

PROBLÉMY MERANIA MECHANICKÝCH VELIČÍN
NA POHYBUJÚCICH SA STROJOCH

•

Matěj Bílý - Ústav mechaniky strojov SAV
Bratislava

Jozef Dušička - Vývojový závod TEES

Vladimír Tydlačka Martin

Resume

V príspevku sa komplexne rozoberá problematika merania, záznamu a vyhodnotenia mechanických veličín /prevedených na elektrické signály/ - charakteristík pohybujúcej sa konštrukcie. Ukazujú sa etapy technického a organizačného zabezpečenia merania a opisujú sa technické prostriedky pre prenos a záznam informácií. Podrobnejšie sa analyzujú varianty meracích reťazcov, najmä s ohľadom na použitie frekvenčne modulovaného /FM/ záznamu alebo záznamu metódou pulzne kódovej modulácie /PCM/. Z argumentácie vyplýva, že PCM záznam má značné výhody v porovnaní s FM záznamom.

Zaznamenané signály sa spracúvajú buď na základe vzťahov korelačnej teórie, alebo metódami diskretizácie procesu pomocou charakteristických parametrov. Výsledky možno využiť jednak pre posúdenie dynamických vlastností meranej konštrukcie, a jednak pre odhad únavovej životnosti.

1. Úvod

Ak zameriame záujem na výskum činnosti mechanických sústav, môžeme konštatovať, že jeho všeobecným účelom bude najmä:

- a/ získať informácie o stavoch vonkajších častí, obsahujúcich body alebo plochy styku s pôsobiacim zaťažením, a to ako vo frekvenčnej, tak aj časovej a priestorovej oblasti,
- b/ určiť podmienky prenosu vibračnej energie na časti vnútorné, resp. časti pripojené a priamo nezatažované.

Prakticky môžeme konkretizovať celý rad úloh v tejto oblasti; menujme z nich aspoň dve :

- charakterizovanie činnosti objektu za určitých, pevne určených podmienok, napr. pre charakterizovanie funkcie určitých zariadení /napr. u automobilu kmitanie riadenia pri jazde v zákrute, u žeriavu zdvihanie bremena za určitých podmienok, proces rezania zeminu u buldozéra a pod./,
- charakterizovanie činnosti objektu alebo jeho častí v súhrne jeho prevádzkových podmienok s cieľom získať napr. podklady pre určenie odhadu ukazovateľov spoľahlivosti objektu alebo jeho častí v prevádzke.

Je známe, že najjednoduchšie a najpohodlnejšie sa merajú a registrujú elektrické veličiny, prúd a napätie. Keďže však nie všetky fyzikálne javy, ktoré nás zaujímajú, majú charakter veličín elektrických, prvým problémom je transformácia elektrickej veličiny na veličinu elektrickú.

Technicky veľmi náročným problémom je meranie na pohybovacích sa objektoch, najmä takých, ktoré sa buď pohybujú v ťažkých terénnych podmienkach /pozri napr.[1]/, alebo v ktorých nie je dostatok priestoru na umiestnenie potrebných aparátúr /napr. malé lietadlá/.

Z hľadiska ďalšieho spracovania nameraných signálov, ktoré je prakticky možné len s použitím výpočtovej techniky /analogový alebo číslicový počítač, resp. hybrid/, je žiaduca vhodná forma záznamu. Súčasný stav je charakteristický dominujúcim postavením paralelného /viackanálového/ analogového záznamu, ktorý je vhodný priame analogové spracovanie; pre spracovanie na číslicovom počítači však musí byť taký záznam digitalizovaný. Perspektívny je priamy sériový digi-

tálny /jedno alebo viackanálový/ záznam na magnetickú pásku, konvertibilnú s magnetickou páskou samočinného počítača.

V ods. 2.0 venujeme stručne pozornosť niektorým organizačným problémom a v ods. 4.0 sa hovorí o vyhodnocovaní nameraných signálov. Najväčšia pozornosť je sústredená na ods. 3.0, v ktorom sa podrobnejšie diskutujú najmä otázky prenosu a záznamu informácií.

Spojité náhodný proces je možné spracovať buď na analógovom alebo na číslicovom počítači. Hoci má spracovanie na analógovom počítači svoje výhody, dávame prednosť spracovaniu na číslicovom počítači. Súčasný rozvoj digitálnej záznamovej a výpočtovej techniky je /zdá sa/ skôr a komplexnejšie schopný uspokojiť narastajúce požiadavky na meranie a vyhodnotenie náhodných procesov.

Hranica medzi etapou merania /záznam informácií/ a etapou spracovania výsledkov nie je vždy dostatočne presná. V prípade použitia analógového záznamu končí meranie vznikom analógovej pásky a spracovanie začína jej digitalizáciou. V prípade pulzne modulovaného záznamu /PCM/ môže však priamo pri meraní vzniknúť magnetická pásky, kompatibilná so samočinným počítačom.

2. TECHNICKÉ A ORGANIZAČNÉ ZABEZPEČENIE MERANIA NA POHYBUJÚCOM SA STROJI

Meranie fyzikálnych veličín na pohybujúcich sa strojoch je sprevádzané celým radom charakteristických okolností, ako sú napr. náročné pracovné podmienky meracích a prípadne aj záznamových prostriedkov, menšie priestorové možnosti pre zariadenie a obsluhu, závislosť od pohyblivých /prenosných/ energetických zdrojov, odlúčenosť od laboratórneho pracoviska, časová ohraničenosť merania, závislosť od poveternostných podmienok a iné. Okrem voľby technických prostriedkov treba venovať značnú pozornosť aj celému radu organizačných problémov.

Pri súčasnej špecializácii pracovísk a pracovníkov sa pri meraniach musia uplatniť vzťahy charakteristické pre tímovú prácu. Vedúcim merania - pracovného tímu býva spravidla pracovník zodpovedný za úlohu ako celok, t.j. za jej formu-

láciu, za teoretickú aj experimentálnu etapu jej riešenia, vyhodnotenie experimentu a konečnú interpretáciu výsledkov.

Časový sled a obsah činností má niekoľko etáp:

- etapa prípravná, čo je súbor činností súvisiacich so zásadnými metodickými rozhodnutiami a ich zabezpečením. Sem patria napr. výber a príprava objektu pre meranie, výber, popis a príprava podmienok merania, príprava programu, voľba meracích metód, výber prostriedkov pre stavbu meracieho reťazca, jeho preverenie a ciachovanie, vyhodnotenie možných chýb a príprava energetických zdrojov.
- etapa merania, ktorá je súborom činností bezprostredne zameraných na získanie záznamu časovej závislosti sledovaných fyzikálnych veličín a sprievodných informácií umožňujúcich popis, vyhodnotenie a spracovanie výsledkov podľa vopred vypracovaného programu.
- etapa kontrolná, je zameraná na získanie a odstránenie neočakávaných, zjavne chybných priebehov, ktoré by v ďalšom narušili spracovanie výsledkov. Ak by sa ukázalo, že rozsah chýb je taký veľký, že splnenie určeného zámeru je vážne ohrozené, je treba pristúpiť k opakovaniu merania, prípadne s nutnými opravami jeho metodiky.
- etapa ukončovacia je časový úsek, v priebehu ktorého sa zhrnú poznámky a všetky dôležité poznatky, pripraví sa záznamy na spracovanie, a ak sa ukáže, že je reálna nádej, že ďalšie vyhodnotenie bude úspešné, zruší sa merací reťazec.
- etapa konečného spracovania výsledkov a ich interpretácie.

Nakoniec si stručne všimnime dosť zanedbávanej problematiky ako je organizácia záznamu. V prípade ručného spracovania malého množstva grafických záznamov /napr. z UV zapisovača/ je iste možné prípadné nedostatky a neúplnosti záznamu a pomocných údajov doplniť podľa pamäti osôb zúčastnených na meraní. Pri automatickom, pokiaľ možno maximálne racionálnom spracovaní veľkého množstva záznamov na magnetickej páske, sa však nie je možné spoliehať na dodatočné úpravy na základe často protichodných úvah, dohadov a vyhlásení; záznam musí byť presný, jednoznačný a úplný, musí obsahovať všetky nutné sprievodné a pomocné údaje.

Sprievodné údaje sú najmä:

- nula - vyváženie kanálov meracieho reťazca pri dohodnutom stave alebo polohe objektu,
- kalibrácia - rozváženie meracích kanálov známym signálom,
- ciach - rozváženie meracích kanálov známou hodnotou meranej fyzikálnej veličiny alebo zodpovedajúcim elektrickým signálom,
- dynamický test,
- sprievodný komentár - súbor informácií vo forme hovoreného slova, zaznamenávaný synchronne so záznamom signálov a obsahujúci popis všetkých dôležitých javov a okolností v priebehu merania. Pred meraním je účelné pripraviť scenár komentára a v priebehu merania dopĺňovať len konkrétne údaje.

Medzi pomocne údaje zaraďujeme všetky tie údaje, ktoré principiálne nepodmieňujú spracovanie, ale zvyšujú jeho presnosť a efektívnosť a umožňujú racionálnejšie využitie záznamových a vyhodnocovacích prostriedkov.

3. TECHNICKÉ PROSTRIEDKY PRE PRENOS A ZÁZNAM INFORMÁCIÍ Z POHYBUJÚCEHO SA STROJA

3.1 Obecná štruktúra informačného reťazca

Zber a spracovanie dát z mobilných objektov je možné z hľadiska štruktúry použitých informačných reťazcov členiť na niekoľko vzájomne na seba nadväzujúcich fáz:

- snímanie prvotných informácií,
- záznam, prípadne prenos prvotných informácií z pohybujúceho sa objektu,
- príprava, resp. úprava prvotných informácií pre spracovanie na samočinnom počítači.

Snímanie prvotných informácií je základným článkom reťazca. Uskutočňuje sa súborom snímačov a meracích prevodníkov, ktorými sa sledované neelektrické veličiny transformujú na mieronosný elektrický napätový alebo prúdový signál, obyčajne unifikovanej úrovne.

Záznam, prípadne prenos prvotných informácií, nadväzuje na snímanie. Jeho nutnosť vyplýva z potreby ďalšieho spracovania prvotnej informácie. Informáciu nie je možné spracovať bezprostredne na mieste jej vzniku, t.j. na pohybujúcom sa

objekte.

Najefektívnejší spôsob záznamu predstavuje dnes záznam na magnetickú pásku. V prípade nutnosti použije sa telemetrický, bezdrôtový prenos informácií z pohybujúceho sa objektu na pevné meracie stanovište.

Podľa spôsobu kódovania meracích signálov a druhu rozlišuje sa niekoľko spôsobov magnetického záznamu.

Najčastejšie sa meracie signály zaznamenávajú metódou širokopásmovej frekvenčnej modulácie /FM/. Užívajú sa 6, 14 a výnimočne aj viac kanálové magnetofóny. Meracie signály, reprodukované z magnetickej pásky, majú opäť analógový elektrický charakter. Záznam je možné na páske prakticky ľubovoľne dlho skladovať a je priamo spracovateľný analógovými metódami. Výhodou analógového záznamu je predovšetkým názornosť: záznam je možné snadno kvalitatívne aj kvantitatívne posúdiť, prípadne jeho vybrané časti graficky zaznamenať pomocou zapisovača a analyzovať. Súbežne s meracími signálmi je možné zaznamenávať komentár a riadiace signály. Nevýhodou meracieho magnetofónu so širokopásmovou FM je ohraničený počet stop a značný vplyv rušivých činiteľov, čo znižuje presnosť záznamu. Číslícové spracovanie analógových meracích signálov, zaznamenaných na magnetickej páske, vyžaduje prevod analógových signálov do číslícovej formy, kompatibilnej so zápisom samočinného počítača. Zariadenie, ktorými sa meracie signály digitalizujú, nie sú štandardným vybavením bežných typov počítačov a predstavujú technicky zložitý a nákladný prvok, bez ktorého je efektívnosť samotného záznamu z hľadiska spracovania značne problematická.

Pokiaľ nie je možné použiť meraciu magnetofón s analógovým záznamom priamo na pohyblivom objekte, prenášajú sa signály z objektu pomocou telemetrických sústav, najčastejšie s frekvenčným delením kanálov /FM multiplex/. Prenesené signály sa na strane prijímača po demodulácii a filtácii zaznamenávajú buď ako pôvodný súbor analógových signálov na viacstopú magnetickú pásku metódou širokopásmovej FM, alebo metódou priameho záznamu na jednu stopu pásky ako širokopásmový videosignál, ktorý vznikne zlúčením modulovaných subnosných frekvencií jednotlivých meracích kanálov.

Efektívne využitie číslicových počítačov vyžaduje, aby informácie, určené na spracovanie mali číslicovú formu, a aby formát informácie spĺňal podmienky kompatibility z hľadiska použitého kódovania, štruktúry a organizácie záznamu. Je preto vhodné, aby meracie signály boli priamo v mieste ich vzniku zaznamenávané v číslicovej forme na vhodné záznamové médium, napr. číslicovú magnetickú pásku priamo spracovateľnú počítačom. Potrebám zberu, prenosu a spracovania v celej šírke vyhovujú systémy s časovým delením kanálov a číslicovou moduláciou. Meracie signály sa prenášajú na jednu stopu magnetickej pásky ako sériový záznam metódou pulzne kódovej modulácie /PCM/. Systavy PCM prekonávajú nedostatky sústav s FM tak z hľadiska presnosti záznamu, ako aj z hľadiska počtu meracích kanálov a frekvenčných rozsahov. Výhoda sériového číslicového záznamu na jednu stopu magnetickej pásky vyniká najmä pri meraní na mobilných objektoch: buď bude možné inštalovať na objekte vhodný číslicový magneticko-páskový zapisovač, alebo "jednokanálový" PCM signál telemetricky prenášať.

3.2 Usporiadanie meracích reťazcov

V ďalšom sú uvedené základné varianty usporiadania meracích reťazcov, používaných na pohybujúcich sa objektoch; pozornosť je venovaná tým, ktoré majú význam z hľadiska spracovania získaných informácií počítačom.

Na obr. 1 je bloková schéma meracieho reťazca s výstupnými zariadeniami pre indikáciu a záznam meracích signálov analógovými metódami /UV zapisovač, viackanálový merací magnetofón s FM záznamom a amplitúdovo modulovaným komentárovým kanálom/. Merací signál je získavaný snímačom A a meracím prevodníkom B. Výstupný merací signál sa obyčajne upravuje z hľadiska nežiadúcich frekvenčných zložiek, najčastejšie pomocou modulových aktívnych filtrov / napr. [3] /.

Kritickým miestom analógového reťazca sú predovšetkým záznamové zariadenia. Pre ťažšie prevádzkové podmienky je nutné použiť bezdrôtový telemetrický prenos. Meracie signály sa na prijímanej strane zaznamenávajú na merací magnetofón. Vybrané úseky záznamu je možné prepisovať na UV zapisovač a vizuálne kontrolovať na viackanálovom osciloskope /obr. 2./.

Digitalizácia reprodukovaných signálov sa robí buď na počítači /pokiaľ je vybavený A/D prevodníkom a prepínačom/, alebo na špeciálnom off-line zariadení podľa obr. 3. Na zariadení sa získa kompatibilná číslicová magnetická páska. Sústavu tvorí merací magnetofón (1), vstupný analógový prepínač (2), vzorkovače (3) s rýchlym analógovo-číslícovým prevodníkom (4), formátovacia jednotka (5) s vyrovnávacou pamäťou, číslicová magnetopásková jednotka (6) a riadiaca jednotka (7).

Analógové signály z meracieho magnetofónu sa pomocou vstupného prepínača a vzorkovača postupne pripájajú na vstup A/D prevodníka. Vzorkovanie je riadené riadiacou jednotkou, pomocnými signálmi zaznamenanými na analógovej páske, alebo z frekvenčného generátora. Výstupné dáta sa vo formátovacej jednotke rozkladajú na sérioparalelnú informáciu, ktorá sa ukladá do vyrovnávacej pamäti, rozdelenej na dve časti. Zatiaľ čo sa jedna časť plní, druhá časť sa vypisuje na číslicovú magnetickú pásku. Podrobne sú tieto systémy popísané napr. v [4].

Perspektívnym riešením je použitie sústav s časovým delením kanálov /multiplex/ a číslicovou moduláciou. Systémy PCM sa začínajú postupne používať pre zber, prenos a spracovanie najmä väčšieho počtu tak analógových /spojitých/, ako aj číslicových /nespojitéch/ informácií.

Bloková schéma sústavy PCM pre záznam a prenos informácií z pohybujúceho sa stroja je na obr. 4. Kódovacia časť sústavy má z hľadiska frekvenčného rozsahu dva druhy vstupov: "rýchle", vzorkované celistvým násobkom vzorkovacej frekvencie, a "pomalé", vzorkované základnou frekvenciou. Sériový PCM signál, vystupujúci z kódovacej časti sa buď zaznamenáva priamo na jednu stopu magnetickej pásky ako sériová číslicová informácia, alebo sa telemetricky prenáša na pevné stanovište.

Bloková schéma reprodukčnej časti PCM sústavy na pevnom stanovišti je na obr. 5. PCM signál, zaznamenaný na magnetickej páske sa privádza do vstupnej časti demodulátora. Po dekódovaní PCM signálu sú k dispozícii dáta v paralelnej forme, ktoré je možné formátovať a zapísať na kompatibilnú číslicovú pásku, použiteľnú pre ďalšie spracovanie počítačom. Súčasne je možné využiť analógové výstupy pre záznam, resp. analýzu rekonštruovaného súboru pôvodných meracích signálov.

Namiesto magnetickej pásky môže byť "zdrojom" PCM signálu te-
lemrický prijímač. Ďalší postup je zhodný s predchádzajúcim.

3.3. Popis najdôležitejších meracích reťazcov

3.3.1. Snímače a meracie prevodníky

Na snímače a meracie prevodníky, inštalované na mobilných
objektoch sa kladú zvýšené požiadavky najmä z hľadiska teplot-
nej a časovej stálosti elektrických a mechanických parametrov,
vyžaduje sa mechanická a klimatická odolnosť, odolnosť proti
pôsobeniu otrasov, rázov a uhlových a lineárnych zrýchlení.
Vyžaduje sa tiež dostatočná presnosť a reprodukovateľnosť ú-
dajov a vysoká spoľahlivosť. Pre vysokú konštrukčnú a techno-
logickú náročnosť sa dnes výrobou snímačov a prevodníkov zao-
berajú vysoko špecializované firmy, často býva snímač vyrobený
ako integrálny konštrukčný celok priamo s meracím prevodníkom
a napájačom.

Na meranie fyzikálnych veličín na pohybujúcich sa stro-
joch sa používajú snímače a meracie prevodníky, ktorých prin-
cípy sú všeobecne známe. Na meranie relatívnych deformácií sa
používajú odporové tenzometre, napájané jednosmerným alebo
striedavým napätím. Používanie striedavých tenzometrických
mostíkov s nosným kmitočtom však ustupuje a stále viac sa pou-
žívajú systavy s diferenciálnymi zosilňovačmi. Širokopásmové
zosilňovače sú konštruované ako kompaktné modulárne jednotky
so jednosmerným napájaním z palubnej batérie a s galvanicky
oddeleným meracím obvodom. Vstavaný stabilizátor dovoľuje
značné kolísanie napájacieho napätia. Bežným vybavením sú
vstavané aktívne filtre s prepínateľným hraničným kmitočtom.
Modely sú miniaturizované, majú malú hmotnosť a vysokú odol-
nosť proti rušivým elektrickým poliam. Na meranie dynamických
a statických tlakov sa používajú miniatúrne tenzometrické sní-
mače s priamo zabudovanými meracími prevodníkmi. Na meranie
lineárnych posuvov a uhlových natočení sa používajú tenzomet-
rické snímače. Na meranie otáčok a rýchlosti pohybu sa s výho-
dou používajú tachodynamá. Lineárne zrýchlenia vo všetkých
troch osiach /kompaktné trojosové snímače miniatúrnych rozme-
rov/ sa merajú tenzometrickými akcelerometrami, uhlové rých-
losti a natočenia okolo súradnicových osí sa merajú snímačmi

gyroskopickými. Podrobnejší popis snímačov a prevodníkov prekračuje zámer tohto príspevku.

3.3.2 Meracie magnetofóny

Na záznam meracích signálov sa dnes najčastejšie využíva magnetický záznam metódou širokopásmovej frekvenčnej modulácie /FM/. Meracie magnetofóny sú konštruované ako viackanálové, obyčajne pre 6 alebo 14 kanálov záznamu FM signálu a jeden amplitúdovo modulovaný kanál pre záznam riadiacích signálov a komentára. Priamy záznam sa využíva aj na meranie signálov s širokým frekvenčným spektrom.

Pri zázname FM /napr. magnetofón TESLA EMM 140/ je frekvenčný rozsah pre maximálnu rýchlosť posunu pásky 38 cm s^{-1} : 0 - 2500 Hz a odstup rušivých napätí 42 dB. Pre najmenšiu rýchlosť posunu $4,75 \text{ cm s}^{-1}$ je frekvenčný rozsah 0 - 312 Hz a odstup rušivých napätí sa zníži na 38 dB. Pri priamom zázname je frekvenčný rozsah v intervale 200Hz - 30 kHz pre maximálnu rýchlosť pásky.

O výhodách a nevýhodách bola zmienka vyššie. Ďalšie podrobnosti o využití tohto spôsobu záznamu pre účely zberu a spracovania informácií sú uvedené napr. v [4].

Všimnime si teraz podrobnejšie niektorých problémov spojených s použitím magnetofónu pre číslicový magnetický záznam.

Záznamová časť sústavy PCM /obr. 6/ obsahuje analógový vstupný prepínač meracích signálov, vzorkovač, analógovo-čísllicový prevodník, radič a riadiacu jednotku. Vzorky meracích signálov sa pomocou analógovo-čísllicového prevodníka prevádzajú na 8 až 12 bitové paralelné slová, ktoré sú po prevode na sériový kód vedené do radiča, v ktorom sa vytvára spolu s číslicovými a pomocnými signálmi sériový PCM signál s konštantnou opakovacou frekvenciou. Sériový sled bitov jedného číslicového slova /meracieho kanálu a synchronizačných bitov/ tvorí základný prvok PCM signálu, t.j. rámec /obr.8./. Jednotlivé rámce sa skladajú do vyšších celkov - multirámcov, ktoré obsahujú dáta všetkých vzorkovaných kanálov. Sériový sled multirámcov vytvára kompletný sériový signál, ktorý sa buď priamo zaznamenáva na jednu stopu magnetickej pásky, alebo sa telemetricky prenesie na pevné meracie stanovište.

Vzorkovanie spojitého signálu v ekvidištantných okamihoch je zrejmé z obr. 7. Amplitúda signálu je rozdelená na 16 hladín, ktorých číslo je vyjadrené binárne 4-mi bitmi $/2^4 = 16/$. Počet hladín určuje presnosť kvantovania signálu v amplitúde. Obyčajne sa používa dĺžka výstupného slova 8, 10 alebo 12 bitov. Pri dĺžke 10 bitov bude počet hladín $2^{10} = 1024$, takže rozlišovacia schopnosť bude lepšia ako 0,1 % rozsahu.

Štruktúra sériového PCM signálu je zrejmá z obr. 8; dáta obsahujú 10 bitov, pričom v jednom rámci sú 4 záznamové kanály. Na jednu stopu magnetickej pásky sa za sebou najčastejšie zaznamenávajú dáta /údajové slová/ z ôsmich meracích signálov, a slovo dát má obyčajne 10 bitov. Frekvenčný rozsah zaznamenaných signálov závisí od počtu kanálov a hustoty magnetického záznamu. Napr. pre rýchlosť posuvu magnetickej pásky 38 cm s^{-1} je prenosová rýchlosť 80 kbit s^{-1} a maximálna šírka pásma všetkých ôsmich zaznamenaných signálov bude 200 Hz. Ak budú vzorkované len 4 kanály, rozšíri sa frekvenčné pásmo na 400 Hz, a pre jeden kanál až na 1200 Hz. Každý z ôsmich hlavných kanálov je možné rozšíriť podružnými vstupnými prepínačmi až na 64 meracích miest v moduloch po 8. Vzorkovacia frekvencia týchto subkanálov sa primerane zúží, zatiaľ čo frekvencia vzorkovania hlavných kanálov zostane nezmenená. Takto sa dosiahnu rozdielne vzorkovacie frekvencie a zvýši sa počet záznamových kanálov. Opísaný postup umožňuje na jednej stope zaznamenať tak dynamicke deje s vysokou frekvenciou, ako aj nízkofrekvenčné deje "kvázistatické".

Príkladom usporiadania takej sústavy je PCM zariadenie fy JOHNE und REKHOFER GmbH [6] s ôsmimi hlavnými záznamovými kanálmi, v ktorých jeden je rozšírený na 16 subkanálov. Sedem hlavných kanálov je využitých pre záznam veličín v pásme 0 - 200 Hz, na každý zo 16-tich subkanálov sa môžu zaznamenávať signály vo frekvenčnom pásme 0 - 12,5 Hz. Všetkých 23 meraných kanálov sa zaznamenáva na jednu stopu magnetickej pásky pomocou číslicového magnetofónu 4 S17 v prevedení pre pohyblivé objekty. Číslicový magnetofón používa 4-stopú pásku šírky 14" na cievkach s elektronicky riadeným pohonom /5 voliteľných rýchlostí do 30 inch s^{-1} /. Súbežne so záznamom dát je možné zaznamenávať komentár na hovorený kanál. Napájanie magnetofónu

je zo vstavaných Ni - Cd akumulátorov alebo zo siete cez napájač. Prednosťou sú malé rozmery /80 x 251 x 230 mm/ a nízka hmotnosť /3,2 kg/ zariadenia.

3.4 Zhodnotenie prostriedkov pre prenos a záznam informácií

V popise možných variantov usporiadania systémov pre zber a prenos experimentálnych dát z pohybujúcich sa strojov boli spomenutú najdôležitejšie výhody a nevýhody jednotlivých riešení z hľadiska požiadaviek ďalšieho spracovania získaných informácií.

Nie je zanedbateľné aj ekonomické hľadisko. Cena získaných informácií prudko rastie s počtom meraných veličín, s požadovanou presnosťou merania, prenášaným frekvenčným rozsahom a úrovňou spracovania.

Z výkladu je jasné, že doteraz rozšírený spôsob záznamu, t.j. analógový FM záznam, má rad nedostatkov a je na ústupe. Na jeho miesto nastupuje kvalitatívne vyšší princíp - technika PCM záznamu. Zhodnotenie je preto urobené vo forme zhrnutia hlavných výhod PCM záznamu.

Hlavné prednosti metódy PCM záznamu proti analógovému FM záznamu sú tieto:

- Možnosť záznamu veľkého počtu meracích kanálov na jednu stopu štandardnej magnetickej pásky metódou sériového záznamu /časový multiplex/. Napr. možnosť rozšírenia počtu kanálov z doterajších 14 u FM metódy na $14.8 = 112$ kanálov.
- Podstatne vyššia dosiahnuteľná presnosť záznamu: PCM typicky 0,1 %, FM typicky 1,5 - 2 %.
- Kolísanie rýchlosti magnetickej pásky pri zázname a reprodukcii PCM signálu nie je na závalu /pripúšťa sa 10 - 15 %/. Naproti tomu u FM systémov je tento parameter kritický. Z uvedeného dôvodu je možné u PCM systému použiť robustný pohon pásky so značnou otrasuvzdornosťou.
- Podstatne vyššia odolnosť PCM záznamu proti rušivým signálom a šumu. Odstup signál/šum je u PCM 60 - 70 dB, u FM 45 dB/.
- Jednoduchá a hlavne racionálna možnosť súčasného záznamu tak vysokofrekvenčných dynamických, ako aj nízkofrekvenčných "kvázistatických" veličín spolu s číslicovými informáciami v jedinom súbore.

- Číslícový charakter zaznamenananej PCM informácie je vhodný pre ďalšie spracovanie na samočinnom počítači /bez nutnosti digitalizácie/. Teda snadná náväznosť na výpočtovú techniku a na systémy pre diaľkový prenos dát.
- Možnosť súčasného záznamu komentára na ďalšiu stopu magnetickej pásky.
- Možnosť vylúčenia telemetrickeho prenosu z meracieho reťazca a tým ďalšie zvýšenie presnosti prenosu a záznamu pri súčasnom zjednodušení obsluhy, zvýšení spoľahlivosti a znížení nákladov na prípravu a realizáciu merania.
- Možnosť rekonštrukcie PCM signálu na pôvodný súbor analógových signálov, ich zobrazenie a prípadný rozbor analógovými prostriedkami /napr. FM-magnetický záznam, UV- záznam, spracovanie na analógovom počítači a pod/.
- PCM sústavy a meracie magnetofóny pre záznam PCM signálu majú proti FM sústavám veľmi výhodné rozmerové parametre. Realizácia najprogresívnejšími technológiami v oblasti elektrotechniky a výpočtovej techniky umožňuje navyiac dosiahnuť vysokú spoľahlivosť a prispieva k poklesu ich ceny.
- Vďaka vysokej hustote záznamu /typický 1300 bit mm^{-1} / veľká kapacita PCM pásky s pravdepodobnosťou chyby 1.10^{-6} až 1.10^{-7} .

4. VYHODNOTENIE NAMERANÝCH SIGNÁLOV

Vyhodnotenie nameraných a zaznamenaných signálov sa bude líšiť podľa účelu analýzy. Zo všeobecnej schémy spracovania na obr. 9 vyplýva, že vlastné spracovanie možno urobiť buď na základe charakteristík korelačnej teórie ako sú hustota pravdepodobnosti amplitúd a špičiek, autokorelačná funkcia a spektrálna výkonová hustota, alebo pomocou metód diskretizácie procesu a určenia početností jeho charakteristických parametrov /relatívnych vrcholov, maximálnych amplitúd, relatívnych rozkmitov, párových rozkmitov a prechodov/.

Rozhodnutie, ktorú cestu v praxi použiť, je motivované účelom experimentu, teoretickou pripravenosťou pracoviska a taktiež jeho technickým vybavením. Všeobecne možno povedať, že metódy korelačnej teórie sú presnejšie a výstižnejšie, ale ich realizácia je podstatne náročnejšia +/.

+ Vzhľadom na uvádzané prednosti PCM sústav budeme ďalej predpokladať, že spracovanie sa bude robiť na číslicovom počítači.

Pokiaľ sa týka účelu experimentu, ide buď o posúdenie dynamických vlastností konštrukcie, alebo o odhad únavovej životnosti. Zatiaľ čo štatistiky korelačnej teórie náhodných procesov možno využiť pre jeden aj druhý účel, histogramy početností charakteristických parametrov sú vhodné pre odhad únavovej životnosti, popr. aj pre laboratórnu simuláciu prevádzkového procesu z hľadiska únavy. Hoci sa niektoré histogramy početností podarilo uviesť do matematickej súvislosti so spektrálnou výkonovou hustotou, z hľadiska únavových aplikácií sú tieto dve skupiny úplne izolované; prepočet únavovej životnosti, určenej jedným spôsobom, na životnosť určenú spôsobom druhým je všeobecne nemožný.

Za predpokladu, že vzorkovacia frekvencia PCM záznamu alebo A/D prevodníka zodpovedá štatistickým kritériám, kladeným na vyhodnocované charakteristiky, a dĺžka záznamu je dostatočne reprezentatívna, môžeme pristúpiť k vyhodnocovaniu.

4.1 Vyhodnotenie signálov v rámci korelačnej teórie

Ak na základe rozboru signálu na obrazovke osciloskopu usúdime, že signál je asi stacionárny a náhodný, urobíme test stacionarity, založený na posúdení časovej invariantnosti parciálnych stredných hodnôt a rozptylov /napr. pomocou testu trendu alebo testu interácií/. Ak tento test preukáže, že signál je stacionárny, aplikujeme ďalej test náhodnosti. Jeho účelom je posúdiť, či signál neobsahuje výrazné harmonické zložky, alebo či nie je periodický. Aj keď väčšina procedúr teórie náhodných procesov dovoľuje spracúvať aj deterministické signály, detekcia harmonických zložiek uľahčuje interpretáciu vypočítaných charakteristík. Pre posúdenie náhodnosti signálu osobitné testy nemáme a vychádzame z rozboru hustoty pravdepodobnosti amplitúd a autokorelačnej funkcie.

Niekedy nás môže zaujímať aj posúdenie normality signálu /pomocou testu zhody/. Keďže však všetky známe testy sú pomerne prísne, často nám neostáva nič iné, ako na základe kvalitatívneho porovnania hustôt pravdepodobnosti predpokladať, že signál je aspoň približne normálny, hoci test ho vylúčil.

Vyhodnotenie nestacionárnych náhodných signálov si všeobecne žiada doplňujúce vysvetlenie a predpoklady. Keďže táto

oblasť je zatiaľ prakticky nevyužitelná /až na niektoré prípady simulácie/, opäť sa často uchýľujeme k vyhláseniu, že hoci test stacionarity nepotvrdil stacionaritu, pokladáme "mierne" nestacionárny proces za približne stacionárny. Pritom si však treba uvedomiť, že táto nepresnosť môže mať dopad najmä na tvar spektrálnej výkonovej hustoty.

Pokiaľ stacionárny náhodný proces obsahuje sínusové zložky, je žiaduce ich odfiltrovať. Prvým problémom však je ich detekcia. Niekedy sa podarí určiť prítomnosť harmonických zložiek vizuálne pri prehrávaní na osciloskope. Frax ukazuje, že je to možné, ak smerodajná odchýlka niektorej z nich nepoklesne pod polovicu smerodajnej odchýlky náhodnej zložky procesu. Spravidla však treba náhodný proces predbežne vyhodnotiť a určiť buď hustotu pravdepodobnosti amplitúd alebo spektrálnu výkonovú hustotu. V ďalšom kroku sa použije úzkopásmová zadrž, ktorá pre nastavenú frekvenciu odstráni zo signálu celý výkon, včítane podielu, prislúchajúceho náhodnému procesu. Ak je však potlačené pásmo veľmi nízke, celková energia procesu sa zmení len nepatrne. Výhodné je používať zadrž s plynule nastaviteľnou frekvenciou a sledovať výsledok filtrácie na osciloskope; tak sa môžeme zaoberať aj bez predbežnej analýzy procesu. Niekedy postačí harmonické zložky len určiť, ale neodstraňovať. Tým, pravda, vylučujeme možnosť posúdiť normalitu procesu.

Ak je účelom merania konštrukcie posúdenie jej dynamic-
kých vlastností, zo signálu vyhodnocujeme

- a/ hustotu pravdepodobnosti amplitúd $p(x)$ /prakticky je však táto charakteristika užitočná iba na posúdenie normality procesu/,
- b/ spektrálnu výkonovú hustotu $S(\omega)$,
- c/ vzájomné spektrálne výkonové hustoty medzi dvoma signálmi $x(t)$ a $y(t)$, t.j. $S_{xy}(\omega)$,
- d/ frekvenčné charakteristiky prenosových kanálov medzi vstupným procesom $x_i(t)$ a výstupným procesom $y(t)$, t.j. $H_{x_i y}(\omega)$ /napr. postupom podľa [7]/, a
- e/ viacnásobnú koherenčnú funkciu medzi množinou vstupných procesov $x_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, E$, a výstupným procesom $y(t)$, t.j. $\Gamma_{x-y}(\omega)$.

Metodika výpočtu a interpretácia výsledkov hodnotenia dynamických vlastností meranej konštrukcie sa podrobne rozoberá napr. v [7].

Pre účely hodnotenia únavovej životnosti meraného miesta zo signálu vyhodnocujeme:

- a/ hustotu pravdepodobnosti amplitúd $p(x)$, z ktorej ďalej vyčíslime extrémne špičky napätia σ_{\max} a σ_{\min} , resp. extrémálnu amplitúdu $\sigma_{\text{aex}} = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2$. Tieto charakteristiky porovnávame jednak so statickými vlastnosťami materiálov σ_{Kt} a σ_{Pt} , a jednak s amplitúdou namáhania na medzi únavy σ_C použitého materiálu, resp. súčasti [8].
- b/ smerodajnú odchýlku signálu s_σ , ktorú porovnávame so smerodajnou odchýlkou namáhania na medzi únavy s_{σ_C} použitého materiálu alebo súčasti [8].
- c/ spektrálnu výkonovú hustotu $S(\omega)$, ktorú možno dosadiť do Rajcherovej hypotézy výpočtu životnosti [8].

Poznamenajme, že najmä v poslednej dobe sa merania konštrukcií v prevádzke a spracovanie signálov robia za účelom laboratórnej simulácie prevádzkových procesov namáhania na laboratórnych stendoch, a to tak z hľadiska únavových, ako aj dynamických vlastností. Možnosť, ako simulovať proces so zadanými štatistickými charakteristikami, je celý rad. Podrobne sa opisujú v práci [9].

4.2 Vyhodnotenie signálov diskretizáciou pomocou charakteristických parametrov

Tento spôsob spracovania signálov prichádza do úvahy iba v únavových aplikáciách, kedy nám ide o odhad únavovej životnosti meraného miesta bez ohľadu na dynamické vlastnosti systému. V podstate ide o určenie počtu výskytov niektorej charakteristickej veličiny signálu (obr. 9). Z vyhodnotených početností sa určí krivka a náhodný proces sa tak prevedie na spektrum /blok/ harmonických amplitúd rôznej veľkosti, ktoré sú ďalej pomocou niektorej hypotézy kumulácie poškodenia porovnávané s Wöhlerovou krivkou materiálu, resp. súčasti.

Poznamenajme, že jednotlivé metódy diskretizácie spolu nijako nesúvisia a porovnanie ich výsledkov je možné iba na konkrétnych záznamoch signálov. Výber charakteristického pa-

rametra sa nedá podložiť žiadnym štatistickým kritériom a skôr sa určuje únavovými aspektmi.

Z praktického hľadiska je dôležité, že pri tejto metóde spracovania nás nezaujímajú žiadne iné vlastnosti procesu ako napr. jeho stacionarita či obsah harmonických zložiek. Získané krivky početností parametrov však nedávajú žiadnu informáciu o následnosti amplitúd signálu /časové merítko/ alebo o rýchlosti ich zmeny.

5. ZÁVER

Celá uvedená problematika merania, záznamu a vyhodnotenia signálov snímaných na pohybujúcej sa konštrukcii je značne technicky i teoreticky náročná a vyžaduje si dlhodobé investičné a kádrové budovanie pracoviska. Z druhej strany si však treba uvedomiť, že naše stroje majú v svetovom merítku nevyhovujúce váhové a spoľahlivostné parametre a preto sa treba sústrediť na overenie ich vlastností reálnych prevádzkových podmienkach a z toho vyplývajúce opatrenia pre ďalšie navrhované konštrukcie. Že je to úkol reálny, ukazuje aj príklad Vývojového závodu Turčianskych strojární.

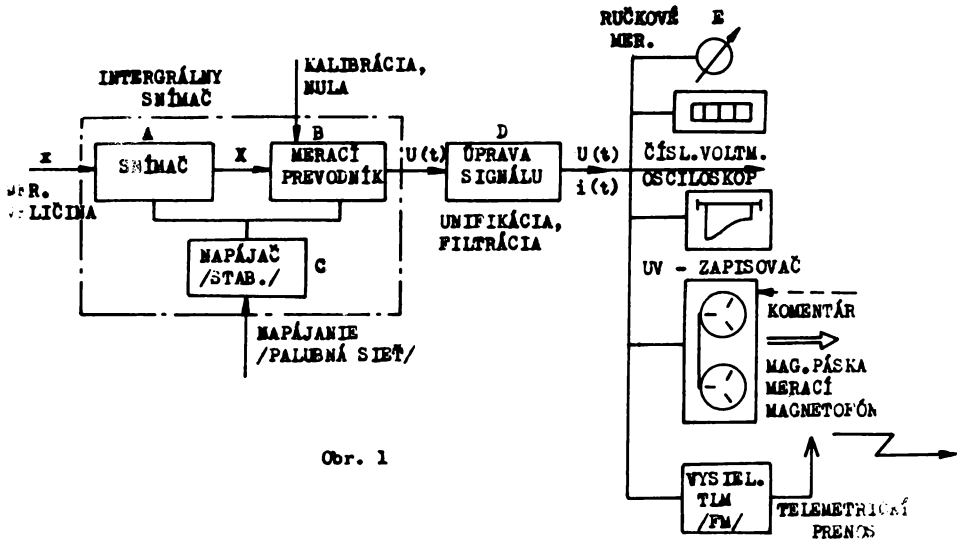
LITERATÚRA

- [1] Tydlačka V., Bílý M.: Scanning and Analysis of Stochastic characteristics of Vehicle Moving in Hard operational Conditions. Zborník referátov VI. konferencie o dynamike strojov, Bratislava-Smolenice 1970, ÚMS-SAV Bratislava 1970
- [2] Baráni V., Tydlačka V.: Náhodné funkcie v technickej praxi - základné vlastnosti, možnosti a spôsoby merania a záznamu. Zborník referátov z celoštátneho seminára Spracovanie náhodných procesov s použitím počítačov, ZP SVTS pri ÚMS SAV Bratislava a ZP SVTS pri TEES Martin, Martin 1974
- [3] Kováčová M.: Modulové aktívne filtre pre stavebnicový merací systém, int. správa VZ - V 0029/77 - 04, VZ TEES Martin 1977
- [4] Šťastný A.: Magnetický záznam v reťazcích sběru a zpracování měřených signálů, Interný materiál zo seminára "Magnetofónová páska - jej využitie a perspektíva v meracej

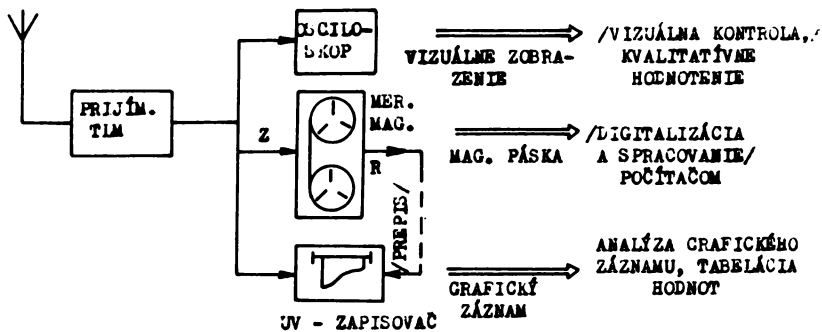
- technike a technika spracovania údajov", VZ TEES Martin 1972
- [5] Dušička J.: Číslíkové spracovanie fyzikálnych veličín zaznamenaných na magnetickú pásku, Int. správa VZ - V 0231/73 - 01 , VZ TEES Martin 1973
- [6] Glockmann P.: Aufzeichnung und Übertragung von analogen Messdaten in PCM - Technik, ATM - Messtechnische Praxis, 43, 1976, Nr.9, S. 271/281
- [7] Bílý M., Chmúrny R.: Identifikácia zložitej mechanickej sústavy v prevádzkových podmienkach. Stroj. Čas., 24.1973 č. 6.
- [8] Tydlačka V., Bílý M., Bukoveczky J.: Metodika odhadu životnosti a spoľahlivosti konštrukcie z hľadiska únavy, Strojírenství, 24, 1974, č. 8.
- [9] Bílý M., Bukoveczky J.: Digital simulation of environmental processes with respect to fatigue. J. Sound and Vibration, 49 1976, č.4.

Zoznam obrázkov:

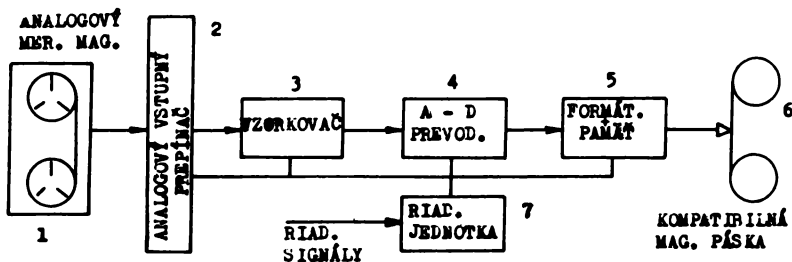
- Obr. 1 : Bloková schéma analógového meracieho reťazca, so zariadeniami pre záznam a prenos meracích signálov z pohyblivého objektu.
- Obr. 2 : Bloková schéma usporiadania pevnej časti telemetrickeho prenosu informácií z pohyblivého objektu
- Obr. 3 : Bloková schéma zariadenia pre digitalizáciu analógových meracích signálov zaznamenaných na magnetickej páske.
- Obr. 4 : Blokovaná schéma sústavy PCM pre záznam a prenos informácií z pohyblivého stroja.
- Obr. 5 : Blokovaná schéma reprodukčnej časti PCM sústavy na pevnom stanovišti. Varianty spracovania PCM signálu.
- Obr. 6 : Blokovaná schéma kódovacej časti sústavy PCM.
- Obr. 7 : Kvantovanie spojitého signálu /16 hladín, 4 bity/.
- Obr. 8 : Príklad štruktúry sériového PCM signálu;
4 záznamové kanály; 4 slová dát v rámci;
8 rámcov v multirámcu; 1 slovo 10 bitov.
- Obr. 9 : Všeobecná schéma spracovania zaznamenaných signálov.



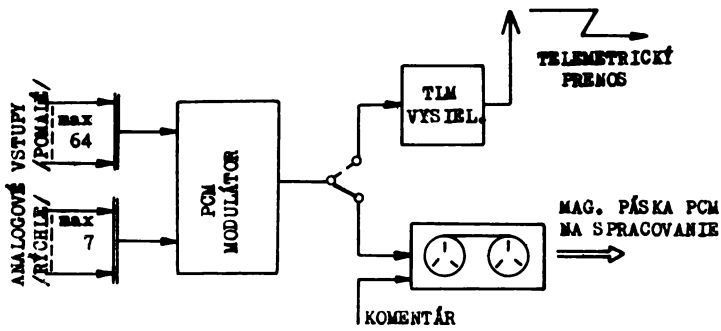
Obr. 1



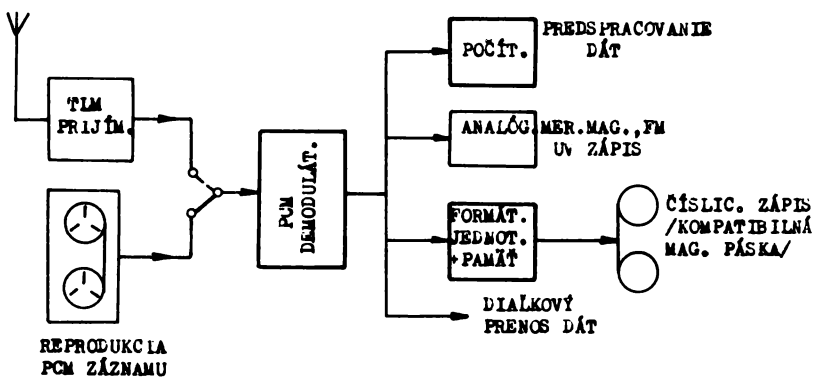
Obr. 2



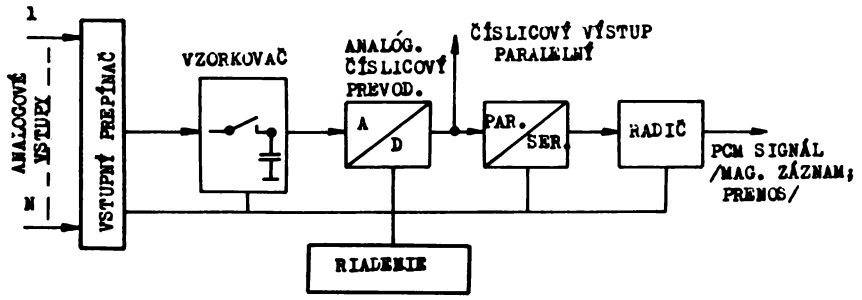
Obr. 3



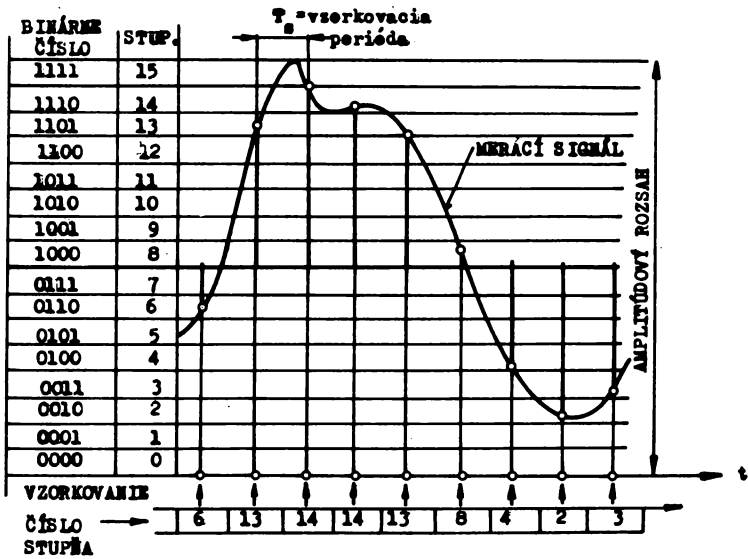
Obr. 4



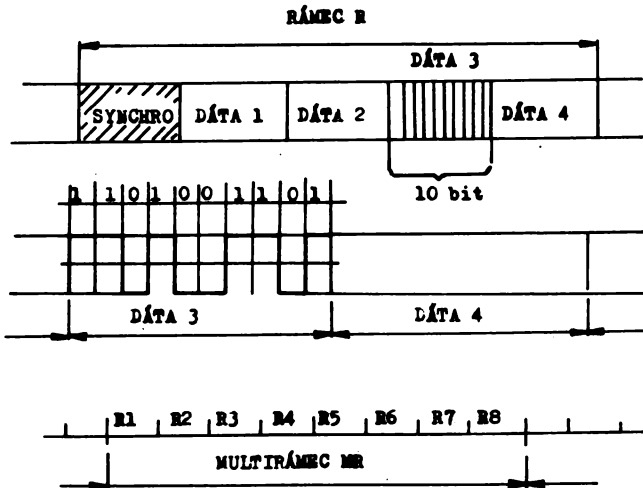
Obr. 5



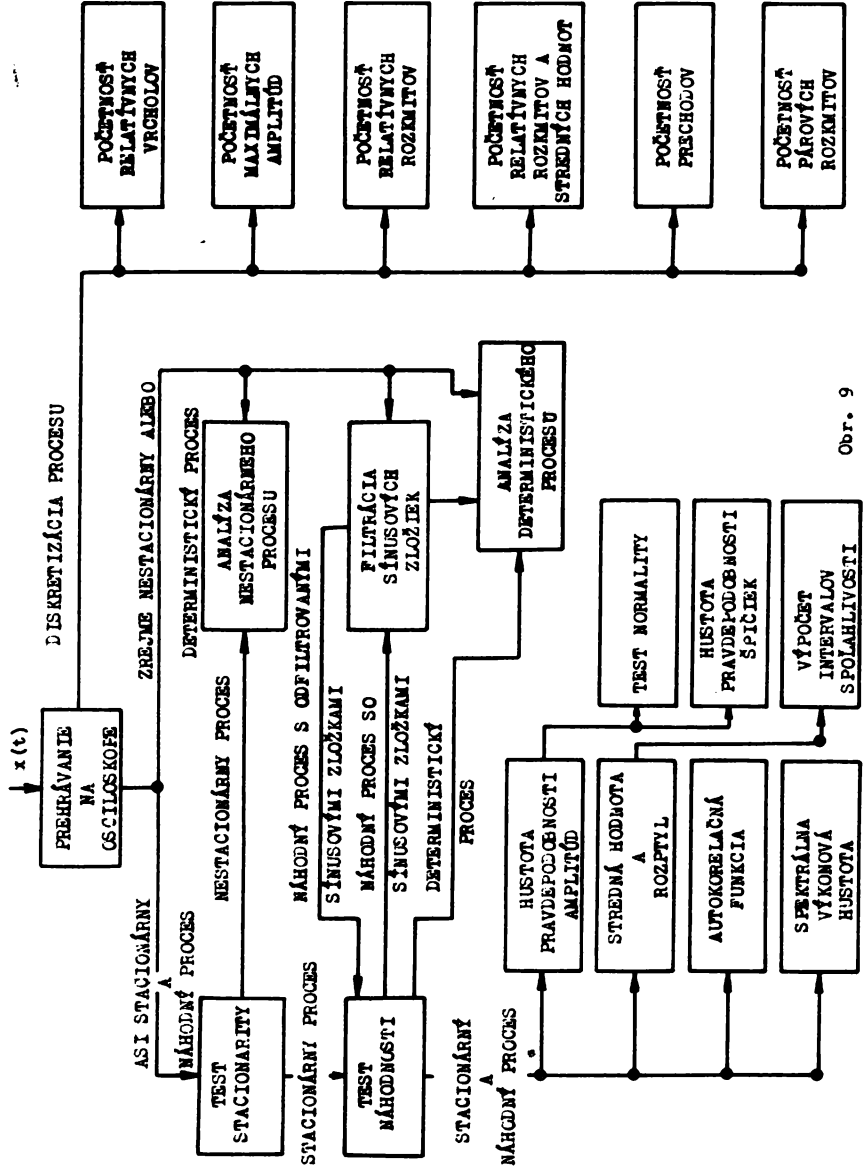
Obr. 6



Obr. 7



Obr. 8



Obr. 9