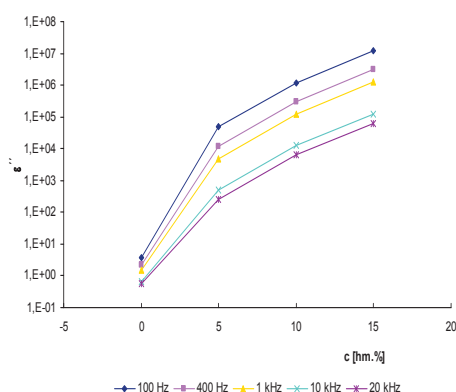
Obr. 1 Závislosť
a) reálnej zložky konduktivity γ' ,
b) jalovej zložky konduktivity γ'' ,
c) striedavej konduktivity γ , od
koncentrácie uhlíka c , pri hustote
 $850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a frekvenciách f : 0,1;
0,4; 1; 10 a 20 (kHz)



Obr. 2 Závislosť
a) reálnej zložky konduktivity γ' ,
b) jalovej zložky konduktivity γ'' ,
c) striedavej konduktivity γ ,
od koncentrácie c , od frekvencie f ,
pri hustote $850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a $350 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
(Krupinit) a koncentráciách uhlíka
 c : 0; 5 a 10 (hm.%).



Obr. 3 Závislosť permitivity ε' od koncentrácie uhlíka c , pri frekvenciách f : 0,1; 0,4; 1; 10 a 20 (kHz) a hustote 850 kg.m^{-3}



Obr. 4 Závislosť stratového čísla ε'' od koncentrácie uhlíka c , pri frekvenciách f : 0,1; 0,4; 1; 10 a 20 (kHz) a hustote 850 kg.m^{-3}

VPLYV KONCENTRÁCIE UHLÍKA A FREKVENCIE

Vplyv koncentrácie uhlíka na striedavú konduktivitu sme zisťovali na intervale 0 až 15 (hm.%). Na sledovanom intervale frekvencií 100 Hz až 20 kHz sa vplyv frekvencie prejavil len na vzorkách DCK bez úpravy uhlíkom. Prítom pri frekvencii 100 Hz bola konduktancia $\gamma \hat{=} 10^{-8} \text{ S.m}^{-1}$ a pri frekvencii 20 kHz bola jej veľkosť o 2 rády vyššia. Pri použití uhlíka už vplyv frekvencie na výslednú konduktivitu zistení nebol. Je to spôsobené vysokou hodnotou konduktivity uhlíka, ktorý veľmi významne ovplyvňuje hodnoty reálnej zložky konduktivity γ' . Pri koncentrácii uhlíka 10 hm.% dosahuje konduktivity DCK približne hodnotu 10^{-2} S.m^{-1} , zatiaľ čo hodnota jalovej zložky konduktivity dosahuje len hodnotu 10^{-4} S.m^{-1} . Zvýšenie konduktivity γ vplyvom uhlíka bolo pri $f = 100 \text{ Hz}$ o 5 rádov a pri $f = 20 \text{ kHz}$ o 3 rády. Preto, aj napriek nárastu imaginárnej zložky konduktivity, s rastúcou frekvenciou až o dva rády, sa táto zmena na celkovej konduktivitě neprejavila.

Zmeny dielektrických vlastností DCK do určitej miery korešpondujú so zmenami zložiek konduktivity. So zvýšeným stratovým číslom ε'' približne až o 7, resp. 5 rádov, pri frekvencii 100 Hz, resp. 20 kHz na rozdiel od permitivity, ktorá sa zvýši o 2 rády, resp. len o 1,5 rádu. Vplyvom zvýšenia frekvencie hodnoty dielektrických veličín ε'' a ε' klesajú. Táto skutočnosť je podmienená polarizačnými mechanizmami, ktoré prebiehajú v kompozite pod vplyvom striedavého elektrického poľa. Stratové číslo reprezentuje vodivostné straty, ktoré sa s nárastom frekvencie znižujú.

Permitivita sa znižuje s nárastom frekvencie v dôsledku postupného zanikania relaxačných polarizačných mechanizmov prebiehajúcich v drevnej vlne, ktorá je zložkou DCK.

Zvýšenie útlmu pre elektromagnetické žiarenie priamo súvisí so zvýšením dielektrických vlastností materiálu.

ZÁVER

Môžeme konštatovať, že:

- na intervale frekvencie pri zmenách koncentrácie uhlíka od 0 % do 15 % sa konduktivita γ uhlíkom modifikovaných drevoceментových dosiek vplyvom zmeny koncentrácie uhlíka od 0 % do 10 % zvýšila o 3 až 5 rádo, pričom vplyv frekvencie na túto charakteristiku sa prejavil len pri frekvencii 100 Hz.
- vplyvom zvyšovania frekvencie v dôsledku zmien prebiehajúcich v polarizačných mechanizmoch sa hodnoty dielektrických veličín DCK – stratového čísla ε'' a permitivity ε' , plynule znižovali.
- účinok rastúcej koncentrácie uhlíka sa prejavil zvyšovaním oboch dielektrických vlastností, najmä však zvýšením stratového čísla. Stratové číslo sa zvýšilo o 4 resp. až 7 rádo pri frekvencii 20 kHz resp. 100 Hz, permitivita sa pritom zvýšila o 2 rády resp. len 1,5 rádu.

Táto práca vznikla v rámci riešenia projektu Agentúry na podporu výskumu a vývoja číslo APVV-0229-06 s názvom „Aplikovaný výskum drevoceментových dosiek pre tienie elektromagnetických polí a pre zvýšenie požiarnej odolnosti“

LITERATÚRA

1. NAGASAWA, CH. a kol.: 1990. “Electromagnetic Shielding effectiveness of Particleboard Containing Nicel-Metalized Wood-Particles in the Core Layer”. Journal of the Japan Wood Research Society. 36, 7, 1990, s. 531–537.
2. NAGASAWA, CH. a kol.: 1991. Elektrokonduktivita and Electromagnetic-Shielding Effectiveness of Nickel-Plated Veneer. Journal of the Japan Wood Research Society, 37, č. 2, 1991, s. 158–163.
3. NAGASAWA, CH. a kol.: 1994. “Effects of Wood Species on Electroconductivity and Electromagnetic Shielding Properties of Electrolessly Plated Sliced Veneer with Nickel”. Journal of the Japan Wood Research Society. 40, 10, 1994. s. 1092–1099.
4. LI, J. a kol.: 2006. “Study on Influence factors of Wood-metal Composites Electromagnetic Shielding”. Northeast Forestry University China, AP42, s 185–188.
5. TESLA Brno: 1987. Manuál BM 595, Měřič RLC, 1987, 95 s.

Kontaktná adresa:

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

SOFTVÉROVÁ APLIKÁCIA PRE PODPORU MODELOVANIA PÁSOVÝCH VOZIDIEL V MSC.ADAMS/VIEW

A SOFTWARE APPLICATION FOR SUPPORT OF TRACKED VEHICLES MODELING IN MSC.ADAMS/ VIEW

Jaroslav MATEJ

ABSTRAKT: Obsahom príspevku je softvérová aplikácia, ktorá zjednodušuje a výrazne urýchľuje modelovanie pásových vozidiel v MSC.ADAMS/View systéme. Aplikácia je špeciálne zameraná na podporu automatizovaného vytvárania kontaktov, ktorých je v modeloch tohto typu niekoľko stoviek a ich ručné vytváranie cez grafické rozhranie systému nie je reálne.

Kľúčové slová: MSC.ADAMS/View, pásové vozidlo, ContactWizard

ABSTRACT: A content of paper is created by description of software application, which simplifies and accelerates modeling process of tracked vehicles in MSC.ADAMS/View system. Application is especially focused on support of contact creation, related to track segments, which are present at many hundreds number in the models of this type.

Keywords: MSC.ADAMS/View, tracked vehicle, ContactWizard

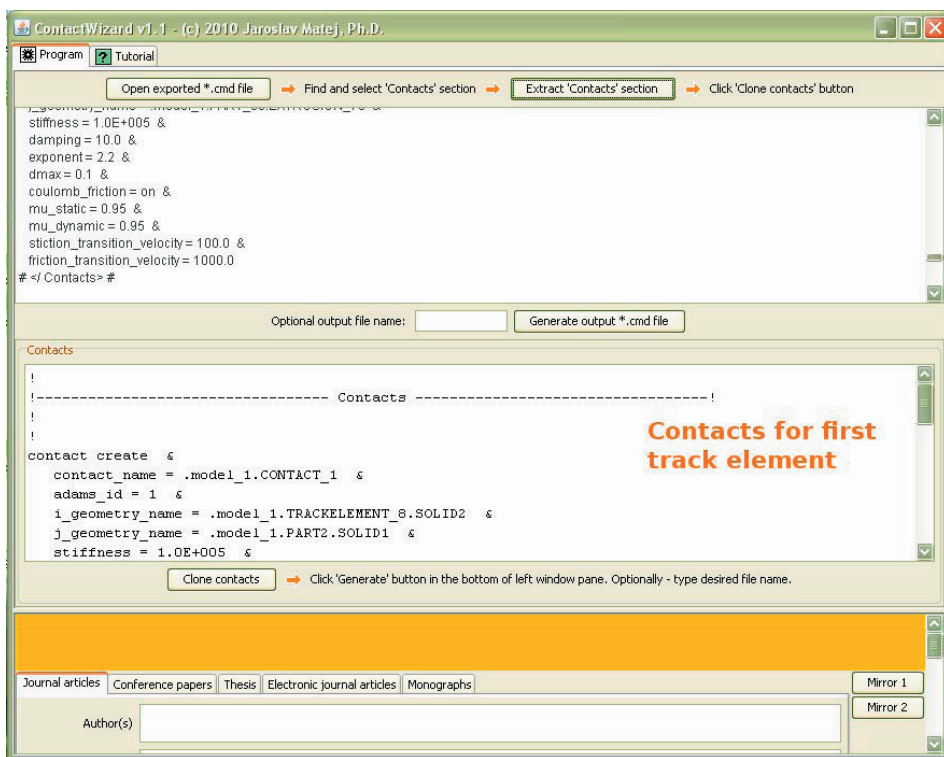
1. ÚVOD

MSC.ADAMS je systém pre dynamickú simuláciu mechanických sústav. Popisovaný modul View je zameraný na vizuálne modelovanie všeobecných mechanických sústav, t.j. bez zamerania alebo podpory na mechanické sústavy konkrétneho typu. Vytvorenie kontaktov medzi jednotlivými časťami akéhokoľvek mechanizmu je kľúčové, pretože bez nich nedôjde medzi časťami ani ku kolízii ani ku kontaktu akéhokoľvek typu. Pásový mechanizmus je tvorený jednotlivými článkami spojenými rotačnou väzbou, pričom každý jeden článok pásu musí mať definovaný kontakt s ostatnými členmi mechanizmu s ktorými príde do kontaktu. V základnej verzii sú to najmä pojazďové kolesá, väčšinou aspoň štyri kusy, hnacie koleso, napínacia kladka a aspoň štyri podporné kladky plus terén. Ak sa pritom pás skladá povedzme z šesťdesiatichtroch článkov, je počet kontaktov, ktoré musia byť definované rovný šesťstodeväťdesiatštyri.

2. MATERIÁL A METÓDY

Definovanie jedného kontaktu v grafickom rozhraní systému ADAMS trvá najmenej pätnásť sekúnd a je teda pomerne ťažko predstaviteľné realizovať to týmto spôsobom pre všetky kontakty všetkých článkov pásu. Zvolený bol teda prístup, ktorý vyžaduje, aby sa týmto spôsobom definovali iba všetky kontakty jedného článku pásu, pričom autorom príspevku napísaná aplikácia ContactWizard (obr. 1) [4] zabezpečí „naklonovanie“ týchto kontaktov aj pre ostatné články pásu vozidla.

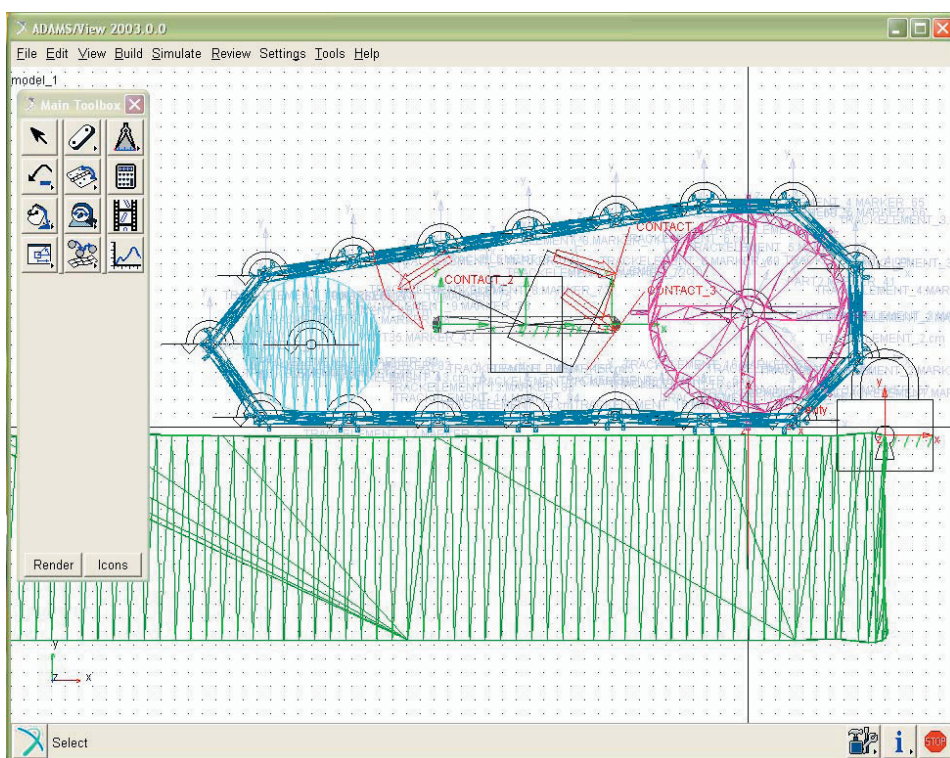
Samotná aplikácia bola napísaná v programovacom jazyku Java, ktorý bol vytvorený spoločnosťou Sun Microsystems, v súčasnosti prevzatou firmou Oracle, s využitím prostredia NetBeans 6.5.1. Podstatou funkčnosti aplikácie je manipulácia s textovým súborom, ktorý definuje celý model mechanizmu a ktorý je možné získať exportom modelu do formátu ACF (Adams/View Command File). Tento súbor aplikácia zmodifikuje a spätným importom do MSC.ADAMS/View systému vytvorí kontakty pre ostatné články pásu. V aktuálnej verzii 1.1 je možné vytvoriť kontakty pre jeden pás, k dispozícii je aj kompletný návod, ktorý je súčasťou aplikácie.



Obrázok 1 Aplikácia ContactWizard verzia 1.1

Pred použitím aplikácie je teda, ako je vyššie uvedené, potrebné manuálne definovať všetky vzorové kontakty pre jeden článok pásu. Tomuto však samozrejme musí predchádzať

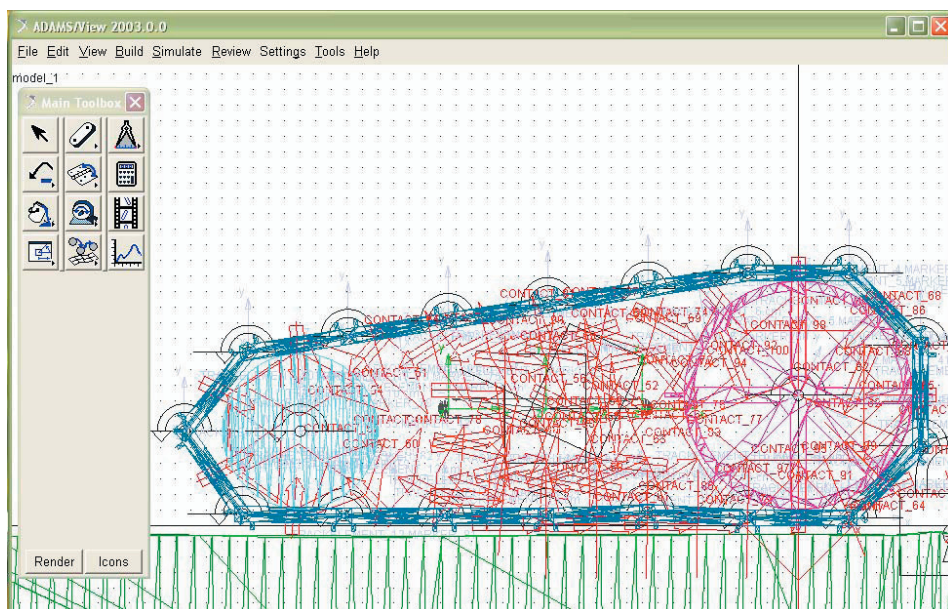
vytvorenie kompletného modelu pásového mechanizmu, najlepšie so všetkými detailami, keďže vytvorením kontaktov pre všetky články sa model značne zneprehľadní (obr. 3). Prípadne je možné kontaktom pre články pásu následne vypnúť viditeľnosť. Podrobnosti týkajúce sa importu dielov z CAD aplikácií sa nachádzajú v [2]. Jednoduchý pásový mechanizmus je zobrazený na obr. 2. V tomto prípade bolo potrebné vytvoriť tri kontakty, t.j. medzi článkom a prednou kladkou, článkom a zadným hnacím kolesom, a článkom a terénom. Články pásu musia byť premenované na TRACKELEMENT plus podčiarknik a poradové číslo, podľa čoho aplikácia identifikuje objekty článkov a vytvorí pre ne kontakty podľa vzorového článku. Toto je možné dosiahnuť vytvorením prvého článku s menom TRACKELEMENT, nastavením jeho vlastností a jeho následným kopírovaním.



Obrázok 2 Jednoduchý pásový mechanizmus s vytvorenými kontaktmi pre jeden článok pásu

Takto vytvorený model vozidla sa vyexportuje do Adams/View Command File súboru, ktorý tvorí vstupné dáta do aplikácie ContactWizard. Po spustení aplikácie je potrebné načítať tento súbor a nájsť v ňom sekciu –Contacts–, a tam vyznačiť definície tých kontaktov, ktoré sa týkajú prvého článku pásu. Následne kliknutím na tlačítko *Extract*, je potrebné tieto definície extrahovať zo vstupného súboru. Potom, kliknutím na tlačítko *Clone contacts* a *Generate output*, sa vytvorí výstupný súbor s definíciami kontaktov pre všetky

články pásu, vrátane prvého článku, z čoho vyplýva potreba pred importom tohto súboru do MSC.ADAMSu zmazať vytvorené definície vzorových kontaktov pre prvý článok. Importom výstupného súboru sa vytvoria všetky kontakty pre všetky články pásu podľa vzoru pre prvý článok (obr. 3). Týmto je definícia kontaktov ukončená a z tohto pohľadu je model pripravený na simuláciu.



Obrázok 3 Kontakty vytvorené pre všetky články pásu. Prehľadnosť je možné zvýšiť vypnutím zobrazenia kontaktov

3. VÝSLEDKY A DISKUSIA

Použitím aplikácie boli takto vytvorené kontakty pre model pásového vozidla. Pred simuláciou je ešte potrebné zobrať do úvahy čas simulácie, ktorý bude najmenej niekoľko desiatok minút až po hodiny, v závislosti od počtu prvkov modelu, výkonu počítača a nastavení parametrov riešiča (SOLVER) v sekcii Settings/Solver/Dynamics. Podľa získaných skúseností nie je potrebné SOLVER špeciálne nastavovať s výnimkou polí 'Error' a 'Hmax' v súčinnosti s vhodnou voľbou počtu krokov celej simulácie. Ich nastavenie je však pre každý model špecifické a subjektívne a významne ovplyvňuje úspešnosť a čas simulácie. Správne nastavenie sa bude nachádzať v intervale medzi príliš rýchlym výpočtom a hroziacim výpočtovým zaseknutím mechanizmu a príliš detailným výpočtom, kedy môže dôjsť k numerickej chybe, zrejme vplyvom internej práce s príliš malými medzivýsledkami. Subjektívne je pre tento účel vhodnejší C++ riešič. Pri riešení v jazyku Fortran je vhodné nastaviť pamäťový model na HUGE, riešič v C++ toto nepožaduje. Tiež

je potrebné akceptovať pamäťovú náročnosť, podľa nadobudnutých skúseností by to malo byť aspoň 6 GB RAM (Windows XP) a viac v závislosti najmä na dĺžke simulácie.

Samozrejme, pre zrýchlené definovanie kontaktov nie je nevyhnutné použiť popísanú aplikáciu, sú aj iné možnosti, avšak vyžadujú vyššiu úroveň znalostí systému ADAMS alebo vyššiu investíciu do balíku ATV Toolkit (Adams Tracked Vehicle Toolkit) [1], ktorého cena je porovnateľná s cenou samotného balíka MSC.ADAMS, konkrétne vo verzii Full Simulation Package.

Niekoľko simulácií, zrealizovaných autorom, je uvedených v [3], pričom ich výpočtová náročnosť sa pohybovala v rozmedzí od 40 minút do 3 hodín.

4. ZÁVER

V príspevku bola popísaná pôvodná softvérová aplikáciu ContactWizard v1.1, napísaná špeciálne pre tento účel, ktorá významne zjednodušuje a urýchľuje tvorbu modelu pásového vozidla v systéme MSC.ADAMS/View tým, že ponúka automatizované vytvorenie kontaktov pre jednotlivé články pásu pásového mechanizmu vozidla. Týmto je možné zrealizovať dynamickú analýzu pohybu pásového mechanizmu v MSC.ADAMS/View systéme. Uvažovaný bol tuhý, t.j. nedeformovateľný terén. Pri potrebe uvažovať s poddajným terénom je zrejme nevyhnutné použiť vyššie uvedený ATV Toolkit.

Keďže do prostredia MSC.ADAMSu je možné bezproblémovým spôsobom importovať objekty z CAD nástrojov, je možné vytvoriť reálne a podrobné modely pásových mechanizmov a teda simuláciou získať hodnotné výsledky, plne využiteľné v praxi.

LITERATÚRA

1. ATV TOOLKIT [online]. MSC Software, Corp. [cit.28/01/2011]. *Internetová stránka*: <http://www.mscsoftware.se/solutions/toolkits/atv.htm>
2. MODELOVÁNÍ A ANALÝZA SERVISNÍCH ROBOTŮ [online]. Ladislav Kárník [cit.28/01/2011]. *Internetová stránka* – http://robot2.vsb.cz/elekskripta/servisni_roboty/interest132.htm
3. MULTIMEDIÁLNE SÚBORY [online]. Katedra lesnej a mobilnej techniky, Technická univerzita vo Zvolene. [cit.28/01/2011]. *Internetová stránka*: <http://www.tuzvo.sk/klmt> > Predmety > Multimédia
4. CONTACTWIZARD [online]. Jaroslav Matej [cit.01/05/2010] – *Internetová stránka*: http://www.tuzvo.sk/files/FEVT/katedry_fevt/klmt/ContactWizard_v1.1.zip, resp.: <https://docs.google.com/leaf?id=0BzQlg5pWOH5LYTBmMzRhY2ItYzJmNy00ZGM3LT-k3YTAAtMTVjMzU3YTU2OWI3&hl=en>

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

ŤAHOVÉ SKÚŠKY A VLASTNOSTI ŠPECIÁLNEHO LESNÉHO TRAKTORA

TRACTION TEST AND PROPERTIES OF SPECIAL FOREST WHEELED TRACTOR

Juraj MIKLEŠ

ABSTRAKT: Práca je venovaná problematike ťahových vlastností špeciálnych lesných traktorov, ktoré sa používajú pri približovaní dreva. Pojednáva o základných veličinách ťahovej, hnacej sily k prekonávaniu jazdných odporov, ktoré majú význam len vtedy ak sú doprevádzané údajom o preklze kolies. Vymedzená je svahová dostupnosť, max. uhol svahu $\alpha_{\max}$, určená max. veľkosť nákladu, keď ako limitujúce kritériá boli použité: výkon motora, adhézne podmienky, hmotnostno-geometrické riešenie traktora. Článok je venovaný problematike merania závislosti medzi ťahovou silou a preklzom, ťahovým výkonom, pracovnou rýchlosťou terénnych vozidiel – traktorov pričom ide o snímanie okamžitých hodnôt týchto veličín.

Kľúčové slová: technika lesnícka; traktory; ťahové vlastnosti

ABSTRACT: Traction properties are treated in special forest tractors used for wood skidding. The basic parameters traction driving force overcoming the rolling resistance are described; these parameters are applicable only if the data on wheel slip are given. Gradeability is given maximum angle of slope $\alpha_{\max}$, maximum load are determined using the limiting criteria as follows: engine power, adhesion conditions, weight distribution and geometric design of the tractor. This article also deals with problems of measuring the relationship between the traction force and slippage, traction power, speed of work, of terrain vehicles – tractors, especially the instantaneous of these quantities.

Key words: forest machinery, tractors, traction properties

Problematika ťahových vlastností je všeobecne známa a pomerne veľmi dobre rozpracovaná u poľnohospodárskych traktorov. Aj keď špeciálny lesný traktor pracuje tiež na poddajnej podložke, vyskytujú sa pri vyšetrovaní ťahových vlastností špecifiká, na ktoré je v článku predovšetkým zameraná pozornosť. Pri rozbere sú vyšetrované hlavne možnosti ŠLKT (špeciálny lesný kolesový traktor) v lesnom teréne na základe jeho hmotnostno-geometrických parametrov.

V rámci experimentu boli vykonané štandardné ťahové skúšky špeciálnych lesných kolesových traktorov slovenskej výroby LKT-81 a LKT 120B (bezúväzkové približovanie). Ťahová charakteristika je veľmi účelná ako technický podklad pre koncepciu traktoru a jeho konkrétnych zostáv. V rámci Organisation for Economic Co-operation and

Development pre skúšanie traktorov sa ťahové vlastnosti traktorov merali na betónovej dráhe pri prostom ťahu. Preto by bolo idealistické považovať výsledky určitej ťahovej skúšky za reprezentáciu vlastností traktorov v iných zostavách a na inom povrchu.

1. ŤAHOVÉ VLASTNOSTI ŠLKT

Doteraz publikované práce z tejto oblasti sú zamerané na teoretický výpočet alebo meranie ťahových vlastností prevažne univerzálnych traktorov. Závislosť, ktorá charakterizuje stroj (traktor) ako celok, od určitej podložky je možné jednoducho upraviť na vzťah medzi hnacou (obvodovou) silou na samotnom hnacom ústrojenstve a medzi preklzom a konečne na vzťah medzi súčiniteľom záberu (pomer hnacej sily k zaťaženiu hnacieho ústrojenstva-tiaž) a preklzom. To všeobecne charakterizujú záberové schopnosti hnacieho ústrojenstva bez ohľadu na stroj.

Definícia veličín

Skôr ako pristúpime k vyšetrovaniu ťahových vlastností ŠLKT definujeme niektoré základné veličiny:

F_x	– zložka celkovej ťahovej sily, rovnobežná s povrchom dráhy,
H_i	– hnacia sila na i-tej ($i = 1, 2, \dots$) náprave definovaná vzorom [4],
H	– celková hnacia sila ŠLKT,
T_i	– posuvná sila na i-tej náprave, sila prenášaná osou nápravy na rám,
R_i	– celkový odpor valenia i-tej nápravy,
R	– celkový odpor valenia ŠLKT,
G	– celková tiaž ŠLKT,
Z_i	– tlaková sila (normálová reakcia) jednej nápravy,
F_x/G	– merná ťahová sila,
H/G	– merná hnacia sila C_m ,
H_i/Z_i	– súčiniteľ záberu μ_i ,
T_i/Z_i	– súčiniteľ ťahu χ_i ,
$R/G, R_i/Z_i$	– súčiniteľ valenia φ, φ_i .

Vzťahy medzi definovanými veličinami sú tieto:

$$H = F_x + R = \sum T_i + \sum R_i = \sum (T_i + R_i) = \sum H_i \quad (1)$$

$$\mu_i = \chi_i + \varphi_i \quad \mu_i - \varphi_i = \chi_i \quad (2)$$

Preklz je definovaný dráhou, ktorú prejde hnacie koleso na určitej podložke pri otočení o jednu otáčku, bez hnacej sily (l_0) a pri prenose hnacej sily (l):

$$\delta = l - \frac{l}{l_0} \quad (3)$$

Hnacia sila na styčnej ploche hnacieho ústrojenstva a podložky je vyvolaná hnacím momentom. Práca tohoto momentu na jedno otočenie hnacieho kolesa s prihliadnutím na mechanickú účinnosť $2\pi \cdot M_h \cdot \eta$ kompenzuje prácu vnútorného odporu valenia $2\pi r_d \cdot R_p$ a prácu hnacej sily $2\pi r_d \cdot H$. Z podmienky rovnováhy vyplýva:

$$2\pi \cdot M_h \cdot \eta = 2\pi r_d \cdot R_p + 2\pi r_d \cdot H$$

Pre veľkosť hnacej sily platí:

$$H = \frac{M_h \cdot \eta}{r_d} - R_p \quad (4)$$

Celkový odpor valenia R sa u kolesa s pneumatikou skladá z vonkajšej R_i a vnútornej R_p zložky, ktoré vznikajú vplyvom špecifických strát vo vlastnom hnacom ústrojenstve. Straty, ktoré sú však závislé od prenášaného hnacieho momentu, je treba zahrnúť do mechanickej účinnosti hnacieho ústrojenstva η .

Vo výpočtoch sa často používa približná definícia: hnacia sila H je pomer hnacieho momentu M_h k účinnému (valivému) polomeru kolesa r_d . Vnútorný odpor valenia sa pripočíta k vonkajšiemu a tvorí s ním celkový odpor valenia.

Pri ťahových skúškach terénnych vozidiel, ktoré sa vykonávajú zásadne na rovine, nemožno dosiahnuť nulový preklz. Pri ťahovej skúške sa meria závislosť medzi ťahovou silou F_x a relatívnym preklzom δ' . Tento relatívny preklz sa potom prepočítava na (skutočný) preklz δ . Hnacie kolesá meraného stroja majú pri nulovej jazde preklz zodpovedajúci hnacej sile H , ktorej veľkosť je rovná súčtu vonkajšieho odporu valenia hnacích kolies a celkového trakčného odporu (vlečené kolesá). Táto metóda je pri meraní v teréne všeobecne platná pri aplikácii na rôzne terénne vozidlá.

Skutočný preklz pri vyjadrení pomocou otáčok kolies n (s hnacou silou) a n_0 (bez hnacej sily) hnacieho kolesa na rovnakej dráhe s

$$s = l \cdot n = l_0 \cdot n_0$$

dosadením $l/l_0 = \frac{n_0}{n}$ do rovnice (3) dostaneme

$$\delta = 1 - \frac{n_0}{n} = \frac{n - n_0}{n} \quad (5)$$

Meraný stroj musí byť pred skúškou zohriaty na pracovnú teplotu. Ťažné zariadenie s dynamografom má pôsobiť pokiaľ možno vodorovne. Ťahové vlastnosti terénneho vozidla alebo záberové vlastnosti hnacieho mechanizmu sa obtiažne definujú, čo komplikuje ich meranie. Sem patrí hlavne preklz, polomer valenia, hnacia sila a odpor valenia.

2. ANALÝZA VYBRANÝCH VELIČÍN LESNÉHO TRAKTORA

Najprv budeme vyšetrovať svahovú dostupnosť danú uhlom svahu $\alpha_{\max}$, limitovanú výkonom motora, pričom uvažujeme s maximálnym točivým momentom motora $M_{\max}$.

Vtedy môžeme napísať:

$$M_{\max} i_p \eta \frac{1}{r_d} = G(\varphi \cos \alpha_{\max} + \sin \alpha_{\max}) \quad (6)$$

kde:

$\alpha_{\max}$ – maximálny uhol sklonu svahu,

$M_{\max}$ – maximálny točivý moment motora,

i_p – celkový prevodový pomer prevodového ústrojenstva,

η – celková mechanická účinnosť hnacieho ústrojenstva,

r_d – účinný polomer hnacieho kolesa,

G – tiaž traktora,

φ – súčiniteľ valenia.

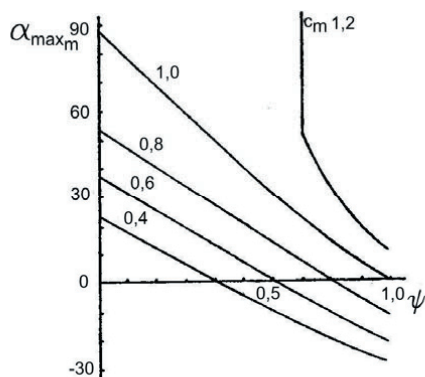
Ak výraz $M_{\max} i_p \eta / r_d$ vydelíme tiažou traktora, dostaneme mernú hnaciu silu C_m

$$C_m = \psi \cos \alpha_{\max, m} + \sin \alpha_{\max, m} \quad (7)$$

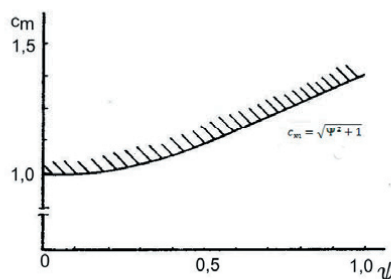
Zo vzťahu (6) určíme uhol svahu $\alpha_{\max}$ v ideálnych podmienkach; údaj však aj napriek tomu poskytne obraz o svahovej dostupnosti traktora limitovanej výkonom motora traktora:

$$\alpha_{\max, m} = \cos^{-1} \frac{\left(C_m \psi \pm \sqrt{\psi^2 - C_m + 1} \right)}{\psi^2 + 1} = \sin^{-1} \frac{\left(C_m \pm \psi \sqrt{\psi^2 - C_m + 1} \right)}{\psi^2 + 1} \quad (8)$$

Vzťah (7) sme dostali vyriešením kvadratickej rovnice. Na obr. 1 je vynesená závislosť uhla svahu $\alpha_{\max}$ od súčiniteľa odporu odvaľovania ψ pri rôznych konštantných hodnotách mernej hnacej sily C_m . Pri rozbere vzorca (7) musí byť výraz pod odmocninou v čitateli: $\psi^2 - C_m + 1 \geq 0$. Z toho vyplýva, že veličina mernej hnacej sily $C_m \leq \psi^2 + 1$. Tým dostávame vymedzenú oblasť hodnôt C_m , keď svahová dostupnosť traktora je limitovaná výkonom motora (obr. 2).



Obrázok 1 Svahová dostupnosť traktora limitovaná výkonom motora



Obrázok 2 Oblasť hodnôt C_m , keď svahová dostupnosť je limitovaná výkonom motora

Ďalší prípad budeme vyšetrovať, keď svahová dostupnosť je limitovaná adhéziou medzi podložkou a traktorom. Vtedy môžeme napísať rovnicu:

$$\mu G \cos \alpha_{\max,a} = G(\psi \cos \alpha_{\max,a} + \sin \alpha_{\max,a}) \quad (9)$$

kde: $\alpha_{\max,a}$ – maximálny uhol svahu limitovaný adhéziou.

Riešením rovnice (8) dostaneme:

$$\alpha_{\max,a} = \operatorname{tg}^{-1}(\mu - \psi) = \operatorname{tg}^{-1} \chi \quad (10)$$

kde: χ – súčiniteľ ťahu.

Na obr. 3 je vynesená závislosť uhla svahu $\alpha_{\max,a}$ od súčiniteľa ťahu χ . Z grafu vidieť, že (teoreticky) maximálny uhol limitovaný adhéznymi podmienkami je 45° . V reálnych podmienkach pri priaznivých adhézných podmienkach (lesná cesta hlinité, hliniopiesčité suchá) sa súčiniteľ ťahu pohybuje v intervale $0,6 - 0,7$, z čoho potom vyplýva uhol $\alpha_{\max,a} = 30^\circ - 35^\circ$, v nepriaznivých adhézných podmienkach (lesná cesta hlinité, hliniopiesčité mokrá) $\chi = 0,4 - 0,5 \Rightarrow \alpha_{\max,a} = 20^\circ - 25^\circ$. A konečne pre úplnosť, svahovú dostupnosť (uhol $\alpha_{\max,p}$) určuje aj celkové hmotnostno-geometrické riešenie traktora (poloha ťažiska), to znamená, že pri svahu väčšom ako $\alpha_{\max,p}$ dôjde k prevráteniu traktora. Uhol svahu $\alpha_{\max,p}$ pri statickom riešení dostaneme z rovnice:

$$l_1 G \cos \alpha_{\max,p} = h_T G \sin \alpha_{\max,p} \quad (11)$$

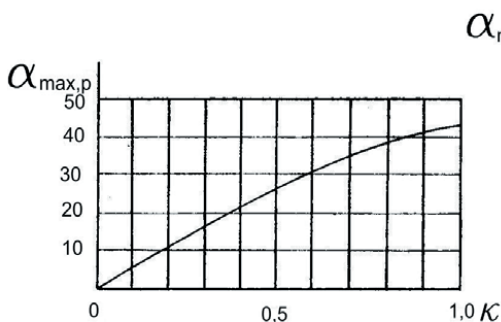
$$\alpha_{\max,p} = \operatorname{tg}^{-1} \frac{l_1}{h_T} \quad (12)$$

kde:

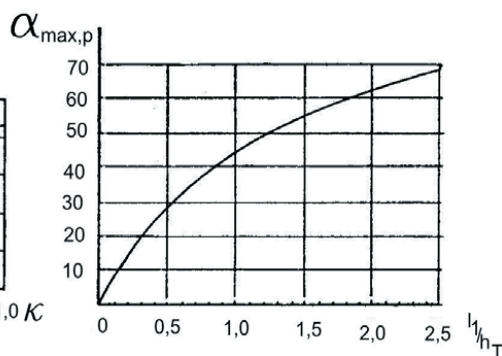
l_1 – vzdialenosť ťažiska traktora od osi zadnej nápravy (vzdialenosť je v podstate zhodná so vzdialenosťou k bodu okolo ktorého dochádza k preklápaniu traktora),

h_T – výška ťažiska traktora.

Pri určovaní uhla $\alpha_{\max,p}$ je, ako vidíme rozhodujúci pomer $\frac{l_1}{h_T}$, ktorý sa pohybuje u súčasných traktorov v rozmedzí $1,0 - 1,7$ čo zodpovedá uhlu svahu $45^\circ - 60^\circ$ (obr. 4).



Obrázok 3 Svahová dostupnosť traktor limitovaná adhéznymi podmienkami medzi podložkou a traktorom



Obrázok 4 Svahová dostupnosť limitovaná hmotnostno-geometrickým riešením traktora

3. ROZBOR VZÁJOMNÉHO SILOVÉHO PÔSOBNIA LESNÝ TRAKTOR – KMENE

V tejto časti vykonáme analýzu silového pôsobenia na kmene a ŠLKT počas operácie približovania v polozávесе. Najprv pristúpime k vyšetrovaniu silového pôsobenia na zväzok kmeňov. Na obr. 5 je schéma silového pôsobenia na kmene pri približovaní v polozávесе. Pri dĺžke kmeňov l_k určíme polohu ťažiska zväzku kmeňov pomocou súčiniteľa k_e (určenie pôsobiska sily Q). Potom z podmienky rovnováhy síl a momentov v rovine môžeme odvodiť tieto rovnice:

$$R_k \sin \alpha + f R_k \cos \alpha - F \cos \beta = 0 \quad (13)$$

$$F \sin \beta + R_k \cos \alpha - f R \sin \alpha - Q = 0 \quad (14)$$

$$k_e Q \cos(\Theta + \alpha) + F \cos \beta \sin(\Theta + \alpha) = F \sin \alpha \cos(\Theta + \alpha) \quad (15)$$

kde:

Q – tiaž nákladu (kmeňov),

F – sila v lane navijaka traktora,

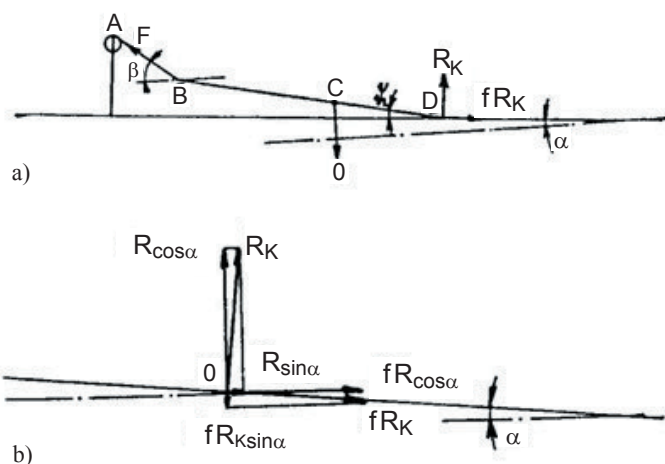
R_k – reakcia pôsobenia na zväzok kmeňov od podložky,

α – uhol sklonu svahu,

β – uhol sklonu lana traktora voči horizontále,

Θ – uhol sklonu kmeňov voči terénu,

f – súčiniteľ vlečného odporu kmeňov.



Obrázok 5 Schéma silového pôsobenia na približované kmeň v polozávěse ŠLKT

Z rovníc (12) a (13) určíme silu v lane F :

$$F = \frac{Q(\sin \alpha + f \cos \alpha)}{\cos \beta_0 + f \sin \beta_0} \quad (16)$$

prítom $\beta_0 = \beta - \alpha$.

Úpravou rovníc (14) a (15) dostaneme uhol sklonu lana β :

$$\beta = \text{tg}^{-1} \left[\frac{1}{1 - k_e} \left\{ \frac{k_e (1 - f \text{tg} \alpha)}{\text{tg} \alpha + f} + \text{tg} (\Theta - \alpha) \right\} \right] \quad (17)$$

Jednoduchou úpravou rovnice (15) môžeme určiť aj tiaž približovaných kmeňov (náklad) Q , pri danej veľkosti sily v lane

$$Q = \frac{F(f \sin \beta_0 + \beta_0)}{f \cos \alpha + \sin \alpha} \quad (18)$$

Z obr. 5 vidíme, že ak $\theta = 0$, rovnice (12), (13) sa nemenia, ale musí platiť (aby kmeňe boli na zemi):

$$k_e Q \cos \alpha + F \cos \beta \sin \alpha \geq F \sin \beta \cos \alpha \quad (19)$$

Pre daný prípad určíme F aj z rovnice (15), resp. Q z rovnice (17), pritom však pre silu v lane (ako vyplýva z nerovnosti (18)) musí platiť že:

$$F < \frac{k_e Q \cos \alpha}{\sin \beta_0} \quad (20)$$

4. VÝSLEDKY – EXPERIMENT

Ťahové skúšky traktora LKT 81

Traktor LKT 81 je určený na úvazkové približovanie dreva. Na skúšky bol použitý traktor vybavený radlicou a ochranným štítom. Pôsobisko ťahovej sily bolo v osi kladky lanového kozlíka, smer pôsobenia sily k vodorovnej rovine bol 35° . Tabuľkové a grafické spracovanie je v tab. 1 a na obr. 6. merané boli prvé 3 prevodové stupne. Pri meraniach boli zapnuté pohony všetkých hydrogenerátorov.

Ťahové skúšky traktora na betónovom povrchu

Druh skúšobnej dráhy: betónová vozovka

Súčiniteľ valivého odporu: $\psi = 0,025$

Poloha ovládacej páky regulátora: plné otáčky motora

Palivo: motorová nafta letná podľa STN 65 6506

Olej – motorový: M5 AD

prevodový: PP 90

Výška ťažného bodu: cca 1850 mm

Vzdialenosť od osi zadných kolies: 680 mm

Smer pôsobenia ťahovej sily: 35°

Hmotnosť traktora: 6890 kg

Vertikálna statická reakcia – predná náprava: 42,67 kN

– zadná náprava: 24,92 kN

Rozmery pneumatík – predné 16,9/14 – 30 10 PR

– zadné 16,9/14 – 30 10 PR

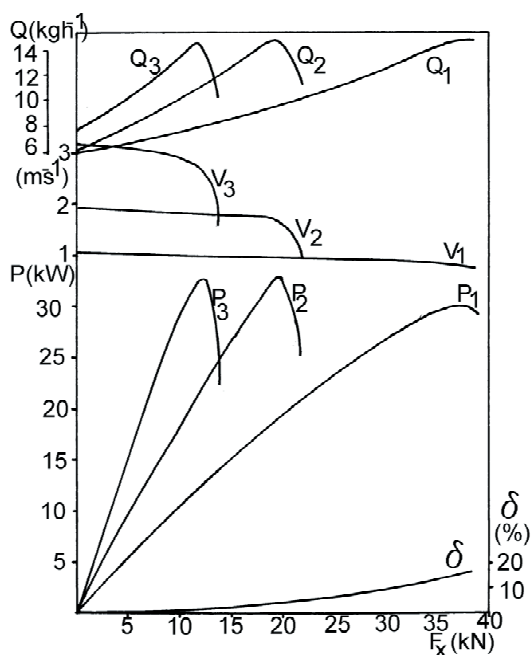
Tlak v pneumatikách – predných: 150 kPa

– zadných: 150 kPa

Tabuľka 1 Najväčší ťahový výkon

Prevodový stupeň	Výkon [kW]	Ťahová sila [kN]	Rýchlosť [m.s ⁻¹]	Preklz [%]	Merná spotreba paliva [g.kWh ⁻¹]	Atmosfer. podmienky		
						Teplota vzduchu [°C]	Relatívna vlhkosť [%]	Tlak [kPa]
1	30	37,5	0,8	16	480	14,6	56	94,76
2	33,2	19,7	1,68	5	434	21,2	38	94,69
3	32,7	12,2	2,68	2,4	440	19,4	56	94,70

Výsledky ťahových skúšok na betónovej vozovke majú analogický charakter.



Obrázok 6 Ťahová charakteristika traktora LKT 81 na betónovej vozovke

Ťahové skúšky traktora LKT 120 B

Traktor LKT 120 B je určený na bezúvážkové približovanie dreva. Traktor bol vybavený radlicou a klieštinami. Prevodové ústrojenstvo: hydrodynamický menič, štvorstupňová prevodovka, hnacie nápravy so samosvorným diferenciálom. Pri meraniach boli vypnuté nepotrebné pohony. Pôsobisko zaťažovacej sily bolo zvolené v otočnom čape klieštin (drapáku). Výsledky meraní sú v tab. 2 a na obr. 7.

Skúšky na betónovom povrchu:

Pruh skúšobnej dráhy: betónová vozovka, súč. val. odporu $\psi = 0,031$

Poloha ovládacej páky regulátora: plné otáčky motora

Palivo: motorová nafta letná podľa STN 65 6506

Olej motorový: M5AD

Olej prevodový: PP 90

Výška ťažného bodu: cca 2100 mm

Vzdialenosť od osi zadných kolies 1520 mm

Smer pôsobenia ťahovej sily: 320

Hmotnosť traktora: 10 650 kg

Vertikálny statická reakcia – predná náprava: 62,78 kN

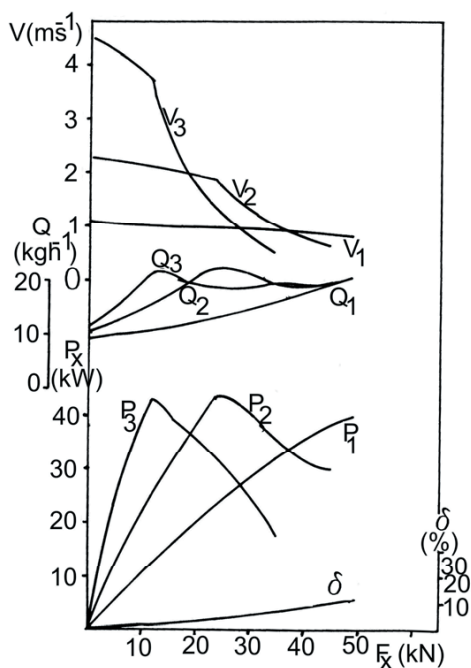
– zadná náprava: 41,69 kN

Tlak v pneumatikách – predných: 150 kPa

– zadných: 150 kPa

Tabuľka 2 Najväčší ťahový výkon

Prevodový stupeň	Výkon [kW]	Ťažná sila [kN]	Rýchlosť [m.s ⁻¹]	Preklz [%]	Merná spotreba paliva [g.kwh ⁻¹]	Atmosférické podmienky		
						Teplota vzduchu [°C]	Relatívna vlhkosť [%]	Tlak [kPa]
1	40,2	49	0,82	12		14,4	80	95,4
2	44,1	25	1,76	5,5		18,1	55	95,4
3	43,2	12	3,6	3,2		18,1	55	95,4



Obrázok 7 Ťahová charakteristika traktora LKT 120 B na betónovej podlažke

ZÁVER

Skúšané lesnícke traktory majú nižšiu účinnosť ako poľnohospodárske traktory. To je zrejme spôsobené použitím hydrostatických pohonov.

Vplyvom uchytenia ťahovej sily, ktoré zodpovedá podmienkam pri nasadení traktora v prevádzke sa dosiahne menší preklz. Maximálna sila nie je limitovaná stopercentným preklzom, ale riaditeľnosťou traktora.

LITERATÚRA

GREČENKO, A.: Vlastnosti terénních vozidel. ČZU Praha 1994, s. 115, ISBN80-213-0190-2
MIKLEŠ, M.; HOLÍK, J.; MIKLEŠ, J.: Projektovanie a výpočet lesných strojov, Technická univerzita vo Zvolene, 2010, s. 200, ISBN 978-80-228-2096-7

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

Kontaktná adresa:

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

KINEMATIKA OTÁČANIA ŠPECIÁLNEHO LESNÉHO KOLESOVÉHO TRAKTORA V LESNOM TERÉNE S NÁKLADOM

KINEMATICS OF TURNING, OF SPECIAL FOREST WHEELED TRACTOR IN THE TERRAIN WITH LOAD – SIZE

Milan MIKLEŠ

ABSTRAKT: Lesné kolesové ťahače majú najčastejšie kĺbový rám. Otáčanie sa uskutočňuje cestou zlamovania polrámov. V práci je rozobraná kinematika otáčania ťahača bez nákladu a s nákladom, ktorý tvorí zväzok kmeňov. Otáčanie ťahača prebieha po krivke s premenlivou hodnotou polomeru od nekonečnej (priamka) po konečnú hodnotu. Stred otáčania sa tiež premiestňuje po trajektórii – krivke, až kým nedôjde k maximálnemu zalomeniu polrámov – minimálnemu polomeru otáčania po kružnici. Pri pohybe traktora v priamom smere, ktorý nie je totožný so smerom pozdĺžnej osi zväzku, vlečená časť zväzku sa pohybuje po krivke traktrixe.

Kľúčové slová: lesnícka technika, traktory, kinematika otáčania

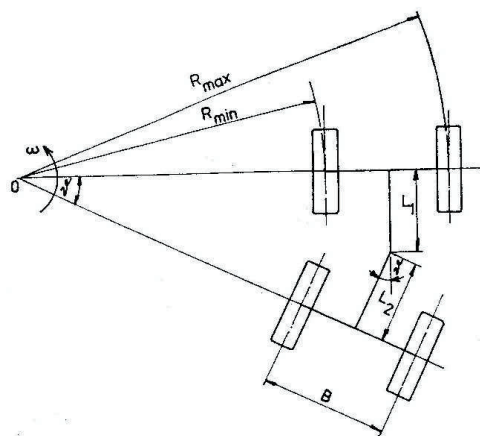
ABSTRACT: Forest skidders have, in most cases, an articulated frame. A turning is execute by articulating of the frame. This paper describe a kinematics of turning of a skidder without a load and with a load, which consist of a bunch of logs. The skidder turning run on a curve with a variable value of a radius, in a range from an infinity (line) to a finite value. The center of turning is moving on a trace – curve until the articulation of the frame is maximal, which correspondence with a minimal radius of turning on a circle. During a ride of the skidder in a straight direction, which is not identical with a direction of longitudinal axis of a bunch, the hauled section of a bunch run on a curve named tractrix.

Key words: forest machines, tractors, kinematics of turning

OTÁČANIE BEZ NÁKLADU

Väčšina lesných kolesových približovacích traktorov má kĺbový rám. Otáčanie traktora s takým rámom sa uskutočňuje cestou zlamovania polrámov (sekcii) jedného voči druhému. Stred otáčania traktora sa bude nachádzať v priesečníku osí náprav. Uhol, ktorý

zvierajú osi predného a zadného mostu bude aj uhlom medzi pozdĺžnou osou predného a zadného polrámu. Ak otáčanie prebieha s konštantným uhlom zlamovania q , tak stred otáčania bude stály, polomery otáčania budú konštantné a pohyb v takom prípade bude prebiehať po kružnici. Pri zväčšení uhla zlamovania polrámov sa znižuje polomer otáčania. Pri otáčaní traktora so zlamovacím rámom z praktického hľadiska má značný význam určenie maximálneho a minimálneho polomeru otáčania ($R_{\max}$, $R_{\min}$) a z toho vyplývajúca jazdná šírka $R_{\max}$, $R_{\min}$ (Shishiuchi 1980, Mikleš 1985, Grečenko 1994).



Obrázok 1 Určenie teoretického polomeru otáčania traktora so zlamovacím rámom pri malých uhlových rýchlostiach, otáčanie na rovine

Pri podmienke, že otáčame traktora prebieha pri veľmi malej uhlovej rýchlosti ω (pozri obr. 1), môžeme odvodiť tieto vzťahy:

a) $K_L \geq 0,5$

$$R_{\max} = \frac{L}{\sin \theta} \{K_L + (1 - K_L) \cos \theta\} + \frac{B}{2}, \quad R_{\min} = \frac{L}{\sin \theta} \{\cos \theta + (1 - K_L)\} - \frac{B}{2},$$

$$R_{\max} - R_{\min} = \frac{L}{\sin \theta} (2K_L - 1)(1 - \cos \theta) + B,$$

- kde: $R_{\min}$ [m] – polomer otáčania vnútorných kolies traktora,
 $R_{\max}$ [m] – polomer otáčania vonkajších kolies traktora,
 $R_{\max} - R_{\min}$ [m] – jazdná šírka v zatáčke,
 B [m] – rozchod,
 L [m] – rázvor,
 $K_L = \frac{L_1}{L}$ – (L_1 vzdialenosť prednej nápravy od stredového kĺbu),

b) $K_L < 0,5$

$$R_{\max} = \frac{L}{\sin\theta} \{K_L \cos\theta + (1 - K_L)\} + \frac{B}{2}$$

$$R_{\min} = \frac{L}{\sin\theta} \{K_L + (1 - K_L) \cos\theta\} - \frac{B}{2}$$

$$R_{\max} - R_{\min} = \frac{L}{\sin\theta} (2K_L - 1)(\cos\theta - 1) + B$$

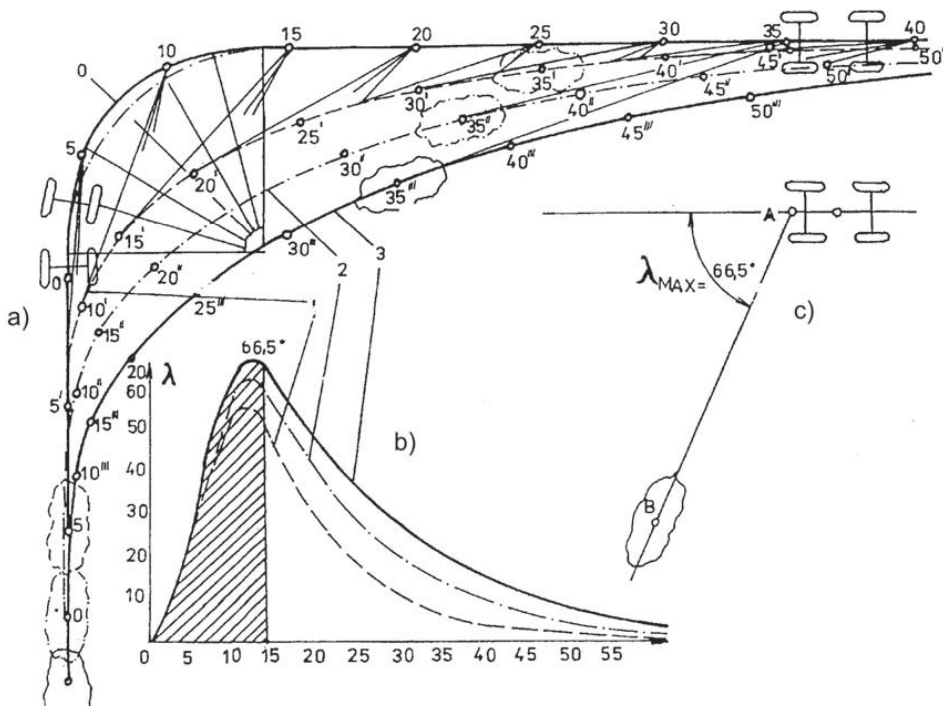
Prechod traktora z priamočiarej dráhy, keď uhol $\theta = 0$, na otáčanie s uhlom $\theta = \theta_{\max}$ neprebíha okamžite. Vodič na túto operáciu potrebuje 3 až 5 s. V tomto čase sa bude postupne zmenšovať od $R = \infty$ do $R = R_{\min}$. Pritom sa súčasne premiestňuje aj stred otáčania. Z toho vyplýva, že prechod z priamkovej trajektórie na krivočiaru prebieha s premenlivým stredom otáčania a nie pri rovnakom polomere. Pritom trajektória otáčania predstavuje krivku, pozostávajúcu z elementov rôznej krivosti, opísanú z okamžitých stredov. Takáto trajektória môže byť určená tak analyticky, ako aj graficky.

OTÁČANIE S NÁKLADOM

Budeme sledovať systém, do ktorého patrí lesný kolesový ťahač so zväzkom kmeňov v polozávесе. Keď vychádzame z toho, že vlečúca časť zväzku kmeňov sa premiestňuje po traktrixe (Mikleš, 1985). Pre jednoduchosť úvahy označíme počiatočný bod zväzku v mieste závesu ako bod A (traktor) a stred plochy kontaktu zväzku s povrchom terénu ako koncový bod B. Ak sa počiatočný bod A premiestňuje v smere osi zväzku AB, vtedy sa koncový bod B bude premiestňovať v smere bodu A. Ak počiatočný bod A prejde z priamočiarej trajektórie na krivočiaru, tak aj bod B prejde na krivočiaru trajektóriu. Analyticky vyjadriť väzbu medzi trajektóriami počiatočného a koncového bodu je veľmi zložitá.

Najprv sledujeme prípad, ktorý je na obr. 2a. Na obrázku sú uvedené trajektórie stredu „koruny“ pri rôznych dĺžkach zväzkov kmeňov (stromov). Priebehy trajektórií zodpovedajú dĺžkam zväzkov 12 m, 16 m a 20 m. Trajektória bodu A závesu zväzku predstavuje krivku, ktorá má na začiatku a na konci premenlivú krivosť, ak v strednej časti krivka je oblúkom kružnice. Prechod traktora z priamočiarej dráhy, keď uhol medzi osami predného a zadného polrámu je nulový, vtedy neprebíha natočenie na maximálny uhol zlomu okamžite. Vodič na túto operáciu potrebuje určitý čas. Preto trajektória bodu závesu zväzku predstavuje krivku na začiatku a konci otáčania, ktorá pozostáva z úsekov rôznej krivosti. Stredná časť tejto krivky je oblúk kružnice minimálneho polomeru, pretože otáčanie prebieha s maximálnym uhlom zlamovania polrámov traktora. Na obr. 2a trajektória bodu A je zobrazená krivkou 0 pri otáčaní traktora o 90°, (tam sa nachádza tiež oblúk kružnice). Dĺžka úsekov s premenlivou krivosťou závisí od vodiča traktora ako rýchlo otáča volant. Ak rýchlejšie, vtedy to má za následok zväčšenie uhlovej rýchlosti zlamovania polrámov, časť trajektórie s premenlivou krivosťou sa zmenšuje a dĺžka oblúka kružnice sa zväčšuje.

V tejto práci urobíme analýzu zmeny uhla λ , ktorý zvierajú os zväzku kmeňov (stromov) a pozdĺžnu os zadného polrámu traktora (obr. 2). Dráha bodu závesu A je rozdelená na úseky s rovnakými uhlami.

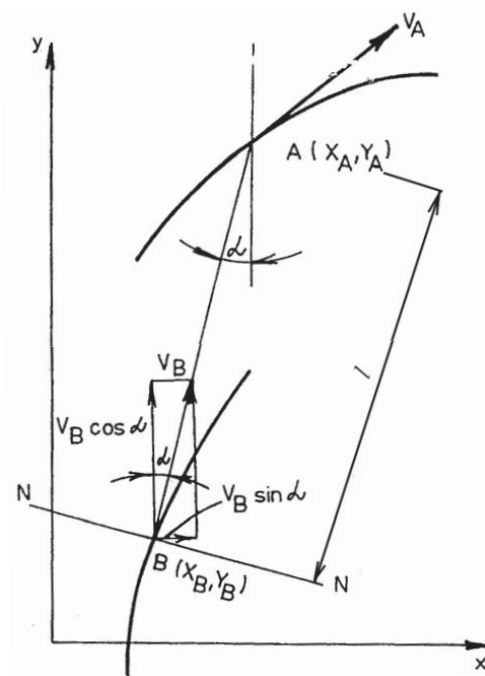


Obrázok 2

Na začiatku pohybu je uhol λ rovný nule, ako sa dostáva traktor na krivku otáčania, uhol λ sa postupne zväčšuje a dosahuje svojej najväčšej hodnoty v mieste okolo bodu 14. Tento bod sa nachádza na konci krivky, keď traktor už vychádza alebo už vyšiel na priamy úsek. V tomto prípade priečna zložka sily odporu vlečenia približovaného zväzku bude mať maximálnu hodnotu a z toho tiež vyplýva, že v danom prípade bude pôsobiť tiež maximálny klopný moment v priečnej rovine. Na obr. 2 sú uvedené krivky ako sa mení uhol λ . Z nich vyplýva, že čím je kratší zväzok kmeňov (stromov), tým menší je maximálny uhol λ a z toho vyplýva menšie nebezpečie preklopenia traktora pri rovnakých podmienkach. Extrémne body hodnôt uhla λ sú u krátkeho zväzku -55° , u stredného $-61,5^\circ$ a u dlhého $-66,5^\circ$, pričom všetky nie sú na jednej zvislici. Tak napr. 55° sa nachádza v oblasti premiestňovania 12-teho bodu závesu, $61,5^\circ$ – 13-teho a $66,5^\circ$ – v 17-tom bode závesu. Najdlhší zväzok kmeňov má najväčší uhol λ , a nachádza sa bližšie ku koncu otáčania traktora, pri jeho vychádzaní na priamu dráhu.

V procese teoretických výskumov sa vychádza z toho, že sila vlečného odporu zväzku v polozávese je rovnaká pri pohybe po priamke, tak i pri otáčaní. Na základe experimentálnych meraní sily v lane, na ktorom bol zavesený zväzok kmeňov, možno konštatovať, že sa potvrdili predpoklady.

Označíme súradnice bodu závesu zväzku $A(x_A, y_A)$ a súradnice stredu na podložke vlečenej časti zväzku $B(x_B, y_B)$ vzdialenosť od bodu závesu A po stred vlečenej časti zväzku B nazveme dĺžkou zväzku a označíme l (obr. 3).



Obrázok 3

Ak trajektória bodu závesu je zadaná v parametrickom tvare, tak $x_A = f_1(t)$ a $y_A = f_2(t)$ kde t – čas.

Nájdeme trajektóriu pohybu bodu B. Zanedbáme bočný sklz zväzku, čo plne zodpovedá pri malých rýchlostiach pohybu a pri zodpovedajúcom koeficiente trenia vlečúcej sa časti zväzku o povrch dráhy (cesty). Potom môžeme zapísať v tvare:

$$\dot{x}_B \cdot \cos \alpha - \dot{y}_B \cdot \sin \alpha = 0 \quad (1)$$

Pre systém traktor – zväzok môžeme písať rovnicu (1), ktorá vyjadruje zákon pohybu zväzku, ak sú známe zložky rýchlosti $\dot{x}_A$ a $\dot{y}_A$ bodu A závesu zväzku.

Vyjadríme súradnice bodu B prostredníctvom súradnice bodu A a uhlu α , ktorý je tvorený pozdĺžnou osou zväzku a osou y :

$$x_B = x_A - l \sin \alpha \quad (2)$$

$$y_B = y_A - l \cos \alpha$$

kde l [m] – dĺžka zväzku.

Derivovaním rovnice (2) podľa času t , dostaneme

$$\dot{x}_B = \dot{x}_A - l \cos \alpha \cdot \dot{\alpha} \quad (3)$$

$$\dot{y}_B = \dot{y}_A + l \sin \alpha \cdot \dot{\alpha}$$

Keď dosadíme zložky rýchlosti $\dot{x}_B, \dot{y}_B$ z výrazu (3) do neholonómnej väzby (1), dostaneme

$$\dot{x}_A \cdot \cos \alpha - l \cos^2 \alpha \dot{\alpha} - \dot{y}_A \cdot \sin \alpha - l \sin^2 \alpha \dot{\alpha} = 0$$

alebo $\dot{x}_A \cdot \cos \alpha - l \cos^2 \alpha \dot{\alpha} - \dot{y}_A \cdot \sin \alpha - l \sin^2 \alpha \dot{\alpha} = 0$ (4)

Z toho vyplýva, že poloha zväzku v ľubovoľnom okamihu času t bude známa z riešenia nelineárnej diferenciálnej rovnice prvého rádu.

V prípade malých uhlov α možno brať, že $\sin \alpha \cong \alpha$, $\cos \alpha \cong 1$ a rovnica (4) nadobudne tvar

$$\dot{\alpha} + \frac{\dot{y}_A}{l} \alpha = \frac{\dot{x}_A}{l} \quad (5)$$

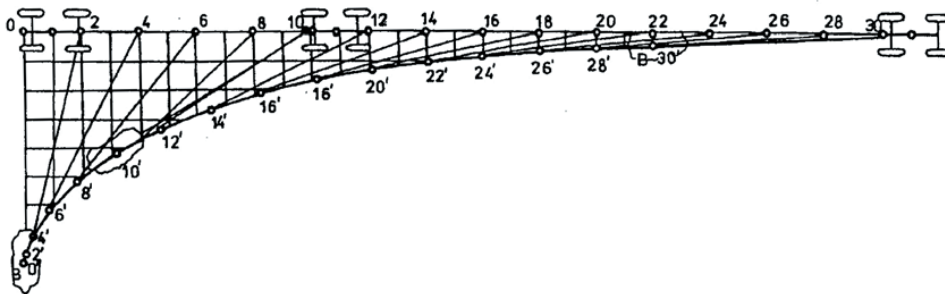
Rovnica (5) je lineárna diferenciálna rovnica prvého rádu. Jej všeobecné riešenie:

$$\alpha = e^{-\int \frac{\dot{y}_A}{l} dt} \left[\int \frac{\dot{x}_A}{l} \cdot e^{-\int \frac{\dot{y}_A}{l} dt} \cdot dt + c \right] \quad (6)$$

Integračná konštanta c sa určí z počiatočných podmienok pre $t = 0$, $\alpha = \infty$. Keď dosadíme počiatočné podmienky do rovnice (6), dostaneme $\alpha_0 = c$.

Rovnica (4) môže byť riešená, ale $\dot{y}_A = 0$, t.j. bod závesu zväzku sa pohybuje po priamke paralelnej s osou úsečiek (obr. 4). Vtedy rovnica (4) nadobudne tvar:

$$l \dot{\alpha} = x_A \cos \alpha \quad (7)$$



Obrázok 4

Keď riešime rovnicu (7), určíme α pri počiatočných podmienkach $t = 0$, $\alpha = \alpha_0$

$$\int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{d\alpha}{\cos \alpha} = \int_0^t \frac{\dot{x}_A}{l} dt \quad \text{a keď dosadíme za (rýchlosť bodu závesu) napíšeme riešenie:}$$

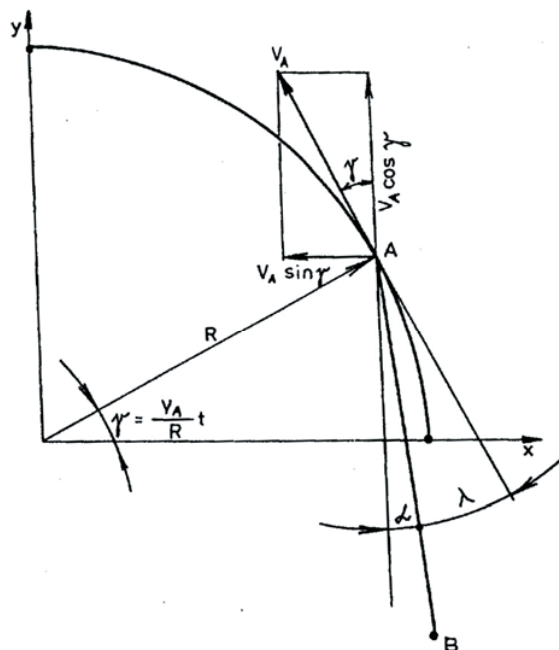
$$\ln \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha}{2} + \frac{\pi}{4} \right) - \ln \operatorname{tg} \left(\frac{\alpha_0}{2} + \frac{\pi}{4} \right) = \frac{v}{l}$$

$$\ln \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2} + \frac{\pi}{4}\right)}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_0}{2} + \frac{\pi}{4}\right)} = e^{\frac{v}{l}t}$$

$$\alpha = 2 \operatorname{artg} \left[\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_0}{2} + \frac{\pi}{4}\right) \cdot e^{\frac{v}{l}t} \right] - \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

Bod závesu A sa pohybuje po oblúku kružnice s polomerom R (obr. 5) s konštantnou rýchlosťou v , vtedy priemety rýchlosti do osi x a y budú mať tvar

$$\dot{x}_A = -v \sin \frac{v}{R} \cdot t, \quad \dot{y}_A = +v \cos \frac{v}{R} \cdot t \quad (9)$$



Obrázok 5

Keď dosadíme priemety rýchlosti $\dot{x}_A$ a $\dot{y}_A$ z výrazu (9) do rovnice (6) dostaneme vzťah pre určenie uhla α pre tento prípad:

$$\alpha = e^{-\frac{v}{l} \int \cos \frac{v}{R} t dt} \left[-\frac{v}{l} \int \sin \frac{v}{R} t \cdot e^{-\frac{v}{l} \int \cos \frac{v}{R} t dt} \cdot dt + c \right] \quad (10)$$

Keď označíme

$\frac{v}{R} \cdot t = \gamma$, $dt = \frac{R}{v} d\gamma$ vo všeobecnom riešení (10) zameníme premenné

$$\alpha = e^{-\frac{R}{l} \sin \gamma} \left[-\frac{R}{l} \int \sin \gamma e^{\frac{R}{l} \sin \gamma} \cdot d\gamma + c \right].$$

Integračnú konštantu c určíme z počiatočných podmienok.

Pri $t = 0$, $\alpha = 0$ odtiaľ potom $c = 0$

$$\alpha = -\frac{R}{l} \cdot e^{-\frac{R}{l} \sin \gamma} \int_0^{\gamma} \sin \gamma e^{\frac{R}{l} \sin \gamma} \cdot d\gamma \quad (11)$$

Uhol medzi pozdĺžnou osou zväzku a pozdĺžnou osou zadného polrámu traktora sme označili λ . Z obr. 5 vidieť, že $\lambda = \gamma - \alpha$. Z toho potom vyplýva

$$\lambda = \gamma + \frac{R}{l} \cdot e^{-\frac{R}{l} \sin \gamma} \int_0^{\gamma} \sin \gamma e^{\frac{R}{l} \sin \gamma} \cdot d\gamma \quad (12)$$

Nájďme extrémne hodnoty λ z výrazu (12), tak že derivujeme tento výraz podľa γ a postavíme $\frac{d\lambda}{d\gamma} = 0$. Po úpravách a zjednodušení dostaneme rovnicu

$$\sin^2 \gamma + \frac{l}{R} - 2 = 0 \quad (13)$$

Riešené rovnice majú dva korene

$$\sin \gamma_{1,2} = \frac{l}{2R} \pm \sqrt{\left(\frac{l}{2R}\right)^2 + 2}.$$

ZÁVER

Na základe riešenia môžeme konštatovať, že trajektória vlečúcej časti zväzku závisí len od dĺžky zväzku. Najväčší uhol medzi osou zväzku a pozdĺžnou osou zadného polrámu je na konci otáčania. Veľkosť uhla závisí i od dĺžky zväzku, čím sú dlhšie kmene tým bude väčší uhol pri ostatných rovnakých podmienkach. Získané závislosti dovoľujú zostrojiť trajektóriu ľubovoľného bodu zväzku pri známej trajektórii bodu závesu. V súvislosti s vlečným odporom nákladu umožňuje riešenie vymedziť vplyv na priečnu stabilitu ťahača.

LITERATÚRA

GREČENKO, A.: Vlastnosti terenných vozidel, VŠZ Praha, 1994, s. 115.

MIKLEŠ, M.: Ťahové vlastnosti a kinematika otáčania špeciálneho lesného kolesového traktora v lesnom teréne. Lesnictví, 31, 1985 (1), s. 73–86.

SHISHIUCHI, M.: A Fundamentals Study od Analysis of Logging Tractor Performance. Bulletin of the Iwate University Forests, 11, Marioka, Japan, 1980, s. 1–141.

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

Kontaktná adresa:

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: mikles@vsld.tuzvo.sk

PRENOS ÚDAJOV VYUŽITÍM GSM MODULU

DATA TRANSMISSION THROUGH GSM MODUL

Rudolf PETRÁŠ – Jozef ŠURIANSKY

ABSTARACT: The article consists of information about the data transmission through the GPRS technology. This technology contains a GSM modul. The data transmission from the PC which is connected through the GSM modul to the remote server connecting to the internet. There is an analysis of the time latency system for the data transmission. The article describes a GPRS configuration, the data receipt on server side using the PHP language and the measure time from the PC to the server.

Key words: GSM modul, GPRS, baud rate

ABSTARKT: Článok sa zaoberá prenosom údajov technológiou GPRS, ktorá je súčasťou GSM modulu. Údaje sa prenášajú z počítača pripojeného na GSM modul do vzdialeného serveru pripojeného k internetu. Pri prenose údajov sa analyzuje časové oneskorenie prenosového systému. Článok opisuje konfiguráciu GPRS, prijímanie údajov na serveri pomocou jazyka PHP a meranie času potrebného k prenosu od počítača k serveru.

Kľúčové slová: GSM modul, GPRS, prenosová rýchlosť

1. ÚVOD

GSM sieť využíva niekoľko technológií na prístup k sieti internet. GPRS (General Packet Radio Service) je jedna z týchto technológií. Zahŕňa podporu protokolu IP (Internet Protocol), využívaného internetom. Na testovanie prenosu údajov cez GPRS sme vyvinuli počítačový program, ktorý načítava údaje z textového súboru a pomocou GSM modulu ich posiela na internet. Na internet je pripojený server, ktorý prijíma HTTP požiadavky vyslané GSM modulom. Požiadavky sú spracovávané v jazyku PHP na serveri. Údaje, ktoré boli poslané, sú uložené v databáze MySQL a zároveň graficky vyhodnotené.

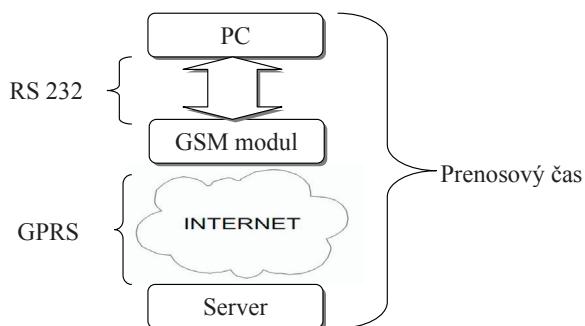
2. MATERIÁL A METÓDY

2.1 Komunikácia

Pri komunikácii počítača so vzdialeným serverom sú použité dve technológie:

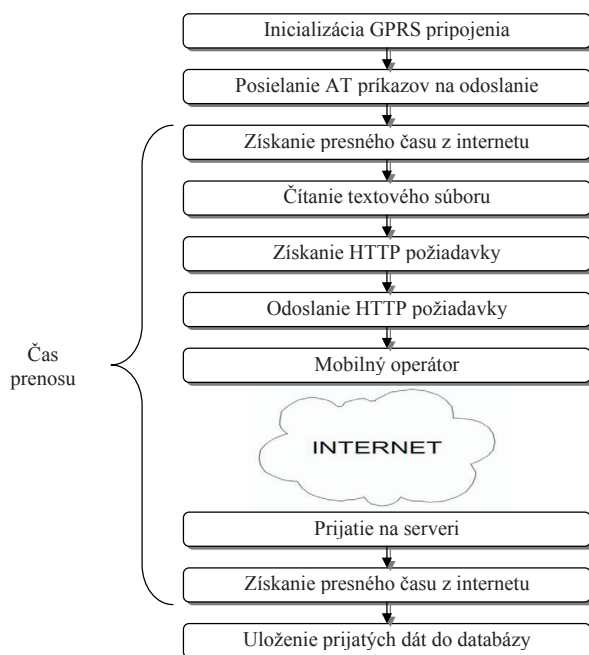
- Sériové rozhranie RS232
- GPRS

Sériové rozhranie sa používa na komunikáciu medzi počítačom a GSM modulom. Technológiou GPRS, ktorá je súčasťou GSM siete (globálna sieť pre mobilné telefóny) je vytvorené spojenie medzi GSM modulom a vzdialeným serverom cez dátovú sieť internet. Na obr. 1 je náčrt komunikačného rozhrania medzi GSM modulom a serverom.



Obrázok 1 Komunikačné rozhranie

Pre lepšiu predstavu o princípe nášho testu je na obrázku č. 2 vývojový diagram prenosu údajov.



Obrázok 2 Vývojový diagram prenosu údajov

Časti „Inicializácia GPRS pripojenia“ a „Posielanie AT príkazov na odoslanie“ sú popísané v kapitole 3.1. Časti od „Získanie presného času z internetu“ po „Odoslanie HTTP požiadavky“ zabezpečuje program na riadenie GSM modulu popísaný v kapitole 4. Posledné tri časti sú vykonávané na serveri v skriptovacom jazyku PHP.

2.2 GSM modul

Na testovanie sme využili GSM modul SIM508 vrátane vývojového kitu. Modul je ovládaný počítačovým programom, ktorý vysiela cez RS232 tzv. AT príkazy. AT príkazy sa používajú na nastavovanie, ovládanie a riadenie GSM modulu. Pomocou týchto príkazov sme nakonfigurovali GPRS a odoslali údaje na dátovú sieť internet.

2.2.1 GPRS

GPRS (General Packet Radio Service) slúži na dátový prenos cez GSM sieť. Jedna z prvých služieb, ktorá nie je závislá od času pripojenia, ale od počtu prenesených dát. GPRS je paketovo–prepínané, čo znamená, že viacej užívateľov zdieľa rovnaký prenosový kanál. To má aj svoje nevýhody, čím viacej užívateľov, tým pomalšie pripojenie.

Pri testovaní využívame HTTP (Hypertext Transfer Protocol) protokol. HTTP je základný prenosový protokol pre internet.

Ako pri každom mobilnom telefóne pri zapnutí musíme zadať tzv. PIN kód (4 až 8 miestny číselný kód predstavuje bezpečnostnú funkciu SIM kariet), tak aj pri GSM module. PIN kód zadáme nasledujúcim AT príkazom:

PIN KOD: AT+CPIN=??? (otázniky sa nahradia skutočným PIN kódom)

AT príkazy na inicializáciu GPRS:

<i>AT+CGATT=1</i>	(Pripájanie k službe GPRS)
<i>AT+CGDCONT=1, "IP", "o2internet"</i>	(definovanie PDP, podľa mobilného operátora)
<i>AT+CSSTT="o2internet", "", ""</i>	(definovanie DNS, podľa mobilného operátora)
<i>AT+CIICR</i>	(vyvolá pripojenie pomocou GPRS)
<i>AT+CIFSR</i>	(získa IP adresu modulu)
<i>AT+CIPSTATUS</i>	(získa stav pripojenia)

AT príkazy na poslanie údajov:

<i>AT+CDNSORIP=1</i>	(vyžaduje IP adresu alebo NDS server)
<i>AT+CIPSTART="TCP", "www.google.com", "80"</i>	(spustí pripojenie na zadaný server)
<i>AT+CIPSEND</i>	(príkaz na poslanie údajov)

Ak chceme zo serveru prijať odpoveď musíme poslať HTTP požiadavku na server s príkazom *AT+CIPSEND*. HTTP požiadavka môže mať tvar:

```
GET / HTTP/1.1
Host: www.google.com
Accept: */*
Accept-Language: en-us
(prázdny riadok)
```

Po poslaní požiadavky, dostaneme odpoveď zo servera ako HTML kód. HTML je základný značkovací jazyk webových stránok.

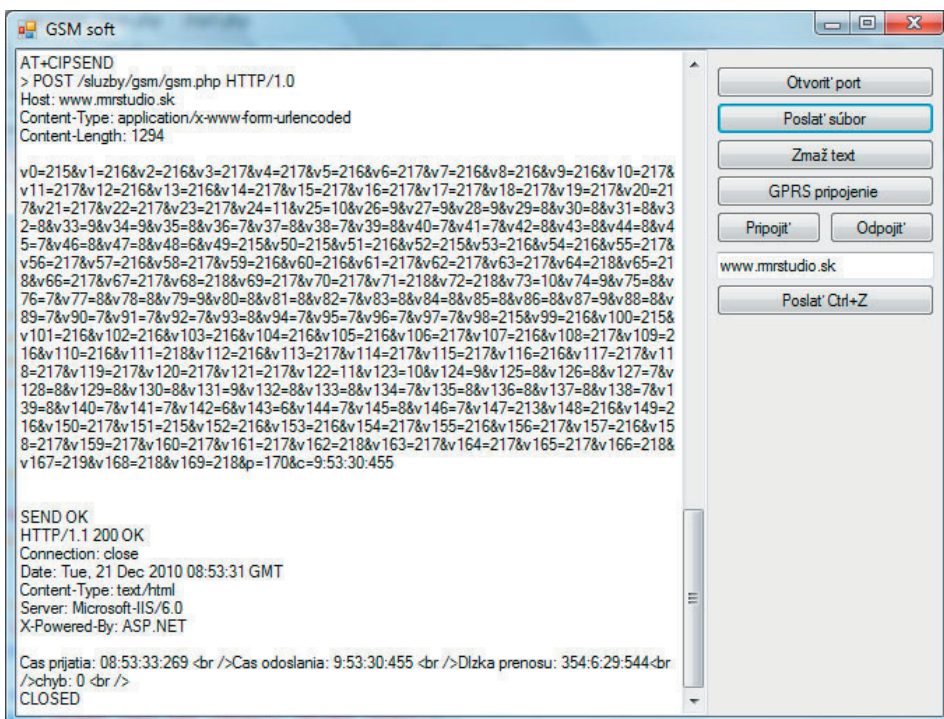
2.3 Program na riadenie GSM modulu

Program je vytvorený na platforme .NET v jazyku C#. Hlavnou úlohou je zabezpečiť:

- Načítavanie údajov zo súboru, ktoré chce užívateľ poslať.
- Generovanie HTTP požiadavky.
- Inicializácia GPRS pomocou AT príkazov.
- Posielanie HTTP požiadavky pomocou AT príkazov.

Pre odosielanie AT príkazov využívame nasledovnú funkciu:

```
private string ExecCommand(string command, int responseTimeout)
{
    try
    {
        serialPort1.Write(command + "\r\n");
        Thread.Sleep(responseTimeout);
        return string.Empty;
    }
    catch (Exception ex)
    {
        return ex.Message;
    }
}
```



Obrázok 3 Program na ovládanie GSM modulu

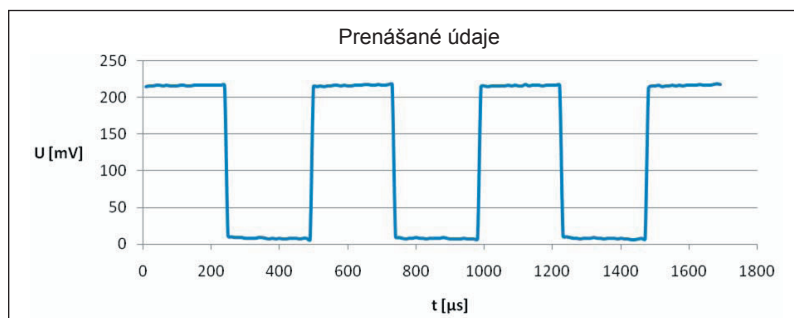
3. VÝSLEDKY

Testovanie rýchlosti sme vykonávali tak, že sme merali čas od odoslania údajov z počítačového programu, ktorý je pripojený na GSM modul, až po prijatie na vzdialenom serveri. Pred odoslaním z počítača sme zistili presný čas z internetu, tento časový údaj sme odoslali s údajmi na server. Po prijatí požiadavky serverom, sme opätovne získali presný čas z internetu. Tieto dva časy sme odčítali a získali sme čas prenosu.

Prijaté údaje serverom sme opätovne vykreslili graficky, aby sme overili správny prenos údajov.

Podmienky pri testovaní:

- Prenos rovnakého množstva údajov t.j. 1,39 kB.
- Prenášané údaje sú v digitálnej podobe.
- Čas testovania bol od 9.00 do 14.00 hodiny v priebehu pracovných dní.
- Test bol vykonávaný na rovnakom mieste a zariadení.



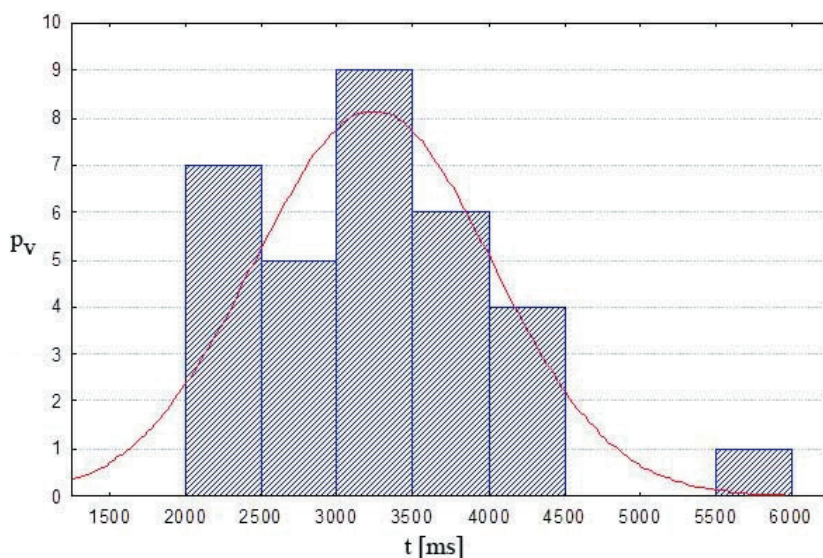
Obrázok 4 Prenášané údaje

Parametre prenášaného signálu boli: $f = 2 \text{ kHz}$, $T = 0,5 \text{ ms}$, $f_{vz} = 100 \text{ kHz}$.

Pre lepšiu prehľadnosť sme rozdelili namerané časy do intervalov v tabuľke č. 1. Dĺžka intervalu je 500 ms. Na obrázku č. 5 je zobrazený graf, ktorý udáva v ktorom časovom intervale je najväčšia početnosť.

Tabuľka 1 Namerané hodnoty rozdelené do intervalov

Interval	Čas		Počet
1	500	999	0
2	1000	1499	0
3	1500	1999	0
4	2000	2499	7
5	2500	2999	5
6	3000	3499	9
7	3500	3999	6
8	4000	4499	4
9	4500	4999	0
10	5000	5499	0
11	5500	5999	1
12	6000	6499	0



Obrázok 5 Histogram početnosti nameraných hodnôt s krivkou hustoty normálneho rozdelenia p_v – pravdepodobnosť výskytu

Tabuľka 2 Základné štatistické parametre meraného času

	Počet nameraných hodnôt	Minimum	Maximum	Medián	Aritmetický priemer	Smerodajná odchýlka	Variačný koeficient
t[ms]	32	2048	5561	3212,50	3227,22	783,08	24,26

4. ZÁVER

V článku je ukázaný spôsob prenosu údajov z počítača na vzdialený server, ktorý je pripojený na internet. Na prenos údajov sa využil GSM modul, ktorý ponúka technológiu GPRS. Na prenos údajov cez internet sme využili protokol HTTP.

Z údajov vidno, že namerané časy prenosu boli v rozmedzí od dvoch po päť a pól sekúnd. Najpravdepodobnejší čas prenosu je približne od troch do štyroch sekúnd. Zmena veľkosti prenášaných údajov (v ráde kilobajtov) podstatnou mierou neovplyvní prenosový čas. Z našich meraní môžeme usúdiť, že údaje pomocou GPRS nie je vhodné prenášať v reálnom čase, ale je vhodné skôr tam, kde dopravné oneskorenie nie je podstatným parametrom. Ďalšia vlastnosť prenosu je, že vložené oneskorenie nie je stále rovnaké, takže pri prenose nemôžeme rátať s konštantným oneskorením.

Využitie tohto systému je vhodné najmä v prostredí, kde nemáme prístup na internet cez iné siete len cez GSM. Pri prenose textových údajov alebo obrazových informácií v horšej kvalite, kvôli nízkej prenosovej rýchlosti maximálne 20 kbit/s.

LITERATÚRA

1. NistClock [online]. Dostupné na internete: < <http://cosinekitty.com/nist/> >, náhľad stránky október 2010.
2. Get Date and Time from a time server [online]. Dostupné na internete: <<http://www.kloth.net/software/timesrv1.php>>, náhľad stránky október 2010.
3. GsmMadeEasy.com [online]. Dostupné na internete: < <http://www.madeeasykits.com/Faqs.asp>>, náhľad stránky október 2010.
4. SIM508 Module [online]. Dostupné na internete: <http://www.sos.sk/a_info/resource/pdf/ine/sim508.pdf>, náhľad stránky október 2010.

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

VPLYV POLOHY KOMPENZAČNÝCH DRÁŽOK, MEDENÝCH NITOV V TELE PÍLOVÉHO KOTÚČA A NEROVONOMERNÉHO ROZSTUPU ZUBOV NA KRITICKÉ OTÁČKY

THE EFFECT OF THE POSITION OF THE COMPENSATING SLOTS, THE COPPER CORKS IN THE BODY OF A CIRCULAR SAW BLADE AND THE UNBALANCED PITCH OF SEVERAL TEETH ON CRITICAL SPEED

Ján SVOREŇ

ABSTRACT: In most cases, the cutting of wood is proceeded at high feed speed and high cutting speed of the circular saw blades. At present time, the asymmetric circular saw blade is the most commonly used in the cutting process. The results of the measuring the natural frequency of two structurally different circular saw blades are presented in this paper. The types of the circular saw blades are: with six sigmoid compensating slots in radial direction and with six sigmoid compensating slots inclined at an angle of 45° . The diameters of the circular saw blades were 350 mm. The determinate informations were obtained upon experimental measurements, which are graphically illustrated and referred to in article. The influence of the position of slots on the critical speed is shown, where if $k = 3$ and $k = 4$ is an increase of critical speed (PK2) to (PK1).

Key words: circular saw blade, compensating slots, natural frequency, critical speed

ABSTRAKT: Vo väčšine prípadov, sa rezanie dreva realizuje pri vysokej posuvnej rýchlosti a vysokej reznej rýchlosti pílových kotúčov. V súčasnosti je v procese rezania najčastejšie používaný asymetrický pílový kotúč. V článku sú prezentované výsledky merania vlastnej uhlovej frekvencie dvoch konštrukčne rozdielnych pílových kotúčov. Typy pílových kotúčov sú: so šiestimi esovitými kompenzačnými drážkami v radiálnom smere a so šiestimi esovitými kompenzačnými drážkami sklonenými pod uhlom 45° . Priemery pílových kotúčov boli 350 mm. Na základe experimentálnych meraní boli získané určité poznatky, ktoré sú graficky znázornené a uvedené v článku. Preukázal sa vplyv polohy drážok na kritické otáčky, pričom v prípade $k = 3$ a $k = 4$ je nárast kritických otáčok (PK2) voči (PK1).

Kľúčové slová: pílový kotúč, kompenzačné drážky, vlastná frekvencia, kritické otáčky

1. ÚVOD

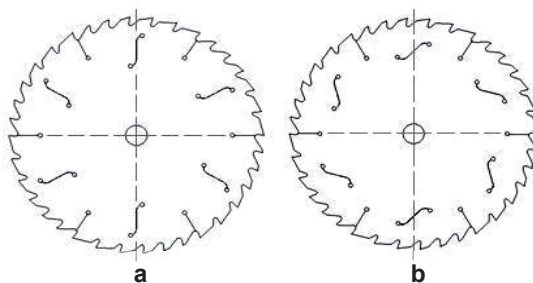
V drevárskom priemysle je najviac používaný proces rezania dreva a drevných materiálov kotúčovými pilami. Reznými nástrojmi sú pilové kotúče. Kmitanie a hluk pilových kotúčov sú základné problémy nestability nástroja v procese rezania. Zníženie amplitúdy kmitov je nevyhnutné pre zlepšenie kvality povrchu, presnosti rezania, zvýšenie výťažnosti materiálu, predĺženie životnosti nástroja, ale aj pre redukciu hluku. K obmedzeniu pískania a priečného kmitania pilového kotúča boli zavedené niektoré metódy, ktoré sú:

- predpínanie pilového kotúča valcovaním,
- použitie vysoko tlmiacej zliatiny na telo pilového kotúča,
- tlmenie kmitania prúdom vzduchu,
- vedenie pilového kotúča,
- rezanie drážok do tela pilového kotúča laserovým lúčom.

V súčasnosti pri rezaní dreva a drevných materiálov je najčastejšie používaný asymetrický pilový kotúč, v ktorom sú vyrobené viaceré kompenzačné drážky. Vplyvy dĺžky, počtu, tvaru a polohy kompenzačných drážok na tvary priečného kmitania, vlastné uhlové frekvencie a kritické otáčky boli skúmané vo viacerých výskumných prácach. Niektoré z týchto prác môžeme spomenúť (Yu a Mote, 1987; Holøyen, 1987; Nishio a Marui, 1996; Svoreň a Naščák, 1997; Raman a Mote, 1999; Stakhiev, 2000; Svoreň, 2001; Svoreň a Danko 2004; Svoreň a Murín, 2009; Ekevad et al, 2009). Napriek mnohým výskumným prácam neboli úplne ešte vysvetlené všetky možné vplyvy, čo podmieňuje ďalší základný výskum.

2. MATERIÁL A METÓDY

V rámci výskumu boli pri experimentálnych meraniach použité dva pilové kotúče. Prvý pilový kotúč (PK1) mal v tele pomocou laseru vypálené esovité kompenzačné drážky v radiálnom smere, medené nity a nerovnomerný rozstup viacerých zubov opakujúci sa po 1/6 obvodu (obr. 1a). Druhý pilový kotúč (PK2) mal v tele esovité kompenzačné drážky sklonené pod uhlom 45° od radiálneho smeru, medené nity a nerovnomerný rozstup viacerých zubov opakujúci sa po 1/6 obvodu (obr. 1b). Zuby pilových kotúčov sú osadené doštičkami zo spekaného karbidu a sú striedavo šikmo brúsené. Použité upínacie príruby mali vonkajší priemer $d_p = 110$ mm. Konštrukčné rozdiely pilových kotúčov sú znázornené na obr. 1.



Obrázok 1 Použité pilové kotúče

Tabuľka 1 Základné parametre použitých pílových kotúčov

Parametre	PK1	PK2
Priemer pílového kotúča, mm	350	350
Priemer upínacej diery, mm	30	30
Počet zubov	36	36
Hrúbka pílového kotúča, mm	2,5	2,5
Šírka reznej hrany, mm	4,5	4,5
Výška zuba, mm	13	13
Rozstup zubov, mm	nerovnomerný rozstup zubov	
Geometria zuba	$\alpha_f = 15^\circ$	
	$\beta_f = 65^\circ$	
	$\gamma_f = 10^\circ$	
Typ zuba	WZ	

Metódy merania vychádzajú z teórie kmitania otáčajúceho sa pílového kotúča. Vlastná uhlová frekvencia otáčajúceho sa pílového kotúča f_d je ovplyvnená existujúcou uhlovou rýchlosťou. Teda frekvencia f_d je funkciou otáčok pílového kotúča n a môžeme ju napísať ako $f_d(n)$. Frekvencie dopredu postupujúcej a dozadu postupujúcej vlny sú potom vyjadrené podľa (Nishio a Marui, 1996) ako rovnice:

$$\text{dopredu postupujúca vlna: } f_1 = f_d(n) + \frac{k \cdot n}{60}, \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

$$\text{dozadu postupujúca vlna: } f_2 = f_d(n) - \frac{k \cdot n}{60}, \quad [\text{Hz}] \quad (2)$$

V prípade, že sa otáčky pílového kotúča zvyšujú, frekvencia dozadu postupujúcej vlny sa v určitých pracovných otáčkach (okrem prípadov, keď počet uzlových priemerov $k = 0$ a 1) rovná nule. Tieto pracovné otáčky sa nazývajú „kritické otáčky“. Pri týchto kritických otáčkach sa uhlová rýchlosť pílového kotúča rovná rýchlosti vlny v pílovom kotúči a dozadu postupujúca vlna sa javí akoby v priestore stála. To je rezonančný bod, kedy aj malá bočná sila zapríčini veľké priečne vybočenie pílového kotúča. Z rovnice (2) je možné potom odvodiť nasledujúcu rovnicu:

$$n_k = \frac{60 \cdot f_d(n)}{k}, \quad [\text{min}^{-1}] \quad (3)$$

V dôsledku odstredivej sily sa vlastná uhlová frekvencia otáčajúceho pílového kotúča parabolicky zvyšuje s narastajúcimi pracovnými otáčkami. Vzťah medzi vlastnou uhlovou frekvenciou otáčajúceho sa pílového kotúča a otáčkami je vyjadrený rovnicou:

$$f_d(n)^2 = f_{(n=0)}^2 + \lambda \cdot \left(\frac{n}{60}\right)^2, \quad [\text{Hz}] \quad (4)$$

Dosadením rovnice (4) do rovnice (3) dostaneme po úprave rovnicu pre kritické otáčky:

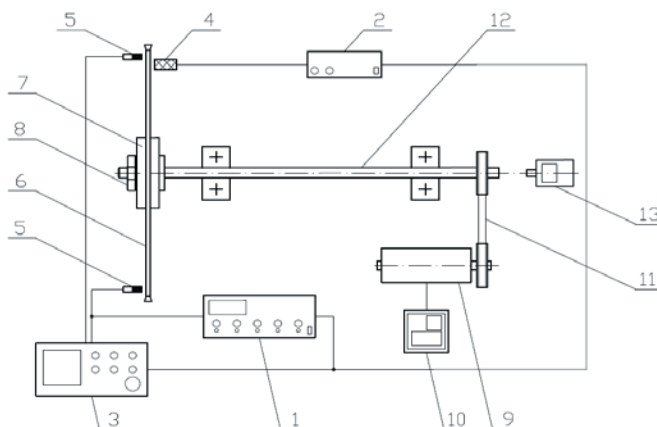
$$n_k = \frac{60 \cdot f_{(n=0)}}{\sqrt{k^2 - \lambda}}, \quad [\text{min}^{-1}] \quad (5)$$

$f_{(n=0)}$ – vlastná uhlová frekvencia kmitov pílového kotúča v pokoji, t.j. keď $n = 0$ [Hz]

k – počet uzlových priemerov ($k = 1; 2; 3; 4; 5 \dots$) [–]

λ – koeficient odstredivej sily [–]

Vlastné uhlové frekvencie kmitov neotáčajúcich sa pílových kotúčov $f_{(n=0)}$ boli experimentálne určené pre $k = 1; 2; 3; 4$ na meracej aparátúre, ktorá je vybudovaná v laboratóriu KDSZ. Bloková schéma zapojenia prístrojov je znázornená na obr. 2.



Obrázok 2 Bloková schéma zapojenia prístrojov pre meranie vlastných uhlových frekvencií a frekvencií dozadu postupujúcej vlny (f_2) otáčajúcich sa pílových kotúčov

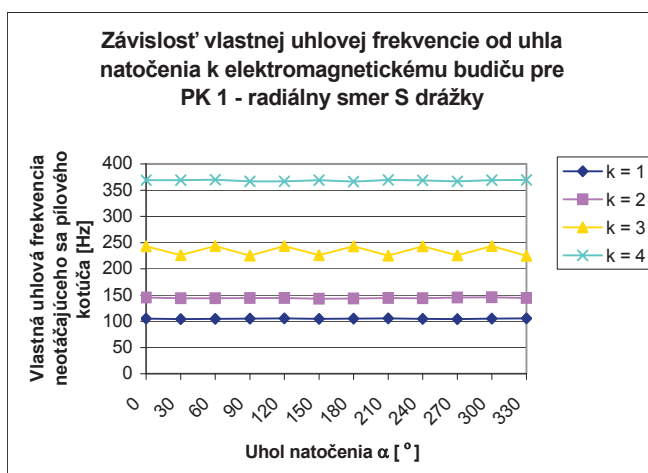
1 – tónový generátor a počítač frekvencie, 2 – zosilňovač, 3 – digitálny osciloskop, 4 – elektromagnetický budič, 5 – snímač kmitov, 6 – pílový kotúč, 7 – upínacie príruby, 8 – matica, 9 – elektromotor, 10 – frekvenčný menič, 11 – remeňový prevod, 12 – hriadeľ uložený v ložiskách, 13 – bezkontaktný otáčkomer

Koeficienty odstredivej sily λ sa vypočítavali podľa rovnice (4) na základe experimentálne nameraných frekvencií dozadu postupujúcej vlny f_2 (pozri rovnicu 2). Pri experimentálnych meraniach boli použité upínacie príruby s priemerom: $\varnothing d_p = 110 \text{ mm}$ – upínací pomer ($\alpha = 0,314$). Pracovné otáčky pri ktorých sa vykonali experimentálne merania boli v rozsahu $n_p = (3000 \div 3600) \text{ min}^{-1}$ s nárastom po 100. Na meranie frekvencií dozadu postupujúcej vlny f_2 sa použila tá istá meracia aparátúra.

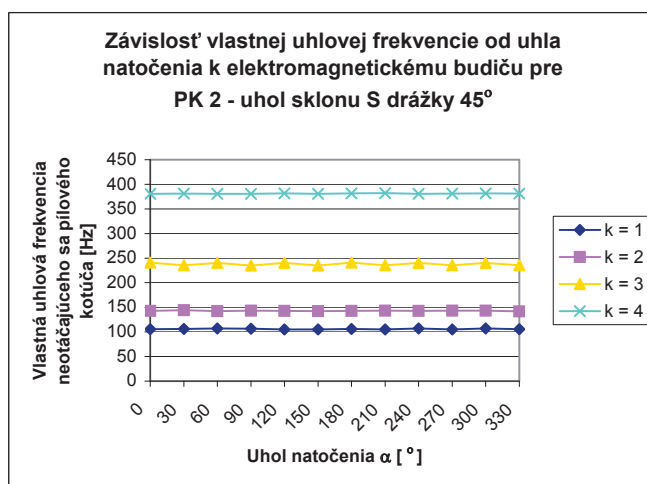
3. VÝSLEDKY MERANIA A DISKUSIA

Koeficienty odstredivej sily λ pre uvedené pílové kotúče boli vypočítané na základe nameraných hodnôt frekvencií $f_{(n=0)}$ a frekvencií f_2 pre jednotlivé pracovné otáčky podľa

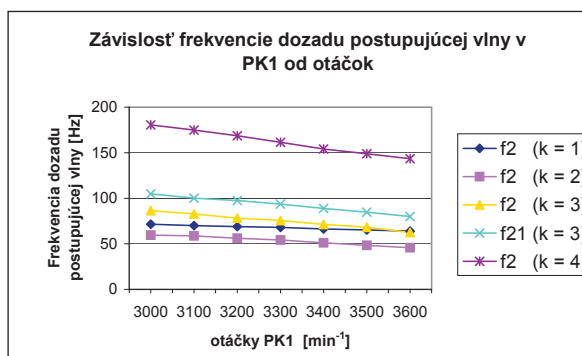
rovnice (4). Z vypočítaných koeficientov sa pre každý uzlový priemer $k = 1; 2; 3; 4$ určila stredná hodnota. Grafické znázornenie výsledkov meraní je na obr. (3÷7). Kritické otáčky uvedených pilových kotúčov sa vypočítali podľa rovnice (5) a sú uvedené v obr. 7.



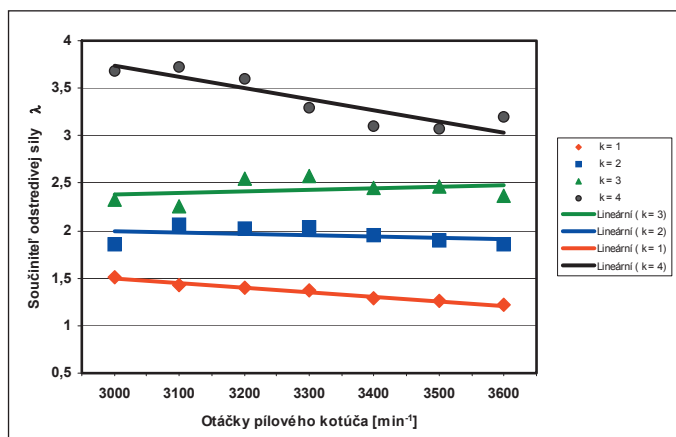
Obrázok 3 Závislosť vlastnej uhlovej frekvencie od uhla natočenia k elektromagnetickému budiču



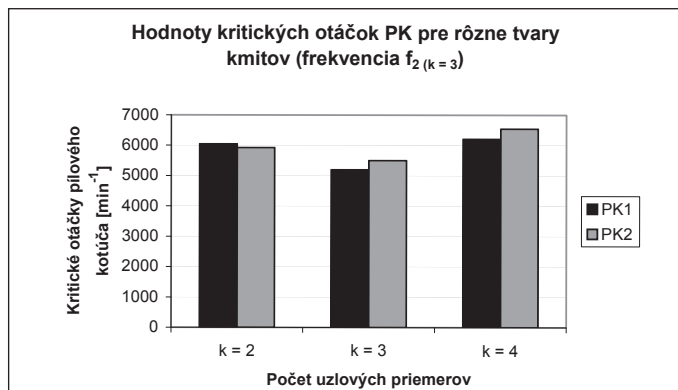
Obrázok 4 Závislosť vlastnej uhlovej frekvencie od uhla natočenia k elektromagnetickému budiču



Obrázok 5 Závislosť frekvencie dozadu postupujúcej vlny na otáčkach pilového kotúča



Obrázok 6 Závislosť súčiniteľa odstredivej sily λ od otáčok pre PK1



Obrázok 7 Hodnoty kritických otáčok pre rôzne tvary kmitov

Z experimentálnych meraní vplyvu polohy drážok tela pílových kotúčov na kritické otáčky vyplývajú nasledovné závery:

- vplyv drážok na vlastné uhlové frekvencie je výrazný pre sledovaný uzlový priemer $k = 3$ pre obidva pílové kotúče obr. 3 a obr. 4,
- pre $k = 3$ sa vyskytujú dve rôzne hodnoty frekvencie dozadu postupujúcej vlny f_2 a f_{21} ako to vidieť na obr. 5,
- koeficient odstredivej sily λ je nezávislý na otáčkach pílového kotúča obr. 6,
- pre sledované uzlové priemery $k = 2; 3; 4$ je v prípade $k = 2$ pokles kritických otáčok (PK2) voči (PK1) ale v prípade $k = 3; 4$ nárast kritických otáčok (PK2) voči (PK1) obr. 7.

4. ZÁVER

Laserové rezanie drážok do tela pílového kotúča ovplyvňuje jeho kmitanie pri chode naprázdno aj v procese rezania. Pri rovnakých rozmeroch pílových kotúčov sú kritické otáčky závislé od polohy kompenzačných drážok v tele pílového kotúča. V konštrukčnom návrhu kotúčovej pily musíme zohľadniť minimálne kritické otáčky pílového kotúča a musíme sa im vyhnúť. Použitie pílových kotúčov s drážkami zvyšuje v praxi kvalitu obrobeneho povrchu, presnosť obrobku ako aj kvalitu pracovného prostredia z hľadiska hlučnosti.

LITERATÚRA

- EKEVAD, M., CRISTOVAO, L., GRÖNLUND, A.: 2009. Different methods for monitoring flatness and tensioning in circular – saw blades. In: *Proceedings 19th International Wood Machining Seminar*, Nanjing, 21.–23. october 2009, p. 121–131, Faculty of Wood Science and Technology, Nanjing Forestry University, 21 037 Jiangsu, China
- HOLØYEN, S.: 1987. Vibrations and natural frequencies of angular slot circular saws. *Holz als Roh – und Werkstoff*, 45, 1987, s. 101–104.
- NISHIO, S., MARUI, E.: 1996. Effects of Slots on the Lateral Vibration of a Circular Saw Blade. *Proceedings of Tenth Wood Machinig Seminar*, 1996, s. 159–168.
- RAMAN, A., MOTE, C. D.: 1999. Non – linear oscillations of circular plates near a critical speed resonance. *International Journal of Non – Linear Mechanics*, 34, 1999 s. 139–157.
- STAKHIEV, Y. M.: 2000. Today and tomorrow circular sawblades: Russian version. *Holz als Roh – und Werkstoff*, 58, 2000, s. 229–240.
- SVOREŇ, J., NAŠČÁK, L.: 1997. Vplyv drážok tela pílových kotúčov na rezonančné a kritické otáčky. *Acta Facultatis Technicae*, 1, 1997, č. 1, s. 93–99. ISBN 80-228-0706-0.
- SVOREŇ, J.: 2001. Vlastné statické frekvencie kmitov pílových kotúčov s kompenzačnými drážkami. In: *Zborník prednášok z Medzinárodnej vedeckej konferencie, Sekcia č.1, Trendy lesníckej, drevárskej a environmentálnej techniky a jej aplikácie vo výrobnom procese*. Vydavateľstvo TU vo Zvolene, 2001, s. 185–189. ISBN 80-228-1061-4.
- SVOREŇ, J., DANKO, P.: 2004. Vplyv drážok tela na kritické otáčky pílových kotúčov. *Acta Facultatis Technicae*, 8, č. 1, 2004, s. 13–19, ISBN 80-228-1517-9, ISSN 1336-4472.
- SVOREŇ, J., MURÍN, L.: 2009. Vplyv tvaru drážok tela na kritické otáčky pílových kotúčov. *Acta Facultatis Technicae*, 14, č. 2, 2009, s. 59–66, ISSN 1336-4472.

YU, R. C., MOTE, C. D.: 1987. Vibration of Circular saws Containing Slots. *Holz als Roh – und Werkstoff*, 45, 1987, s. 155–160.

Vedecké poznatky boli získané v rámci riešenia grantového projektu KDSZ VGP – č. 1/0022/09.

Kontaktná adresa:

doc. Ing. Ján Svoreň, CSc.,
Katedra drevárskych strojov a zariadení, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky,
Technická univerzita vo Zvolene,
T. G. Masaryka 24,
960 53 Zvolen
Slovenská republika
e-mail: svoren@vsld.tuzvo.sk

ZVÝŠENIE PRESNOSTI SENZOROV POLOHY NA BÁZE MAGNETOSTRIKCIE A WIEDEMANOVHO JAVU

INCREASE OF ACCURACY OF SENSORS POSITION BASED ON MAGNETOSTRICTION AND WIEDEMANN EFFECT

Jozef ŠURIANSKY ml. – Ľubomír NAŠČÁK

ABSTRACT: This article deals with utilization of magnetic characteristic of ferromagnetic materials in the advanced sensors systems. Next part deals with design of processor system what ensures uncertainty neutralization which arises by non-linearity and thermal dependence of magnetostriction sensor.

Key words: magnetostriction, Wiedman effect, microcomputer

ABSTRAKT: V článku je popísané využitie magnetických vlastností feromagnetických materiálov v moderných snímacích systémoch. Ďalšia časť sa zaoberá návrhom procesorového systému, ktorý zabezpečuje neutralizáciu neistoty vznikajúcej nelinearitou a tepelnou závislosťou magnetostrického senzoru.

Kľúčové slová: magnetostrikcia, Wiedemannov jav, mikropočítač

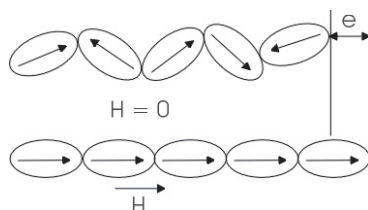
1 ÚVOD

Meranie polohy, posunutia, vzdialenosti, sledovanie prítomnosti predmetov sa vyskytuje veľmi často v automatizačných úlohách, v robotických aplikáciách a v rôznych pohybových zariadeniach. Zásadné rozšírenie snímania polohy a odvodených procesných veličín priniesla automatizácia nespojitých výrobných procesov a taktiež strojárnská a automobilová výroba. Na meranie polohy sa v súčasnosti najčastejšie používajú elektrické princípy. Merací rozsah sa pohybuje od niekoľkých stotín milimetra až do stoviek metrov. Citlivý prvok senzora transformuje vstupnú veličinu na elektrický výstupný signál. Za ťažiskový problém v oblasti meracej techniky pre riadenie a monitorovanie možno pokladať návrh a realizáciu meracích kanálov s požadovanými metrologickými vlastnosťami z komerčne dostupných prvkov podľa požiadaviek praxe. V súčasnosti je veľmi dôležité zavádzanie modernej prvkovej základne pri praktických aplikáciách a to najmä číslícových meracích kanálov, ale aj uplatňovanie prvkov v podsystémoch riadiacich

systémov s aplikáciou mikropočítačov. Na zabezpečenie týchto zámerov je potrebné poznať základné princípy merania.

2 MAGNETOSTRIKCIA

Magnetostrickiou rozumieme javy vznikajúce vzájomným pôsobením magnetických a mechanických stavov feromagnetických látok (obr. 1).



Obr. 1 Znáozornenie magnetostrickie

Snímače využívajúce rôzne prejavy magnetostrickie sa dajú rozdeliť do nasledujúcich kategórií:

- **Magnetoelastické snímače**

Zmena permeability pri mechanickom namáhaní feromagnetických materiálov je úmerná mechanickému napätiu σ a ďalším materiálovým konštantám

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = \lambda_0 \mu_0 \sigma$$

kde:

$\Delta\mu = \mu - \mu_0$ je zmena permeability pri mechanickom namáhaní k hodnote μ_0 pre $\sigma = 0$
 λ_0 je koeficient úmernosti.

Z podmienky rovnováhy hustoty mechanickej energie a zmeny hustoty magnetickej energie spôsobenej deformáciou, s uvažovaním závislosti koeficienta magnetostrickie od magnetickej indukcie, sa dá základná prevodová charakteristika snímača vyjadriť v tvare:

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = \frac{2\lambda_s}{B_s^2} \mu \sigma$$

kde:

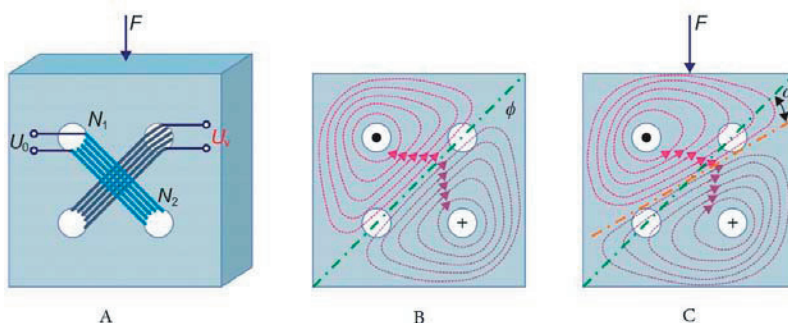
λ_s je koeficient magnetostrickie feromagnetika pri nasýtení,

B_s je magnetická indukcia feromagnetika pri nasýtení,

σ je mechanické napätie.

Z tohto vzťahu vyplýva, že na použitie v snímačoch sú vhodné feromagnetické materiály, ktoré majú veľkú hodnotu permeability a koeficienta magnetostrickie, a naopak, malú hodnotu indukcie pri nasýtení. Kryštalické magnetické materiály majú hodnotu koeficienta magnetostrickie v rozsahu od $1 \cdot 10^{-6}$ až do $9 \cdot 10^{-6}$.

- **Magnetoanizotropné snímače**



Obr. 2 Magnetoanizotropný snímač

Princíp magnetoanizotropného snímača je na obr. 2. V otvoroch magnetického obvodu, tvoreného telesom z plechov alebo plným feromagnetickým materiálom, sa nachádza primárne a sekundárne vinutie (obr. 2a). Tieto dve cievky vytvárajú transformátor. V stave bez mechanického namáhania sa vďaka dokonalkej geometrickej a magnetickej symetrii vo výstupnom vinutí indukuje iba minimálne napätie. Rozloženie magnetického toku pre tento prípad naznačuje obr. 2b. Mechanické zaťaženie vytvorí oblasť zvýšenej permeability pod uhlom α od hlavnej uhlopriečky (obr. 2c). Silovým pôsobením sa tak vytvorí magnetická anizotropia, ktorej dôsledkom je zväčšenie väzby medzi vstupným a výstupným vinutím. Magnetický tok sledujúci smer zníženého magnetického odporu vytvorí zložku kolmú k ploche vinutia cievky 2. V tomto vinutí sa generuje napätie

$$U_2 \approx U_1 \frac{N_2}{N_1} \sin \alpha \approx K_p \sigma U_1$$

kde:

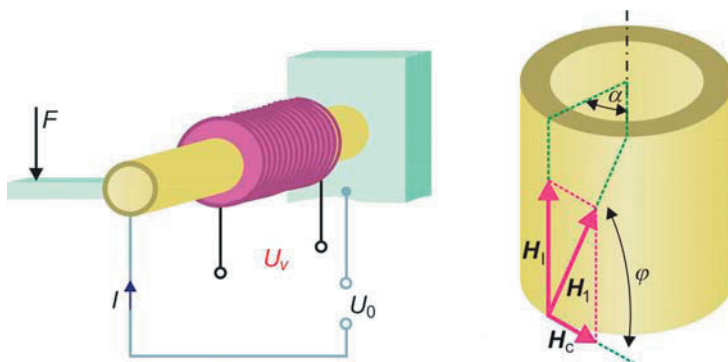
K_p je konštanta snímača,

N_1 je počet závitov primárneho vinutia,

N_2 je počet závitov sekundárneho vinutia.

- **Snímače využívajúce Wiedmannov jav**

Wiedmannov jav sa prejavuje tak, že tyč kruhového prierezu alebo trubička z vhodného magnetostrikčného materiálu, ktorá je na jednej strane pevne fixovaná, sa skrúti okolo vlastnej osi, ak na ňu súčasne pôsobí pozdĺžne a kruhové magnetické pole. Snímače často využívajú inverzný Wiedmannov jav: budenie kruhovým magnetickým poľom a skrútenie trubičky, ktorou prechádza budiaci prúd. Výstupom je napäťový signál indukovaný v snímačnej cievke, ktorý vytvára pozdĺžne magnetické pole.



Obr. 3 Snímač Wiedemannovho typu

Senzor pracujúci na princípe Wiedemannovho javu (obr. 3) je zložený z feromagnetickej rúrky, magnetovanej pulzným prúdom I , ktorý prechádza pozdĺž rúrky, alebo v jej vnútri a vytvára kruhové pole s vektorom intenzity H_c v smere rovnobežnom s plochou snímačej cievky (Clark, 1980). Indukované napätie U_v sa v tomto prípade rovná nule. Pri skrútení trubičky o uhol α sa vektor intenzity poľa otočí o uhol φ . Vznikne tak zložka kruhového poľa H_t , kolmá na vinutie snímačej cievky, ktorá v nej vyvolá indukované napätie úmerné uhlu α

$$U_v = K \cdot \varepsilon$$

kde:

K je citlivosť snímača,

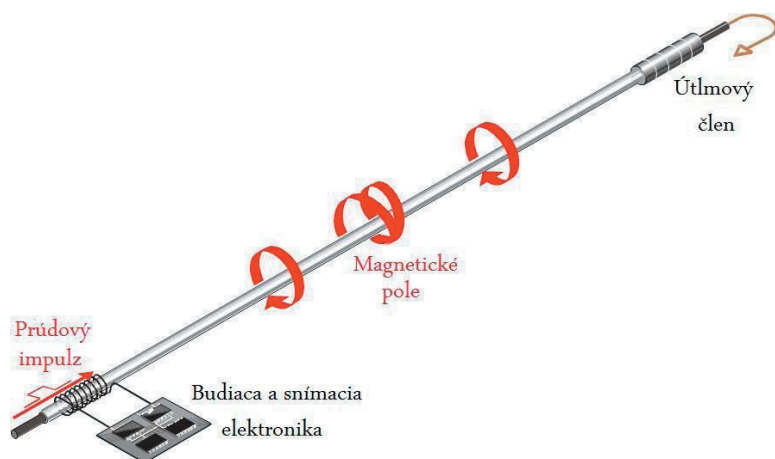
ε je pomerná deformácia.

3 VYUŽITIE MAGNETOSTRIKČIE A WIEDEMANNOVHO JAVU V SENZORIKE

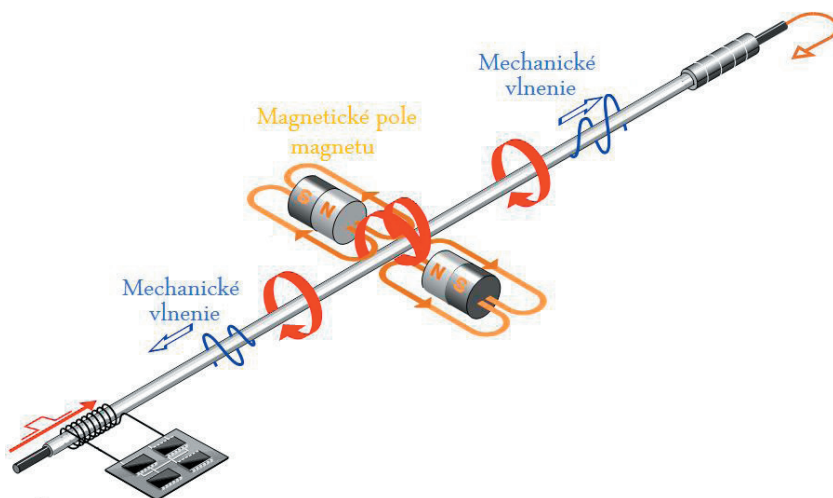
V lineárnych senzoroach polohy sa tento jav používa ako menič vychýlenia magnetického poľa na mechanické vlnenie. V snímačoch je uložená trubička magnetostrickného materiálu, v ktorej je umiestnený budiaci vodič. Na jednej strane trubičky je umiestnená elektronika pre riadenie procesu merania, na strane druhej je útlmový člen, ktorého úlohou je utlmiť mechanickú vlnu na opačnom konci.

Snímanie začína prúdovým impulzom vyslaním do budiaceho vodiča. Tento impulz vytvorí magnetické pole, ktoré deformuje trubičku magnetostrickného materiálu (obr. 4). Keďže je dĺžka impulzu krátka (cca $1 \mu s$) je vyvolané v trubičke mechanické vlnenie (Chudý, 1997).

Snímače využívajú na určenie polohy permanentný magnet. Tento magnet vytvorí magnetické pole, od ktorého sa šíri mechanická vlna späť k snímačej cievke. Tu využijúc Wiedmannov efekt (zmena mechanického vlnenia na indukované napätie v cievke) sa impulz prijme (obr. 5).



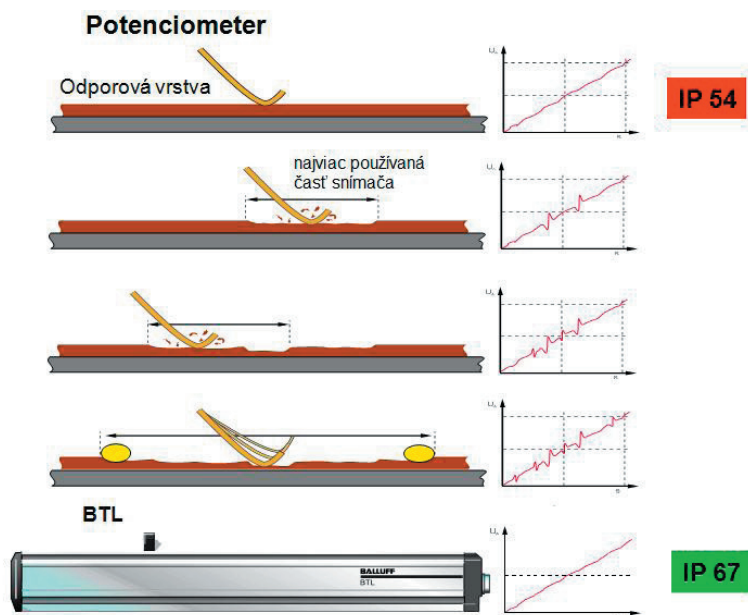
Obr. 4 Magnetické pole vytvorené prúdovým impulzom



Obr. 5 Šírenie mechanickej vlny od permanentného magnetu

Určenie snímanej vzdialenosti sa vypočíta ako čas od vyslania impulzu po príjem mechanickej vlny cievkou.

Jedným z výrobcov využívajúcich tento systém merania je spoločnosť Balluff. Nový snímač tejto spoločnosti s označením BTL7 má snímací rozsah do 7 600 mm a okrem klasických analógových a priemyselných komunikačných výstupov má možnosť USB rozhrania. Týmto sa dostáva do najvyššej triedy lineárnych snímačov. Hlavnou výhodou tohto princípu merania je bezkontaktný systém. Preto na rozdiel od klasických potenciometrických lineárnych snímačov ostáva výstupný signál po celú dobu životnosti rovnako kvalitný (obr. 6).

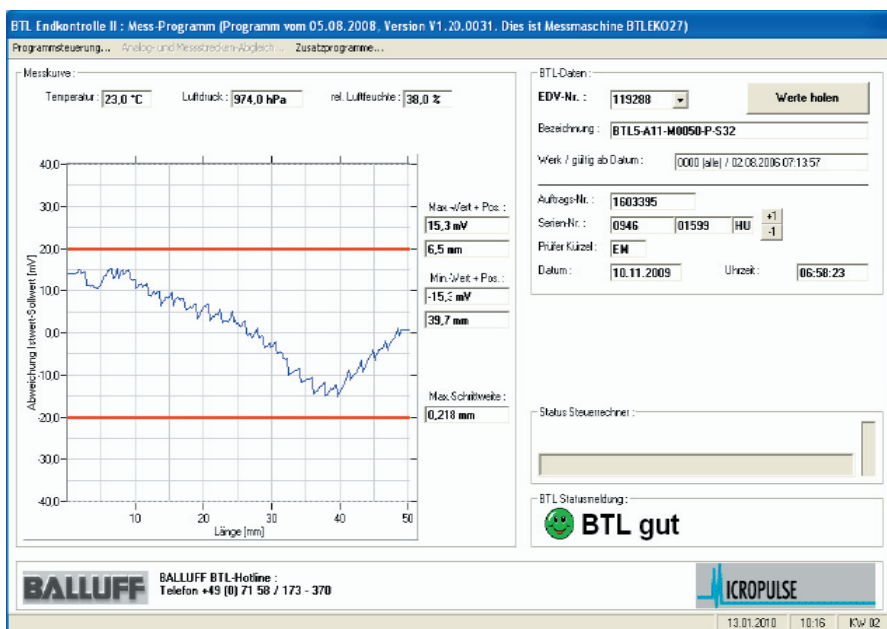


Obr. 6 Stabilita výstupu snímača na magnetostrikčnom a potenciometrickom princípe

USB rozhranie umožňuje rýchle a jednoduché nastavenie parametrov a rozsahu snímača. Prostredníctvom USB možno nastaviť duálnu funkciu výstupu ako polohu a rýchlosť od jedného magnetu. Operačný stav a diagnostiku signalizujú LED diódy, čo vedie k zvýšeniu ochrany. Tiež garantujú spoľahlivú odolnosť proti zvýšeným otrasom a vibráciám. S rozlíšením na 0,01 mm, krytím IP 67 a mechanickou odolnosťou je to spoľahlivý nástroj pre široký rozsah aplikácií. Teplotná závislosť pre snímač s analógovým napäťovým výstupom je $150 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ čo je odchýlka o 0,0015%. V porovnaní z ostatnými typmi absolútneho snímania polohy je presnejší ako štandardné optické snímače. Nedosahuje však presnosť optického pravítka, ktoré je však drahšie a nie tak odolné voči mechanickému poškodeniu.

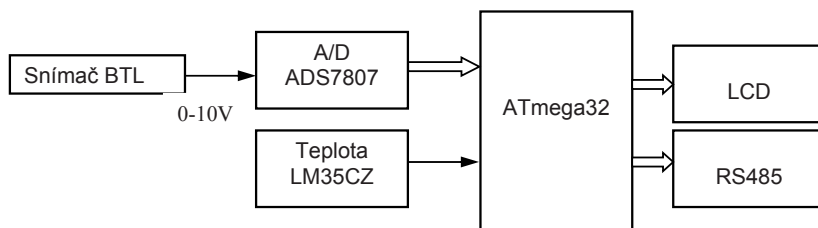
4 ZVÝŠENIE PRESNOSTI SNÍMANIA POMOCOU PROCESORA ATMEGA32

V prípade požiadaviek na zvýšenie presnosti merania, potlačenie teplotnej závislosti a chyby nelinearity je možné vyžiadať priamo od výrobcu, firmy Balluff, charakteristiku absolútnej chyby, tzv. chybovú charakteristiku (kalibračnú krivku) (obr. 7). Táto je meraná pre každý jeden magnetostrikčný snímač pri jeho kalibračnej kontrole vo výrobe a je uložená v archívoch.



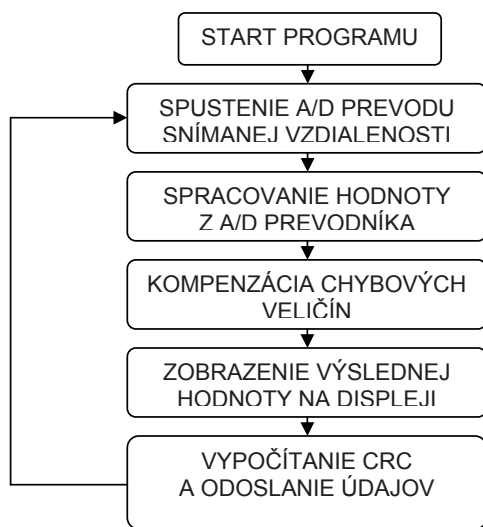
Obr. 7 Chybová charakteristika k lineárnemu snímaču

Na uvedenú neutralizáciu neistoty je možné použiť mikroprocesorový systém s univerzálnym mikropočítačom, analógovo-digitálnym prevodníkom a snímačom teploty. Návrh systému je na obr. 8.



Obr. 8 Systém pre spresnenie merania so snímačom BTL

V navrhnutom systéme je použitý pre zvýšenie presnosti externý 16-bitový A/D prevodník nakoľko použitý mikropočítač má implementovaný menej presný 10-bitový prevodník. Pre snímanie teploty je použitý polovodičový teplomer LM35CZ. Zobrazenie nameraných údajov zabezpečuje interný LCD displej. Procesorový systém zároveň umožňuje komunikáciu cez štandardnú priemyslovú zbernicu RS485. Ochrana údajov pri prenose je riešená kanálovým kódovaním CRC. Vývojový diagram na obr. 9 popisuje algoritmus činnosti mikroprocesorového systému.



Obr. 9 Systém pre spresnenie merania zo snímačom BTL

Pri štarte programu sú inicializované konštanty systému a načítané kompenzačné charakteristiky. Po inicializácii dôjde k spusteniu A/D prevodu. Po prijatí signálu o ukončení prevodu je prijatá a spracovaná hodnota z A/D prevodníka. Podľa zosnímanej hodnoty a nameranej teploty je hodnota vzdialenosti upravená kompenzačnými konštantami. Následne je hodnota zobrazená na displeji. Pre odoslanie na hodnoty po RS485 je vypočítaná hodnota CRC. V prípade prijatia požiadavky na komunikačnej zbernici je spracovaná informácia spolu s kódom CRC odoslaná žiadateľovi. Následne sa cyklus spúšťa ďalším prevodom.

5 ZÁVER

Takýto systém umožňuje kompenzovať chybové parametre na základe korekčnej charakteristiky snímača, zároveň je možné potlačiť aj vplyv teploty na výstupné parametre senzoru. Z tvaru korekčnej charakteristiky je zrejmé, že kompenzáciu je efektívne realizovať pomocou tabuľky, ktorá je diskretným obrazom kalibračnej krivky. S využitím kalibračnej charakteristiky je možné zvýšiť presnosť merania na úroveň neistoty 2 μm .

LITERATÚRA

- CLARK, A. E.: 1980. *Ferromagnetic Materials*, vol 1, ed Wolfhart, E. P. : Amsterdam: North-Holland, 1980 pp. 531
- CHUDÝ, V., PALENČÁR, R. KUREKOVÁ, E., CSC., HALAJ, M. 1999: Meranie technických veličín, vydalo Vydavateľstvo STU, 1. vydanie, 1999, ISBN 80-227-1275-2
- Balluff GmbH, Micropulse Transducers BTL/BIW, Doc. No. 822987/Mat. No. 123757 E – Edition 1003

MTS Systems Corp. USA, Magnetostrictive Linear Position Sensors, <http://www.sensorland.com/HowPage024.html>

Kontaktná adresa:

Ing. Jozef Šuriansky ml.
Žarnovická Huta 96, 966 81 Žarnovica
e-mail: jozef.suriansky@gmail.com

doc. Ing. Ľubomír Naščák, CSc.
Technická Univerzita vo Zvolene, FEVT, KIAT
T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen
e-mail: nas@vsld.tuzvo.sk

POSÚDENIE SPÔSOBILOSTI MERADLA

APPRAISAL OF METER CAPABILITY

Miroslava ŤAVODOVÁ

ABSTRACT: Industrial engineers integrate human, machines and works. Must be able to design, implement, plan and manage complex integrated production systems and the systems for provision of services. To fulfil these tasks, it is necessary to know in the different areas the right to use the suitable tools, techniques and methods. In the area of quality assurance there are many of these methods. The evaluation of capability of the instrument as one of statistical methods aimed at measuring systems used in industry, expressed capability index, consists of repeated measurements with a calibrated normal in the place of use measuring equipment. It is about the functionality of the measuring device and the accuracy of the measured data.

Key words: industrial engineering, capability gauges, quality production, manufacturing processes

ABSTRAKT: Priemyselní inžinieri integrujú ľudí, stroje a prácu. Musia vedieť projektovať, implementovať, plánovať a riadiť komplexné integrované výrobné systémy a systémy pre poskytovanie služieb. Pre naplnenie týchto úloh je potrebné aby v rôznych oblastiach vedeli správne využívať vhodné nástroje, techniky a metódy. V oblasti zabezpečovania kvality existuje mnoho týchto metód. Posúdenie spôsobilosti meradla ako jedna zo štatistických metód, zameraných na systémy merania používaných v priemysle, vyjadrená indexmi spôsobilosti, sa skladá z opakovaných meraní s kalibrovaným normálom v mieste používania meradla/meracieho zariadenia. Vypovedá o funkčnej spôsobilosti meracieho zariadenia a o správnosti nameraných údajov.

Kľúčové slová: priemyselné inžinierstvo, spôsobilosť meradiel, kvalita produkcie, výrobné procesy

ÚVOD

Pre dosiahnutie maximálnej prosperity a konkurencieschopnosti podniku na pozíciách stredného manažmentu výrobnej organizácie a v útvaroch priemyselného inžinierstva je nevyhnutné zabezpečiť kvalifikovaný ľudský potenciál. Tento by mal disponovať rozsiahlymi poznatkami z oblasti prevádzky a riadenia strojárskoho priemyselného podniku, ktoré mu umožnia riešiť problémy vyskytujúce v logistike a riadení dodávateľských reťazcov, vnútropodnikovej logistiky a optimalizácie zásob a materiálových tokov, v implementácii celopodnikových informačných systémov, plánovaní a riadení výroby, v manažmente kvality, pri projektovaní výrobných procesov a systémov, pri riadení inovácií, zavádzaní metód priemyselného inžinierstva do jednotlivých podnikových útvarov, v oblasti počítačového modelovania podnikových procesov, projektového riadenia, aplikácie

metód operačného výskumu a pod. Univerzálnosťou, ale pritom vysokou odbornosťou, majú takýto zamestnanci veľmi vysokú hodnotou na trhu práce.

Priemyselní inžinieri integrujú ľudí, stroje a prácu. Projektujú, implementujú, plánujú a riadia komplexné integrované výrobné systémy a systémy pre poskytovanie služieb a zabezpečujú ich vysokú výkonnosť, spoľahlivosť, plnenie termínov a riadenie nákladov v nich. Tieto systémy integrujú ľudí, informácie, technologické zariadenia a procesy, materiály a energie v celom životnom cykle daného výrobku alebo služby. Inými slovami, mali by byť integrátormi vedy, obchodu a techniky, so schopnosťou riešiť problém z jeho technickej, ľudskej, informačnej i finančnej stránky. Od priemyselných inžinierov sa vyžaduje, prehľad o fungovaní jednotlivých prvkov výrobného podniku a schopnosť organizovať a riadiť projekty podnikových zmien (www.ipaslovakia.sk).

Veda a technika sa vždy opierali o meranie. Používanie technicky vhodných a ekonomicky výhodných meradiel, meracích prístrojov a zariadení ako i metód, má významný vplyv na kvalitu procesov a produktov každej organizácie (ĽAVODOVÁ M., 2010).

1 MATERIÁL A METÓDY

Pre naplnenie týchto úloh je potrebné, aby v rôznych oblastiach priemyselný inžinier vedel správne využívať relevantné nástroje, techniky a metódy (tabuľka 1).

Tab. 1 Oblasti využitia znalostí priemyselného inžiniera

OBLASŤ	NÁSTROJE, TECHNIKY, METÓDY
Analýza a meranie práce	MOST, MTM, UAS,....
Zlepšovanie procesov	IM, Kaizen, moderovanie workshopov,...
Optimalizácia liniek	Value Stream, vyvažovanie liniek,...
Logistika	TOC, optimalizácia zásob a priebežných dôb,...
Riadenie projektu	kritický reťazec, tímy zmien,...
Priemyselné audity, metódy racionalizácie	SMED, 5S, jidoka,...
Simulácia	EP Plant, Arena, Witness, štatistika,...
Moderovanie, hodnotenie pracovníkov, motivácia	Assessment Centre, Check list, Metoda BARS, ...
Organizácia, plánovanie a riadenie výroby	
Inžinierska ekonomika, hodnotová analýza	
TPM a TQM, SPC, nástroje kvality	PDCA, štatistika, indexy spôsobilosti,

Práve posledne spomenutá oblasť zahŕňa mnoho metód a techník, využívaných pre dosiahnutie kvality procesov. Procesov výrobných, ktorých nevyhnutnou súčasťou je zabezpečovanie kvality v každom okamihu a počas celého prebiehajúceho procesu. Úlohou priemyselného inžiniera je viesť použiť vhodný nástroj manažérstva kvality a tým pomôcť zefektívniť prácu v danom výrobnom uzle, resp. odstrániť problém, ak sa tam vyskytne náhle alebo i dlhodobo.

Zamestnanec, ktorý pracuje pri strojnom zariadení alebo dohliada na výrobný proces, má spravidla povinnosť vykonávať kontroly v podobe meraní v stanovených časových

intervaloch. Pre tieto merania sú často používané jednoduché analógové či digitálne mera-
dlá ako sú posuvné meradlá, mikrometrické meradlá, číselníkové odchýlkomery, pasamet-
re, meradlá na meranie závitov a pod. Všetky meradlá podliehajú pravidelnej kalibrácii,
zväčša v zmysle Metrologického poriadku, ako jednej zo smerníc tvorených v SMK orga-
nizácie. Intervaly kalibrácie meradiel sú rôzne. Spravidla je to pri tomto druhu meradiel
jeden kalendárny rok. Akreditované laboratória a pracoviská vystavujú pre každé meradlo
kalibračný list, ktorý je dokladom jeho spôsobilosti poskytovať spoľahlivé a stabilné me-
rania. V praxi sa však často stáva, hlavne ak sú meradlá používané denno-denne, počas
niekoľkých pracovných zmien a používajú ich rôzni pracovníci, že sa ich spoľahlivosť
znižuje a môže to byť až na takú mieru, kedy už nemôžeme s istotou tvrdiť, že podávajú
správne údaje. Práve pre takéto situácie je vhodné využiť jednoduché metódy, ktoré nám
odhalia – potvrdia alebo vyvrátia podozrenie zo straty spôsobilosti meradla.

Vo všeobecnosti sa môže iniciovať posúdenie spôsobilosti meradla v prípadoch ak je:

- meradlo mimo prevádzku dlhšie ako napr. jeden mesiac;
- meradlo po oprave;
- podozrenie, že príčina vzniku nepodarkov, prípadne reklamácií je práve v strate spô-
sobilosti meradla poskytovať spoľahlivé údaje.

Postupy hodnotenia systému merania sú využívané v prostredí výroby, v celom strojár-
skom priemysle. Konkrétne povedané, sú to postupy pre vyhodnocovanie štatistických veli-
čín – strannosť, opakovateľnosť, reprodukovateľnosť, stabilita a linearita. Súhrnne sa týmto
postupom hovorí postupy pre zisťovanie spôsobilosti meracieho zariadenia/meradla. Aj na-
priek tomu, že sú to štatistické postupy, možno ich reprezentovať spôsobom, zrozumiteľným
i pre pracovníkov, ktorý nie sú štatistickí (HRUBEC, 2001). Priemyselný inžinier, ovládajúci
tieto postupy dokáže jednoducho vysvetliť pracovníkovi vo výrobe ako postupovať a hlavne
prečo je to pre udržanie a zlepšenie kvality produkcie také nevyhnutné.

1.1 Spôsobilosť meradiel

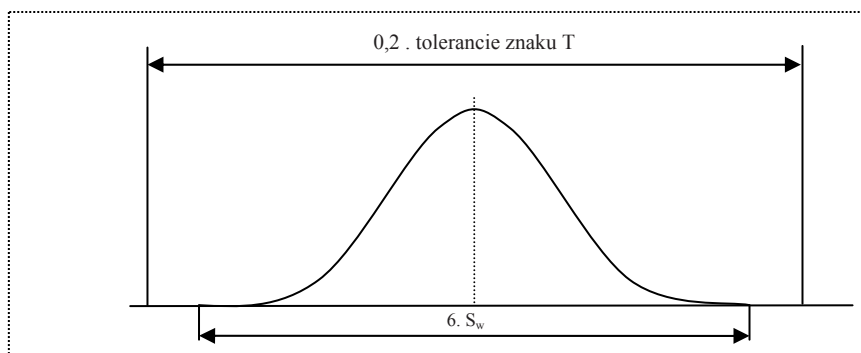
Pre kontrolu presnosti meradiel aj mimo určenej doby kalibrácie je možnosť v pod-
mienkach praxe využiť jednu z dostupných metód riadenia kvality. Je ňou hodnotenie
spôsobilosti meradiel, ktorá je uskutočniteľná aj na úrovni dielne, v ktoromkoľvek tech-
nologickom uzle výrobného procesu.

Dôležitým aspektom štatistického riadenia kvality je zabezpečiť prijateľnú spôsobi-
losť kontrolného systému (TEREK, HRNČIAROVÁ, 2004), zabezpečeného meradlami,
meracími prístrojmi a pod.

Hodnotenie spôsobilosti meradla je jedna zo štatistických metód zameraných na sys-
témy merania často používaných v priemysle. Spôsobilosť meracieho zariadenia/meradla
vypovedá o funkčnej spôsobilosti meracieho zariadenia a o správnosti nameraných úda-
jov. Kvalita nameraných údajov súvisí so štatistickými vlastnosťami opakovaných meraní,
získaných systémom meraní, pracujúcich v stabilných podmienkach (HRUBEC, 2001).

Kontrola spôsobilosti meradla ako jedna zo štatistických metód zameraných na sys-
témy merania používaných v priemysle sa skladá z opakovaných meraní s kalibrovaným
normálom v mieste používania meradla/meracieho zariadenia. Menovitú hodnotu normá-
lu X_r je potrebné zvoliť tak, aby sa nachádzala vo vnútri používaného rozsahu meracieho
zariadenia. Prednostne sa volí tak, aby ležala v strede tolerancie príslušného znaku T.

Výsledky posúdenia charakterizujú indexy spôsobilosti meradla C_{gm} – pomer $0,1 \times$ tolerancia znaku T k trojnásobku smerodajnej (štandardnej) odchýlky S_w opakovaných meraní (obrázok 1) a C_{gmK} – pomer $0,1 \times$ tolerancia znaku T k trojnásobku smerodajnej (štandardnej) odchýlky S_w s prihliadnutím k polohe strednej hodnoty $\bar{X}_a$ nameranej prístrojom/ meradlom. Namiesto tolerancie znaku T je možné použiť tiež rozptyl procesu $6 \times \sigma$.



Obrázok 1 Index spôsobilosti C_{gm} (HRUBEC, 2001)

Ako uvádza (HRUBEC, 2001, 2010), pre posúdenie spôsobilosti meradla je potrebné, aby boli dodržané nasledovné kritériá:

1. posúdenie je potrebné vykonať na stálom mieste – tam, kde sa meradlo používa;
2. pred začiatkom skúšky je potrebné meradlo/meracie zariadenie jednoznačne nastaviť, pretože počas skúšky nie je toto prípustné;
3. nastavovacie a kalibrovacie normály (koncové mierky) sa musia medzi jednotlivými meraniami vybrať z meracej pozície a znovu vložiť;
4. meranie na normále sa musí vykonať vždy na rovnakom mieste a v rovnakej polohe;
5. postupne sa vykoná minimálne 25 opakovaní meraní (najlepšie 50 opakovaní) s každým normálom a hodnoty sa zapisujú do tabuľky, ktorá je podkladom pre zostrojenie grafu.
6. z nameraných hodnôt sa dosadením do vzťahov [1] a [2] vypočítajú – stredná, priemerná hodnota $\bar{X}_a$, štandardná odchýlka S_w a pomocou vzťahov [3], [4] a [5] sa vypočítajú indexy (ukazovatele) spôsobilosti C_{gm} a C_{gmK} .

$$\bar{X}_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad [1]$$

n – počet meraní,
 X_i – i -tá nameraná hodnota.

$$S_w = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_a)^2} \quad [2]$$

Index (ukazovateľ) spôsobilosti procesu je ukazovateľ, opisujúci spôsobilosť procesu vo väzbe k toleranciam určených špecifikáciou (STN ISO 21747:2010).

$$C_{gm} = \frac{0,2T}{6 \cdot S_W} \quad [3]$$

T – tolerancia znaku

Horný index spôsobilosti procesu je ukazovateľ, opisujúci spôsobilosť procesu vo vzťahu k hornej tolerančnej medzi U (STN ISO 21747:2010).

$$C_{gmKU} = \frac{(X_r + 0,1T) - \overline{X}_a}{3 \cdot S_W} \quad [4]$$

Dolný index spôsobilosti procesu je ukazovateľ, opisujúci spôsobilosť procesu vo vzťahu k dolnej tolerančnej medzi L (STN ISO 21747:2010).

$$C_{gmKL} = \frac{\overline{X}_a - (X_r - 0,1T)}{3 \cdot S_W} \quad [5]$$

X_r – konvenčne pravá hodnota (hodnota normálu)

Kritérium pre posúdenie spôsobilosti meradla je stanovené hodnotami (HRUBEC, 2001):

$$C_{gm} \geq 1,34$$

$$C_{gmKU}, C_{gmKL} \geq 1,33 \quad [6]$$

Pri indexoch spôsobilosti C_{gmKU} a C_{gmKL} sa pre posúdenie spôsobilosti meradla berie do úvahy menšia z vypočítaných hodnôt, ktorá sa stáva minimálnym ukazovateľom spôsobilosti procesu C_{gm} .

V prípade, že hodnoty indexov C_{gmK} a C_{gm} sa ukážu veľmi malé, je potrebné stanoviť príčiny, ktorými môžu byť buď príliš veľká oblasť rozptylu alebo špeciálna príčina variability – special cause – zdroj variability procesu iný, ako inherentná variabilita procesu. Špeciálne príčiny vznikajú v dôsledku špecifických podmienok, ktoré nie sú vždy prítomné. Veľkosť variability pod vplyvom špeciálnych príčin v procese ako taká je z času na čas nepredvídateľná (STN ISO 21747:2010).

V literatúre, konkrétne v norme STN ISO 8258 sa uvádza, že ak je hodnota indexu vyššia ako 1, meradlo (proces) môžeme považovať za spôsobilé. Je to v prípadoch menej presných prevádzok, kde je potrebné proces štatisticky zvládnuť, čiže stabilizovať.

2.2 Vlastné meranie

Meranie sa uskutočnilo v laboratórnych podmienkach, pretože sa nepodarilo zabezpečiť experiment vo výrobe. Pre zisťovanie spôsobilosti meradla koncovými mierkami (obrázok 3) bolo vybrané digitálne mikromerické meradlo (mikrometer) Mitutoyo,

s meracím rozsahom 25–50 mm a presnosťou merania 0,001 mm (obrázok 2). Meradlo bolo nové a výrobca s ním dodal len certifikát kontroly (Certificate of inspection). Jeho hlavné využitie je plánované na cvičeniach strojárskych predmetov v laboratóriu strojárskej metrológie. Predpokladá sa, že bude využívané aj v iných laboratóriách katedry, pre rôzne účely mimo vyučovania.



Obrázok 2 Mikrometrické meradlo



Obrázok 3 Koncové mierky



Obrázok 4 Meraná súčiastka

Tabuľka 2 Namerané hodnoty X_i a odchýlky Δ (v mm) od hodnoty $\varnothing 26,250$ mm

X_i	Δ	X_i	Δ	X_i	Δ	X_i	Δ
26,250	0	26,250	0	26,252	0,002	26,250	0
26,251	0,001	26,248	– 0,002	26,250	0	26,252	0,002
26,251	0,001	26,248	– 0,002	26,250	0	26,248	–0,002
26,251	0,001	26,250	0	26,250	0	26,248	–0,002
26,250	0	26,252	0,002	26,252	0,002	26,250	0
X_i	Δ	X_i	Δ	X_i	Δ	X_i	Δ
26,250	0	26,253	0,003	26,250	0	26,250	0
26,250	0	26,252	0,002	26,247	–0,003	26,252	0,002
26,249	– 0,001	26,250	0	26,253	0,003	26,252	0,002
26,250	0	26,251	0,001	26,252	0,002	26,250	0
26,250	0	26,250	0	26,250	0	26,252	0,002

Mikrometrom bol kontrolovaný priemer valcovej súčiastky (obrázok 4). Hodnota znaku kvality – priemer hriadeľa Ø 26,250 mm, tolerancia $\pm 0,010$ mm.

Podmienky merania: teplota v miestnosti 20 °C.

Uskutočnilo sa 40 meraní pomocou normálov, s hodnotou 26,250 mm.

Z hodnôt, ktoré sú zapísané v tabuľke č. 2 boli po dosadení do vzťahov [1] a [2] vypočítané:

stredná hodnota: $\bar{X}_a = 26,250$ mm

smerodajná odchýlka: $S_w = 0,00061$ mm

Ďalej sa na základe známych a získaných (vypočítaných) hodnôt pristúpilo ku výpočtu indexov spôsobilosti meradla:

$$C_{gm} = \frac{0,2T}{6 \cdot S_w} = \frac{0,2 \cdot 0,02}{6 \cdot 0,00061} = 1,11$$

$$C_{gmU} = \frac{(X_r + 0,1T) - \bar{X}_a}{3 \cdot S_w} = \frac{(26,250 + 0,1 \cdot 0,02) - 26,250}{3 \cdot 0,00061} = 1,09$$

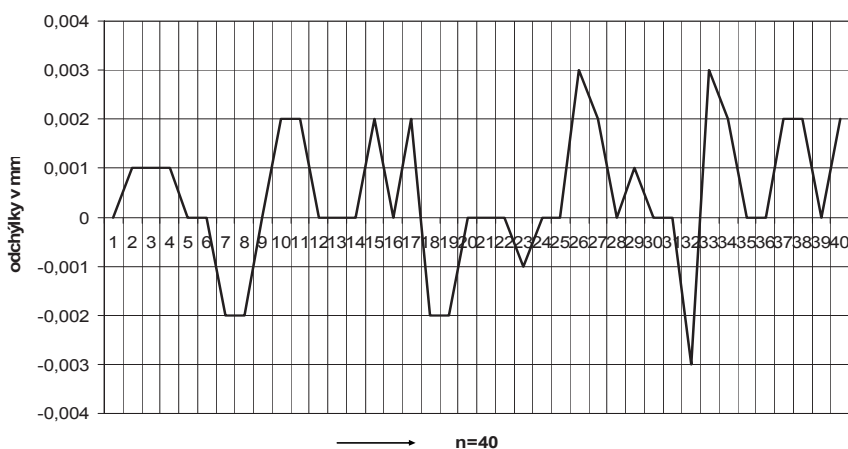
$$C_{gmL} = \frac{\bar{X}_a - (X_r - 0,1T)}{3 \cdot S_w} = \frac{26,250 - (26,250 - 0,1 \cdot 0,002)}{3 \cdot 0,00061} = 1,09$$

Pre hodnotenie a posúdenie spôsobilosti meradla sa berie do úvahy vždy menšia z hodnôt C_{gm} , podľa kritéria:

$$C_{gm} \geq 1,34$$

$$C_{gmU}, C_{gmL} \geq 1,33$$

Na obr. 5 je grafické zobrazenie priebehu kolísania nameraných hodnôt.



Obrázok 5 Grafické zobrazenie priebehu kolísania nameraných hodnôt

3 VÝSLEDKY

Spôsobilosť digitálneho mikrometra Mitutoyo, používaného prevažne študentmi na cvičeniach predmetu Výrobné technológie bola zisťovaná pomocou indexov C_{gmk} a C_{gm} . Mikrometrom bol kontrolovaný priemer valcovej súčiastky (obrázok 4). Hodnota znaku kvality bol priemer hriadeľa Ø 26,250 mm, tolerancia $\pm 0,010$ mm.

Pred začatím merania sa mikrometer nastavil na konvenčne pravú hodnotu (hodnota normálu) $X_r = 26,250$ mm, keďže v priebehu merania nie je jeho nastavovanie prípustné. Meranie sa uskutočnilo na rovnakom mieste a v rovnakej polohe. Bolo vykonaných 40 meraní za sebou a hodnoty sa zapísali do tabuľky 2. Z týchto hodnôt sa vypočítali základné štatistické charakteristiky procesu – priemerná hodnota $\bar{X}_a = 26,250$ mm a smerodajná odchýlka $S_w = 0,00061$ mm. Pre zistenie spôsobilosti meradla boli ďalej vypočítané indexy spôsobilosti C_{gmk} a C_{gm} . Podľa stanoveného kritéria sa pre zistenie spôsobilosti meradla berie do úvahy vždy menšia z vypočítaných hodnôt.

Hodnoty indexov spôsobilosti sú $C_{gm} = 1,11$ a indexy $C_{gmkU} = C_{gmkL} = C_{gmk} = 1,09$. Graf na obrázku 1 zachytáva priebeh kolísania nameraných hodnôt.

4 DISKUSIA

Zisťovanie spôsobilosti merania nebolo možné vykonať vo výrobnej prevádzke. Uskutočnilo sa teda v laboratórnych podmienkach, čo nám sčasti mohlo výsledky skresliť (nevýrobné prostredie, nové meradlo, nerovnomerný prítlak pri meraniach koncovými mierkami a pod. – špeciálne príčiny variability). Rozmery a tolerancie súčiastky však boli známe a overené. Tieto údaje sú pre zistenie spôsobilosti meradla najpodstatnejšie.

Pre zisťovanie spôsobilosti meradla – digitálneho mikrometra bol overovaný len jeden rozmer na meradle, pretože len tento sa na súčiastke meral. Nie je však v praxi nič výnimočné, keď sa v jednom technologickom uzle na súčiastke kontroluje aj viac rozmerov – znakov kvality produktu (napr. priemer vonkajší a vnútorný, priemer a dĺžka a pod., ako to vyžaduje situácia). Je potrebné postupne uskutočniť predpísaný počet meraní znaku kvality produktu (minimálne 25, optimum 50) s každým normálom a aj ďalšie menovité hodnoty normálu X_r sa prednostne volia tak, ako už bolo uvedené vyššie, aby ležali v strede tolerancie príslušného znaku.

Pre hodnotenie spôsobilosti meracích zariadení popisuje (HRUBEC, 2001) štyri metódy. Pri hodnotení spôsobilosti digitálneho mikrometra Mitutoyo bola z nich vybraná a použitá metóda, ktorá využíva pre toto hodnotenie indexy spôsobilosti C_{gmk} a C_{gm} . Je založená na opakovaných meraniach s kalibrovaným normálom v mieste používania meradla.

V literatúre (STN ISO 8258:1995) sa uvádza, že ak je hodnota indexu je vyššia ako 1, meradlo môžeme považovať za spôsobilé.

Z výsledkov vyplýva a my môžeme konštatovať, že meradlo je podľa indexu $C_{gm} = 1,11$ blízke spôsobilosti. Indexy $C_{gmkU} = C_{gmkL} = C_{gmk}$ majú rovnakú hodnotu 1,09. Rovnaká hodnota vyšla preto, lebo priemerná hodnota bola vypočítaná $\bar{X}_a = 26,250$ mm, je zhodná s hodnotou meraného znaku a nachádza sa v strede tolerančného poľa. Kritéria pre stanovenie spôsobilosti sú však vyššie [6]. Napriek tomu, na základe týchto skutočností

môže byť meradlo používané na účely, pre ktoré je určené, pretože hodnoty indexov sú vyššie ako 1 (STN ISO 8258:1995).

5 ZÁVER

V článku je popísaný metodický postup, často využívaný v strojárskych praxi. Je jedným z postupov kontroly spôsobilosti meradla, s využitím hodnotenia meradla pomocou indexov spôsobilosti. Ako nástroj pre udržanie a zlepšenie kvality produktov má široké využitie. Dokáže rýchlo vyriešiť problém, ak sa vyskytnú pochybnosti o správnosti meraní hodnôt jednoduchých i zložitejších meradiel.

Priemyselný inžinier, ktorý ovláda a má prehľad v technikách a metódach, implementovateľných v hlavných i vedľajších procesoch, výrobe aj v službách, stáva sa prínosom pre podniky a firmy, ktoré usilujú udržať a zlepšiť si svoju pozíciu na trhu.

LITERATÚRA

HRUBEC Jozef, 2001 *Riadenie kvality*, Nitra: ES SPU, 2001. ISBN 80-7127-849-6.

HRUBEC Jozef, 2010 *Spôsobilosť meradiel* <http://josef.posta.sweb.cz/KONF/Hrubec.doc>, cit: 31.05.2010

TEREK Milan – HRNČIAROVÁ Ľubica, 2004 *Štatistické riadenie kvality*, IURA EDITION Bratislava 2004, ISBN 80-89047-97-1, s. 106.

ŤAVODOVÁ Miroslava, 2010 *Hodnotenie spôsobilosti meradiel*, Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva 2010: VII. medzinárodná vedecká konferencia : 9.–11. september 2010 Hotel Boboty, Terchová : zborník prednášok. – s. 193–198. – Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2010, ISBN 978-80-228-2143-8.

STN ISO 8258:1995 Shewhartove regulačné diagramy

STN ISO 21747:2010 Štatistické metódy. Výkonnosť procesu a štatistiky spôsobilosti pre meraný znak kvality

<http://www.ipaslovakia.sk/> Dostupné na internete 13. 1. 2011

Kontaktná adresa:

Ing. Miroslava Ťavodová, PhD.

Katedra výrobných technológií a materiálov,

Fakulta environmentálnej a výrobnéj techniky,

Technická univerzita vo Zvolene, Študentská 26, 960 53 Zvolen,

e-mail: tavodova@vsld.tuzvo.sk

ANALÝZA TEPLOTNÝCH POLÍ V OKOLÍ OHRIEVANÉHO TELESA

ANALYSIS OF TEMPERATURE FIELDS IN THE VICINITY OF THE HEATED BODY

Karina VALENTOVÁ – Jozef ČERNECKÝ

ABSTRACT: This paper deals with analysis of temperature fields in the boundary layer around the surfaces of pipe-type heat exchanger with square section. For heating body to monitor the heat transfer due to free and forced convection. For the experiment were used the method of holographic interferometry in real time. Analysis of thermal fields is used for research of heat transfer and also as a basic support for structural design of heat exchanger.

Key words: heat transfer, heat exchanger, holographic interferometry

ABSTRAKT: Príspevok sa zaoberá analýzou teplotných polí v medznej vrstve v okolí povrchov tepelných výmenníkov rúrkového typu so štvorcovým prierezom. Na ohrievanom telese sa sleduje šírenie tepla vplyvom voľnej a nútenej konvekcie. Na experimente bola použitá metóda holografickej interferometrie v reálnom čase. Analýza teplotných polí sa využíva pri výskume prestupu tepla a tiež ako podklad pre konštrukčný návrh výmenníkov tepla.

Kľúčové slová: prestup tepla, výmenník tepla, holografická interferometria

1 ÚVOD

Problematika prestupu tepla patrí k základným procesom, ktorý sa využíva v rôznych výskumných oblastiach a technických aplikáciách. V súčasnosti sa pri riešení prenosových javov do popredia dostáva otázka intenzifikácie prenosu energie, preto je príspevok zameraný na výskum teplotných polí v okolí rôzne polohovaného ohrievacieho telesa. Problematikou prenosu tepla v kanály, v ktorom sú umiestnené profily – šípovitého tvaru, sa zaoberal (Sundén, Olsson, 1998). Problematikou pri konvektívnom prestupe tepla pri obtekaní profilov, tiež štvorcového prierezu popisuje (Naylor, 2003). Sledovaním konvekcie v telese skriňového tvaru sa zaoberal (Koster, 1983). Intenzifikáciou prestupu tepla vkladáním rôznych usmerňovacích telies v kanály sa zaoberali (Herman, Kang, 2001). Nútenou konvekciou v kanály s usmerňovacími telesami rôznych tvarov sa zaoberal a publikoval vo svojich prácach (Buchlin, 2001). Štúdiom prestupu tepla pri nútenej konvekcii s malou výškou kanálu sa zaoberal (Sajith, et al. 2010). Problém prúdenia okolo zväzku rúrok

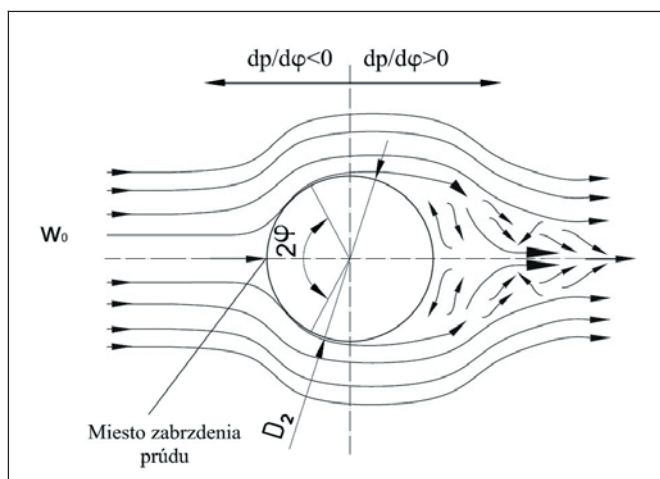
pri nútenej konvekcií bol spracovaný v práci (Koniar, 2008). Analýza teplotných polí nad skúšobnými telesami z rôznych drevín je spracovaná v publikácii (Pivarčiová, 2009). Problematika k prenosovým javom v experimentálnom kanáli s rôzne tvarovanými povrchmi je spracovaná (Brodniarská, 2010).

Tvar teplotného pola závisí od geometrie ohrievacieho telesa – rúrky, ale taktiež od rozdielu teploty medzi okolitým prostredím a povrchom rúrok. Vizualizáciou teplotného pola možno pozorovať proces obtekania vzduchu okolo ohrievaného telesa. Interferometrickým záznamom sa získajú obrazy interferogramov, ktoré sa kvalitatívne a kvantitatívne vyhodnocujú. Zo získaných záznamov je obvykle možné na prvý pohľad priamo kvalitatívne posudzovať sledovaný dej. Pre kvantitatívne vyhodnotenie vizualizačných záznamov fázových predmetov (resp. transparentných predmetov) treba najskôr stanoviť rozloženie indexu lomu v objekte a z neho ďalej vypočítať rozloženie žiadaných fyzikálnych veličín. Zmenu indexu lomu možno určiť z interferogramu zo záznamovej zmeny interferenčného rádu alebo vzniku interferenčného rádu. Aplikácia holografických metód má pre jednotlivé experimenty prenosových javov veľa výhod. Táto metóda bola vybraná preto, lebo sa jedná o presnú bezdotykovú meraciu metódu, ktorá zobrazí naraz v celom priestore optické nehomogenity, ku ktorým z pohľadu interferometrie patria aj teplotné polia.

2 TEÓRIA

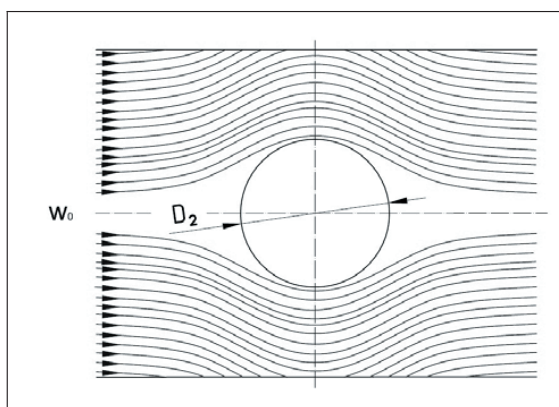
Pri šírení tepla medzi tekutinou a vonkajšou stenou telesa (rúrky) rúrkového výmenníka môže nastať niekoľko možností. Buď tekutina prúdi vplyvom poklesu tlaku v smere prúdenia, alebo prúdi vplyvom rozdielnej hustoty teplejšej a chladnejšej tekutiny, t.j. že je prúdenie nútené alebo voľné (prirodzené) a okrem toho záleží taktiež na smere prúdenia tekutiny vzhľadom na os rúrky (Míka, 1981).

Medzná vrstva sa vytvára na nábehovej strane rúrky; na tvoriacej sa priamke valcom plochy kolmej na os prúdu sa prúd adiabaticky zabrzdí a tlak stúpne na maximum (Obrázok 1). So zväčšovaním uhlu φ v smere obtekania rúrky tlak klesá ($dp/d\varphi < 0$) až na minimum v mieste najužšieho prietokového prierezu, pričom súčasne rýchlosť stúpa. So zväčšovaním tohto prierezu v zadnej – úplavovej zóne rúrky tlak opäť stúpa ($dp/d\varphi > 0$) a rýchlosť klesá. Takmer celý čelný povrch rúrky ($45 \div 47\%$ povrchu) – medziach uhlu $2\varphi = 160^\circ \div 170^\circ$ – obteká tekutina bez odtrhnutia prúdu. Pri väčšom uhle ako 2φ sa prúd odtrhne a v celej zadnej časti povrchu rúrky vznikajú víry, bez zjavnej medznej vrstvy. Tento režim obtekania rúrky sa nazýva zmiešaný, lebo na jej nátokovej strane sa ustáli laminárna medzná vrstva a na úplavovej strane turbulentná medzná vrstva; vyskytuje sa pri $Re = 5 \div 2 \cdot 10^5$. Poloha bodu odtrhnutia prúdu od povrchu rúrky nebýva stála. Pri väčšej vírivosti nabiehajúceho prúdu tekutiny ($Re > 2 \cdot 10^5$) je prúdenie nielen v kanáli, kde je rúrka umiestnená, ale aj v medznej vrstve na povrchu rúrky turbulentné. Odtrhnutie turbulentnej medznej vrstvy od povrchu rúrky nastáva pri $\varphi = 120 \div 140^\circ$, čím obtekanie valca je lepšie a následkom zmenšenia zóny vírov sa prestup tepla výrazne zväčšuje (Ferstl, 1995).



Obrázok 1 Obtekanie rúrky s odtrhom medznej vrstvy pri $Re = w_0 \cdot D_2 / \nu \geq 5$

Laminárne – plynulé obtekanie povrchu rúrky bez odtrhnutia prúdu sa vyskytuje len pri $Re \leq 5$ (Obrázok 2). Spôsob prúdenia pri priečnom obtekaní rúrky značne vplýva na súčiniteľ prestupu tepla α_φ po jej obvode. Pomocou použitej interferometrickej metódy je možné zobrazit' hlavne laminárne prúdenie a sledovať všetky zmeny, ktoré môžu nastať polohovaní vyhrievacieho telesa.



Obrázok 2 Obtekanie rúrky bez odtrhnutia medznej vrstvy pri $Re = w_0 \cdot D_2 / \nu \leq 5$

3 EXPERIMENTÁLNA METÓDA

Pre vizualizáciu analýzy teplotných polí v okolí ohrievaného telesa bola použitá metóda holografickej interferometrie v reálnom čase, ktorá umožňuje prostredníctvom

zaznamenávaného poľa indexu lomu skúmaného prostredia podať ucelený obraz a predstavu o veľkosti a tvare teplotného pola v danom čase a následne analyzovať a interpretovať sledovaný jav. Princíp tejto vizualizačnej metódy je založený na tom, že vplyvom ohrevu okolie rúrok predstavuje optickú nehomogenitu. Pri konštantnom tlaku sa pomerná hustota plynu mení priamo úmerne so zmenou teploty. Nakoľko index lomu prostredia je funkciou jeho hustoty, procesy spojené so zmenou teploty sú charakterizované zmenou indexu lomu, čo sa následne prejaví zmenou alebo vytvorením interferenčných prúžkov. Svetelná vlna, ktorá prechádza cez takéto prostredie sa deformuje. Deformovaním svetelnej vlny sa mení fáza. Zo zmeny fázy sa určuje rozdelenie indexu lomu. Prostredie s vyššou teplotou ako okolie má vzhľadom k nemu inú hustotu a preto tiež iný index lomu. Určenie veľkosti indexu lomu v rôznych miestach prostredia umožňujú stanoviť jeho hustotu a tým, aj jeho teplotu (Černecký, 2003).

Interferometrické zviditeľňovanie teplotných polí bolo zamerané predovšetkým na tepelné medzné vrstvy v okolí jednej rúrky so štvorcovým prierezom s rozmermi 20×20 mm a dĺžkou 170 mm, ktorá bola vyrobená z konštrukčnej ocele triedy 11. Pre vizualizáciu bol použitý holografický variant Mach-Zehnderovho interferometra popísaný v literatúre (Černecký, Pivarčiová, 1997), ktorý bol nastavený na nekonečnú šírku interferenčných prúžkov.

4 VÝSLEDKY A DISKUSIA

Priebeh experimentu mal dynamický charakter. Jednotlivé obrazce sa menili pomerne rýchlo. Výhodou preto bolo použitie digitálnej kamery, ktorá pracuje v reálnom čase – okamžite. V tesnej blízkosti v okolí profilu rúrky sa vytvorila tepelná medzná vrstva, ktorou možno sledovať interferenčné prúžky, kedy sa im priradili konkrétne teploty. Zmeny tvaru interferenčných prúžkov sú spôsobované zmenou fyzikálnych vlastností, čo zapríčiňuje aj zmenu interferenčného rádu. Pomocou vzťahu (1) bolo možné priradiť ku každému interferenčnému prúžku teplotu (Černecký, Pivarčiová, 1997).

Funkčná závislosť teploty na stavových veličinách meracieho prostredia je daná vzťahom:

$$T = \frac{T_{\infty}}{1 - 0,805 \frac{T_{\infty}}{l \cdot p} \left(s' - \frac{1}{2} \right)} = \frac{T_{\infty}}{1 + 0,805 \frac{T_{\infty}}{l \cdot p} \cdot s}, \quad (1)$$

T_{∞} – teplota okolia,

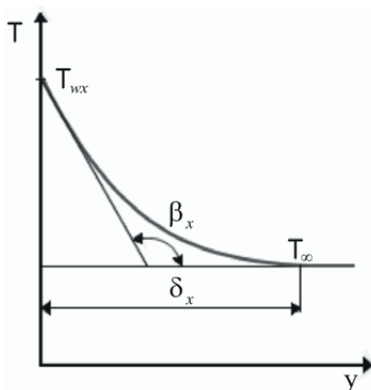
p – atmosférický tlak,,

s – interferenčný rád,

s' – počet tmavých prúžkov.

Pri obtekaní povrchu telies tekutinou s teplotou T_{∞} odlišnej od teploty povrchu T_{wx} v určitom mieste x , dochádza v tomto mieste k lokálnemu prestupu tepla medzi povrchom a tekutinou. Hodnota lokálneho koeficientu prestupu tepla α_x závisí od mnohých faktorov, napr. od druhu prúdajúcej tekutiny, od rýchlosti prúdenia, od tvaru obtekaného povrchu,

od polohy skúmaného miesta a od rozdielu teplôt medzi povrchom a tekutinou. Typický tvar teplotného profilu v tepelnej medznej vrstve s lokálnou hrúbkou δ_x pri laminárnom obtekaní povrchu s lokálnou teplotou T_{wx} vyššou ako je teplota tekutiny T_∞ , je uvedený na obrázku 4.



Obrázok 4 Teplotný profil v tepelnej medznej vrstve pri laminárnom obtekaní povrchu

Lokálnu hodnotu koeficientu prestupu tepla možno vypočítať z rovnice (Pavelek, Janotková, 2007):

$$\alpha_x = -\lambda_v \left(\frac{dT}{dy} \right)_{wx} \frac{1}{T_{wx} - T_\infty}, \quad (2)$$

λ_v – koeficient tepelnej vodivosti (určený pri teplote povrchu),

T_{wx} – teplota povrchu,

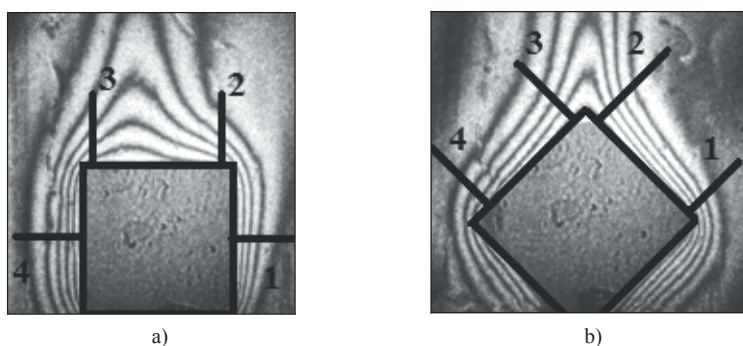
T_∞ – teplota tekutiny (okolia).

Rúrka bola zahrievaná teplotnosným médiom pomocou termostatu na teploty 40 °C, 50 °C a 60 °C. Na vizualizáciu prestupu tepla sa zvolili dve polohy rúrky, pri prvej vodorovnej polohe a druhá poloha bola pri natočení ohrievaného telesa o 45°. Záznam interferogramov začal záznamom pri voľnej konvekcií, ďalšie záznamy boli pri nútenej konvekcií. Použili sa dve rýchlosti prúdenia vzduchu 0,05 m.s⁻¹ a 0,1 m.s⁻¹. Pri vyšších rýchlostiach by boli interferenčné pružky ťažko čitateľné a nedali by sa kvantitatívne analyzovať. Pri meraniach sa sledovali parametre: teplota povrchu rúrok t_{wx} , rýchlosť prúdenia na vstupe do telesa w_∞ , teplota okolia t_∞ a atmosférický tlak p .

Pri analýzach zaznamenaných obrazov rezy boli zvolené tak, aby prechádzali cez všetky interferenčné rády. Na obrázkoch 5÷7 vidieť rovnomerný nárast teplotných medzných vrstiev pri voľnej a nútenej konvekcií prejavujúcich sa tvarom interferenčných pružkov. Interferenčné pružky predstavujú izotermické krivky teplotného poľa. Na hologramoch sú charakteristické jednotlivé interferenčné pružky, ktoré sú jasne ohraničené, pretože sa mení index lomu prostredia. Je to dané tým, že ohrievané teleso sa postupne ohrieva a čím je teplota vyššia, tým viac interferenčných pružkov vzniká.

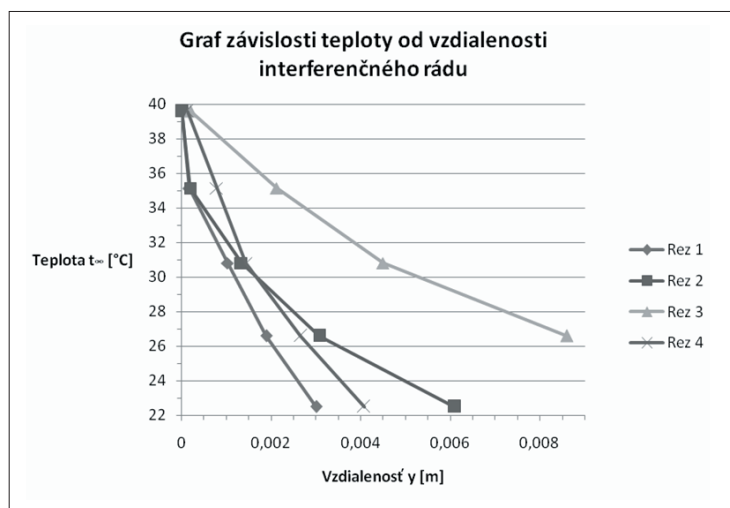
Pri teplote $t_{wx} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ohrievaného telesa bol interferenčný rád 5, pri teplote $t_{wx} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ je interferenčný rád 7 a pri teplote $t_{wx} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ interferenčný rád dosiahol počet 9. Nulový rád bol približne rovný teplote okolia $t_{\infty} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a atmosférický tlak bol 98 000 Pa. Pri podmienkach nútenej konvekcie (Obrázok 6 a 7) je vidieť, že zmenšenie veľkosti medznej vrstvy je na nábehovej ploche rúrky, ktorá je vystavená priamemu vplyvu prúdenia vzduchu. Pri natočení o 45° zmenšenie medznej vrstvy vidieť tiež na nábehovej hrane. Na zadnej úplavovej časti povrchu sú víry, ktoré závisia od rýchlosti prúdenia vzduchu. Zmena prestupu tepla pri prechode od laminárneho prúdenia k turbulentnému závisí na teplote vonkajšieho povrchu ohrievacieho telesa, na rýchlosti prúdenia, polohe a tvare vyhrievacieho telesa.

Na obrázkoch (Obrázok 5 a, b) sú holografické interferogramy, na ktorých môžeme sledovať priebeh teplotných polí pri voľnej konvekcii, teplota ohrevu rúrky je $t_{wx} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a vplyvy prestupu tepla realizované na rúrke. Vzdialenosť interferenčných prúžkov je najväčšia v strede (nad vodorovnou plochou) vyhrievaného telesa.

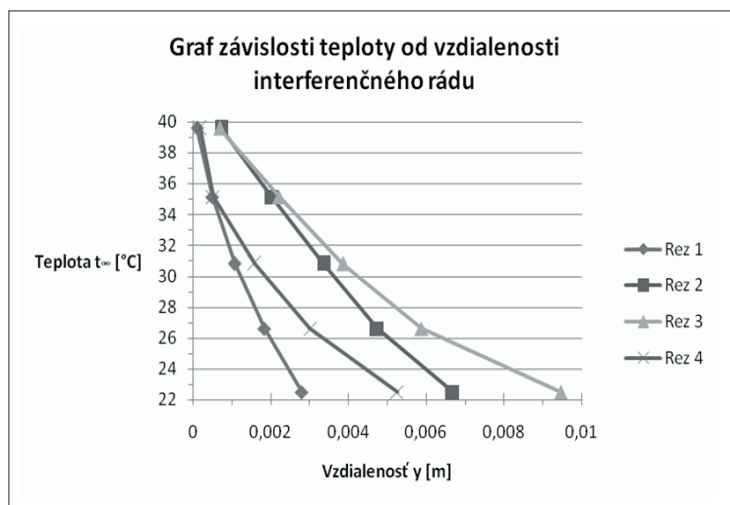


Obrázok 5 Holografický interferogram rúrky pri $t_{wx} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $w_{\infty} = 0\text{ m.s}^{-1}$ vo vodorovnej polohe (5 a) a pootočenej o 45° (5 b)

Zo získaných výsledkov podľa vzťahu (1) sme dostali údaje, ktoré sme dosadili do grafov určujúcich závislosť teploty od vzdialenosti interferenčného rádu od povrchu modelu pre jednotlivé natočenia ohrievaného telesa (Graf 1 ÷ 6).

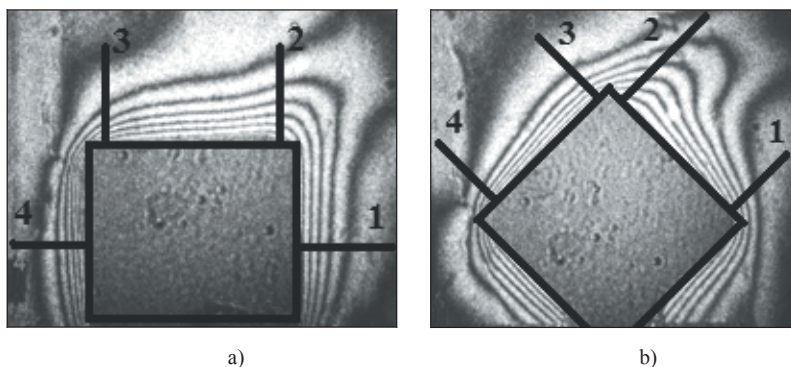


Graf 1 Závislosť teploty od vzdialenosti interferenčného rádu
(pri vodorovnej polohe ohrievaného telesa)

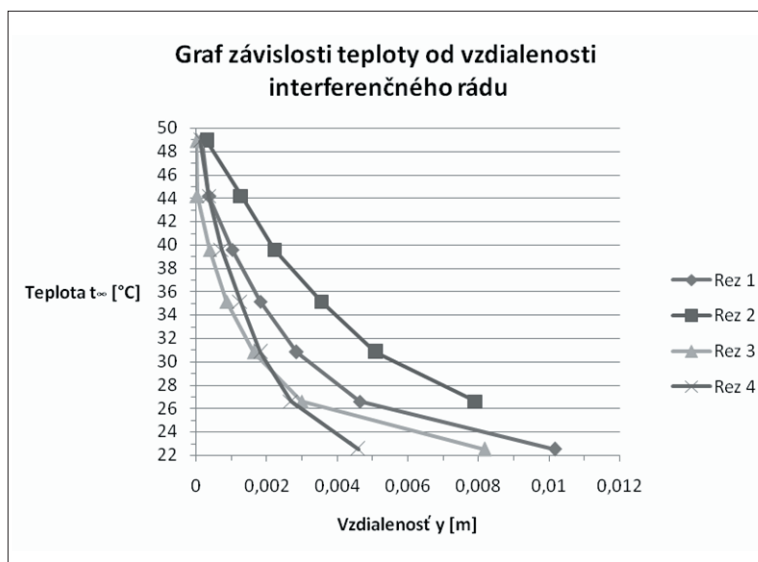


Graf 2 Závislosť teploty od vzdialenosti interferenčného rádu
(pri natočení ohrievaného telesa o 45°)

Analogicky sa teplota povrchu rúrky zvýšila na $t_{wx} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, čiže tým sa aj interferenčný rád zvýšil na počet 7. Vplyvom prúdenia média dochádza k ovplyvneniu tvaru teplotného pola, čo sa prejavuje zmenou interferenčných prúžkov, ktoré sa natáčajú v smere prúdiaceho média. Na obrázku 6 a je rúrka pootočená o 45° , prúdiace médium prichádza z ľavej strany, ktorého rýchlosť prúdenia vzduchu je $w_{\infty} = 0,05\text{ m.s}^{-1}$. Toto médium naráža na hranu modelu, ktoré ovplyvňujú tvar a vzdialenosť medznej vrstvy.

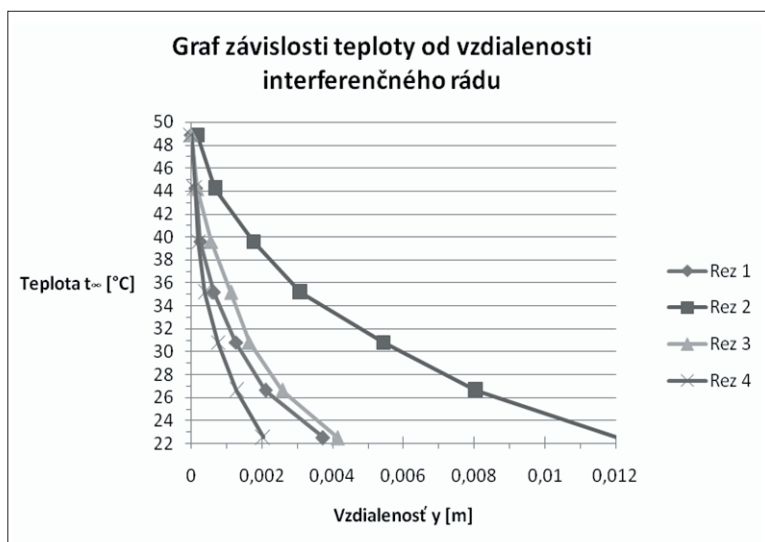


Obrázok 6 Holografický interferogram rúrky pri $t_{wx} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $w_{\infty} = 0,05\text{ m.s}^{-1}$ vo vodorovnej polohe (6 a) a pootočenej o 45° (6 b)



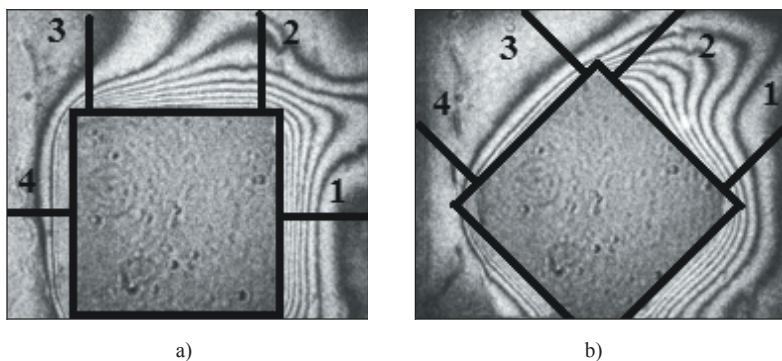
Graf 3 Závislosť teploty od vzdialenosti interferenčného rádu (pri vodorovnej polohe ohrievaného telesa)

Na grafe 4 môžeme vidieť ako nútená konvekcia vplýva na rez č. 2 a zväčšuje vzdialenosť medznej vrstvy od ohrievaného telesa.



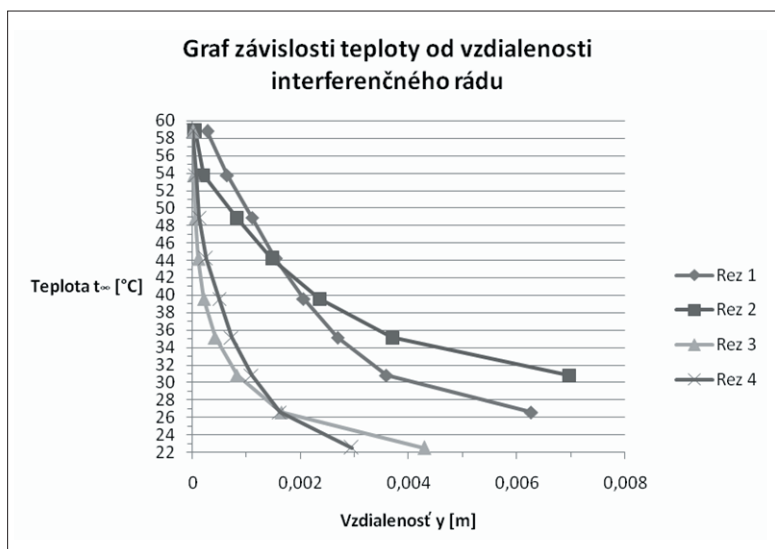
Graf 4 Závislosť teploty od vzdialenosti interferenčného rádu
(pri natočení ohrievaného telesa o 45°)

Na obrázku 7 a, b sa rýchlosť prúdenia vzduchu zvýšila na $w_\infty = 0,1 \text{ m.s}^{-1}$, pri tejto rýchlosti možno sledovať viditeľne väčšiu zmenu interferenčných prúžkov. So zvýšenou teplotou $t_{wx} = 60 \text{ °C}$, sa dá pozorovať nárast interferenčného rádu na počet 9. Na hologramoch je tiež vidieť, že na nábehovej strane ohrievaného telesa sú minimálne vzdialenosti interferenčných prúžkov a naopak v úplavovej časti sú najväčšie.

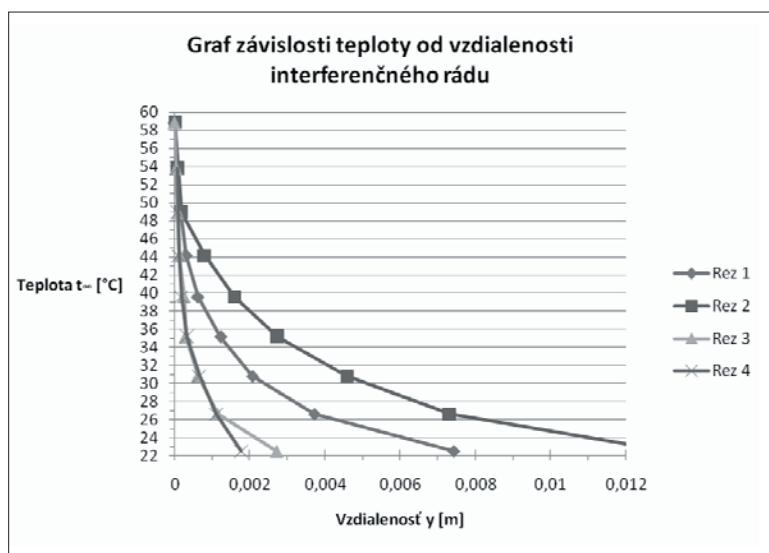


Obrázok 7 Holografický interferogram rúrky pri $t_{wx} = 60 \text{ °C}$, $w_\infty = 0,1 \text{ m.s}^{-1}$
vo vodorovnej polohe (7 a) a pootočenej o 45° (7 b)

Na grafoch 5 a 6 vidieť, ako ovplyvňuje zvýšenie rýchlosti prúdiaceho média na $w_{\infty} = 0,1 \text{ m.s}^{-1}$ závislosť teploty od vzdialenosti interferenčného rádu.



Graf 5 Závislosť teploty od vzdialenosti interferenčného rádu
(pri vodorovnej polohe ohrievaného telesa)



Graf 6 Závislosť teploty od vzdialenosti interferenčného rádu
(pri natočení ohrievaného telesa o 45°)

Počas experimentu bolo zistené, že teplotné polia v okolí vyhrievacích telies majú tendenciu meniť sa vplyvom rušivých podmienok okolitého prostredia (zmeny spôsobené rozdielnymi teplotami v meracom priestore a mimo neho). Najobjektívnejšie sú hodnoty v tesnom okolí vyhrievacieho telesa a čím je vzdialenosť väčšia, tým viac pôsobia vonkajšie vplyvy. Pri voľnej konvekcií (Obrázok 5 a) je koeficient prestupu tepla $\alpha_x = 0,4127 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ a pri pootočení vyhrievacej rúrky o 45° (Obrázok 5 b) má koeficient hodnotu $\alpha_x = 0,5061 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Pri vyhodnocovaní hologramov sa zistilo, že gradient teploty je najväčší pri nútenej konvekcií pri pootočení vyhrievacej rúrky o 45° (Obrázok 7 b), kde je vidieť zmenšenie hrúbky medznej vrstvy v reze 4 a hodnota koeficientu prestupu tepla je $\alpha_x = 3,6149 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Zmenšovanie hrúbky tepelných medzných vrstiev spôsobuje zväčšovanie teplotných gradientov na povrchu a tiež zväčšovanie koeficientu prestupu tepla α_x . Z uvedených analýz vyplýva, že teplo sa najlepšie odvádza pri nútenej konvekcií pri pootočených rúrkach o 45° od základnej polohy. Na výkyvy teploty mohlo mať vplyv aj materiálové zloženie ohrievaného telesa, rozmery a vplyvy z okolitého prostredia, t. j. jemné otrasy okolia, ktoré spôsobujú výrazné kmitanie a nestálosť interferenčných prúžkov.

5 ZÁVER

Výstupom z experimentov boli získané obrazy holografických interferogramov, ktoré zobrazujú rozloženie teplotného poľa v okolí vyhrievacieho telesa vo forme interferenčných prúžkov. Z nich sa analyzoval vplyv voľnej a nútenej konvekcie na rôzne polohované vyhrievacie teleso. Analýza teplotných polí bola uskutočňovaná pomocou programu Vibra, ktorý nahrádza zdĺhavý a prácny postup pri ručnom vyhodnocovaní interferometrických obrazov a možno ho zaradiť medzi programy so špeciálnym zameraním na vyhodnotenie holografických interferogramov. S rastúcim gradientom teploty sa teplo prenáša intenzívnejšie ako vyplýva z grafických závislostí na grafoch 1 ÷ 6. Zo získaných teplotných profilov boli ešte určené lokálne koeficienty prestupu tepla podľa vzťahu (2), ktorý je odvodený zo schémy na obrázku 4. Výsledky týchto meraní sa môžu využiť v rôznych oblastiach vedy, pri výskume a štúdiu prestupu tepla, ako i v praxi pri konštrukčnom návrhu rúrkových výmenníkov tepla s rôznym prierezom.

LITERATÚRA

- BRODNIANSKÁ, Z. 2010. *Výskum prenosových javov v tepelných procesoch holografickou interferometriou*: písomná časť dizertačnej skúšky. Zvolen: TU, 2010. 45 s.
- BUCHLIN, J. M. 2002. Convective heat transfer in a channel with perforated ribs. In *Elsevier Science*. 2002. PII: S1290-0729(02)01323-6.
- ČERNECKÝ, J. – PIVARČIOVÁ, E. – DUBOVSKÁ, R. 2003. *Holografia a jej technické aplikácie*. Radom: Institutu Technologii Eksploatacji, 2003. 66 s. ISBN 83-7204-352-3.
- ČERNECKÝ, J. – PIVARČIOVÁ, E. 1997. *Aplikácia holografickej interferometrie pri viditeľňovaní teplotných polí*. Zvolen: TU, 1997. 74 s. ISBN 80-228-0654-4.
- FERSTL, K. 1995. *Výbrané state z prúdenia a prenosu tepla*. Bratislava: STU. 1995.

- GAJTANSKÁ, M. – CHRISTOV, I. – IGAZ, R. 2004. *Lasery a ich využitie v priemysle*. Zvolen: TU, 2004. 295 s. ISBN 80-228-1398-2.
- HERMAN, C – KANG, E. 2001. Comparative evaluation of three heat transfer enhancement strategies in a grooved channel. In *Heat and Mass Transfer in Springer – Verlag*. 2001.
- KONIAR, J. 2008. *Výskum rýchlostných a teplotných polí okolo ohrievanej zakrivenej steny*: dizertačná práca. Zvolen: TU, 2008. 90 s.
- KOSTER, J. N. 1983. Interferometric investigation of convection in plexglas boxes. In *Experiments in fluids I. in Springer – Verlag*. 1983.
- MÍKA, V. 1981. *Základy chemického inženýrství*. Praha: SNTL. 1981. 872 s. 04-605-81.
- NAYLOR, D. 2003 Recent developments in the measurement of convective heat transfer rates by laser interferometry. In *International Journal of heat and fluid flow in Elsevier Science*. 2003.
- OLSSON, C. – SUNDÉN, B. 1998. Experimental study of flow and heat transfer in rib-roughened rectangular channels. In *Experimental thermal and fluid science in Elsevier Science*. 1998.
- PAVELEK, M. – JANOTKOVÁ, E. – ŠTETINA, J. 2007. *Vizualizační a optické měřicí metody*. Druhé vydání, VUT Brno. 2007.
- PIVARČIOVÁ, E. 2009. Teplotné pole materiálu. In: *Strojárstvo/Strojírenství*, ISSN: 1335-2938, 2009, č. 10, s. 74/4.
- SAJITH, V. et al. 2010. Convective heat transfer studies in macro and mini channels using digital interferometry. In *International Journal of Thermal Sciences in Elsevier Masson*. 2010.

Príspevok je riešený v rámci grantového projektu VEGA 1/0498/10 Aplikácia holografickej interferometrie pri skúmaní medznej vrstvy v zariadeniach na prestup tepla.

Kontaktná adresa:

Ing. Karina Valentová

Katedra environmentálnej techniky, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky,
TU Zvolen, Študentská 26, 960 53 Zvolen, valentova@vsld.tuzvo.sk

doc. Ing. Jozef Černecký, CSc.

Katedra environmentálnej techniky, Fakulta environmentálnej a výrobnjej techniky,
TU Zvolen, Študentská 26, 960 53 Zvolen, jcern@vsld.tuzvo.sk