



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Hálkova 6, 461 17 Liberec 1, CZ



Výzkumné centrum - Textil

TECHNICKÁ ZPRÁVA
č. ISRN TUL – VCT/C – MŘTP/TZ - - 03/001/CZ

Sborník technických zpráv
Sekce C

Zlepšení parametrů mykacího stroje

Sekce C - skupina "Mechatronické systémy"

Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy

Identifikační kód projektu: **LN 00B090**

Nositel: Technická univerzita Liberec

Řešitel: Doc. Ing. Aleš Richter, CSc

Název projektu: Výzkumné centrum „TEXTIL“

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Hálkova 6, 461 17 Liberec 1, CZ

VÝZKUMNÝ ÚSTAV TEXTILNÍCH STROJŮ

LIBEREC a.s.

U Jezu 4, 461 19 Liberec 4, CZ

TECHNICKÁ ZPRÁVA

č. ISRN TUL – VCT/C – MŘTP/TZ - - 03/001/CZ

Sborník technických zpráv

Sekce C

Zlepšení parametrů mykacího stroje

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146088067

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Univerzitní knihovna
Voroněžská 1329, Liberec 1
PSČ 461 17

Liberec, prosinec 2003

TZ 3

Projekt: ZLEPŠENÍ PRODUKCE MYKACÍHO STROJE

Projekt je řešen v sekci C.

Zpráva obsahuje informace o řešení dílčích úkolů :

Návrh měřicí elektroniky mykacího stroje

Snímač délkové hmotnosti pramene

Zvýšení kvality pramene na mykacím stroji

Návrh průtažného ústrojí

Optické snímání plošné hustoty rouna na mykacím stroji

Zprávu předkládá vedoucí projektu Ing. R. Šrámek (VÚTS) – 26.11.2003

Návrh měřicí a řídicí elektroniky mykacího stroje

Zprávu předkládá Ing. Tomášek, p. Had

1. Návrh měřicího, výpočetního a řídicího řetězce
2. Pohony
3. Současné snímače a vyhodnocení měřených signálů
4. Závěr

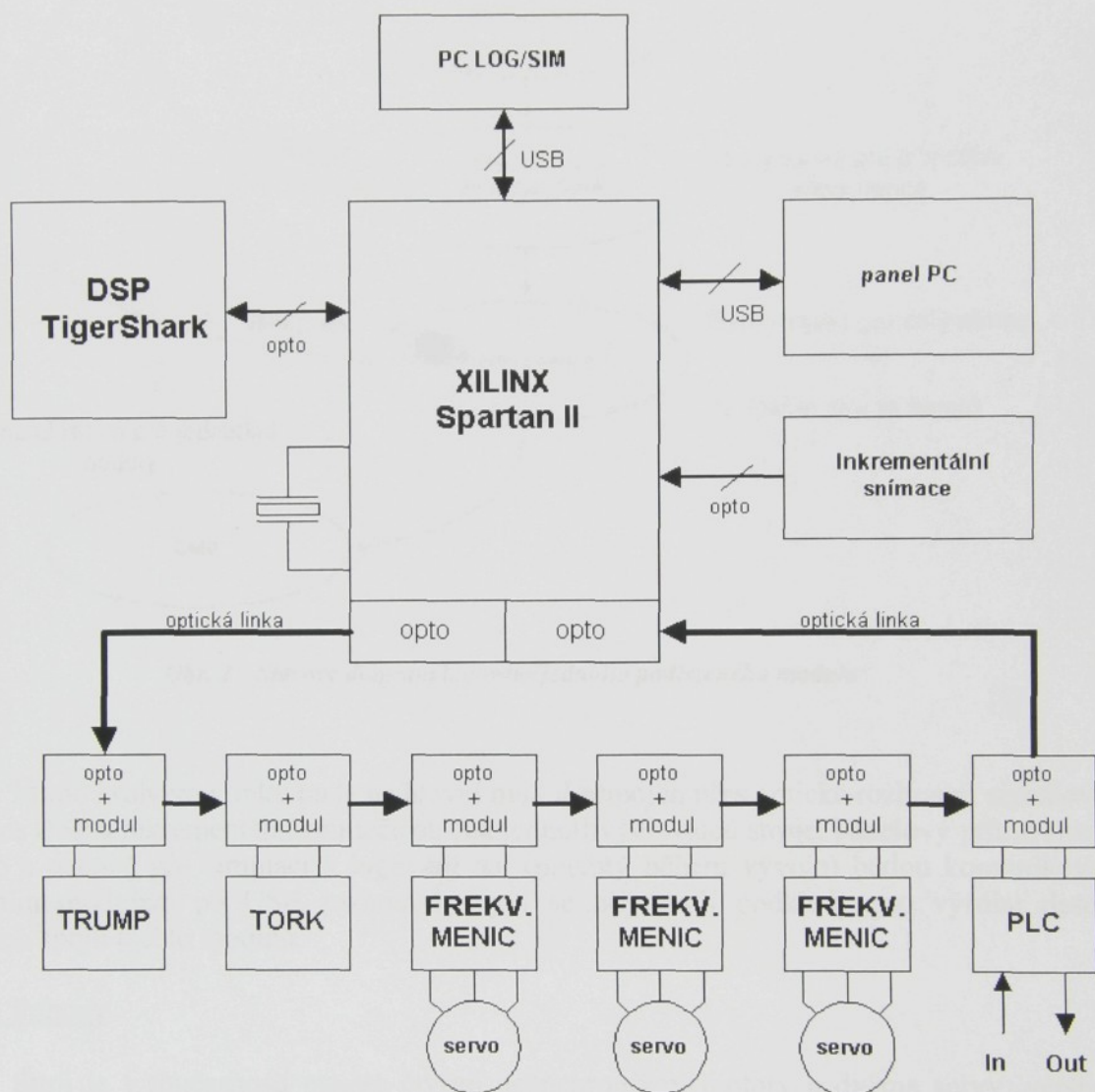
Práce je věnovaná návrhu řešení elektronického zařízení mykacího stroje. V první části dokumentu je popsán měřicí, výpočetní a řídicí blok elektronického zařízení stroje. Část druhá se zabývá silnoproudým vybavením stroje jako jsou pohony a jejich řídicí jednotky. Poslední třetí odstavec popisuje současné snímače použité na stroji.

1. Návrh měřicího, výpočetního a řídicího řetězce

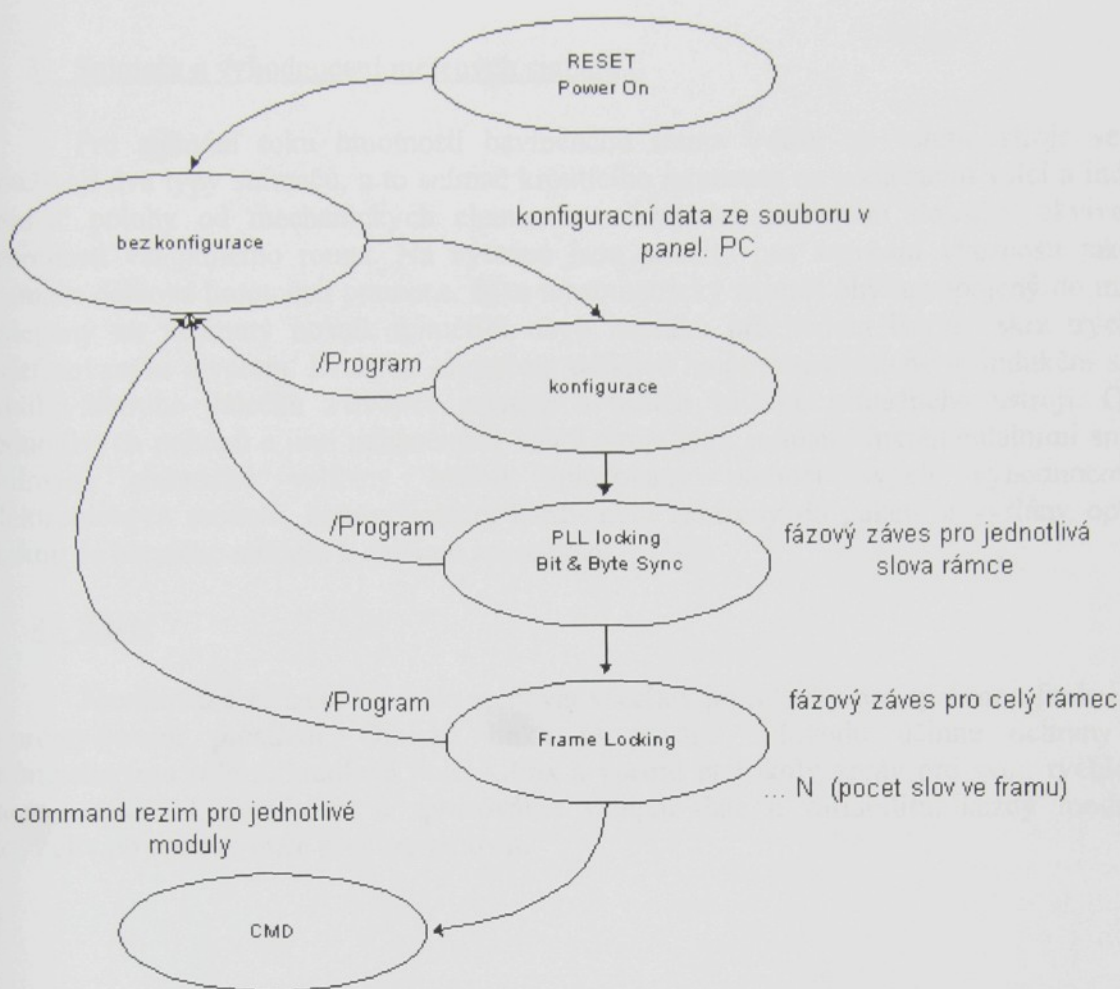
Jednotlivé funkční bloky elektronického zařízení pro měření, výpočty a řízení jsou zobrazeny pomocí blokového schématu na

Obr. 1. Vstupními signály jsou měřené signály ze snímačů toku hmotnosti bavlněného rouna v čase na vstupu stroje a délková hmotnost pramene na výstupu stroje a signály z inkrementálních čidel, výstupními signály jsou řídicí signály pro ovládání servomotorů a asynchronních motorů buď přímo stykači nebo pomocí měničů. Dalšími signály jsou vstupní a výstupní digitální řídicí, poruchové a bezpečnostní signály PLC části stroje. Všechny tyto signály jsou zpracovány ve svých elektronických modulech, údaje jsou uspořádány do komunikačního protokolu a pomocí optických portů vyslány po optické kruhové lince do centrální jednotky (hradlové pole Xilinx), která tento soubor dat zpracovává a řídí komunikaci na této lince. Hodnoty, které mají být dále numericky zpracovány a digitálně filtrovány jsou odeslány do signálového procesoru, signály z PLC obvodu se vyhodnotí. Pakety jsou synchronizovány a vysílány vždy jedním směrem. Délka je vždy stejná, závislá jen na počtu připojených zařízení v kruhu. Časování každého zařízení v kruhu se provádí pomocí synchronizačních pulzů v paketu a fázových závěsů v jednotlivých modulech. Každé zařízení má v protokolu své místo pro přijímaná nebo vysílaná data a svou délku. Jednotlivá zařízení si tak přečtou jen informace určené pro sebe a v tomtéž paketu mohou odpovědět. Na *Obr. 2* je zjednodušený stavový diagram programování hradlového pole Xilinx jednoho podřízeného modulu po optické lince. Po restartu systému se z panelového PC po USB lince naprogramuje Xilinx hlavního modulu, který řídí veškerou komunikaci v systému. Ten následně vysílá po kruhové optické lince k prvnímu podřízenému modulu konfigurační data pro naprogramování Xilinxu uvnitř modulu. Po konfiguraci hradlového pole modulu začíná hlavní modul vysílat prázdné rámce pro synchronizaci komunikace. Po uzamčení fázového závěsu jednotlivých slov rámce se vysílají kompletní rámce bez dat až dojde k zasynchronizování jednotlivých paketů. Poté se vysílají do modulu data pro naprogramování případných jednočipových

procesorů. Jakmile je modul nakonfigurovaný, přejde se k modulu následujícímu, kde vše probíhá opět podle stavového diagramu. Tak jsou postupně nakonfigurovány všechny moduly na optickém kruhu. Data jsou zabezpečena cyklickým polynomm. Jak je z tohoto popisu patrné, každý podřízený modul se skládá vždy z hardwaru obsluhující optickou linku s hradlovým polem Xilinx, zdrojem s přidavnými obvody pro transformaci napájení z 24V střídavých přivedených do každého modulu a dalších obvodů, které jsou různé od použití modulu. Ve většině případů bude modul vybaven mikroprocesorem ADuC 812 firmy Analog Devices.



Obr. 1 Blokové schéma měřicího a řídicího řetězce



Obr. 2 Stavový diagram logování jednoho podřízeného modulu

Mimo kruhovou linku bude na hlavní modul připojen přes optické rozhraní signálový procesor DSP a inkrementální snímače otáček jednotlivých válců stroje. Panelový průmyslový počítač a počítač pro simulaci a logování dat (použitý během vývoje) budou komunikovat s hlavním modulem po USB rozhraní. Nyní se připravují podklady pro výrobu desek plošných spojů těchto modulů.

2. Pohony

Stroj je v současnosti osazen čtyřmi asynchronními motory a dvěma servy, většina z as. motorů má nastavitelné otáčky pomocí frekvenčních měničů Lenze. Pohony průtažného ústrojí jsou stěžejní, především je kladen důraz na rovnoměrnost otáček a výkon 1. a 2. válečku průtahu (výkonný as. motor se setrvačником) a dynamiku a rovnoměrnost chodu (i v průběhu jedné otáčky) třetího válečku (stř. servomotor a měnič Siemens s chybou ± 1 otáčka v průběhu jedné otáčky). Tyto pohony se zdají být optimální variantou pro realizaci stroje.

3. Snímače a vyhodnocení měřených signálů

Pro snímání toku hmotnosti bavlněného rouna v čase na vstupu stroje se nyní používají dva typy snímačů, a to snímač kroutícího momentu na podávacím válci a indukční snímač polohy od mechanických elementů, snímajících přtlakem tloušťku ekvivalentní hmotnosti vstupujícího rouna. Na výstupu jsou použity pro srovnání vlastností také dva snímače délkové hmotnosti pramene. Je to tenzometrický snímač ohybu zapojený do můstku, nalepený na vetknutý nosník a měřící ohyb nosníku průchodem bavlny skrz trychtýřek s definovaným otvorem. Druhým snímačem délkové hmotnosti pramene je indukční snímač zdvihu horního válečku z dvojice prvních a třetích válečků průtažného ústrojí. Otáčky jednotlivých pohonů a jimi naháněných válců stroje jsou snímány inkrementálními snímači. Snímané elektrické veličiny budou zpracovány pomocí svých vyhodnocovacích elektronických modulů, komunikačním hardwarem zařazený do balení a vyslány optickou linkou do hlavního modulu k dalšímu zpracování.

4. Závěr

Navrhované zařízení by mělo splňovat všechny požadavky pro správnou funkci stroje v průmyslovém prostředí. Optická linka je použita z důvodu účinné ochrany vůči průmyslovému rušení, hradlová pole Xilinx a vlastní protokoly zpráv pro svou rychlost, se kterou dokáží komunikovat a zpracovávat vstupní data a variabilitu, každý modul lze kdykoliv po optické lince přeprogramovat.

2. Snímač délkové hmotnosti pramene

(řešitelé : Ing. Škop, Csc., Ing. Klouček, Ing. Čejka)

Pro snímač TRM-VÚTS 3 s průměry zhušťovačů 5,5 mm a 6,5 mm byly stanoveny kalibrační křivky (převod odporová síla – délková hmotnost pramene) přímo pro materiál vystupující z mykačky při pomaloběžném režimu. Pro oba průměry zhušťovačů byla provedena měření v plném rozsahu využitelnosti daného průměru zhušťovače. Naměřené body spolu s proloženou křivkou jsou zobrazeny v grafech v příloze. U zhušťovače průměru 5,5 mm je v grafu zobrazena také křivka určená měřením s mykanými prameny získanými ze stroje Trützschler DK-903 ve firmě Hybler Semily (oranžová křivka). Z rozdílnosti obou křivek je patrné, že tvar kalibrační křivky je výrazně závislý na způsobu zpracování pramene (procento háčků, míra paralelizace vláken apod.).

Pro regulaci mykačky je nutný také údaj o hmotnosti pramene na výstupu stroje, tj. za průtažným ústrojím. Řešit toto měření druhým snímačem TRM-VÚTS3 se zhušťovačem by bylo technologicky velice obtížně realizovatelné. Za snímačem by musel být instalován ještě čtvrtý pár odtahových válečků a vznikl by i velký problém se zaváděním pramene do průtahu. Bylo tedy přistoupeno k realizaci myšlenky měřit výšku drážky páru odtahových válečků. U dané konstrukce průtažného ústrojí lze předpokládat, že spodní odtahový váleček je dostatečně tuhý a má tuhé uložení, takže lze jeho pohyb ve svislé ose považovat za zanedbatelný. Pro měření výšky drážky pak postačuje měřit zdvih horního odpruženého válečku. První pokusy byly prováděny dotykovým indukčností snímačem zdvihu se safírovým hrotem a odpruženým jádrem. Snímač se dotýkal válečku ve středu drážky pro pramen. Výsledky při porovnání se signálem získaným ze snímače TRM-VÚTS3 naznačily možnou využitelnost principu. Bylo tedy přistoupeno k realizaci funkčního modelu, kdy byly zvoleny indukčností snímače zdvihu s volným jádrem, které bylo pevně spojeno s kolíkem tvořícím přítlak ložiska horního odtahového válečku. Snímače byly uchyceny do šroubů přítlaku pro měření zdvihu prvního a třetího válečku průtažného ústrojí. Pro oba snímače byly určeny kalibrační křivky, které jsou zobrazeny v grafech v příloze. Měření snímači zdvihu bylo ověřováno zatím pro pomaloběžný režim stroje a dosahovalo dobré shody s linearizovaným signálem ze snímače TRM-VÚTS3. Kvalita měření je však silně závislá na technickém provedení přítlaku průtahu, kolíky přítlaku musí mít zajištěno dobré vedení bez možnosti přičení, bez vůlí a s malou třecí silou ve vedení. Výhodou měření zdvihu válečků oproti měření snímačem TRM-VÚTS3 je zejména široký rozsah měření postihující celou šíři produkce stroje bez nutnosti přestavení snímače a téměř lineární závislost mezi zdvihem válečku a délkovou hmotností pramene. Snímač je také umístěn mimo vlastní dráhu pramene, takže nekomplikuje zavádění materiálu do průtažného ústrojí a neovlivňuje pramen přímým stykem. Při zabudování do bloku průtahu je více chráněn před poškozením při nešetrné obsluze stroje oproti snímači odporových sil se zhušťovačem. Podmínkou dobré funkce je dokonalý technický stav mechanických částí průtahu.

Výsledné kalibrační křivky pro snímače zdvihu i snímač TRM-VÚTS3 byly ověřeny proměřením shodných vzorků pramene pomocí měřicí aparatury Uster Tester 4SX na TU Liberec. V příloze jsou uvedeny grafy porovnání signálů ze snímačů TRM-VÚTS3 a zdvihu 1.válečku přepočtené na hodnoty délkové hmotnosti v ktex a signálu z přístroje Uster Tester měřeného v procentech odchylky od střední hodnoty. Signály měřené na průtažném ústrojí byly přepočteny z časové závislosti na délkovou. Na dalším grafu je porovnání délkové hmotnosti pramene měřené snímačem zdvihu na 3.válečku a signálu z přístroje Uster Tester

přepočteného na hmotnost pramene pomocí střední hodnoty hmotnosti pramene daného úseku. Zobrazeny jsou celý úsek proměřený přístrojem Uster Tester a detail zachycující i rychlé změny signálu. Z uvedených grafů je patrné, že snímače TRM-VÚTS3 i snímače zdvihu měří ve shodě s přístrojem Uster Tester 4SX, který je považován za světový standard pro hodnocení kvality pramenů.

Byly navrženy a testovány tři provedení zhušťovačů :

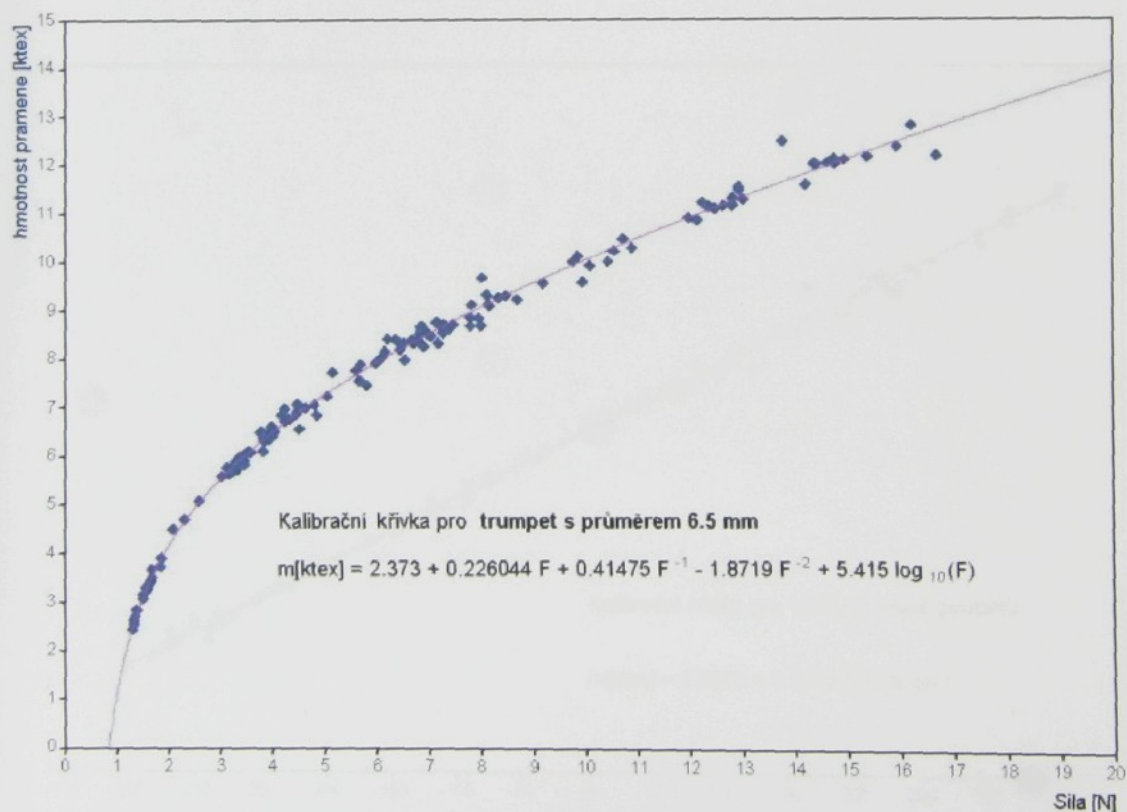
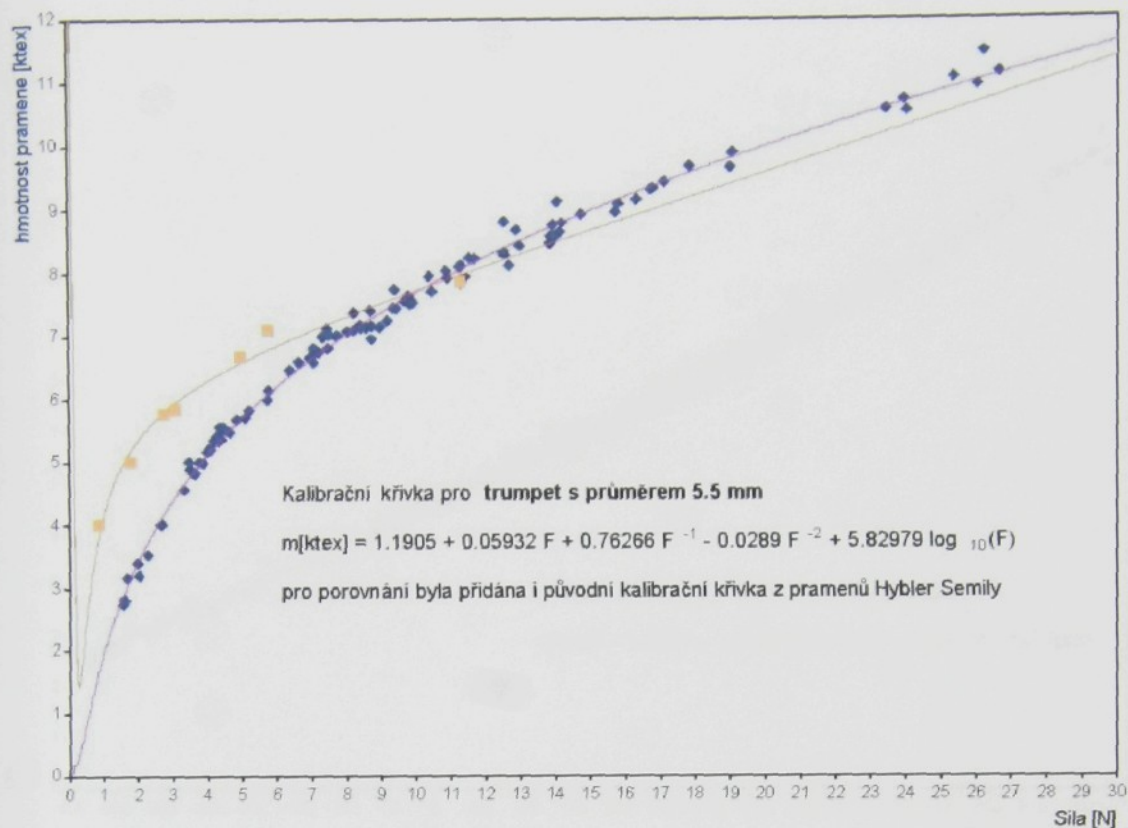
- z hliníkové slitiny, tloušťka stěny 2,7mm – váha 7,2g
- ocelový kalený, tloušťka stěny 0,7mm – váha 7,01g
- ocelový s hliníkovým nákrůžkem – váha 6,3g

Dále byl posuzován vliv drsnosti povrchu uvnitř zhušťovače. Byl zkoušen povrch leštěný a neleštěný. V příloze je z grafu zřejmé, že druh materiálu nemá vliv na naměřené hodnoty síly.

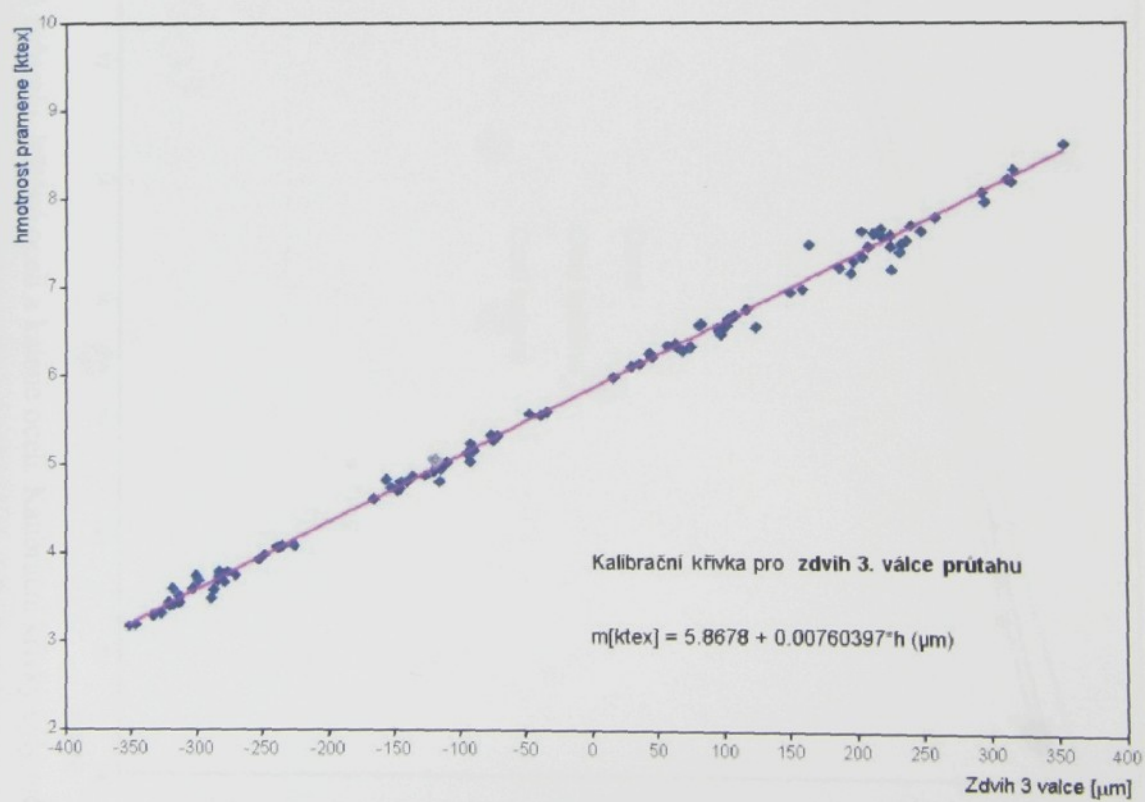
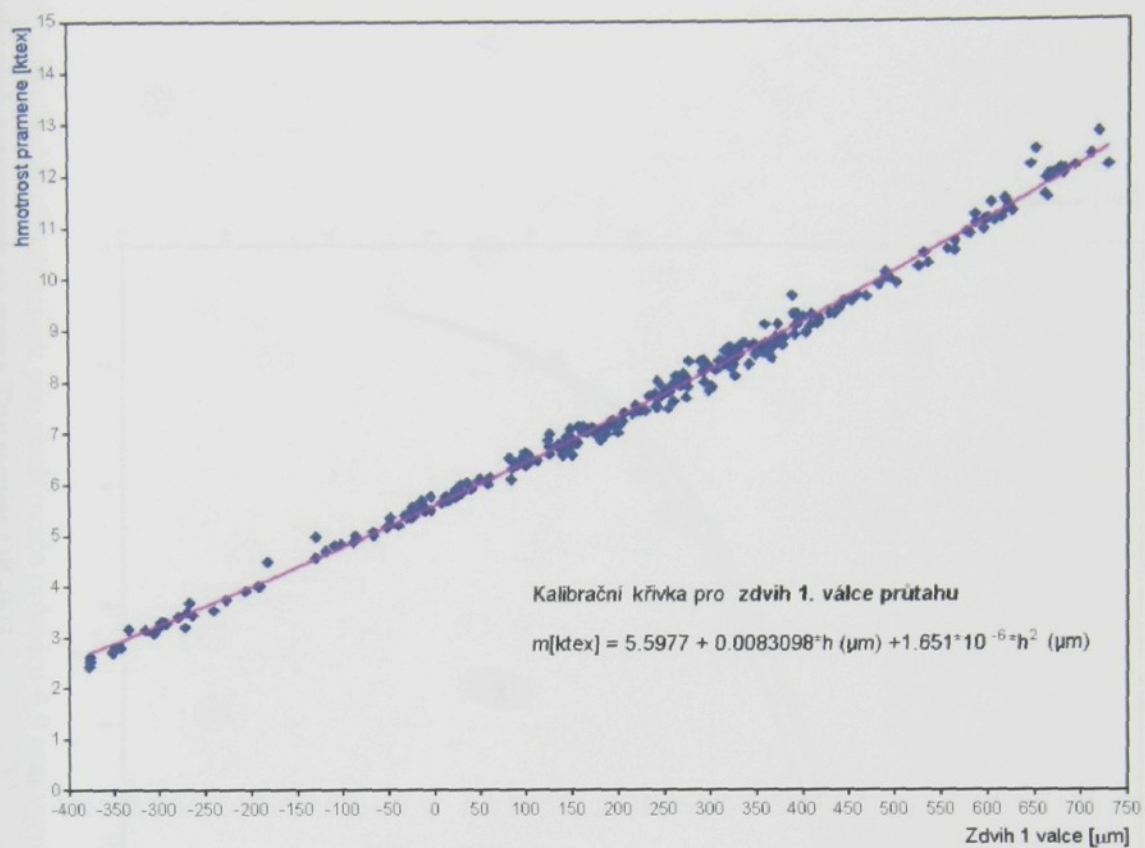
Byly prověřovány možnosti vsadit do zhušťovače vytvrzené vložky. Realizace není vhodná, protože rozměry nevyhovují konstrukčnímu záměru.

Z provedených měření jsme udělal tyto závěry :

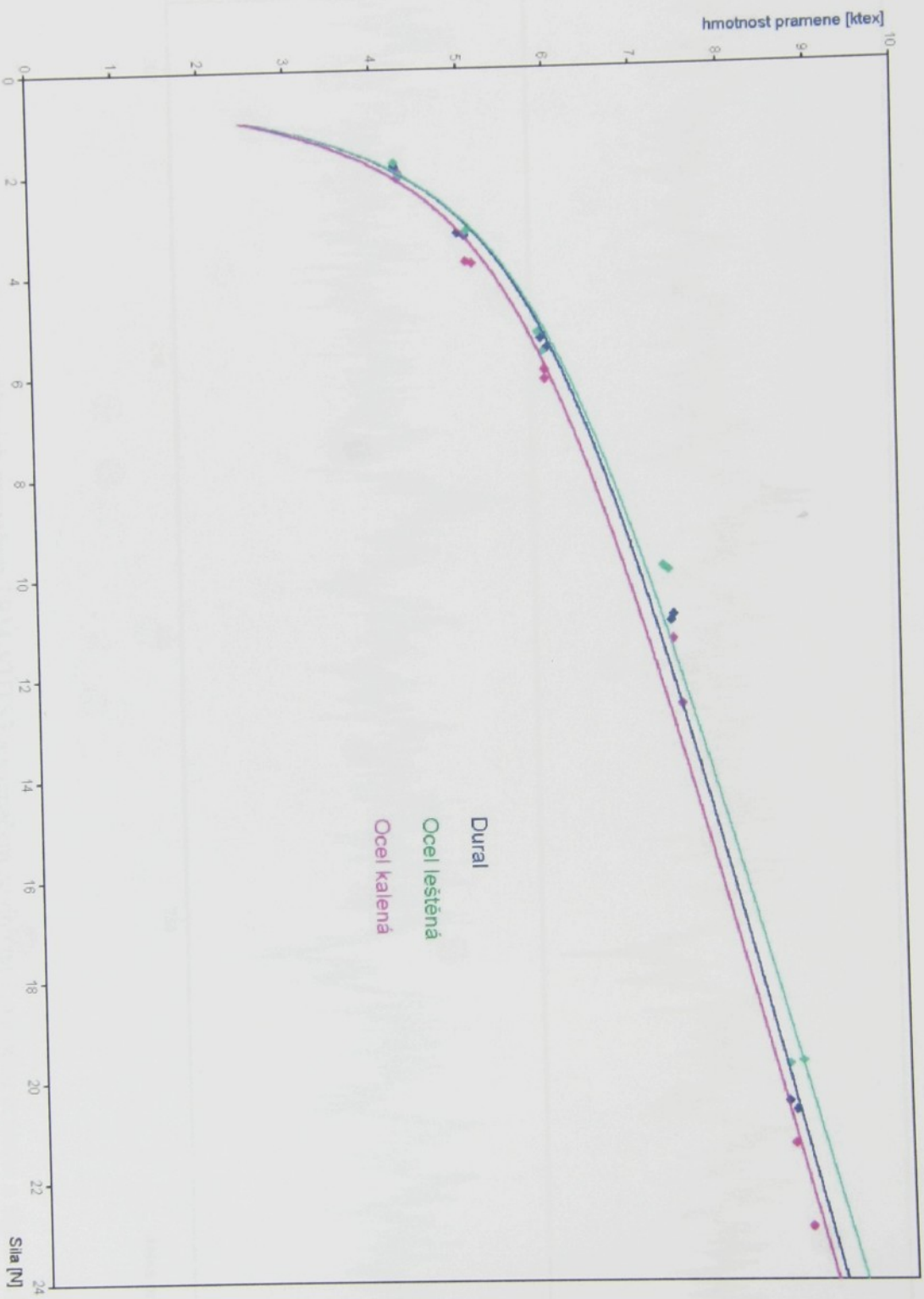
- 1) Pro zajištění dlouhodobé stability doporučujeme kalený ocelový zhušťovač.
- 2) Správné uložení zhušťovače v měrném trámci je nákrůžkem u příruby. Aby hmota celého snímače byla co nejmenší, bude nákrůžek z hliníkové slitiny. Tolerance průměru h8.
- 3) Před kalením bude vnitřní povrch leštěn na $Ra=0,2\mu m$. Na výkresu v příloze je optimální provedení zhušťovače do trampitmeteru.



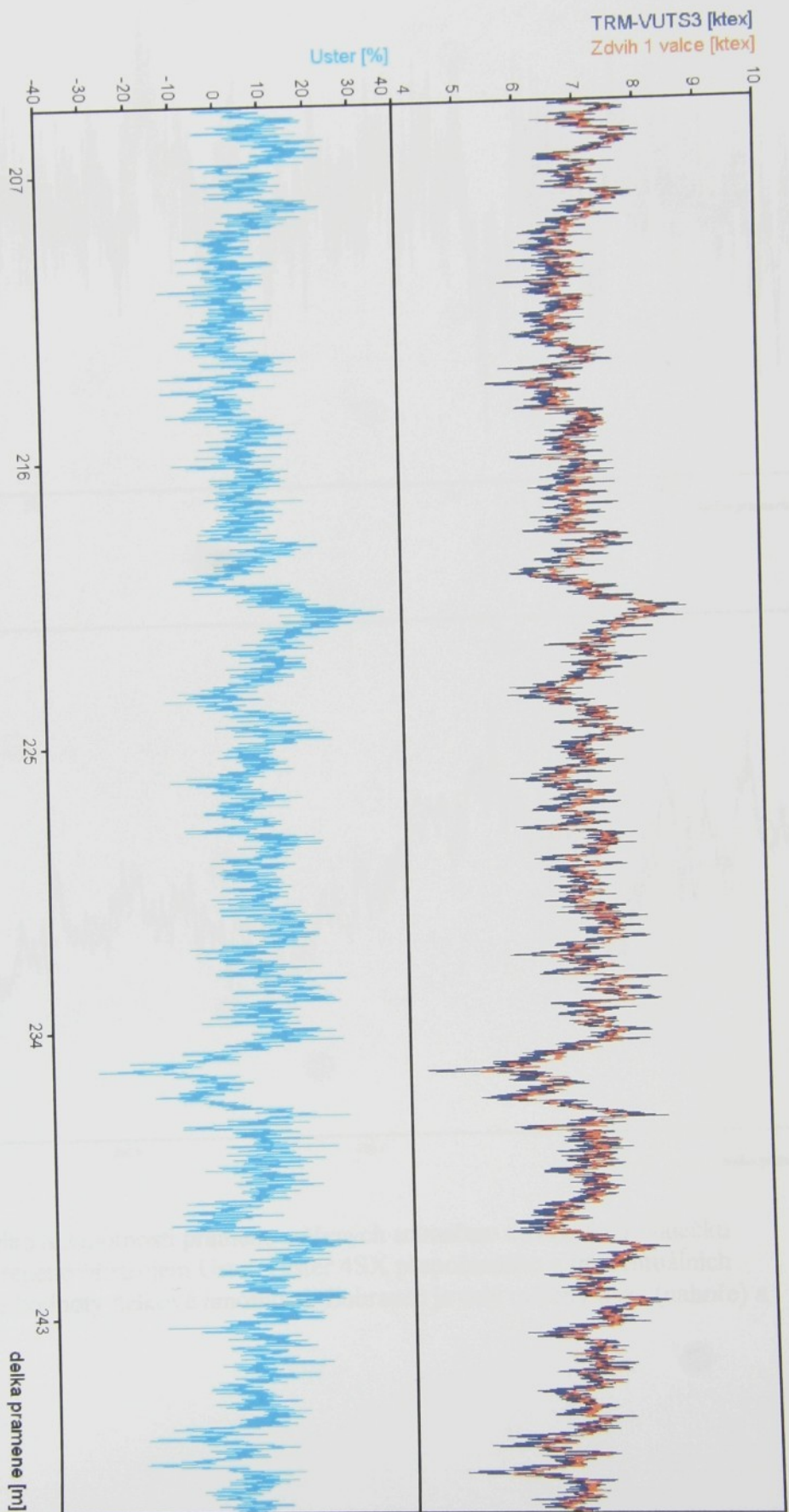
Kalibrační křivky pro snímač TRM-VÚTS3 se zhušťovači průměrů 5,5 mm a 6,5 mm.



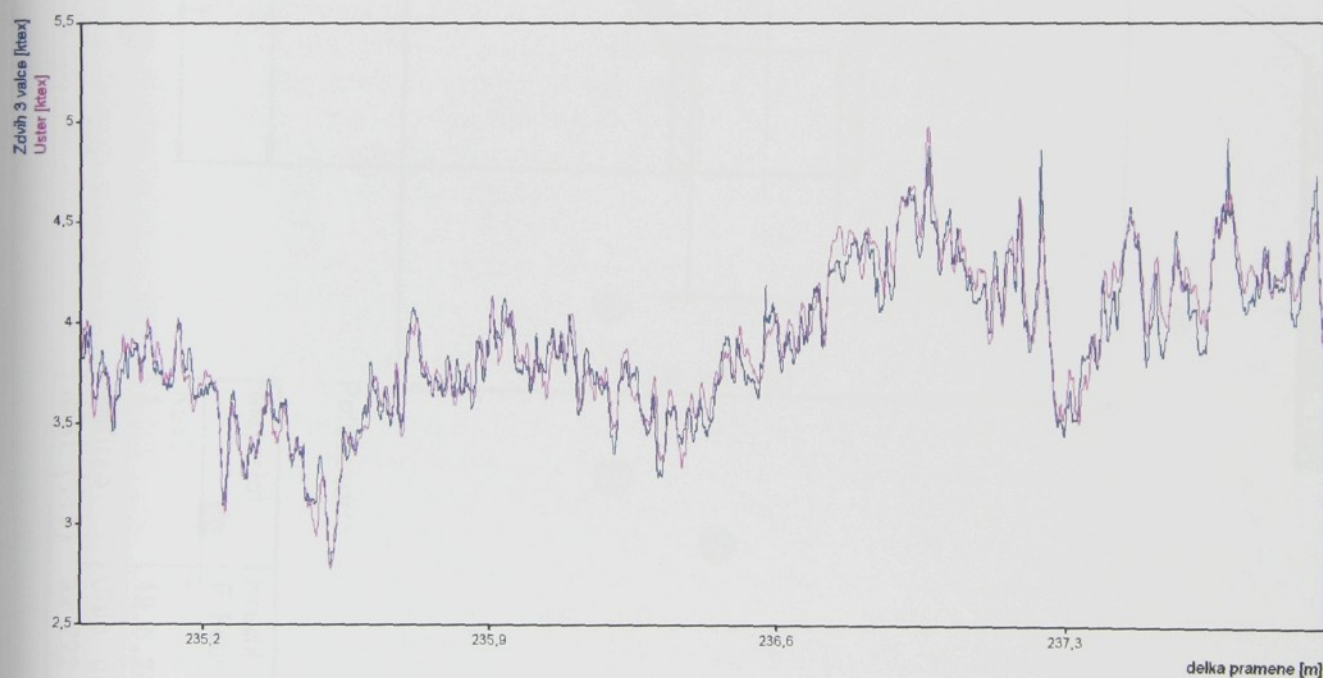
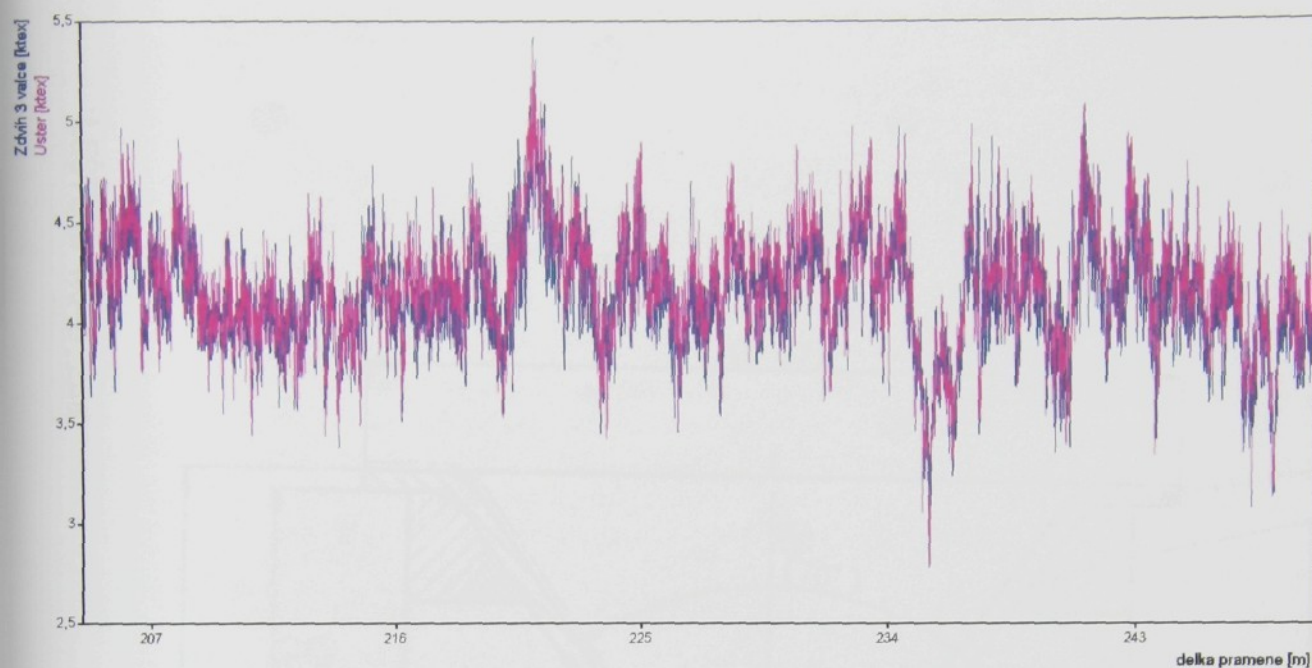
Kalibrační křivky pro snímače zdvihu prvního a třetího páru průtažných válečků.



Porovnání kalibračních křivek pro zhušťovače průměru 4,9 mm vyrobené z duralu, leštěné oceli a kalené oceli. Kalibrační křivky byly měřeny na mykaných pramenech ze stroje Trützschler DK-903.



Porovnání signálů délkové hmotnosti pramene měřených snímačem TRM-VÚTS3 a snímačem zdvihu na 1. válečku průtahů a signálu měřeného přístrojem Uster Tester 4SX.

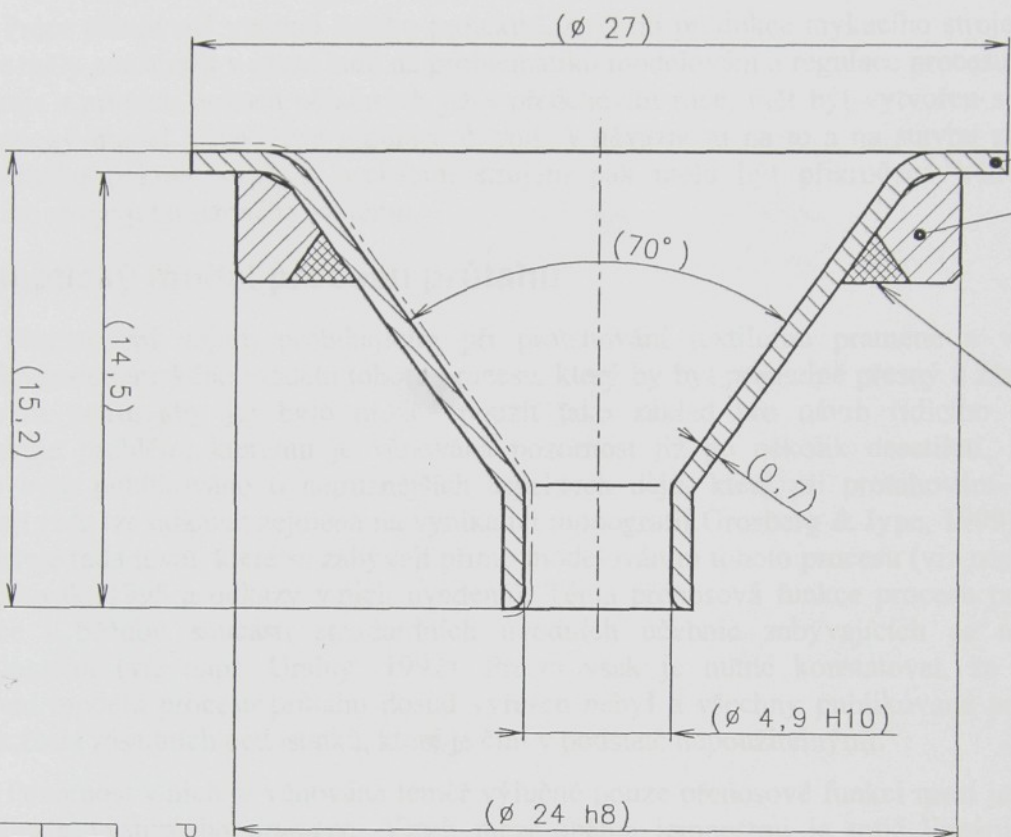


Porovnání signálů délkové hmotnosti pramene měřených snímačem zdvihu na 3. válečku průtahu a signálu měřeného přístrojem Uster Tester 4SX přepočteného z procentuálních odchylek na skutečné hodnoty délkové hmotnosti. Zobrazen je celý měřený úsek (nahore) a detail (dole).

CT02-230 CT02-231

LEPENÍ LEPIDLEM EPOXY 1200

3,2 (0,2/)



Polotovár:

M 1:1



1. LEŠTĚNO Ra=0,2µm

Materiál	Kreslil F. Founě	Poznámka
Kusů 1	Datum 19.6.2003	PRŮTAH MYKACÍHO STROJE
Měřítka NENÍ (1:1)	Číslo úkolu 99 222	Název ZHUŠŤOVAČ SLOŽENÝ Ø4,9
		Číslo náčrtku CT02-229

Projekt: „Zvýšení kvality pramene na mykacím stroji“

**výzkumná zpráva o řešení projektu v roce 2003
listopad 2003**

Jaroslav HLAVA, Bedřich JANEČEK, Josef JANEČEK
TU Liberec, Fakulta mechatroniky, Katedra řídicí techniky

Úvod

Práce plánované v rámci širšího projektu „Zvýšení produkce mykacího stroje“ na rok 2003 se měly soustředit v první řadě na problematiku modelování a regulace procesu průtahu. Vycházejí z prvních pokusů učiněných již v předchozím roce, měl být vytvořen spolehlivý matematický model a navržena regulace ústrojí. V návaznosti na to a na stavbu pracoviště umožňujícího pokusy s celým mykacím strojem pak mělo být přikročeno k identifikaci mykacího stroje jako řízeného systému.

Matematický model procesu průtahu

Porozumění dějům probíhajícím při protahování textilního pramene a vytvoření takového matematického modelu tohoto procesu, který by byl přijatelně přesný a zároveň byl v takovém tvaru, aby jej bylo možné použít jako základ pro návrh řídicího systému, představuje problém, kterému je věnována pozornost již po několik desetiletí. Poměrně mnoho bylo publikováno o nejrůznějších aspektech dějů, které při protahování pramene probíhají (zde lze odkázat zejména na vynikající monografii Grosberg & Iype, 1999) a stejně tak existuje řada textů, které se zabývají přímo modelováním tohoto procesu (viz např. Djiev, 1994; Novák, 1995 a odkazy v nich uvedené). Téma přenosová funkce procesu průtahu je dokonce i běžnou součástí standardních úvodních učebnic zabývajících se textilními technologiemi (viz např. Ursíny, 1992). Přesto však je nutné konstatovat, že problém vytvoření modelu procesu průtahu dosud vyřešen nebyl a všechny publikované práce mají několik zcela zásadních nedostatků, které je činí v podstatě nepoužitelnými.

Pozornost v nich je věnována téměř výlučně pouze přenosové funkci mezi jemnostmi vstupního a výstupního pramene. Vztah mezi oběma jemnostmi je totiž lineární a jeho modelování je proto relativně snazší. Pro účely návrhu řízení je však nezbytné znát i vztah mezi rychlostí posledního válečku a jemností výstupního pramene. Tento vztah je ovšem nelineární a jeho odvození je tak obtížnější. Jakýsi velmi útržkovitý a v konečné instanci zcela nepoužitelný pokus jej odvodit obsahuje pouze (Djiev, 1994). Navíc v téměř žádné z publikovaných prací nebyl učiněn pokus simulovat odezvy vytvořeného modelu v časové oblasti a srovnat je s odezvami skutečného procesu. Jedinou výjimkou je (Novák, 1995), který však nedospěl za konstatování, že srovnání nelze provést, jelikož přenosová funkce mezi jemnostmi vstupního a výstupního pramene je nestabilní. Nebyl již schopen a ani se nepokusil vysvětlit příčinu této nestability, která samozřejmě poukazuje na nějakou chybu modelu, neboť proces průtahu jako takový je stabilní. Pokud by se autoři ostatních publikovaných prací o simulaci vůbec pokusili, dospěli by k obdobným závěrům, neboť jimi navržené přenosové funkce byly obdobné.

Z těchto důvodů nebylo možné převzít hotový model z literatury a věnovat se pouze návrhu řízení, ale bylo nutné nejprve vytvořit vlastní model, který by zahrnul i vliv proměnné rychlosti posledního válečku a samozřejmě byl stabilní. V předchozím roce byl navržen nelineární model s distribuovanými zpožděními a byla nalezena příčina nestability dosud navržených přenosových funkcí (viz Hlava, 2002). V tomto roce výzkum pokračoval.

Nelineární spojitý model

Matematický model procesu průtahu je nelineární. V průběhu běžného provozu však veličiny kolísají v relativně nevelkém okolí (cca $\pm 20\%$) nominálních pracovních hodnot. Nejprirozenějším přístupem k návrhu modelu určeného pro návrh řízení je proto linearizace modelu a převedení linearizovaného modelu do tvaru přenosových funkcí popisujících vliv jemnosti vstupního pramene a změn rychlosti posledního válečku na jemnost výstupního pramene.

Měřitelnými veličinami na průtahovém ústrojí je jemnost vstupního a výstupního pramene. Tyto veličiny nelze ovšem bezprostředně uvést do vztahu. Vzhledem ke struktuře pramene je základní veličinou charakterizující pramen hustota předních konců vláken (HPKV) v příslušném bodě a čase. Vztah mezi HPKV a jemností pramene závisí na rozložení délek vláken a jejich orientaci vzhledem k ose pramene včetně eventuálních zahnutí vláken. Tyto veličiny nejsou časově neproměnné a zároveň není možné je v reálném čase průběžně měřit. Jakýkoliv model proto bude v principu mít pravděpodobnostní povahu a bude udávat vztah mezi středními hodnotami s tím, že mezi jeho výstupem a skutečnými hodnotami může existovat určitá proměnná odchylka mající povahu náhodného šumu.

Při odvozování vztahu mezi HPKV a jemností pramene na vstupu ústrojí je rozumné předpokládat, že vlákna jsou rovnoběžná s osou pramene. Tento předpoklad je přijímán zcela obecně v literatuře, která se zabývá modelováním procesu průtahu pomocí diferenciálních rovnic či přenosů. Paralelizace vláken v prameni sice není taková, aby tento předpoklad byl zcela splněn, odchylky se však v konečné instanci projeví pouze tak, že vlákna se jeví o něco kratší než ve skutečnosti, neboť pro model je podstatný pouze průmět vlákna do směru rovnoběžného s osou vlákna.

Jelikož rychlost prvního válečku je konstantní lze za tohoto předpokladu vyjádřit vztah mezi HPKV a jemností pramene na vstupu výrazem

$$d_1(t) = a\rho \int_0^{l_{\max}} n_1(t - \frac{l}{v_1}) f_c(l) dl \quad (1)$$

kde a označuje průřez jednotlivého vlákna, ρ objemovou hustotu materiálu vláken, v_1 rychlost vlákna na vstupu ústrojí, $n_1(t)$ HPKV na vstupu ústrojí a $f_c(l)$ je komplementární distribuční funkce rozložení délek vláken (staplový diagram).

$$f_c(l) = 1 - \int_0^l f(l) dl \quad (2)$$

Tato funkce udává pravděpodobnost, že vlákno přispívá k jemnosti pramene v místě, které leží ve vzdálenosti l od předního konce vlákna. Vztah (1) je pak v podstatě jen matematická formulace zřejmého faktu, že množství vláken na průřezu v místě svěru prvního válečku (či obecně v libovolném jiném místě) je dáno součtem všech těch vláken, jejichž počátky daným místem prošly a které zároveň ještě nedospěly tak daleko, aby daným místem prošly i jejich konce. Ze systémově teoretického hlediska definuje vztah (1) systém s distribuovaným zpožděním, jehož jádrem je komplementární distribuční funkce délek vláken.

Na vstupu průtahového ústrojí se vlákna pohybují rychlostí prvního válce v_1 . Otázkou, na kterou dosud neexistuje zcela jednoznačná odpověď je určení místa, kde přechází na rychlost dalšího válce. Důležitý je přitom zejména okamžik přechodu na rychlost posledního válce, která je proměnná a slouží jako akční veličina. Přechody na rychlosti dalších válců, které jsou u dvou a více zónových ústrojí umístěny mezi vstupem a výstupem ovlivňují pouze celkové dopravní zpoždění, v případě posledního (regulovaného) válce však ovlivňují i

dynamiku vlivu akční veličiny i poruchy na výstupní jemnost. V navrhovaném modelu jsme zatím vycházeli především z výsledků publikovaných v (Novák, 1995), které naznačují, že k této změně rychlosti dochází až tehdy, když se přední konec vlákna dostane do svěru příslušného válečku nebo velmi těsně před tím. Této otázce nicméně budeme v dalším výzkumu ještě věnovat pozornost.

Dochází-li tedy ke změně rychlosti skokově až v místě svěru dalšího válečku, je možné vyjádřit vztah mezi HPKV na vstupu a na výstupu ústrojí výrazem

$$n_2(t) = \frac{1}{P(t)} n_1(t - \tau_d) \quad (3)$$

kde P označuje průtah

$$P(t) = \frac{v_2(t)}{v_1} \quad (4)$$

Symbol v_2 označuje rychlost regulovaného válečku (v konkrétním případě dvou-zónového ústrojí třetího) a τ_d je čisté dopravní zpoždění mezi vstupem a výstupem. Jeho výpočet je závislý na umístění snímačů a uspořádání ústrojí.

Výraz pro jemnost výstupního pramene lze odvodit na základě úvahy, která je v principu analogická jako při odvozování vztahu (1). Problémem však je skutečnost, že rychlost výstupního válečku není konstantní a dobu potřebnou k tomu, aby přední konec vlákna urazil vzdálenost l proto nelze vyjádřit jednoduchým podílem $\tau(l) = l/v_1$. Jediným možným vyjádřením je tak implicitní funkce definovaná integrálem

$$l = \int_{t-\tau(l,t)}^t v_2(\alpha) d\alpha \quad (5)$$

Výstupní jemnost je pak dána vztahem

$$d_2(t) = a\rho v_1 \int_0^{l_{\max}} \frac{n_1(t - \tau_d - \tau(l,t))}{v_2(t - \tau(l,t))} f_c(l) dl \quad (6)$$

Tento vztah je možné převést do tvaru, který bude pro některé další výpočty příznivější, zavedeme-li pomocnou proměnnou

$$x(t) = \int_0^t v_2(\alpha) d\alpha \quad (7)$$

Rovnice (5) pak přechází do tvaru

$$l = x(t) - x(t - \tau) \quad (8)$$

a výraz pro jemnost výstupního pramene lze upravit do následující podoby

$$d_2(t) = a\rho v_1 \int_0^{\infty} n_1(t - \tau_d - \tau) f_c(x(t) - x(t - \tau)) d\tau \quad (9)$$

Horní mez integrálu bylo možné položit rovnou nekonečnu, neboť $f_c(l)$ je nulové pro $x(t) - x(t - \tau) > l_{\max}$. Akční veličina v_2 , jejíž přítomnost v (9) není bezprostředně zřejmá, je stále přítomna prostřednictvím pomocné proměnné x .

Linearizovaný model popsaný iracionálními přenosy

Systém definovaný uvedenými rovnicemi je zřetelně nelineární a analýza jeho vlastností je navíc komplikována přítomností distribuovaných zpoždění a implicitním tvarem rovnice (5). Jelikož hodnoty veličin se za provozu pohybují v relativně úzkém rozmezí v okolí jmenovitých hodnot, nabízí se linearizace a převod do přenosového tvaru jako první a nejpřirozenější cesta, jak dospět k modelu vhodnému jako základ návrhu řízení.

Jmenovitý pracovní bod lze definovat hodnotami d_{10} , n_{10} , d_{20} , v_{20} a lineárně rostoucí funkcí x : $x_0(t) = v_{20}t$. Hodnoty d_{10} a v_{20} jsou dány, n_{10} a d_{20} lze snadno spočítat ze vztahů (1) a (9), v nichž je uvažováno konstantní $v_2 = v_{20}$. Linearizovaný tvar rovnice (9) v okolí tohoto pracovního bodu pak lze popsat vztahem

$$\Delta d_2(t) = a\rho v_1 \int_0^{\frac{l_{\max}}{v_{20}}} \left\{ \Delta n_1(t - \tau_d - \tau) f_c(v_{20}\tau) + n_{10} \frac{df_c}{dl}(v_{20}\tau) \Delta x(t) - n_{10} \frac{df_c}{dl}(v_{20}\tau) \Delta x(t - \tau) \right\} d\tau \quad (10)$$

Tato rovnice je již lineární, nicméně stejně jako vstupní rovnice (1) obsahuje distribuovaná zpoždění, jejichž jádry jsou funkce f_c a $\frac{df_c}{dl}$. K tomu, abychom dostali použitelný model implementovatelný např. v Simulinku, je nutné je transformovat na soustředěná zpoždění. Jelikož v dostupné literatuře nebyl popsán dostatečně obecný transformační postup, bylo nutno vyvinout postup vlastní. Tento postup byl publikován v (Hlava, 2003d). Ve stručnosti lze jeho hlavní myšlenky popsat následujícími vztahy.

Distribuované zpoždění je možné obecně psát ve tvaru

$$y(t) = \int_0^T g(\tau) u(t - \tau) d\tau \quad (11)$$

kde u je vstup, y výstup a g je nezáporná váhová funkce integrovatelná na intervalu $\langle 0, T \rangle$ a nulová mimo tento interval. Tato funkce se také označuje jako jádro distribuovaného zpoždění. Provedeme-li Laplaceovu transformaci (11) dostaneme

$$Y(s) = \int_0^\infty \int_0^T \{ u(t - \tau) g(\tau) d\tau \} e^{-st} dt \quad (12)$$

Vzhledem k výše zmíněným vlastnostem jádra zpoždění je možné změnit horní mez integrace na nekonečno a zároveň přehodit pořadí integrace. Vztah (12) je tak transformován do tvaru

$$Y(s) = \int_0^\infty g(\tau) \int_0^\infty u(t - \tau) e^{-st} dt d\tau = \int_0^\infty g(\tau) U(s) e^{-s\tau} d\tau = U(s) \int_0^\infty g(\tau) e^{-s\tau} d\tau \quad (13)$$

Integrál zbývající v (13) představuje Laplaceovu transformaci g

$$G(s) = \int_0^\infty g(\tau) e^{-s\tau} d\tau = \int_0^T g(\tau) e^{-s\tau} d\tau \quad (14)$$

a vztah (12) tak může být vyjádřen jako

$$Y(s) = G(s)U(s) \quad (15)$$

Z tohoto vztahu je zřejmé, že Laplaceovu transformaci jádra zpoždění je možné formálně interpretovat jako přenosovou funkci. Tato transformace může ovšem v obecném

případě mít velmi různý tvar. Naším cílem však je nalézt systém se soustředěnými zpožděními, který bude z hlediska vztahu vstup-výstup ekvivalentní s původním distribuovaným zpožděním. Je proto nejprve nutné charakterizovat třídu jader distribuovaných zpoždění, jejichž Laplaceova transformace má stejný tvar jako přenosová funkce retardovaného systému se soustředěnými zpožděními. Laplaceovu transformaci jádra zpoždění (14) lze převést do tvaru

$$\begin{aligned} G(s) &= \int_0^T g(\tau) e^{-s\tau} d\tau = \frac{1}{s} \left(g(0) - g(T) e^{-sT} \right) + \frac{1}{s} \int_0^T g'(\tau) e^{-s\tau} d\tau = \\ &= \frac{1}{s} \left(g(0) - g(T) e^{-sT} \right) + \frac{1}{s^2} \left(g'(0) - g'(T) e^{-sT} \right) + \frac{1}{s^2} \int_0^T g''(\tau) e^{-s\tau} d\tau = \\ &= \sum_{i=1}^q \frac{1}{s^i} \left(g^{(i-1)}(0) - g^{(i-1)}(T) e^{-sT} \right) + \frac{1}{s^q} \int_0^T g^{(q)}(\tau) e^{-s\tau} d\tau \end{aligned} \quad (16)$$

kde q je libovolné kladné celé číslo. Z těchto rovnic lze snadno odvodit, že pokud existuje libovolné konečné q takové, že q -tou derivací g lze vyjádřit jako lineární kombinaci nižších derivací

$$g^{(q)}(t) = \sum_{i=0}^{q-1} c_i g^{(i)}(t), \quad (17)$$

rovnice (16) je možné převést do tvaru

$$\begin{aligned} \int_0^T g^{(q)}(\tau) e^{-s\tau} d\tau &= s^q G(s) - \sum_{i=1}^q s^{q-i} \left(g^{(i-1)}(0) - g^{(i-1)}(T) e^{-sT} \right) = \sum_{i=0}^{q-1} c_i \int_0^T g^{(i)}(\tau) e^{-s\tau} d\tau = \\ &= c_0 G(s) + \sum_{i=1}^{q-1} c_i \left(s^i G(s) - \sum_{j=1}^i s^{i-j} \left(g^{(j-1)}(0) - g^{(j-1)}(T) e^{-sT} \right) \right) \end{aligned} \quad (18)$$

a dále pak

$$\begin{aligned} s^q G(s) - \sum_{i=0}^{q-1} c_i s^i G(s) &= \sum_{i=1}^q s^{q-i} \left(g^{(i-1)}(0) - g^{(i-1)}(T) e^{-sT} \right) - \sum_{i=1}^{q-1} c_i \sum_{j=1}^i s^{i-j} \left(g^{(j-1)}(0) - g^{(j-1)}(T) e^{-sT} \right) = \\ &= \sum_{j=0}^{q-1} s^j \left\{ \left(g^{(q-j-1)}(0) - g^{(q-j-1)}(T) e^{-sT} \right) - \sum_{k=j+1}^{q-1} c_k \left(g^{(k-j-1)}(0) - g^{(k-j-1)}(T) e^{-sT} \right) \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

Laplaceovu transformaci jádra zpoždění pak lze zřejmě vyjádřit ve tvaru

$$G(s) = \frac{\sum_{j=0}^{q-1} s^j \left\{ \left(g^{(q-j-1)}(0) - g^{(q-j-1)}(T) e^{-sT} \right) - \sum_{k=j+1}^{q-1} c_k \left(g^{(k-j-1)}(0) - g^{(k-j-1)}(T) e^{-sT} \right) \right\}}{s^q - \sum_{i=0}^{q-1} c_i s^i} \quad (20)$$

Podmínku (17) splňují dva typy funkcí. Zcela zřejmě je splněna, je-li $g(t)$ polynomiální funkce. Pak vždy existuje konečné q takové, že q -tá derivace $g(t)$ je identicky nulová. Pak je podmínka (17) splněna, přičemž všechny konstanty c_i jsou nulové a $G(s)$ je ve tvaru

$$G(s) = \frac{\sum_{i=1}^q \left(g^{(i-1)}(0) - g^{(i-1)}(T) e^{-sT} \right) s^{q-i}}{s^q} \quad (21)$$

V obecnějším případě je pak tato podmínka splněna, je-li $g(t)$ řešením homogenní diferenciální rovnice s konstantními koeficienty

$$g^{(q)}(t) - \sum_{i=0}^{q-1} c_i g^{(i)}(t) = 0 \quad (22)$$

Toto řešení je ve tvaru lineární kombinace funkcí

$$e^{\alpha t} \cos \beta t; \quad e^{\alpha t} \sin \beta t \quad (23)$$

Případně, pokud odpovídající charakteristická rovnice má vícenásobné kořeny, v řešení budou obsaženy i funkce tvaru

$$t^r e^{\alpha t} \cos \beta t; \quad t^r e^{\alpha t} \sin \beta t \quad (24)$$

Naznačený postup tak může být použit tehdy, když jádrem zpoždění je polynomiální funkce nebo lineární kombinace funkcí (23) a (24). (vlastně i polynomiální jádro může být chápáno jako zvláštní případ (24) s vícenásobným kořenem v nule).

V konkrétním případě distribuovaných zpoždění v rovnicích (1) a (10) je jádro zpoždění dáno komplementární distribuční funkcí délek vláken popř. její derivací. Tyto funkce jsou evidentně nenulové pouze v určitém konečném intervalu a již ve zprávě za rok 2002 bylo konstatováno, že v případě bavlny je lze příhodně aproximovat pomocí polynomiálních funkcí. Relativně přesné aproximace lze dosáhnout při použití Pearsonova rozdělení prvního druhu. V prvním přiblížení je možné použít i trojúhelníkový staplový diagram, tzn. rovnoměrné rozdělení délek rozsahu od nuly až do jistého maxima $l_{\max}$. Komplementární distribuční funkce je v tomto případě dána vztahy

$$\begin{aligned} f_c(l) &= 1 - l/l_{\max} \text{ for } l \leq l_{\max} \\ f_c(l) &= 0 \text{ for } l > l_{\max} \text{ or } l < 0 \end{aligned} \quad (25)$$

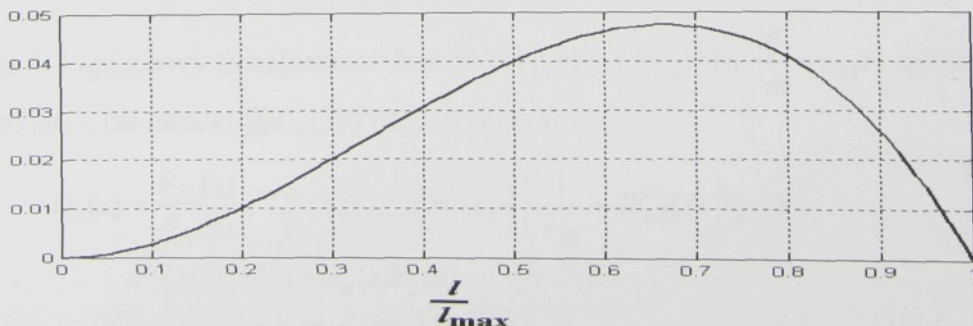
V případě Pearsonova rozdělení prvního druhu jsou hustota pravděpodobnosti a komplementární distribuční funkce dány vztahy

$$\begin{aligned} f(l) &= g_0 l^2 (l_{\max} - l) \quad \text{pro } 0 \leq l \leq l_{\max} \\ f(l) &= 0 \text{ jinde} \end{aligned} \quad (26)$$

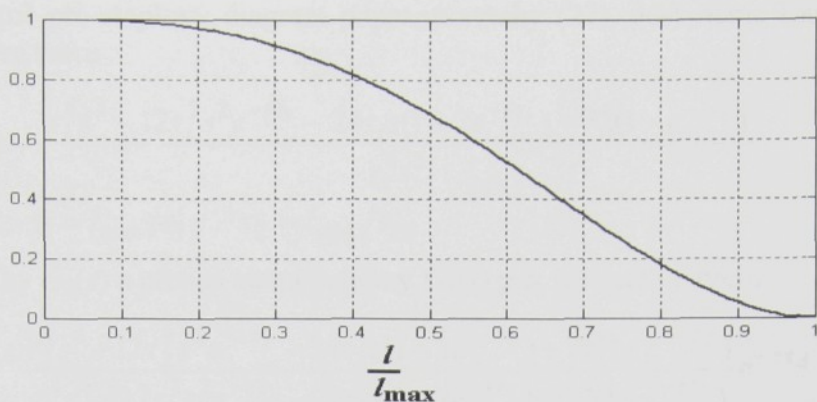
$$\int_0^{l_{\max}} f(l) dl = 1 \Rightarrow g_0 = 12/l_{\max}^4$$

$$\begin{aligned} f_c(l) &= 1 - g_0 l^3 \left(\frac{l_{\max}}{3} - \frac{l}{4} \right) \quad \text{pro } 0 \leq l \leq l_{\max} \\ f_c(l) &= 0 \text{ jinde} \end{aligned} \quad (27)$$

Aproximace popsaná vztahy (26) a (27) je ukázána na obrázcích 1 a 2. Je patrné, že tyto průběhy jsou blízké typickým průběhům bavlněných vláken.



Obr. 1 Hustota pravděpodobnosti definovaná vztahem (26)



Obr. 2 Komplementární distribuční funkce definovaná vztahem (27)

Je-li komplementární distribuční funkce rozložení délek vláken popsána vztahy (27), lze výše popsaný postup aplikovat velmi snadno. Rovnici (10) je možné rozdělit na dvě části. První z nich popisuje vliv změn HPKV vstupního pramene (poruchová veličina), druhá vliv změn rychlosti posledního válečku (akční veličina).

$$\begin{aligned} \Delta d_2(t) = & a\rho v_1 \int_0^{\frac{l_{\max}}{v_{20}}} \Delta n_1(t - \tau_d - \tau) f_c(v_{20}\tau) d\tau + \\ & + a\rho v_1 n_{10} \Delta x(t) \int_0^{\frac{l_{\max}}{v_{20}}} \frac{df_c}{dl}(v_{20}\tau) d\tau - a\rho v_1 n_{10} \int_0^{\frac{l_{\max}}{v_{20}}} \frac{df_c}{dl}(v_{20}\tau) \Delta x(t - \tau) d\tau \end{aligned} \quad (28)$$

Prostřední integrál v (28) nepopisuje žádné distribuované zpoždění a lze jej snadno eliminovat

$$\begin{aligned} \Delta d_2(t) = & a\rho v_1 \int_0^{\frac{l_{\max}}{v_{20}}} \Delta n_1(t - \tau_d - \tau) f_c(v_{20}\tau) d\tau - \\ & - a\rho \frac{v_1}{v_{20}} n_{10} \Delta x(t) - a\rho v_1 n_{10} \int_0^{\frac{l_{\max}}{v_{20}}} \frac{df_c}{dl}(v_{20}\tau) \Delta x(t - \tau) d\tau \end{aligned} \quad (29)$$

Jelikož měřitelnou poruchovou veličinou je jemnost vstupního pramene nikoliv jeho HPKV je nutné do modelu zahrnout ještě rovnici (1). Tu lze snadno přepsat do tvaru

$$\Delta d_1(t) = a\rho v_1 \int_0^{\frac{l_{\max}}{v_1}} \Delta n_1(t - \tau) f_c(v_1\tau) d\tau \quad (30)$$

Označíme-li Laplaceovy transformace funkcí $f_c(v_1\tau)$, $f_c(v_{20}\tau)$ a $\frac{df_c}{dl}(v_{20}\tau)$ symboly $F_{c1}(s)$, $F_{c2}(s)$ a $dF_{c2}(s)$, lze model (29), (30) převést do tvaru

$$\begin{aligned} D_2(s) = & \frac{F_{c2}(s)}{F_{c1}(s)} e^{-s\tau_d} D_1(s) - a\rho n_{10} v_1 \left(\frac{1}{s} + dF_{c2}(s) \right) V_2(s) = \\ = & G_d(s) D_1(s) + G_u(s) V_2(s) \end{aligned} \quad (31)$$

kde symboly Δ označující odchylky od nominálních hodnot byly pro přehlednost vynechány.

Konkrétně pro staplový diagram popsaný vztahy (27), dostaneme Laplaceovy obrazy $F_{c1}(s)$ a $F_{c2}(s)$ ve tvaru

$$F_{ci}(s) = \frac{\tau_i^4 s^4 - 12\tau_i^2 s^2 e^{-s\tau_i} - 24\tau_i s(1 + 2e^{-s\tau_i}) + 72(1 - e^{-s\tau_i})}{\tau_i^4 s^5} \quad (32)$$

$$i = 1, 2; \quad \tau_1 = l_{\max}/v_1; \quad \tau_2 = l_{\max}/v_{20}$$

a přenos poruchy $G_d(s)$ a přenos akční veličiny $G_u(s)$ pak lze psát ve tvaru

$$G_d(s) = P^4 \frac{\tau_2^4 s^4 - 12\tau_2^2 s^2 e^{-s\tau_2} - 24\tau_2 s(1 + 2e^{-s\tau_2}) + 72(1 - e^{-s\tau_2})}{\tau_1^4 s^4 - 12\tau_1^2 s^2 e^{-s\tau_1} - 24\tau_1 s(1 + 2e^{-s\tau_1}) + 72(1 - e^{-s\tau_1})} e^{-s\tau_d} \quad (33)$$

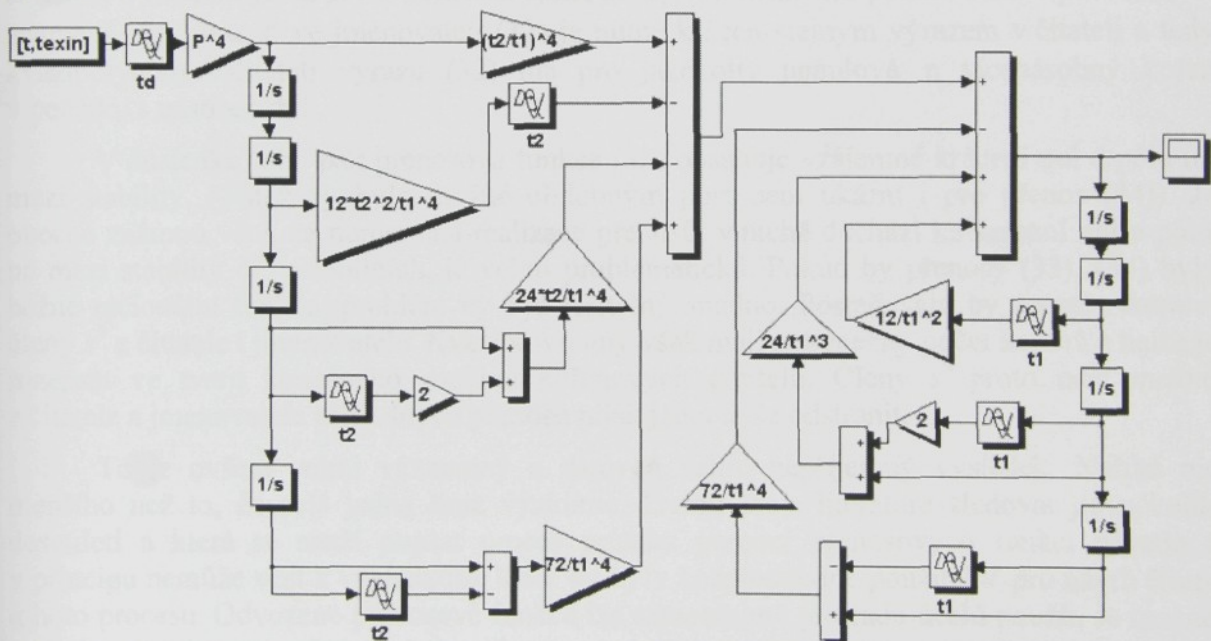
$$\tau_1 = l_{\max}/v_1; \quad \tau_2 = l_{\max}/v_{20}$$

$$G_d(s) = -\frac{5d_{10}v_1}{3v_{20}^2\tau_2^5} \frac{\tau_2^4 s^4 - 12\tau_2^2 s^2 e^{-s\tau_2} - 24\tau_2 s(1 + 2e^{-s\tau_2}) + 72(1 - e^{-s\tau_2})}{s^5} \quad (34)$$

$$\tau_2 = l_{\max}/v_{20}$$

kde d_{10} je jemnost vstupního pramene odpovídající jmenovitému pracovnímu bodu.

Přenosy (33) a (34) lze snadno realizovat v prostředí Matlab/Simulink. Na obrázku 3 je ukázána možná implementace přenosu (33), přenos (34) by bylo možné realizovat obdobným způsobem.



Obr. 3. Implementace přenosu (33) v prostředí Matlab/Simulink (řecká písmena τ jsou ve schématu nahrazena latinskými písmeny t)

Uvedené schéma umožňuje simulovat odezvy průtahového ústrojí, přičemž tyto odezvy jsou stabilní. Obdobně je možné simulovat i odezvy na změny akční veličiny s využitím přenosu (34). Uvedený model byl podrobně popsán v (Hlava, 2003b), zjednodušený popis doplněný o návrh jednoduché regulace byl publikován v (Hlava, 2003c).

Při pokračujících pokusech s praktickou implementací regulátorů s vnitřním modelem založeným na popsaném modelu však byly postupně zjištěny určité problémy. Za vcelku triviální a očekávatelný problém lze pokládat odchylku v chování nelineárního systému a

linearizovaného modelu (34) při větších odchylkách od jmenovitého pracovního bodu. Tento problém lze z přijatelnou přesností řešit jednoduchou aplikací standardní techniky gain scheduling.

Závažnějším problémem se však ukázalo být zjištění, že přestože je model (33), (34) stabilní, má poměrně špatné numerické vlastnosti. Ty se projevily tím, že výstup modelu nakonec po kratším či delším čase v závislosti na zvolené délce kroku numerické metody divergoval od správného řešení. Tento jev se projevil i tehdy, když byly místo běžných numerických metod pro obyčejné diferenciální rovnice, které jsou standardně dostupné v Simulinku, použity speciální metody (viz Shampine & Thompson, 2001) výslovně určené pro diferenčně diferenciální rovnice. K tomuto jevu došlo navíc i při jiných realizacích přenosu (33) než je ta, která je znázorněna na obr. 3. Když byl přenos převeden do tvaru stavových rovnic byla zkoumána odezva takto popsaného systému, objevil se stejný problém. Byla hledána příčina tohoto jevu a nakonec bylo zjištěno, že jej zřejmě lze vysvětlit následujícím způsobem.

Laplaceova transformace $F_{ci}(s)$ daná vztahem (32) má zdánlivě vícenásobný pól v počátku s násobností 5. Ze vztahu (14) je však zřejmé, že $F_{ci}(s)$ lze také vyjádřit jako

$$F_{ci}(s) = \int_0^{\frac{l_m}{v_i}} f_c(v_i \tau) e^{-s\tau} d\tau \quad (35)$$

Z tohoto vyjádření je na první pohled zřejmé, že $F_{ci}(s)$ nemá ani pól ani nulu v počátku. To znamená, že výraz s^5 ve jmenovateli (32) je nutně krácen stejným výrazem v čitateli a tedy kvazipolynom v čitateli výrazu (32) má pro jakékoliv nenulové τ_i vícenásobný kořen v počátku s násobností 5.

V důsledku toho pak přenosová funkce (33) obsahuje vzájemné krácení nul a pólů na mezi stability. (Totéž by bylo možné obdobným postupem ukázat i pro přenos (34)). Je obecně známou věcí, že numerická realizace přenosů, v nichž dochází ke krácení nul a pólů na mezi stability či nestabilních, je velmi problematická. Pokud by přenosy (33), (34) byly běžné racionální funkce, problém by byl řešitelný snadno. Postačovalo by prostě odstranit členy s^5 z čitatele i jmenovatele. Kvazipolynomy však mají nekonečný počet kořenů a nelze je rozepsat ve tvaru konečného součinu kořenových činitelů. Členy s^5 proto není možné z čitatele a jmenovatele příslušných přenosů nijak jednoduše odstranit.

To je ovšem velmi významný a zároveň velmi nepříjemný výsledek. Neříká nic menšího než to, že celá jedna linie výzkumu, kterou lze v literatuře sledovat již několik desetiletí a která se snaží popsat proces průtahu pomocí přenosových funkcí nevede a v principu nemůže vést k výsledkům, které by byly bezprostředně použitelné pro návrh řízení tohoto procesu. Odvozené přenosové funkce lze samozřejmě pro řadu účelů použít. Je možné s nimi pracovat ve frekvenční oblasti, s využitím příslušných metod pro určování dominantních kořenů kvazipolynomů (viz např. Vyhlídal & Zítek, 2003) je lze použít k analýze dynamických vlastností procesu. Vzhledem k tomu, že námi odvozené přenosy jsou na rozdíl od starších pokusů stabilní, lze je užít i pro krátké simulace odezev v časové oblasti. Pro delší simulace a pro použití v regulátorech založených na modelu (regulátory s vnitřním modelem, model prediktivní řízení) však nejsou vhodné. Dospíváme tak k výsledku, který je velmi zajímavý z teoretického hlediska a v současnosti je propracováván do podoby článku, který bude zaslán do časopisu Textile Research Journal. Z hlediska návrhu regulace je to však výsledek velmi nepříjemný, neboť znamená, že je nezbytné hledat alternativní přístupy k modelování procesu průtahu.

Nelineární numerický model

Problematicke alternativních modelů je věnováno především pojednání (Hlava, 2003a). První možnou alternativou je použít přímo nelineární model s distribuovanými zpožděními (1), (6). Tento model je sice obtížně analyzovatelný a pro klasické přístupy k návrhu regulátoru obtížně použitelný, pro některé modernější přístupy k řízení, především pak pro model prediktivní řízení, je možné i tento typ modelu použít. Integrály (1) a (6) lze počítat pomocí vhodné numerické aproximace. Pro výpočet integrálu (6) je nezbytné získat hodnoty implicitní funkce $\tau(l, t)$ řešením rovnice (5). To může vést ke snížení přesnosti modelu, neboť hodnoty v_2 a n_1 jsou dostupné pouze v okamžicích vzorkování a hodnoty $\tau(l, t)$ vypočtené z (5) nebudou v obecném případě celočíselnými násobky periody vzorkování. Z tohoto důvodu je vhodnější použít rovnice (7)-(9) a nastavit horní mez integrálu v (9) na hodnotu odpovídající maximální přípustné hodnotě v_2 .

Vlastní algoritmus výpočtu pak může být poměrně jednoduchý. V každém diskretním okamžiku vzorkování k , je pomocí diskretizované rovnice (1) a pole minulých hodnot n_1 vypočtena hodnota $n_1(k)$. Je-li použita nejjednodušší verze numerické integrace – obdélníková metoda - je $n_1(k)$ dáno vztahem

$$n_1(k) = \frac{(d_1(k) - d_1(k-1))}{a\rho v_1 T_s} + T_s \sum_{i=1}^{k_{\tau_1}} n_1(k-i) (f_c((i-1)v_1 T_s) - f_c(iv_1 T_s)) \quad (36)$$

kde T_s je perioda vzorkování a $k_{\tau_1} = \text{int}(\tau_1/T_s)$.

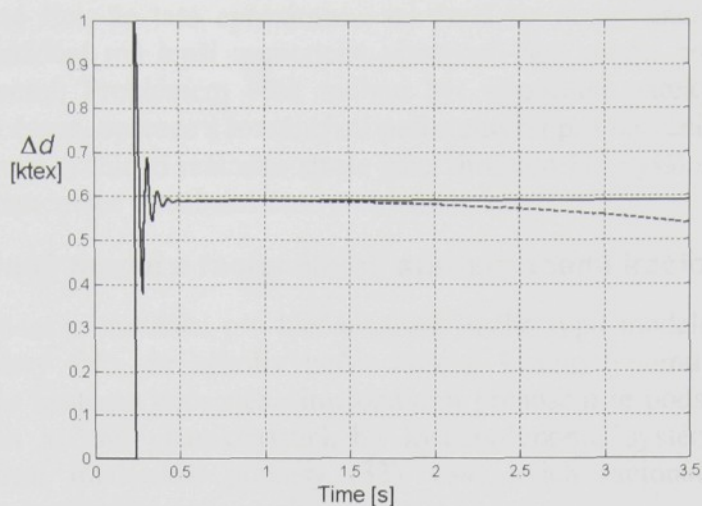
Je samozřejmě možné použít přesnější numerické aproximace integrálu. Rovnice (36) je pak o něco složitější, její struktura je však stejná. Chyba způsobená skutečností, že τ_1 není zcela přesně celočíselným násobkem T_s není z praktického hlediska podstatná, neboť τ_1 je funkcí l_m , které je tak jako určitelné pouze experimentálně a s nepříliš velkou přesností.

V druhém kroku algoritmu je pak použito pole minulých hodnot n_1 a v_2 k numerickému výpočtu $d_2(k)$. Tento výpočet je proveden jako numerická aproximace integrálu (9). Je ovšem velmi důležité, aby na vztahy (1) a (9) byla aplikována stejná metoda numerické aproximace integrálu. Aproximace (1) je totiž použita k nalezení vztahu $n_1(k)$ a tento vztah (v případě obdélníkové aproximace vztah (36)) zahrnuje numerickou diferenci. Pokud by navazující integrace byla provedena jinou aproximací výsledky by byly nepřesné.

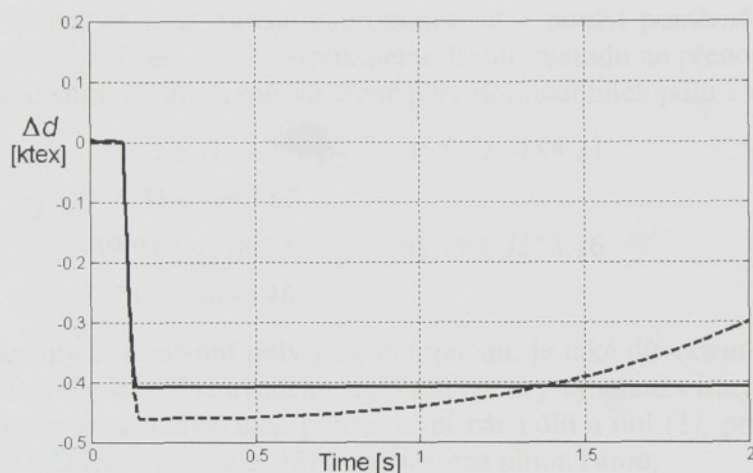
Popsaný nelineární diskretizovaný model procesu průtahu byl implementován v Simulinku jako S-funkce. Na obrázku 4 je vidět srovnání simulačních průběhů s přenosem (33) realizovaným pomocí schématu na obr. 3. Odezva přenosu (33) je nakreslena čárkovanou čarou, odezva numerického modelu založeného na aproximaci integrálu plnou čarou. Na obrázku 5 je obdobné srovnání odezev na změnu rychlosti posledního válečku mezi nelineárním modelem a přenosovou funkcí (34). Uvedené odezvy byly získány s následujícími hodnotami parametrů:

$$\begin{aligned} l_m &= 0.04 \text{ m}; v_1 = 0.49 \text{ m/s}; v_2 = 0.83 \text{ m/s} \\ P &= 1.7; T_s = 0.1 \text{ ms}; \tau_d = 0.1876 \text{ s}; \Delta v_2 = 0.1 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (37)$$

Na obrázku 4 je zřejmé, že počátky obou odezev jsou stejné, po jisté době se však odezva modelu (33) začíná odchylovat od správné (v tomto případě ustálené) hodnoty. Obdobně lze sledovat i na obrázku 5 nejprve ustálení a poté postupnou divergenci odezvy modelu (34). Určitá odchylka již na počátku je v tomto případě způsobena tím, že nelineární model a jeho linearizovaná podoba nemají stejnou statickou charakteristiku.

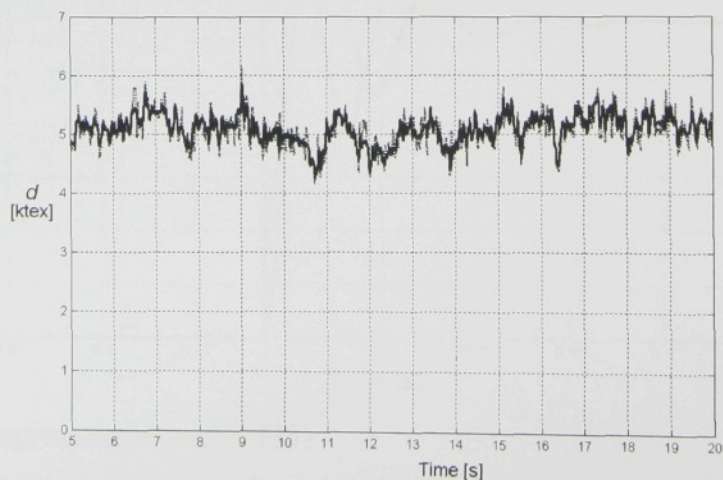


Obr. 4 Srovnání modelu (33) a nelineárního numerického modelu



Obr. 5 Srovnání modelu (34) a nelineárního numerického modelu

Obdobně je možné ukázat, že k divergenci výstupu modelu nedojde, ani pokud je provedena delší simulace, při níž jsou na vstup modelu přivedena reálná data naměřená snímačem na vstupu průtahového ústrojí a výstup modelu je srovnán s výstupem ústrojí. Toto srovnání je uvedeno na obr. 6.



Obr. 6 Výstup z nelineárního numerického modelu (plná čára) a výstup změřený na výstupním snímači ústrojí (tečkovaná čára)

Je tak možné říci, že tato aproximace založená na numerickém výpočtu integrálů distribuovaných zpoždění má lepší numerické vlastnosti než model popsany iracionálními přenosovými funkcemi. Problémem však mohou být výpočetní nároky (množství operací v pohyblivé řádové čáře, operace s rozsáhlými poli nutnými pro uložení minulých hodnot n_1 a v_2). Jelikož provozní rychlosti reálného stroje jsou zhruba o řád vyšší než hodnoty udané v (37) může být implementace v reálném čase problematická.

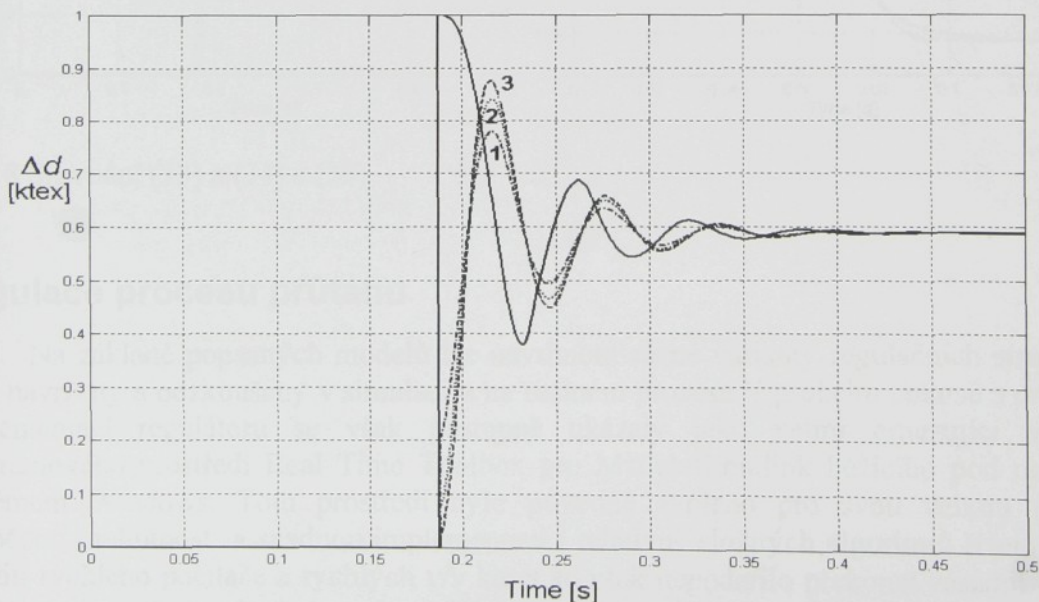
Linearizovaný model s racionálními aproximacemi iracionálních přenosů

Tato skutečnost je motivací pro hledání ještě jiného typu modelu. Výchozím bodem zde může být známý fakt, že ačkoliv počet kořenů kvazipolynomu je nekonečný, pro dynamiku stabilního systému popsaného iracionálním přenosem je podstatný relativně malý počet dominantních kořenů charakteristického kvazipolynomu systému. Naskýtá se tak možnost aproximovat iracionální přenosy (33), (34) jejich racionálními aproximacemi obsahujícími pouze dominantní póly a nuly.

V prostředí Matlabu není přímo k dispozici funkce, která by umožňovala výpočet kořenů kvazipolynomu. Je však možné naprogramovat a použít poměrně efektivní metodu navrženou v (Vyhlídal & Zítek, 2003). Aplikujeme-li tuto metodu na přenos (33), zjistíme, že tento přenos má následující komplexně sdružené páry dominantních pólů a nul.

$$\begin{aligned} p_1 &= -23.51 \pm j104.72; \quad p_2 = -36.93 \pm j184.21 \\ p_3 &= -45.31 \pm j262.62 \\ z_1 &= -39.97 \pm j178.02; \quad z_2 = -62.79 \pm j313.16 \\ z_3 &= -77.03 \pm j446.46 \end{aligned} \quad (38)$$

Skutečnost, že všechny dominantní póly jsou komplexní, je také důvodem toho, že odezva je tak silně kmitavá. Na obrázku 7 je uvedeno srovnání odezvy systému s iracionálním přenosem (33) a jeho aproximací využívajících pouze první pár pólů a nul (1), první dva páry (2) a všechny tři páry (3). Odezva přenosu (33) je zakreslena plnou čarou.



Obr. 7 Racionální aproximace modelu (33)

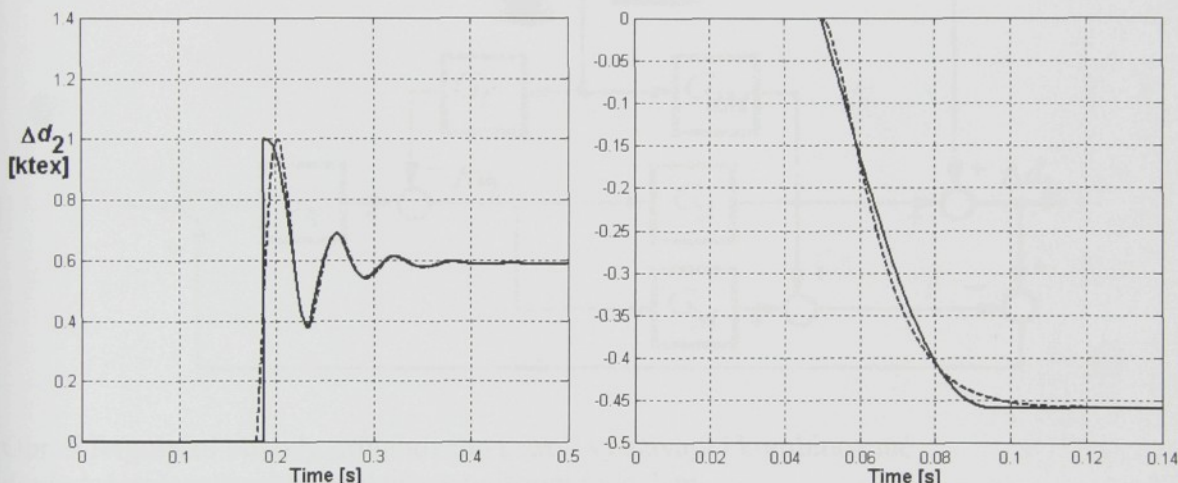
Je zřejmé, že tato aproximace konverguje. Zároveň však je patrné, že skutečně dobrá aproximace by vyžadovala zahrnout do modelu velké množství kořenů, což by vedlo na

model vysokého řádu, který by z hlediska numerických vlastností pravděpodobně nebyl příliš vhodný. Zároveň je však také vidět, že se vzrůstajícím řádem aproximace se frekvence oscilací odezvy prakticky nemění. Z toho vyplývá, že zřejmě nejjednodušším postupem, jak nalézt racionální aproximaci nízkého řádu, je použít ve jmenovateli pouze dominantní kořenový pár a výrazně derivační charakter odezvy, kterým se systém (33) vyznačuje, dosáhnout zařazením členu prvního řádu do čitatele. S využitím optimalizačních funkcí Matlabu lze jednoduše nalézt vhodnou velikost časové konstanty tohoto členu a vhodné snížení dopravního zpoždění τ_d tak, aby se odezva aproximace co nejlépe blížila původní odezvě. Obdobně lze postupovat v případě přenosu akční veličiny (34). Aplikací tohoto postupu lze získat následující racionální aproximace (33), (34) v okolí pracovního bodu určeného parametry (37)

$$G_d = 0.588 \frac{0.0083s + 1}{8.68 \cdot 10^{-5}s^2 + 4.08 \cdot 10^{-3}s + 1} e^{-0.18s}$$

$$G_u = -\frac{4.59}{(0.008s + 1)^2}$$
(39)

Srovnání odezev (33), (34) a (39) je na obrázku 8. V levé části je znázorněna odezva G_d , v pravé části G_u . Shoda je v obou případech relativně dobrá.



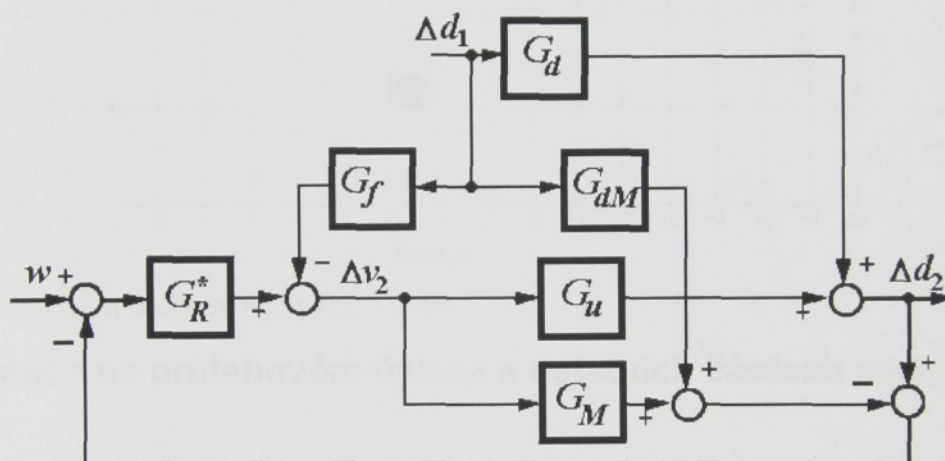
Obr. 8 Srovnání (33) a (34) s (39)

Regulace procesu průtahu

Na základě popsaných modelů lze navrhnout různé varianty regulačních struktur. Ty byly navrženy a odzkoušeny v simulaci a na reálném procesu. V průběhu pokusů s praktickou implementací regulátoru se však postupně ukázaly jako velmi omezující vlastnosti programového prostředí Real Time Toolbox pro Matlab/Simulink běžícího pod operačním systémem Windows. Toto prostředí bylo původně zvoleno pro svou velkou pružnost, výpočetní mohutnost a snadnou implementaci i relativně složitých algoritmů řízení. Ani při použití rychlého počítače a rychlých v/v karet se však nepodařilo překonat zásadní problém, že Windows nejsou vhodné pro práci v reálném čase a při realizaci komplikovanějších algoritmů docházelo k nedodržení přesné periody vzorkování a hroucení regulace již při relativně velmi dlouhých periodách vzorkování okolo 1 ms. Z tohoto důvodu bylo nakonec rozhodnuto toto prostředí opustit a jako náhrada byl vybrán řídicí počítač s operačním systémem reálného času PXI 8176 (výrobce National Instruments, frekvence procesoru

1,2 GHz) a rychlými analogovými vstupně výstupními kartami. Tento počítač je přímo určen pro rychlé řízení v reálném čase (se vzorkovacími frekvencemi v řádu desítek kHz, v závislosti na složitosti regulačního algoritmu), zároveň však je možné jej programovat z nadřazeného počítače PC pomocí systému LabVIEW, tedy relativně jednoduše a rychle. Tento systém je v současné době uváděn do provozu a jeho použití při ověřování algoritmů řízení průtahového ústrojí se předpokládá v průběhu prosince.

V tomto textu proto zatím pro informaci uvádíme pouze jeden z algoritmů řízení odzkoušený simulačně. Vycházejí z některých našich předchozích zkušeností s řízením systémů se zpožděním (viz např. Zítek & Hlava, 2001) je použit kombinovaný dopředně/zpětnovazební regulátor s vnitřním modelem. Jeho struktura je zachycena na obr. 9. V této struktuře symbolizuje blok G_S skutečný přenos mezi akční veličinou (v_2) a regulovanou veličinou (d_2) a blok G_d skutečný přenos mezi poruchovou veličinou (d_1) a regulovanou veličinou. Ostatní bloky jsou součástí regulátoru. Bloky G_M a G_{dM} představují modely přenosu akční a poruchové veličiny. Bloky G_R^* a G_f pak zpětnovazební a dopředný regulátor.



Obr. 9 Regulační obvody průtahového ústrojí využívající kombinované dopředně/zpětnovazební struktury s vnitřním modelem

Regulátor je založen na zjednodušených racionálních modelech (39), které lze numericky implementovat jednoduše a efektivně. Jako řízený systém byl pro účely simulace použit nelineární numerický model. Zpětnovazební regulátor i dopředný kompenzátor byly navrženy podle standardní procedury používané při návrhu regulátorů s vnitřním modelem.

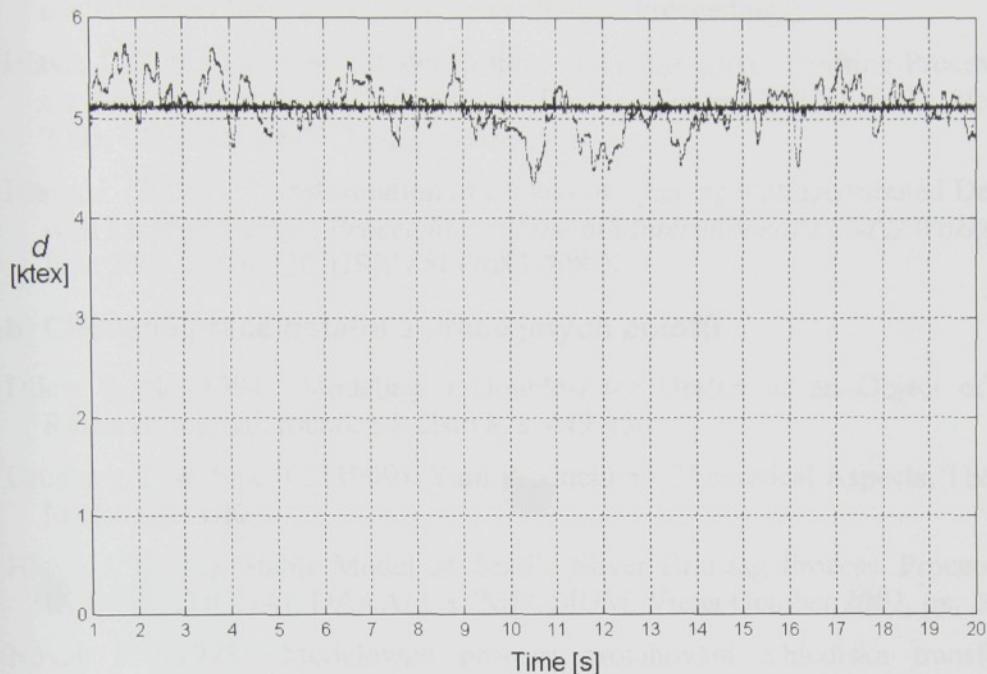
Jelikož (39) je invertibilní, lze přenosy regulátoru a dopředného kompenzátoru popsat následujícími vztahy.

$$G_R^*(s) = G_u^{-1}(s) \frac{1}{(\lambda_1 s + 1)^2} \quad (40)$$

$$G_f(s) = G_u^{-1}(s) G_d(s) \frac{1}{(\lambda_2 s + 1)} \quad (41)$$

Hodnoty λ_1 , λ_2 jsou zvoleny tak, aby byl zabezpečen vhodný kompromis mezi robustností a nominální kvalitou regulace. Při tom bylo nutné vzít v potaz zejména odlišný průběh odezev nelineárního procesu a zjednodušeného racionálního modelu. V konkrétním popisovaném případě jsou optimální hodnoty $\lambda_1=2$ ms a $\lambda_2=2.5$ ms.

Ukázka regulačních průběhů je zachycena na obr. 10. Plnou čarou je zakreslen průběh regulované jemnosti pramene na výstupu ústrojí. Čárkovanou čarou je zakresleno, jak by vypadal neregulovaný průběh (jedná se o průběh sejmutý vstupním snímačem a pouze vynásobený obrácenou hodnotou průtahu). Je zřejmé podstatné snížení nerovnoměrnosti pramene dosažené regulací.



Obr. 10 Regulační průběhy na výstupu ústrojí

Další práce na průtahovém ústrojí a ostatních částech mykacího stroje

V současnosti je již k dispozici pracoviště umožňující pokusy jak s celým mykacím strojem tak s jeho dílčími podsystémy. V tomto okamžiku je stroj zatím ještě provozován při relativně nízkých rychlostech, v dohledné době však bude možné jej provozovat při plné provozní rychlosti. Plánované práce se tak zaměří v první řadě na zprovoznění řídicího počítače s operačním systémem reálného času zmíněného v předchozí podkapitole a jeho připojení k mykacímu stroji. Tento počítač bude v první fázi využit k ověření navržených algoritmů řízení průtahového ústrojí. V dalším kroku pak bude použit nejprve pro další měření a identifikaci mykacího stroje a posléze pro pokusy s řízením celého mykacího stroje. V návaznosti na to a zároveň na vývoj elektroniky řídicího systému, který bude součástí definitivní verze stroje, pak bude provedena implementace regulačních algoritmů v jazyce C tak, aby bylo možné jej do tohoto řídicího systému začlenit.

Citovaná literatura

a) Práce autorů této zprávy bezprostředně se vztahující k řešení projektu a napsané a otištěné v roce 2003

(publikované texty obsahují explicitní odkaz na to, že popisují výsledky výzkumu probíhajícího v rámci projektu LN00B090)

Hlava J. (2003a), Modelling and Control of Cotton Sliver Drafting Process, *Proceedings of 3rd WSEAS International Conference on Systems Theory and Scientific Computation (ISTASC'03)*, Rhodes Greece, November 2003, CD-ROM (ISBN 960-8052-90-4), zároveň

otištěno v časopise *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, Vol.2, No. 4, pp. 808-813, ISSN 1109-2734

Hlava, J. (2003b), Time Delay Systems Applications in Textile Industry – Modelling of Sliver Drafting Process, *Preprints of IFAC Workshop on Time Delay Systems TDS'03*, Rocquencourt, France September 2003, CD ROM (ISBN bude přiděleno až poté, co nakladatelství Elsevier Science vydá oficiální Proceedings)

Hlava, J. (2003c), Internal Model Control of Textile Sliver Drafting Process, *Proceedings of the 14th International Conference on Process Control 2003*, Štrbské Pleso, Slovakia June 2003, CD ROM (ISBN 80-227-1902-1)

Hlava, J. (2003d), Transformation of a Class of Systems with Distributed Delays into Systems with Lumped Delays, *Proceedings of the 6th International ECM²S Workshop*, TU Liberec, June 2003, s.216-220, (ISBN 80-7083-708-X)

b) Citované práce ostatní a práce jiných autorů

Djiev, S. N. (1994), Modeling a Double-Zone Drafter as an Object of Control. *Textile Research Journal*, ročník 64, číslo 8, s. 449-456

Grosberg, P. & Iype, C. (1999). *Yarn Production - Theoretical Aspects*, The Textile Institute, Manchester UK

Hlava, J. (2002), Stable Model of Textile Sliver Drafting Process, *Proceedings of the 13th INTERNATIONAL DAAAM SYMPOSIUM*, Viena October 2002, pp. 207-208

Novák P. (1995), Modelování procesu protahování z hlediska transformace hmotové nestejnoměrnosti, doktorská disertační práce TU Liberec, Fakulta textilní

Shampine L.F., & Thompson S. (2001), Solving DDEs in Matlab, *Appl. Numer. Math.*, Vol. 37, pp. 441-458

Ursíny, P. (1992), *Teorie předení II*, skripty TU Liberec, Fakulta textilní

Vyhlídal, T., & Zítek, P. (2003), Quasipolynomial Mapping Based Rootfinder for Analysis of Time Delay Systems, *Preprints of 4th IFAC Workshop on Time Delay Systems*, France, September 2003, CD-ROM

Zítek, P. & Hlava, J. (2001). Anisochronic internal model control of time-delay systems. *Control Engineering Practice*, ročník 9, č. 5, s.501-516

4. Návrh průtažného ústrojí

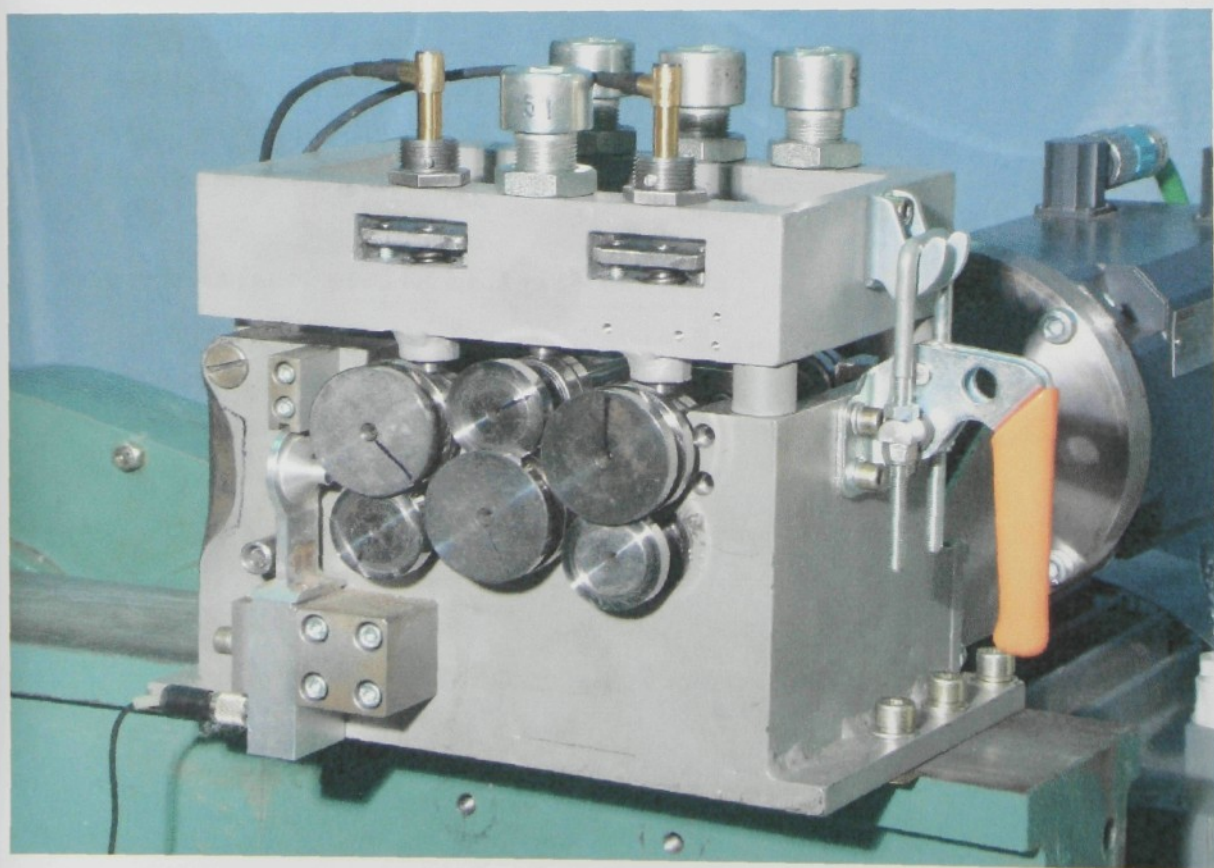
(ved. řešitel Ing.Šrámek, řešitelé Ing.Rous, Ing.Barančok, M.Vychroň, Ing.Koukolíková)

Byl vyroben základní model průtažného ústrojí, který byl odzkoušen na zkušebním standu. Po zhodnocení zkoušek byly navrženy úpravy a vyroben další model, který je na obrázku v příloze zprávy.

V průběhu řešení byly optimalizovány skupiny, které mají vliv na textilní technologii a provoz snímačů, které měří délkovou hmotnost pramene. Z hlediska funkce je důležité, aby horní váleček měl stejnou obvodovou rychlost jako spodní hnací váleček. To by bylo dosaženo použitím ozubených kol. Prověřovali jsme toto řešení a dospěli k závěru, že je nepoužitelné, protože nelze ozubení dokonale zakrytovat. Textilní prach by znehodnotil tento způsob. Je navržen třecí převod, kde testujeme (optimalizujeme) druh a tvrdost gumového válečku. Máme gumové válečky od firmy OTALO (70 Sh) a vulkolanové z TANEX Jaroměř (83 Sh).

Průtažné zařízení je nainstalováno na mykacím stroji a po dokončení řídicí elektroniky proběhnou komplexní zkoušky.

Nové průtažné ústrojí mykacího stroje a nové snímače délkové hmotnosti pramene



Optické snímání plošné hustoty rouna na mykacím stroji

Doc. Ing. Ivan Doležal, CSc.

Ing. Radim Vondra

Ing. Josef Grosman

Technická univerzita v Liberci

Tato zpráva se zabývá etapou vývoje od března do listopadu 2003. Navazuje a rozšiřuje poznatky z předchozího výzkumu aplikací optických snímačů (viz zpráva „Optické principy snímání hustoty rouna” v sekci C z r. 2002). V míře nezbytné pro porozumění stručně rekapituluje výsledky předchozích etap.

Optická metoda snímání obecně

- + nemá žádné pohyblivé nebo jinak složité mechanické díly
- + může být relativně levná
- vliv okolního osvětlení
- silně nelineární závislost mezi optickou a hmotnostní hustotou lehce stlačitelného, tvarově nestabilního rouna $\Rightarrow$ použitelnost metody mohou ukázat až praktické zkoušky prototypu se zapojením do zpětné vazby

Původní řešení s řádkovým snímačem CCD

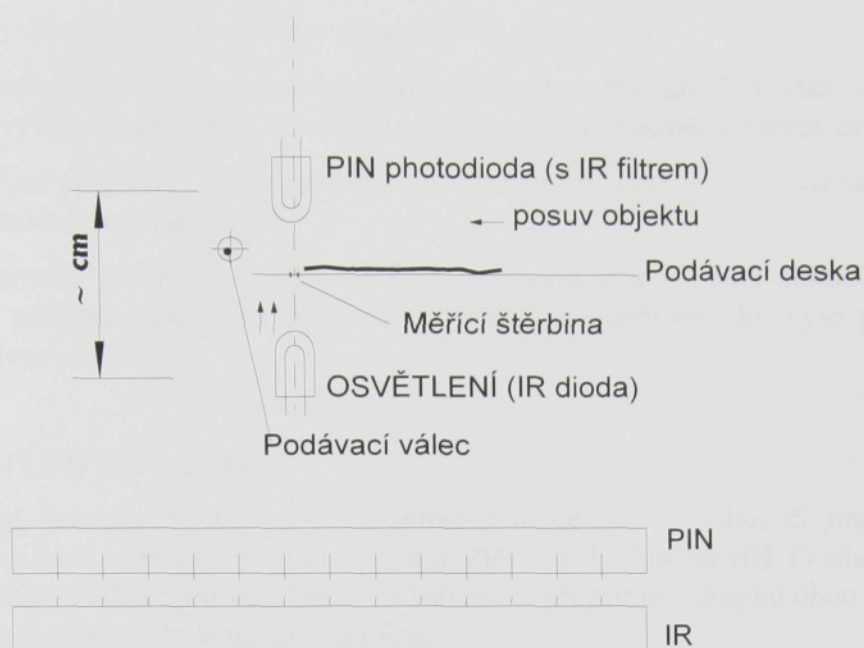
- + poměrně jednoduché
- + dostatečně citlivé
- menší dynamický rozsah
- vzhledem ke geometrii optiky nutná vzdálená montáž
- velký vliv okolního osvětlení
- potřeba rovnoměrného podsvětlení = poměrně obtížné

Nové řešení s řadou párů IR LED - PIN fotodioda

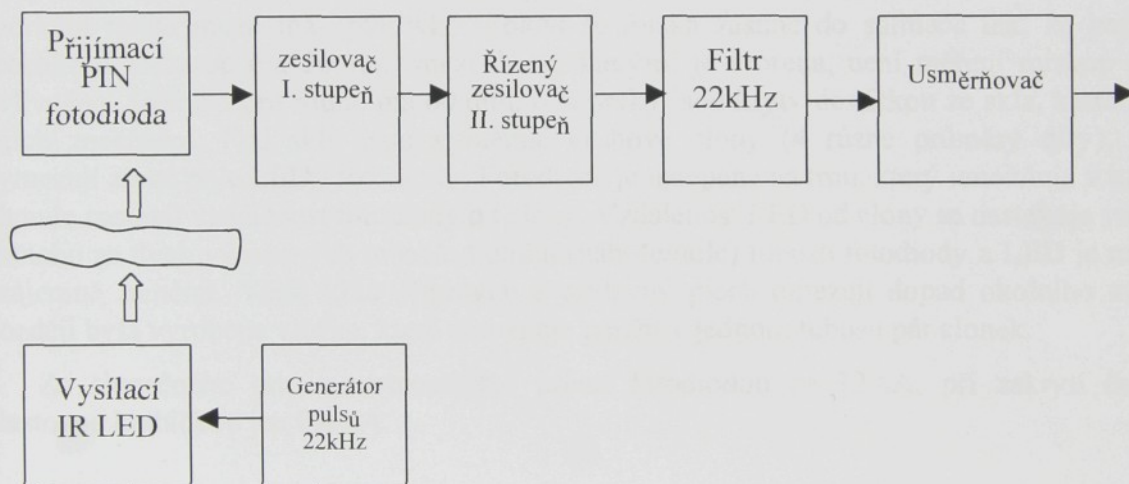
- + menší zástavba
- + snazší odstínění okolního osvětlení
- + menší vliv denního světla vzhledem k maximu citlivosti prvků v IR oblasti
- nespojité
- mnohokanálové $\Rightarrow$ potřeba mnoha snímačů

Při 32 párech bude jejich rozteč na stroji 30-35 mm.

LED je napájena *pulzně* a fotodioda zapojena v *pasivním režimu*.



Původní zapojení



- spínané napájení LED se střídou 1:1 a kmitočtem řádu kHz
- střídavě vázaný 2-stupňový zesilovač
- pásmová propust
- špičkový detektor
- + dobré potlačení okolního osvětlení
- + potlačení šumu a brumu
- o řád nižší možné maximum špičkového proudu LED
- relativně velká střední spotřeba budiče LED (50 % špičkového proudu)

- výstup se snadno dostal do saturace
- pro všechny kanály potřeba velmi mnoho součástek

Konkrétní provedení obvodu mělo určité nedostatky, které by však bylo možno odstranit. Špičkový detektor by bylo vhodnější nahradit přesným usměrňovačem střední hodnoty.

Pulzní proud IR LED a/nebo zesílení signálu fotodiod by mělo být skokově regulovatelné z řídicího mikropočítače.

Hlavním problémem bylo násobné provedení pro 32 párů snímačů, neboť vzhledem k době ustálení signálu na pásmové propusti i usměrňovači by bylo problematické jejich multiplexování.

Měření LED a fotodiody

Původní, jednoduchý vzorek páru snímačů neměl žádný tubus či jiné optické odstínění, nicméně byla změřena závislost proudu PIN fotodiodou BP104 (Vishay) na proudu LED TSHA520 (Vishay) pro vzdálenost ca 100 mm a při přímém dotyku obou prvků. Pro eliminaci okolního osvětlení byla použita krabice.

Přípravek na testování jednoho měřicího páru

S pracovníky VÚTS byl navržen a v jejich dílnách realizován přípravek (obr. 1 v příl. 3), který zajišťuje souosost LED a fotodiody a zároveň umožňuje zasunutí drátěné misky se vzorkem rouna mezi oba optoprvky. Pokud se miska zasune do snímače tak, že paprsky procházejí mezerou (ca 20 mm) mezi dráty, kterými je tvořena, není měření miskou nijak ovlivněno. Štěrbina pro rouno má 60 mm, oba prvky jsou kryty destičkou ze skla, které brání jejich znečištění. Pod skly jsou výměnné kruhové clony (4 různé průměry díry), které vymezují zorné pole LED i fotodiody. Fotodioda je nalepena na trnu, který umožňuje v tubusu plynule nastavit vzdálenost fotodiody od clony. Vzdálenost LED od clony se nastavuje volbou jednoho ze třech výměnných tubusů. Polohu (nahore/dole) tubusů fotodiody a LED je možné vzájemně zaměnit. Větší šířka přípravku a přídavný plech omezují dopad okolního světla. Později byla vyrobena vložka, která umožňuje použít v jednom tubusu pár clonek.

Za slunečného dne v místnosti byl proud fotodiodou ca 12 nA, při zakrytí černou plastovou krabičkou jen 0,4 nA.

Nové zapojení

Charakteristika

- multiplexování LED
- řízený stabilizátor proudu LED
- pouze 4 proudové zesilovače s multiplexováním 8 fotodiod, napájených konstantním napětím
- jediný multiplexor před A/D převodníkem
- odstranění signálu pozadí (okolního osvětlení) odečtením odměru v době bez buzení LED
- špičkový proud LED až 1 A (5× větší než u původního zapojení, neboť malá střída)

Blokové schéma je v příl. 5. Předpokládá se, že každý pár LED-fotodioda bude kalibrován, a že poslední, 32. kanál bude vyhrazen pro průběžnou kalibraci citlivosti měřicího řetězce, která je závislá na teplotě obou optoelektronických prvků. LED a fotodiody tohoto kanálu budou umístěny mimo vlastní měřicí šterbinu, kde budou odděleny clonou s velkou a konstantní optickou hustotou. Po vypnutí všech multiplexerů fotodiody bude možno změřit offset každého ze 4 zesilovacích řetězců – ovšem vzhledem k subtraktivní metodě měření by se mohl nepříznivě uplatnit pouze při kalibraci jednotlivých párů LED-fotodioda.

Multiplexování kanálů

Sepnutím 1 ze 4 elektronických spínačů kladného napájecího napětí 24 V (v 1-kanálovém prototypu jen 9 V) se aktivuje 8 sériově zapojených LED, rozmístěných ovšem na každé 4. pozici, t.j.

1. spínač	kanál č. 1, 5, 9, ... 25, 29
2. spínač	kanál č. 2, 6, 10, ... 26, 30
3. spínač	kanál č. 3, 7, 11, ... 27, 31
4. spínač	kanál č. 4, 8, 12, ... 28, 32

Mezera mezi kanály, u nichž je LED rozsvícena, zabrání ovlivňování právě snímaného, jediného kanálu svitem sousedních rozsvícených LED.

Řetěz LED je spojen na zem přes regulovaný zdroj proudu, nastavovaný (alespoň stupňovitě) z řídicího mikrokontroléru.

Pokud se ukáže, že celkový úbytek napětí na 8 LED při špičkovém proudu 1 A, na zdroji proudu a na spínači překračuje dostupné napájecí napětí 24 V, počítá se s možností 8 spínačů, každý jen se 4 LED v sérii.

Současně bude nastaven příslušný kanál všech analogových multiplexerů AMUX0-3, které připínají fotodiody na vstupy 4 zesilovačů – převodníků proudu na napětí. Následující další analogový multiplexer vybere výstup jednoho z multiplexerů AMUX0-3 na vstup A/D převodníku. Předpokládá se, že multiplexování kanálů půjde podle jejich pořadového čísla 1-32. Jako poslední tedy bude kalibrační kanál č.32.

Na každém kanálu se provedou 2 odměry A/D převodníku – nejprve s rozsvícenou LED, pak se zhasnutou LED. Druhý údaj je dán vlivem okolního osvětlení a odečte se od prvního. Mezi odměry musí být ponechána přiměřená prodleva na ustálení signálu fotodiody i odezvu zesilovače.

Volba časování

Dle datových listů LED byla zvolena délka pulzů špičkového proudu 100 μ s.

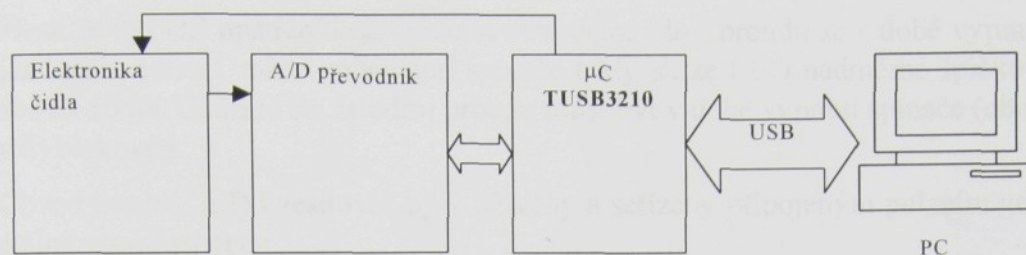
Zadání požaduje vzorkování ca 30 vz./s, t.j. s periodou 33 ms, tedy zvolíme 1 ms na 1 kanál. Z výše uvedeného multiplexování plyne, že LED bude spínána s periodou 4 ms, tedy střída 1:40, což umožní zvolit bezpečný špičkový proud 1 A.

Protože doba ustálení signálu fotodiody a zesilovače využívá délku pulzu 100 μ s, uvažuje se stejná doba do vzorkování s vypnutými LED.

Starší varianta

Byl použit modul s mikroprocesorem TUSB3210 a deska s A/D převodníkem, které měl ing. Vondra k dispozici a které byly použity již v původním zapojení. Na PC běžel program, který zobrazoval data vysílaná mikroprocesorem.

K těmto modulům byla navržena *deska zesilovače* a *deska interface* s obvody spínání LED.



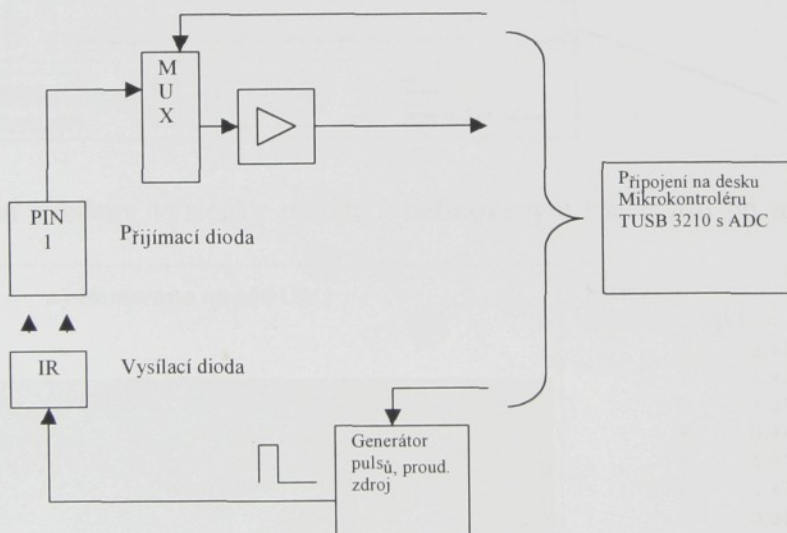
Multiplexer a zesilovač fotodiod

Použit převodník proud-napětí s JFET operačním zesilovačem AD795 (Analog Devices) o nízkém klidovém vstupním proudu a se standardním napájením, zde ± 12 V. Zpětnovazební odpor a tedy i převodní vodivost byly nejprve 50 M Ω , což odpovídá proudu fotodiody 50 nA na plný výstupní rozsah 2,5 V.

Invertující zapojení vyžaduje pro kladné výstupní napětí záporné inverzní napětí fotodiod – je použit standardní stabilizátor 79L05 na -5 V.

Pro zjištění příp. parazitních vlivů byl zapojen analogový multiplexer ADG508A (Analog Devices), byť zde do invertujícího vstupu OZ připojuje jedinou fotodiodu.

Malá deska je umístěna přímo na držáku fotodiody v plechovém krabici, aby byla stíněna proti rušení.



Řízení pulzního proudu LED

Spínač napájení je pouze jediný. Zdroj proudu se dvěma operačními zesilovači a tranzistorem MOSFET byl řízen 3 logickými signály, s volbou proudů 10 mA, 100 mA a 1,0 A.

Vzhledem k dominantní časové konstantě, tvořené vnitřním odporem OZ, ochranným odporem a kapacitou hradla MOSFET byl problém s kmitočtovou kompenzací, aby obvod

nekmital. MOSFET byl použit proto, že v případě bipolárního tranzistoru by snímacím rezistorem v emitoru tekla navíc proud báze.

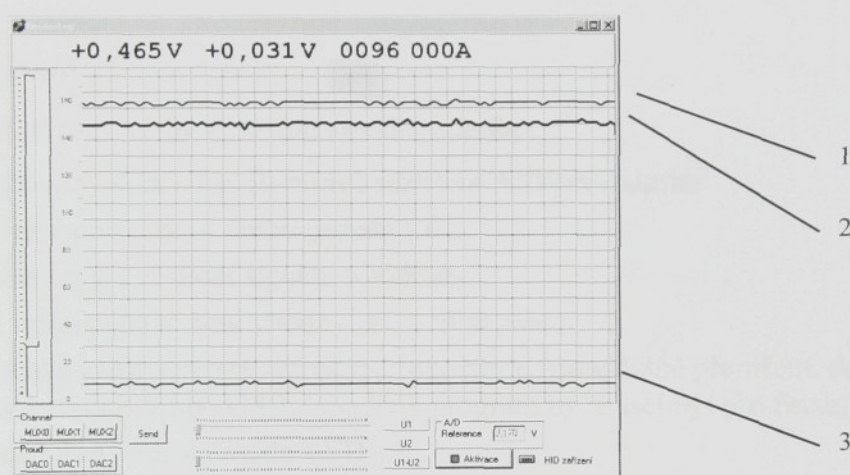
Přestože byl OZ opatřen desaturačním obvodem, zdroj proudu se v době vypnutí spínače napájení zcela otevřel, takže po sepnutí spínače tekly skrz LED nadměrné špičkové proudy po dobu až 10 μ s. Ukázalo se, že zdroj proudu musí být v době vypnutí spínače (obecně všech spínačů) blokován.

Obvod buzení LED i zesilovač byly oživeny a seřizeny připojeným pulzním generátorem a digitálním osciloskopem.

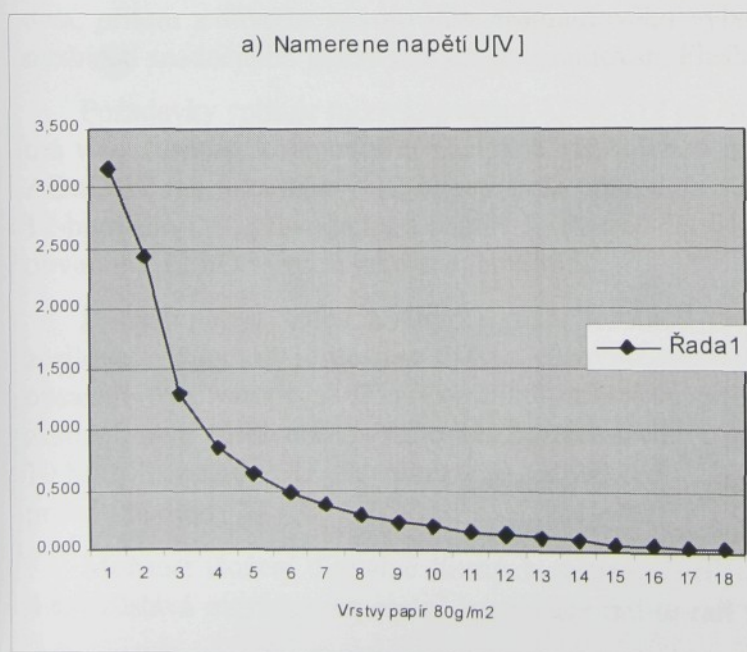
Měření

Měření byla limitována nedostatečným zatemněním místností během slunečných dnů.

Grafické reprezentace naměřených dat je zobrazena na obr. Čára (1) odpovídá hodnotám čtených z A/D převodníku při rozsvícené IR diodě. Spodní čára (3) reprezentuje měřená data při zhasnuté IR diodě. Z rozdílu, jak ukazuje (2), lze zjistit optickou hustotu měřeného materiálu D .



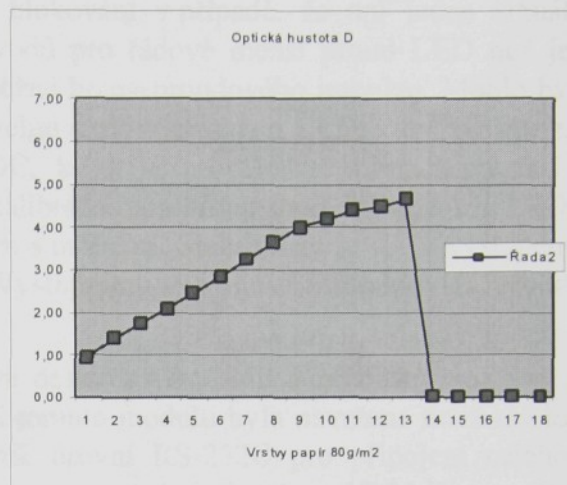
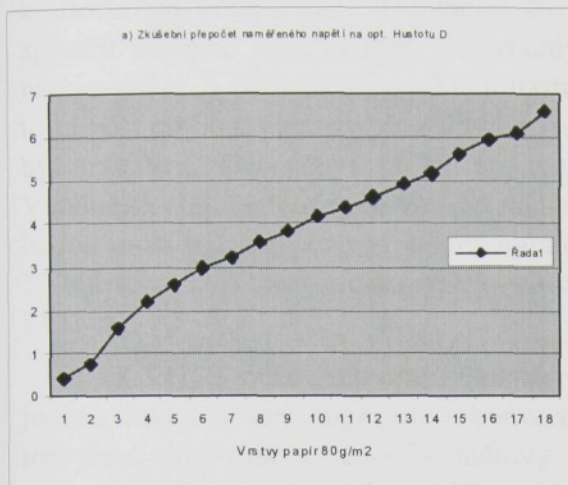
V tabulce jsou uvedeny výsledky měření s definovaným (na rozdíl od rouna) materiálem –



Vrstvy papír	$U[V]$	Optická hustota D	D přepočet
1	3,170	0,94	0,391841
2	2,429	1,41	0,750299
3	1,295	1,76	1,597088
4	0,849	2,11	2,16551
5	0,632	2,46	2,562901
6	0,470	2,83	2,961621
7	0,380	3,25	3,247795
8	0,300	3,63	3,566048
9	0,245	4,00	3,838709
10	0,192	4,20	4,166891
11	0,165	4,40	4,370924
12	0,135	4,50	4,64109
13	0,110	4,66	4,916807
14	0,090	0,00	5,186973
15	0,066	0,00	5,604538
16	0,050	0,00	5,978317
17	0,046	0,00	6,090575
18	0,032	0,00	6,579159

papírem.

Na následujících obrázcích je porovnána hodnota D , vypočítaná z měření, s hodnotou zjištěnou na denzitometru X-RITE model 301, který však měří jen do $D_{\max} = 4,50$.



Nové varianta

Následující důvody vedly k návrhu nového interface :

- nezanedbatelný šum a jen 10-bitové rozlišení A/D převodníku
- požadavek na plynulejší volbu proudu LED
- potřeba rezervy v zesílení signálu fotodiody
- použitý mikropočítač není vhodný pro finální řešení
- hardwareové i softwareové zdroje mikropočítače (pravidelné přerušení, délka kódu) značně vytíženy komunikací po USB, odladěný program by musel být pro finální řešení upravován
- nevhodně řešený zdroj proudu LED

Hledání vhodného typu A/D převodníku (12 bitů, ca 100 kS/s, 8 vstupů, *vestavěný PGA*) bylo neúspěšné. Pak se již nabízelo použít mikrořadič s vestavěným plnohodnotným A/D převodníkem, nejlépe též s D/A převodníkem a nezbytně s pamětí EEPROM pro kalibrační data, přitom z důvodu vývojového programového vybavení s jádrem rodiny 51 a s nějakou možností snadnějšího ladění než jen programování Flash paměti kódu.

Požadavky splňuje mikrokonvertor ADuC812 od Analog Devices s jádrem 8052, který již má v současnosti kompatibilní nástupce s rozšířenou pamětí a 6-násobnou rychlostí. Obvod ADuC812 má 8-kanálový 12-bitový A/D převodník s rychlostí konverze 200 kS/s, 2 kanály 12-bitového D/A převodníku a paměť EEPROM dat 640 B. Paměť kódu je 8 kB, dat 256 B a obvod má 32 I/O vývodů jako standard 8052.

Dvoustupňová volba zesílení signálu fotodiody je realizována tak, že signál z každého zesilovače fotodiody je zesílen dvěma různými zesilovači druhého stupně, jejichž výstupy obsazují dva vstupy A/D převodníku mikrokonvertoru. Volbou tohoto vstupu se zvolí zesílení, nyní nastaveno 2× nebo 8×. Zpětnovazební odpor zesilovače fotodiody byl snížen na 10 MΩ. Rozsah A/D převodníku (0...4095) tedy odpovídá pro citlivější rozsah zesilovače proud fotodiody 31 nA.

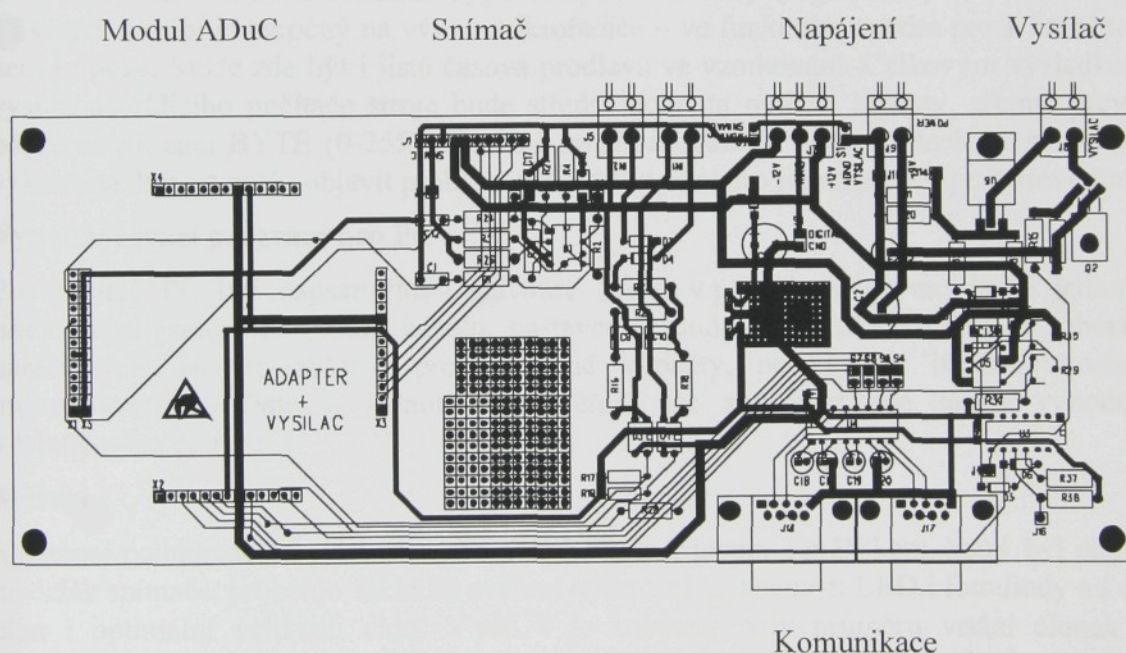
Možnost vložení digitálně řízených zesilovačů (PGA; bohužel v tomto uspořádání nutné 4 ks) zůstává otevřená. Operační zesilovače rail-to-rail s napájením 5 V jsou na tomto místě

nutné také jako ochrana vstupů mikrokonvertoru před maximálním výstupním napětím zesilovače fotodiod, který je napájen ± 12 V.

Stabilizátor proudu LED je jednodušší, s neinvertujícím zapojením OZ, což usnadňuje kmitočtovou kompenzaci. Doplněno bylo jeho blokování v případě, že ani jeden signál spínačů napájení není aktivní. Z neznámých důvodů pro řádově menší proud LED než je maximální 1 A dochází ke zpoždění nástupu náběžné hrany proudového impulsu. Mohlo by to přinést problémy pouze při kalibraci snímačů velmi malým proudem LED, který by musel být nastaven, aby nebyl překročen rozsah ADC, když je prostor ve snímači prázdný. Vhodnější však bude zřejmě vkládat do snímače kalibrační polopropustnou desku, takže LED budou moci být napájeny proudem souměřitelným s měřicím. Stabilizátor je řízen výstupem 12-bitového D/A převodníku mikrokonvertoru. Výstupnímu rozsahu 2,5 V odpovídá proud LED ca 1 A.

Z VUTS byla poskytnuta jednak vývojová deska s ADuC812 a příslušný software, jednak modul se samotným mikrokonvertorem. K tomuto modulu byla navržena nová *deska interface*, doplněná ještě o 2-kanálový převodník úrovní RS-232C pro připojení celého zařízení k PC a 2 galvanicky oddělené logické vstupy s rozsahem log.1 ca 12-24 V pro příp. připojení synchronizace pohonu souřadnicového stolu (viz závěr).

Deska plošných spojů pro 1-kanálovou variantu je na obr.



Prostředky pro vývoj SW desky optosenzoru

Pro tvorbu programů v jazyce C a v assembleru a překlad do formátu INTEL-HEX vhodného pro přenos do mikrokonvertoru ADuC812 je využíváno standardní integrované vývojové prostředí uVision 2 (Keil).

Pro počáteční ladění některých sekvencí bez aplikační desky byl použit simulátor ADSim. Pro vlastní ladění aplikačního programu byl ověřen ladící prostředek ADuC Debugger ve spojení s vývojovou deskou (modulem) EVAL-ADuC812QS. V počáteční fázi ladění je

nezbytné pro ladící účely vyhradit vestavěný sériový kanál mikrokonvertoru ADuC812, proto pro vyvíjenou aplikaci je vytvořen sériový kanál pro přenos informací z aplikace programově. V pokročilém stádiu ladění nebude debugger nezbytný, vestavěný sériový kanál bude plně k dispozici aplikačním informacím. Program bude do programové paměti mikrokonvertoru ADuC812 přenesen pomocí WDS (Windows Serial Downloader), jehož funkčnost byla ověřena jednoduchou aplikací.

Aplikační program desky optosenzoru

Navržený aplikační program obsahuje algoritmy pro přepínání a řízení pulsů (pulsy jsou generovány po 1 ms s délkou 100 μ s, jeden puls je společný pro 8 sekcí, tj. perioda jednoho pulsu jsou 4 ms, viz výše), přepínání a snímání měřicích míst (čtyři osmivstupové analogové multiplexory jsou připojeny na čtyři AD kanály mikrokonvertoru ADuC812), vyhodnocení naměřených údajů a ovládání sériového kanálu pro přenos vyhodnocených dat. Z PC jsou po sériovém kanálu nastavovány vybrané parametry (proud LED, zesílení, příp. perioda vzorkování).

Předpokládá se řízení proudu LED i zesílení signálu fotodiod (zatím jen ve 2 stupních) společně pro všechny kanály, přesto je nutno řešit limitaci hodnot optické hustoty v obou mezích (může k ní dojít na jednom nebo několika kanálech). Odečet signálu pozadí (okolního osvětlení), individuální kalibrace kanálu i celková kalibrace citlivosti podle signálu 32. kanálu se budou provádět jako celočíselné výpočty v rozsahu WORD (16 b) – výsledky násobení LONG WORD (32 b) se oříznou. Výpočet optické hustoty (logaritmus) ve formátu FLOAT v každém kanálu je náročný na výkon mikrořadiče – ve funkčním vzorku pro 1 kanál to však není kritické. Může zde být i jistá časová prodleva ve vzorkování. Celkovým výsledkem pro výstup do řídicího počítače stroje bude střední hodnota optické hustoty, zřejmě převedená pouze do rozsahu BYTE (0-255), nicméně možnost přenosu hodnot všech 31 snímačů není vyloučena, byť se může objevit problém nedostatku času pro jejich přenos po sériové lince.

Vyhodnocovací program pro PC

Pro počítač PC byl napsán řídicí software (okno v příl. 1), který umožňuje jednoduché nastavování parametrů (volba kanálu, nastavení proudu do vysílací diody) a zobrazování naměřených dat, zpočátku i pro příslušné výpočty, než budou implementovány do mikrokonvertoru. Data z jednotlivých měření lze zapisovat pro jejich vyhodnocení v tabulkovém editoru.

Měření

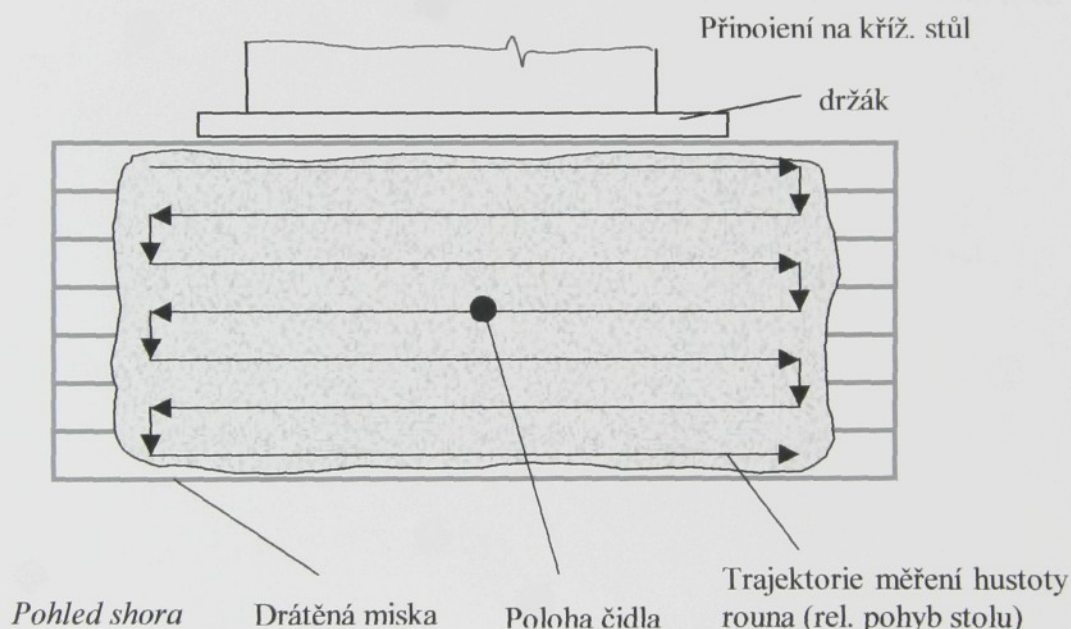
S pomocí polohovacího mechanismu s pohybovým šroubem a měřítkem, který byl připevněn na držák snímače, proběhlo základní ověření optimální vzdálenosti LED i fotodiody od roviny clon i optimální velikosti clon. V příl. 4 je zobrazen vliv průměru vrtání clonek a na následujících listech i vlivu okolního osvětlení. Jako optimální vychází clonka s průměrem vrtání 3,2 mm na přijímací straně, kde je ještě relativně velký odstup signálu od pozadí, a minimalizovaný vliv polohy měřeného objektu mezi přijímací a vysílací diodou. Dle těchto poznatků byla vyrobena upravená přijímací část čidla rouna (příl. 3 – obr.2). Nutno upozornit, že měření proběhlo na listu papíru (reprodukovatelnost), který se chová jako matnice, tedy jinak než rouno.

VÚTS připravil upevnění přípravku snímače na stojan souřadnicového křížového stolu PPJ-1 (VUKOV Prešov, r.v. 1985). Pracovní rozsah translačních jednotek obou os je 300 mm s minimální velikostí kroku 0,1 mm. Řídicí systém stolu umožňuje podle programu uloženého v zálohované paměti vykonávat pohyby jednotlivých posuvných jednotek v dané časové posloupnosti. Dále je schopen současného ovládání uživatelských výstupů a sledování

jednotky. Při automatickém způsobu řízení stroje jsou možné tyto režimy: programování, inicializace, indexování, krokování. Poslední dva režimy pak dále je možné zařadit i v cyklu – tedy do konečné posloupnosti dílčích kroků. Těchto kroků pro jednotlivé osy může být max. 3000. Při inicializaci lze provést prvotní navedení do předem nastavené tzv. základní polohy. Pro případné rozšíření systému je možné využít 12 vstupních a 12 výstupních bitů. Dále je možné ze stroje použít rozšířené výstupy, pomocí nichž je možné zjistit stav systému a provést synchronizaci s jiným zařízením, např. dalším automatem.

Na mechanický stůl je připevněn držák s drátěnou miskou, na kterou lze umístit vzorek materiálu rouna pro měření optické hustoty. Model snímače rouna je pevně spojen s podstavou křížového stolu (příl. 3 – obr. 3). Bude tak moci být ověřena reprodukovatelnost údajů, neboť vzorek materiálu při posuvu nebude deformován, takže se jeho vlastnosti nebudou měnit. K tomu dochází při průtahu přes odtahovací válce na mykacím stroji, kde již opakovaně tento vzorek použít nelze.

Pro toto měření je řídicí systém používán v režimu automatického krokování. Naprogramovaná trajektorie relativního pohybu drátěné misky s rounem je znázorněna na následujícím obrázku. Rouno je opakovaně proměřováno a hodnoty zapisovány prostřednictvím vytvořeného řídicího softwaru na počítači PC k dalšímu zpracování.



Výhled dalšího postupu

Bude dokončena optimalizace uspořádání optické cesty mezi LED a fotodiodou jak z hlediska minimalizace vlivu okolního osvětlení, tak z hlediska dostatečného signálu. Ačkoliv se rouno bude na stroji pohybovat v kontaktu s jednou vnitřní plochou snímače, zkoumá se i vliv jeho polohy mezi oběma vnitřními plochami. Další měření ukáží vliv přiměřeného stlačení rouna, vyvolaného přitlačnou skleněnou deskou, stavitelnou alespoň stupňovitě nade dnem misky.

O použitelnosti metody zřejmě nepůjde rozhodnout pouze na základě výsledků získaných na funkčním vzorku. V r. 2004 se předpokládá návrh mechanického řešení umístění 31 párů snímačů na celou šířku stroje a 1 kalibračního páru pro kompenzaci vlivu teploty a stárnutí optoelektronických součástek. Kritériem použitelnosti bude porovnání textilně technolo-

O použitelnosti metody zřejmě nepůjde rozhodnout pouze na základě výsledků získaných na funkčním vzorku. V r. 2004 se předpokládá návrh mechanického řešení umístění 31 párů snímačů na celou šířku stroje a 1 kalibračního páru pro kompenzaci vlivu teploty a stárnutí optoelektronických součástek. Kritériem použitelnosti bude porovnání textilně technologických parametrů pramene bez a se zpětnovazební regulací plošné hustoty rouna, řízené vyvíjeným snímačem.

U tohoto prototypu, jenž je blokově zobrazen v příloze č. 5, se předpokládá montáž desek s fotodiodami a desek s LED do příčných kanálů na stroji. Konkrétní mechanické řešení bude záviset na zjištěných vzdálenostech mezi prvky a clonou. Clony by měly být chráněny sklem stejně jako u funkčního vzorku, z důvodu zamezení zaprášení snímačů a tedy negativního vlivu na kvalitu měření, a celý systém by měl být co nejlépe chráněn před dopadem okolního světla.

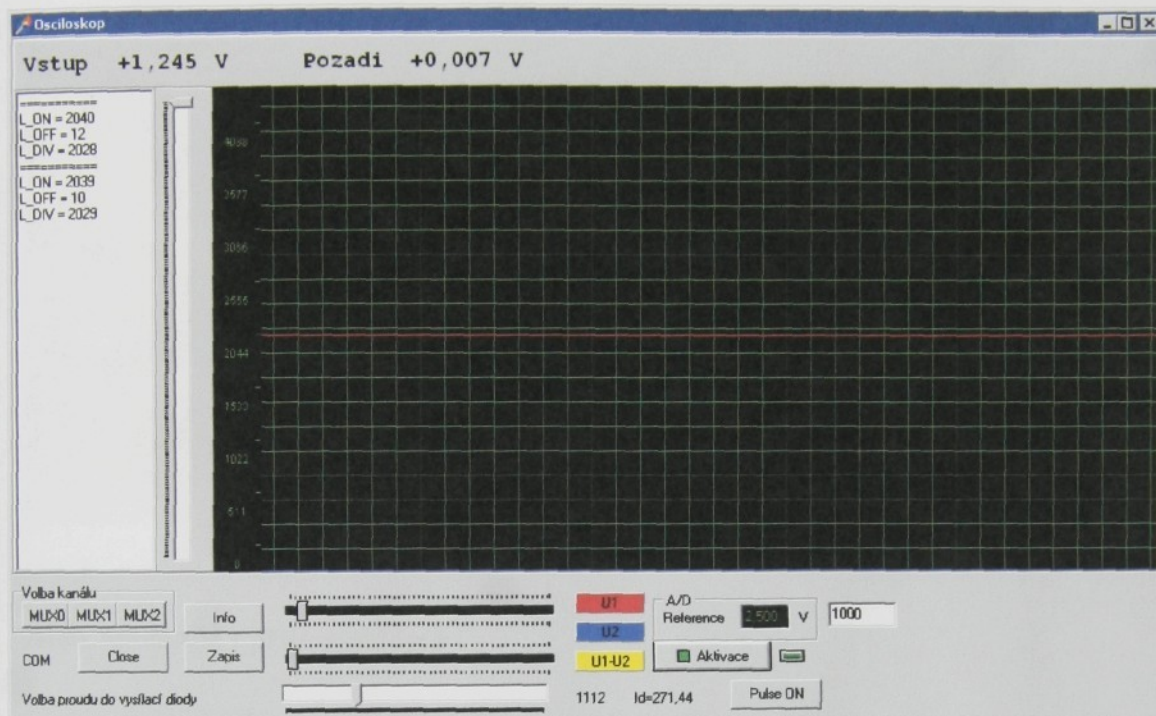
Desky, osazené vždy 8 kusy prvků (v případě snímače včetně multiplexeru a operačního zesilovače), budou spojeny konektory. Ostatní elektronika může být umístěna v oddělené skříňce. S daným mikrokonvertorem zřejmě nebude dosažena požadovaná vzorkovací vzdálenost na pohybujícím se rounu, to však nemusí být pro ověření na závadu. Finálně lze přejít na kompatibilní, 6x rychlejší typ.

Adekvátně bude rozšířen program mikrokontroléru i upraven vyhodnocovací program na PC.

Seznam příloh

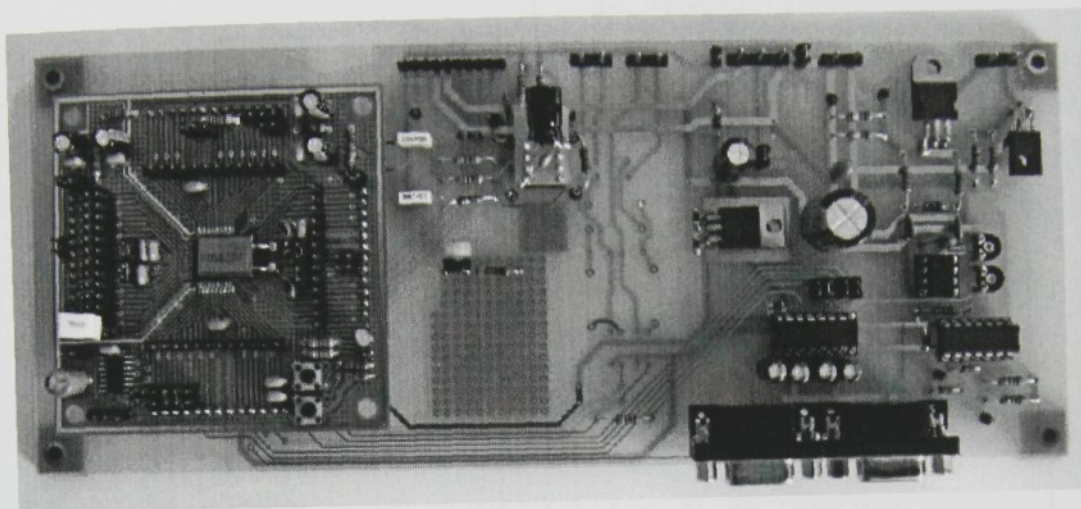
- Příloha 1** **Aplikace na PC pro řízení elektroniky čidla**
- Příloha 2** **Elektronika adaptéru a vysílače a přijímací části**
Obr.1 Osazená deska plošného spoje adaptéru
Obr.2 Blok snímače
- Příloha 3** **Zkušební model pro praktické zkoušky**
Obr.1 Zkušební model
Obr.2 Nové provedení měřicí sondy
Obr.3 Fotografie zkušebního modelu
- Příloha 4** **Základní měření clonek**
Měření vlivu polohy objektu
Měření vlivu clonek a okolního osvětlení
- Příloha 5** **Blokové schéma elektroniky optického snímání plošné hustoty rouna**

Aplikace na PC pro řízení elektroniky čidla



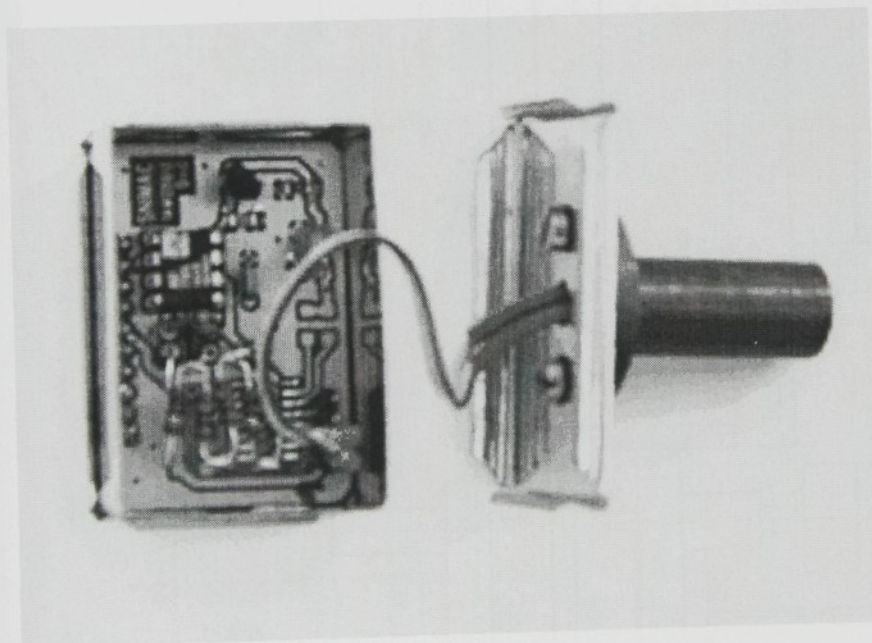
Obr. 1

Elektronika adaptéru a vysílače

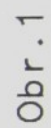


Obr. 1

Blok snímače (přijímací část)

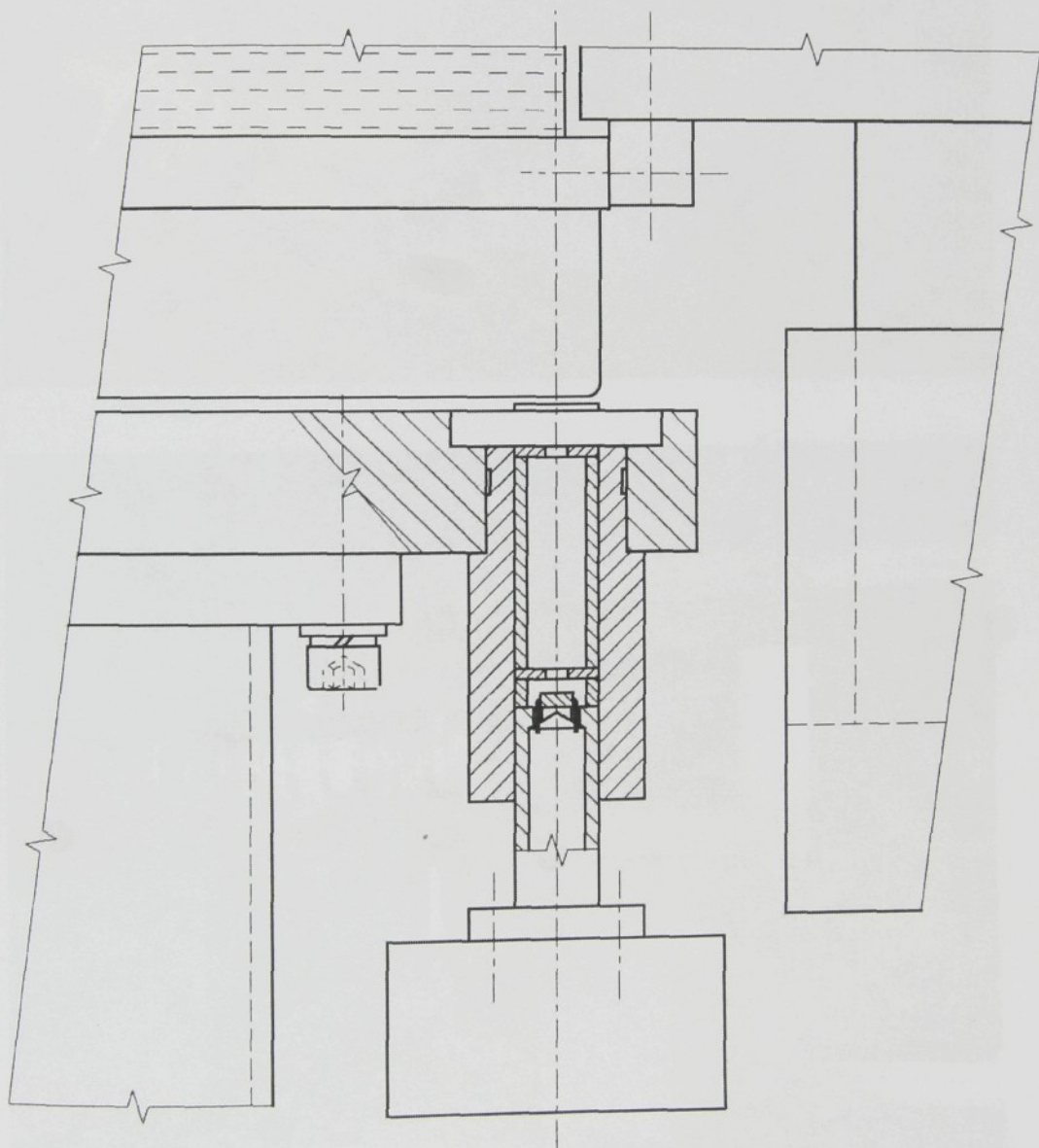


Obr. 2



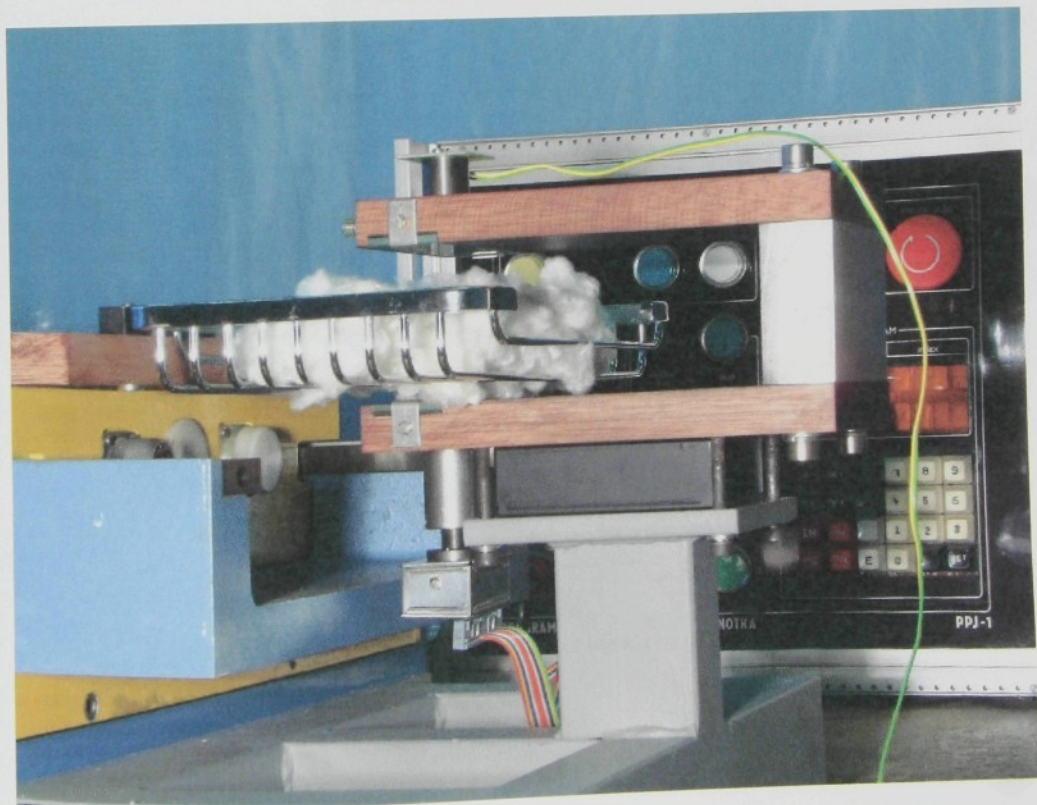
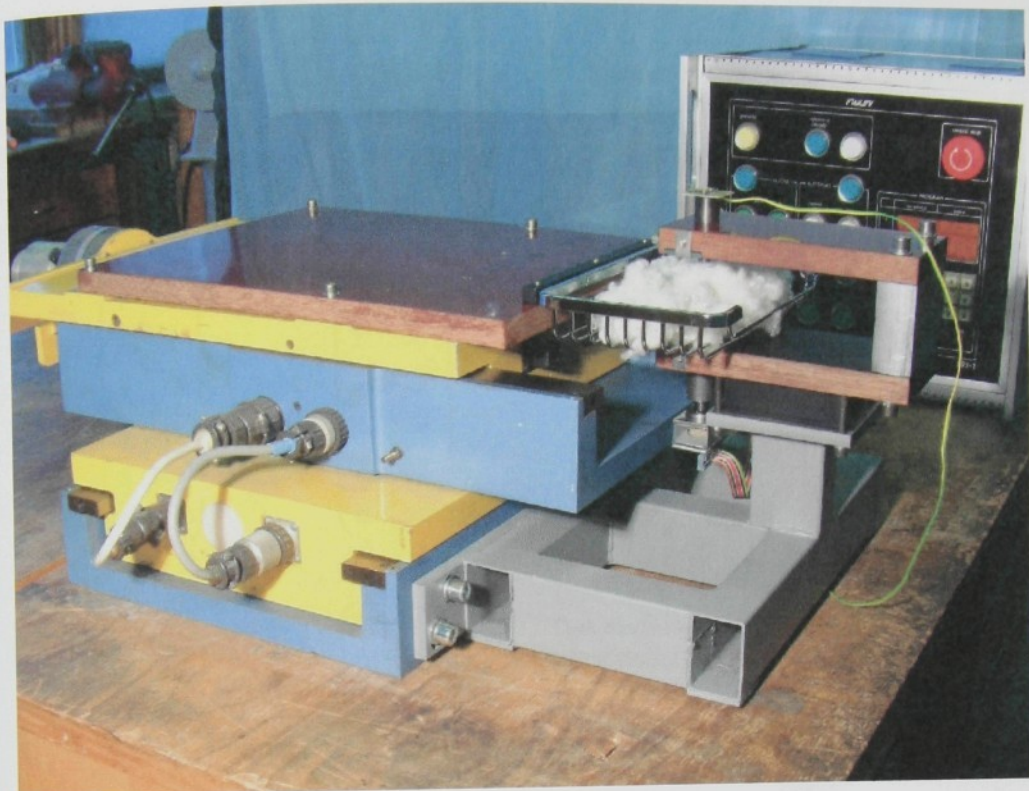
Ob r. 1

SONDA
NOVÉ PROVEDENÍ



Obr. 2

Zkušební model optického snímače hmotnosti rovna



Obr.3

Základní měření clonek

Datum měření 28.10.2003

průměr
clonky

Clona 1
0,5mm

Clona 2
0,8 mm

Clona 3
1,0 mm

Clona 4
1,5mm

$I_{d1} := 433.38\text{mA}$

$I_{d2} := 204.8\text{mA}$

$I_{d3} := 92.03\text{mA}$

$I_{d4} := 66.64\text{mA}$

$$\text{Tab1} = \begin{pmatrix} 0 & 63 \\ 1 & 76 \\ 2 & 98 \\ 3 & 132 \\ 4 & 205 \\ 5 & 348 \\ 6 & 580 \end{pmatrix}$$

$$\text{Tab2} = \begin{pmatrix} 0 & 188 \\ 1 & 232 \\ 2 & 308 \\ 3 & 426 \\ 4 & 619 \\ 5 & 887 \\ 6 & 1129 \end{pmatrix}$$

$$\text{Tab3} = \begin{pmatrix} 0 & 188 \\ 1 & 224 \\ 2 & 294 \\ 3 & 406 \\ 4 & 598 \\ 5 & 816 \\ 6 & 949 \end{pmatrix}$$

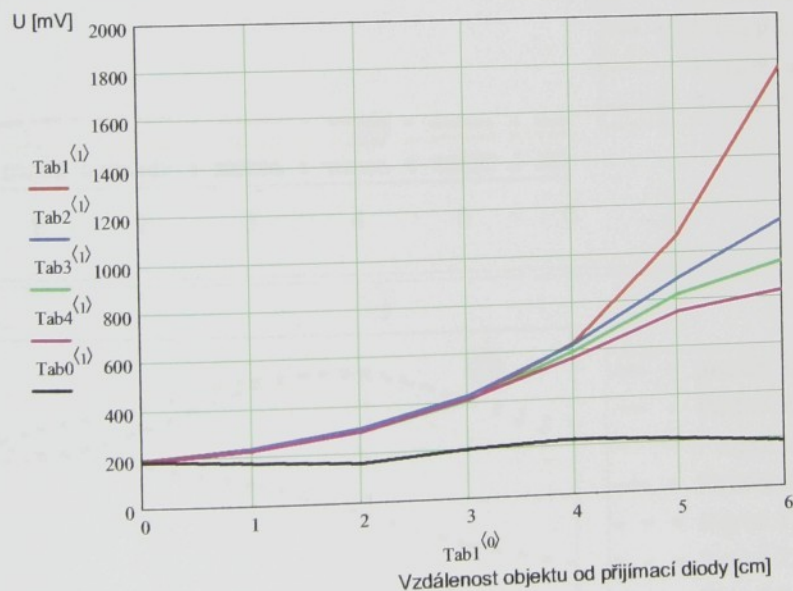
$$\text{Tab4} = \begin{pmatrix} 0 & 188 \\ 1 & 226 \\ 2 & 295 \\ 3 & 408 \\ 4 & 571 \\ 5 & 749 \\ 6 & 827 \end{pmatrix}$$

Bez clony

$I_{d1} := 66.64\text{mA}$

$$\text{Tab0} = \begin{pmatrix} 0 & 2875 \\ 1 & 2663 \\ 2 & 2501 \\ 3 & 3061 \\ 4 & 3451 \\ 5 & 3305 \\ 6 & 2854 \end{pmatrix}$$

Dekadické hodnoty z 12bit. ADC
převodníku

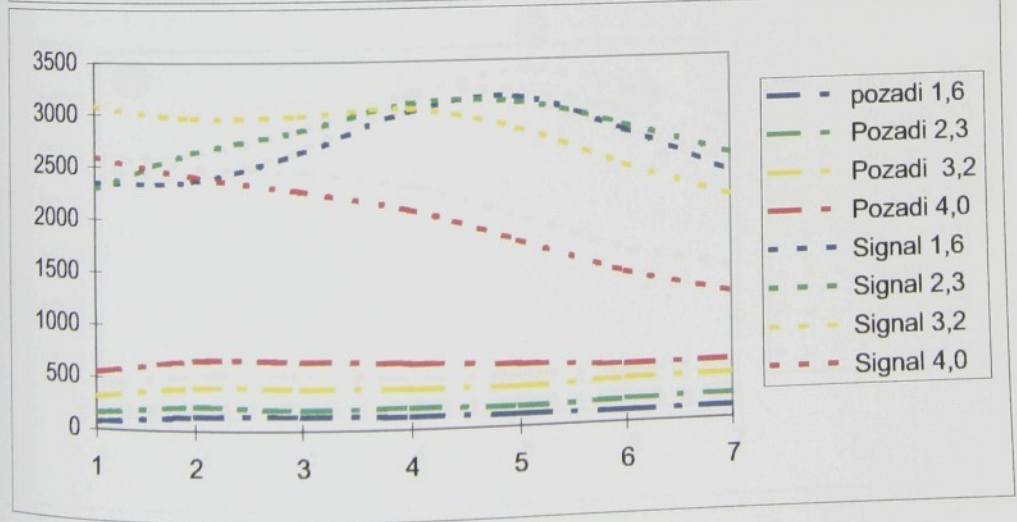
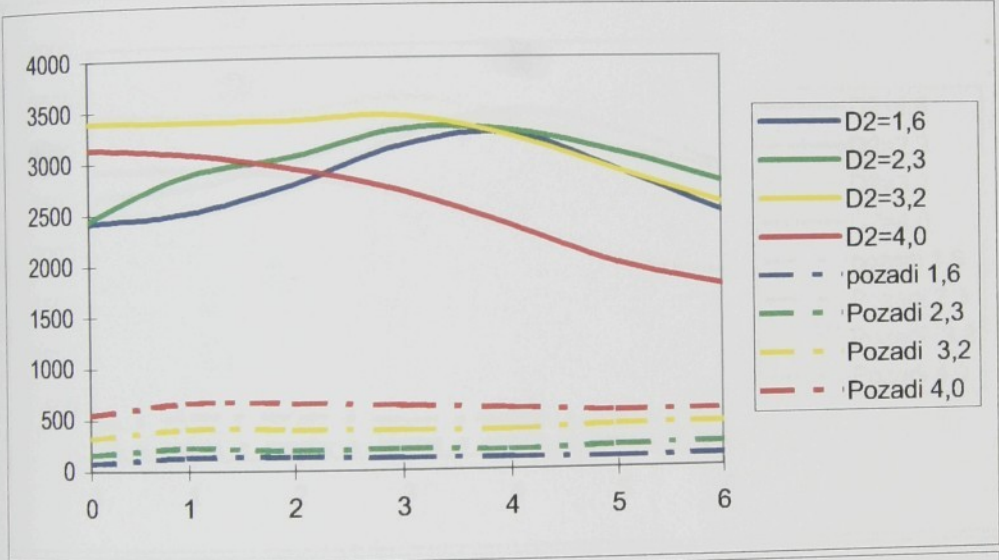


Obr. 1

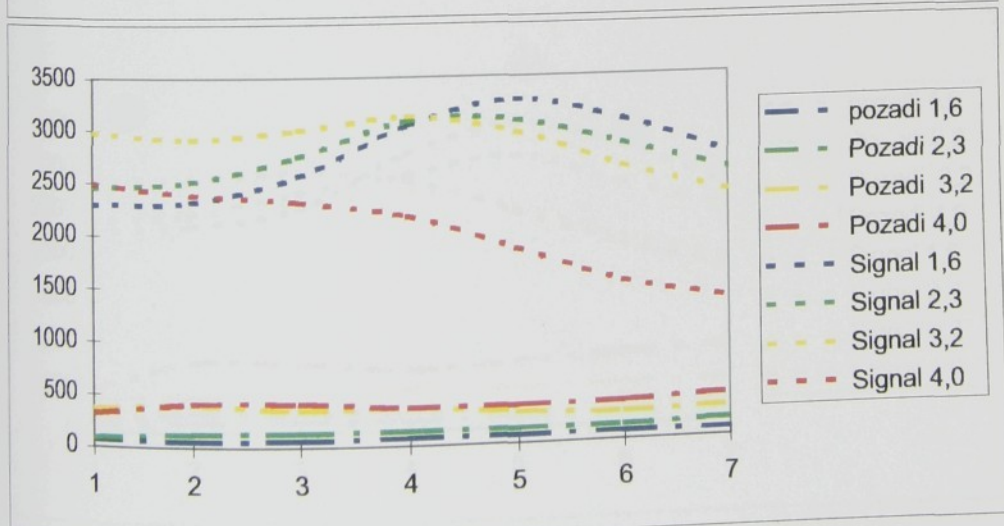
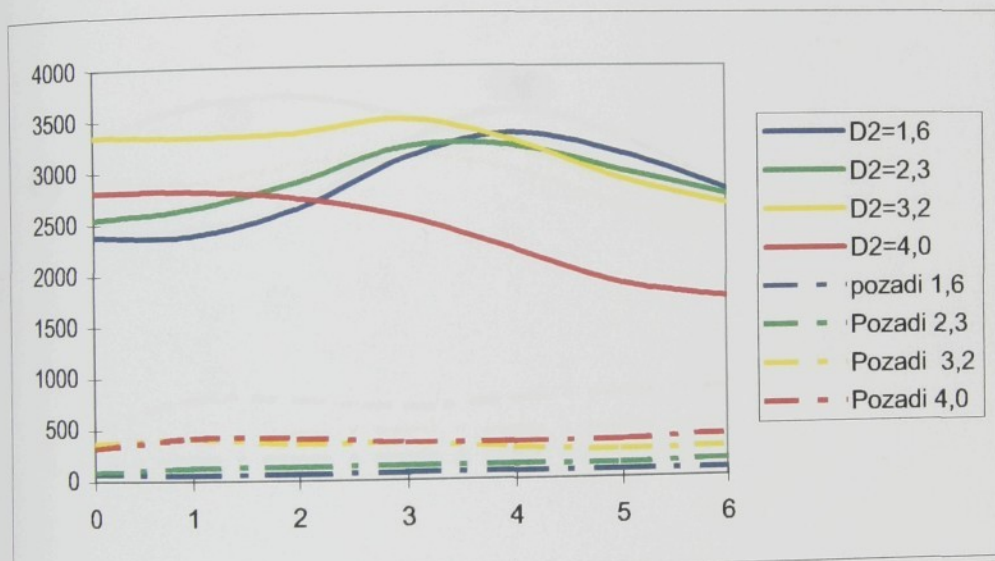
Clonka vysílač D1[mm]

1,6

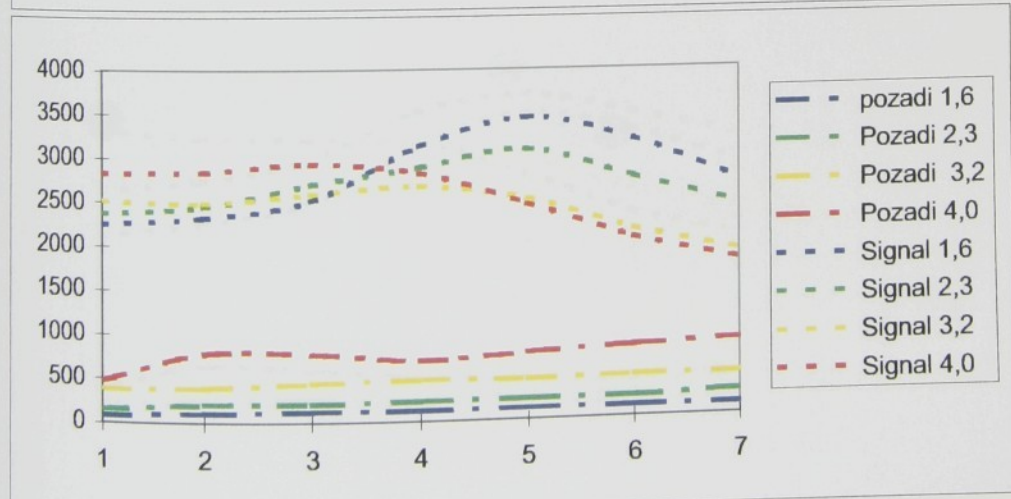
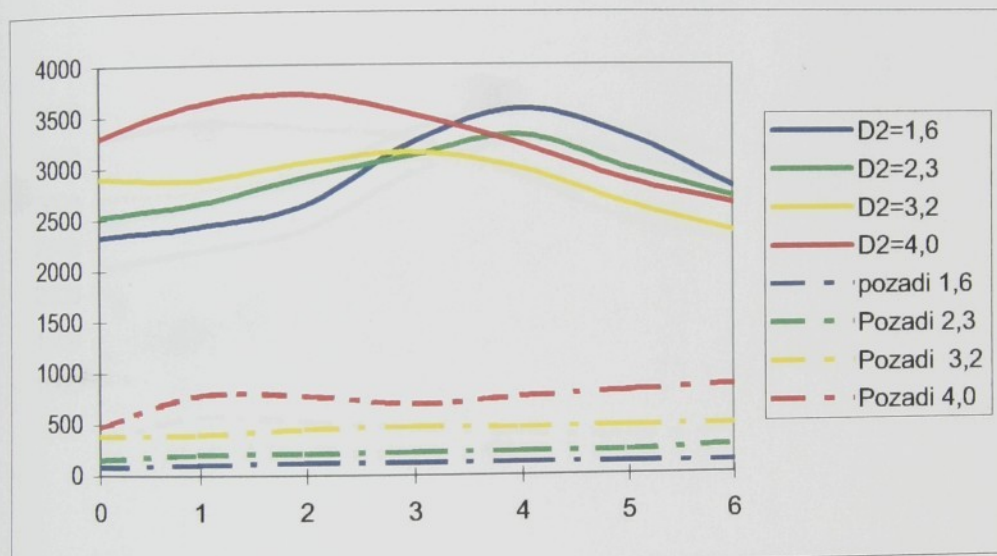
Clonka přijímač D2 [mm]	Poloha objektu (vzdálenost od přijímací diody) L[cm]						
	0	1	2	3	4	5	6
1,6	2415	2501	2769	3142	3260	2905	2482
	73	134	136	121	115	105	117
	2342	2367	2633	3021	3145	2800	2365
2,3	2442	2868	3043	3302	3287	3073	2776
	157	228	198	205	188	219	233
	2285	2640	2845	3097	3099	2854	2543
3,2	3399	3386	3397	3439	3236	2897	2568
	317	412	404	390	386	423	430
	3082	2974	2993	3049	2850	2474	2138
4	3142	3075	2931	2711	2366	1992	1764
	545	663	657	628	594	555	559
	2597	2412	2274	2083	1772	1437	1205



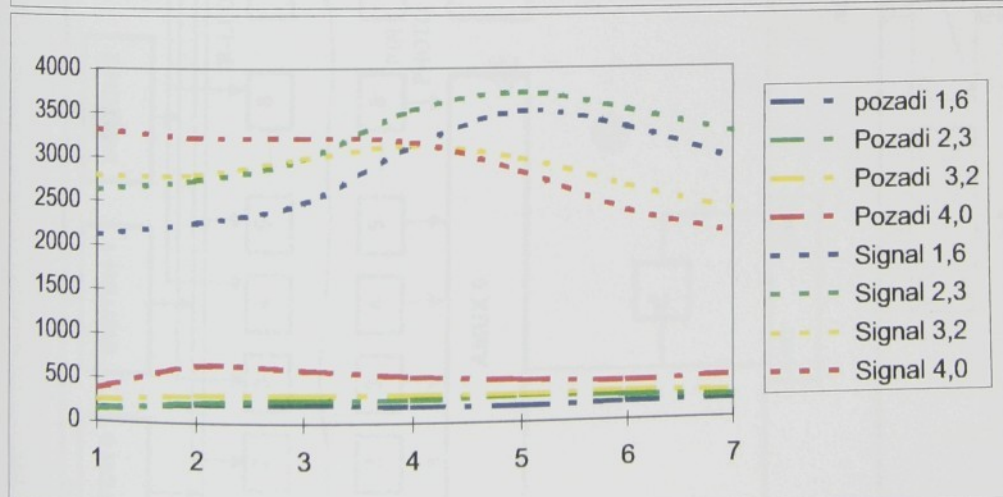
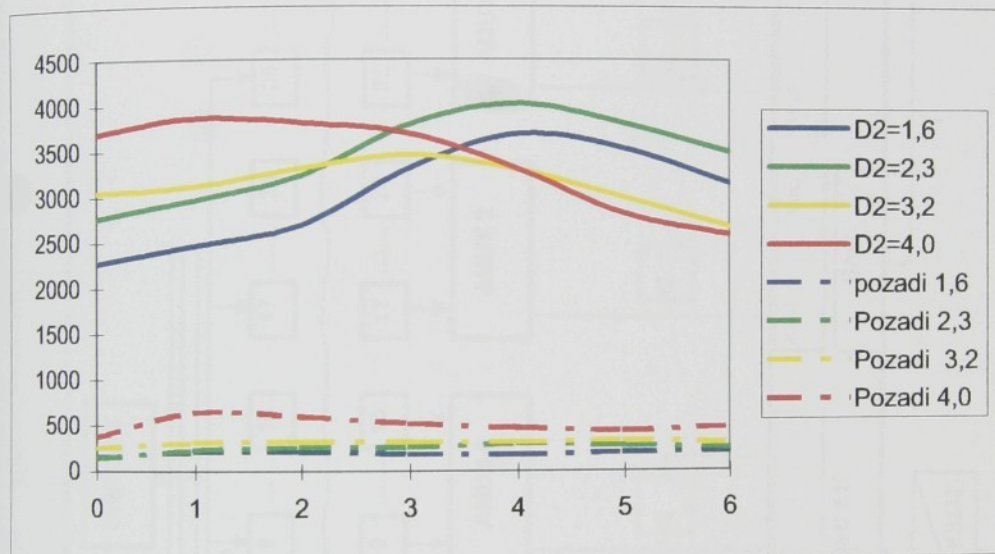
Clonka přijímač D2 [mm]	Poloha objektu (vzdálenost od přijímací diody) L[cm]						
	0	1	2	3	4	5	6
1,6	2373	2376	2628	3112	3347	3151	2796
	77	55	65	75	75	78	74
	2296	2321	2563	3037	3272	3073	2722
2,3	2542	2638	2882	3220	3225	2982	2740
	87	125	134	137	143	140	170
	2455	2513	2748	3083	3082	2842	2570
3,2	3351	3329	3361	3489	3277	2901	2652
	368	407	355	365	307	274	296
	2983	2922	3006	3124	2970	2627	2356
4	2810	2805	2733	2542	2220	1889	1743
	315	413	411	364	363	369	414
	2495	2392	2322	2178	1857	1520	1329

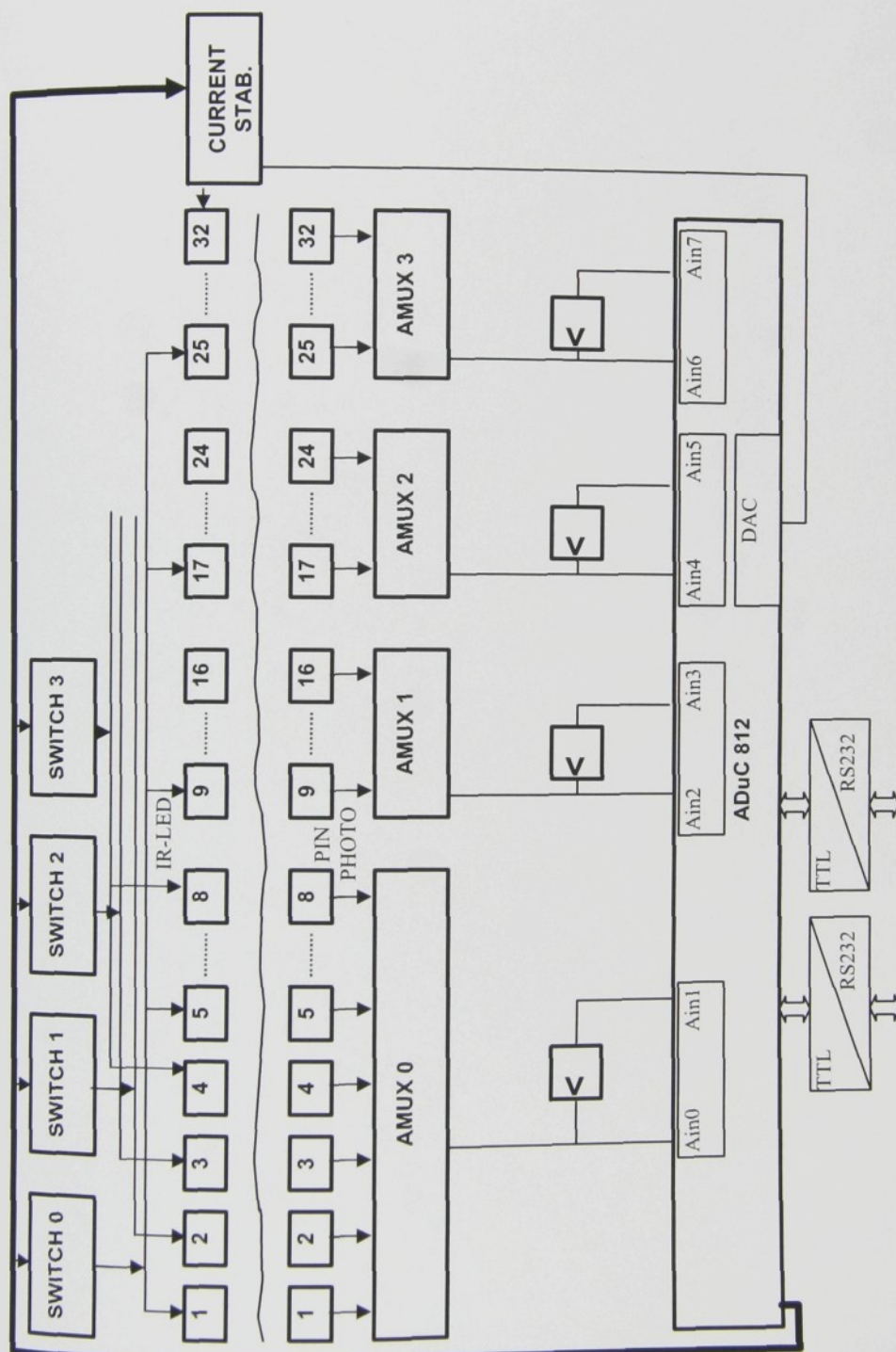


Clonka přijímač D2 [mm]	Poloha objektu (vzdálenost od přijímací diody) L[cm]						
	0	1	2	3	4	5	6
1,6	2327	2424	2635	3243	3567	3303	2809
	81	105	121	120	124	119	117
	2246	2319	2514	3123	3443	3184	2692
2,3	2523	2649	2903	3112	3315	2988	2700
	152	203	208	225	229	234	277
	2371	2446	2695	2887	3086	2754	2423
3,2	2900	2881	3041	3147	2987	2636	2369
	383	397	450	473	463	476	482
	2517	2484	2591	2674	2524	2160	1887
4	3296	3620	3710	3514	3223	2871	2641
	471	779	775	690	762	815	865
	2825	2841	2935	2824	2461	2056	1776



Clonka přijímač D2 [mm]	Poloha objektu (vzdálenost od přijímací diody) L[cm]						
	0	1	2	3	4	5	6
1,6	2267	2463	2691	3308	3686	3525	3149
	154	209	210	187	179	202	211
	2113	2254	2481	3121	3507	3323	2938
2,3	2764	2962	3231	3790	4017	3798	3491
	140	228	259	263	297	276	246
	2624	2734	2972	3527	3720	3522	3245
3,2	3039	3113	3307	3453	3295	2994	2672
	254	314	322	322	313	335	304
	2785	2799	2985	3131	2982	2659	2368
4	3690	3860	3810	3688	3304	2815	2583
	374	644	599	522	473	440	482
	3316	3216	3211	3166	2831	2375	2101





Blokové schéma elektroniky optického snímání plošné hustoty rouna