

Technická univerzita v Liberci

**Fakulta mechatroniky
a mezioborových inženýrských studií**

Ing. Petr Tůma, CSc.

Příspěvek k automatizaci provozních měření

Habilitační práce

26-15-9 Technická kybernetika

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146134331

Liberec, březen 2003

Tůma, P.: Příspěvek k automatizaci provozních měření

Anotace

Práce pojednává o úlohách automatizovaných provozních měření. Nejvýznamnější částí práce je popis pěti konkrétních automatizovaných měřicích aplikací z různých odvětví praxe, jejichž řešení se autor zúčastnil. Obecná část práce, která je tvořena *dvěma prvními kapitolami*, se zabývá měřicím řetězcem, zhodnocením jeho významu jako modelu procesu zpracování informace o fyzikální veličině. Zvláštní pozornost je věnována z některých pohledů spornému použití počítačů kategorie PC v měřicích aplikacích. *Třetí kapitola* se zabývá několika úlohami měření pneumatických tlaků, které vznikají při vývoji a výrobě brzdových systémů kolejových vozidel. *Čtvrtá kapitola* se věnuje měření výšky sloupce rtuti v kapiláře, které je základem jedné z operací při výrobě lékařských teploměrů. *Pátá kapitola* se soustřeďuje na přenos dat s využitím služby SMS systému GSM. *Šestá část práce* je z oblasti sklářského průmyslu a je věnována problematice plošného bezkontaktního optického měření tloušťky průhledné vrstvy. Poslední *sedmá kapitola* se zabývá automatizací souboru měření parametrů mouky, která jsou prováděna ve mlýnech.

Klíčová slova: měřicí řetězec, mikropočítač, přenos dat, PC, obrazová informace

Tůma, P.: A Contribution to Automated Measurements

Summary

This thesis deals with tasks of automated operating measurements. The most valuable part is description of five particular automated measuring applications from diverse branches of use which has been solved by author's participation. The general part, composed of *first two chapters*, is focused on the measuring chain, its value as a model of physical quantity information processing is evaluated here. The attention is paid to the debatable usage of PC within measuring applications. The *third chapter* deals with a few of measurements of pneumatic pressure which have appeared at development and production of rail vehicles brakes. In the *fourth chapter* the measuring of the mercury column height in capillary during the thermometer adjusting operation is detailed. The *fifth chapter* is focused on the data transmission using the Short Message Service of GSM. The *sixth part* looks at glass industry measurements, the thickness of the transparent layer measurement is described in details. The last *seventh chapter* deals with the measurements of the set of wheat flour quality parameters which is performed on in mills.

Keywords: measuring chain, microcomputer, data transfer, PC, image information

Obsah

Úvod

1	Uspořádání automatizované měřicí úlohy	9
1.1	Měřicí řetězec	12
1.2	Snímače	16
1.3	Obvody přizpůsobení	20
1.4	AD převodník	25
1.5	Programové zpracování naměřených dat	29
2	Využití počítačů PC v měřicích úlohách	32
2.1	Měření pomocí zásuvných modulů	34
2.2	Měření pomocí standardních rozhraní počítačů PC	37
3	Měření tlaků v pneumatických soustavách	41
3.1	Použité snímače a jejich výstupní signály	42
3.2	Podsystém pro digitalizaci analogových signálů	44
3.3	Zpracování digitalizovaných dat a jejich přenos do počítače PC	46
3.4	Kalibrace	52
4	Měření výšky sloupce rtuti v polotovaru teploměru	55
4.1	Měřená veličina	55
4.2	Obrazová informace	57
4.3	Videosignál	59
4.4	Počítačové zpracování videosignálu	62
5	Přenos naměřených dat pomocí služby SMS	71
5.1	Služba SMS	71
5.2	Kódování znaků ve službě SMS	72
5.3	Komunikační uživatelské rozhraní mobilních koncových zařízení	77

5.4	Přenos dat pomocí služby SMS	82
6	Měření síly transparentních vrstev	88
6.1	Měřená vrstva	88
6.2	Uspořádání měřicí soustavy	90
6.3	Obrazová informace	93
6.4	Vyhodnocení obrazové informace	93
6.5	HW realizace algoritmu pro zpracování obrazové informace	96
7	Automatizovaná měření v provozní laboratoři ve mlýnech	105
7.1	Měřené signály	105
7.2	Převod signálů na data	107
7.3	Přenos naměřených dat do PC	109
7.4	Počítačové zpracování měření	111
	Závěr	115

Použité zkratky

AD	Analog-to-Digital (převod analogových signálů na digitální data)
ASCII	American Standard Code for Information Interchange (kódování znaků)
CCD	Charge Coupled Device (princip maticových opto-elektrických převodníků)
CMOS	Complementar Metal Oxid Semiconductor (technologie výroby IO)
CNC	Computer Numeric Control (počítačově řízené polohování)
CR	Carriage Return (znak 'návrat na začátek řádku' s ASCII kódem 13)
DA	Digital-to-Analog (převod digitálních dat na analogové signály)
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory (typ paměti s obsahem nezávislým na napájení)
EISA	Extended Industry Standard Architecture (standard systémové sběrnice PC)
ETSI	European Telecommunications Standards Institute (organizace spravující standardy GSM)
GPRS	General Packet Radio Service (jedna ze služeb GSM, vhodná pro přenos dat)
GSM	Global System for Mobile communication (sít' mobilních komun. prostředků)
HART	Highway Addressable Remote Transducer (protokol pro kom. s intel. sensory)
IO	Integrovaný obvod
ISA	Industry Standard Architecture (starší standard pro systémovou sběrnici PC)
LAN	Local Area Network (lokální počítačová síť)
LF	Line Feed (znak 'nový řádek' s ASCII kódem 10)
LVDT	Linear Variable Differential Transformer (typ snímače mechanické polohy)

MEMS	Micro Electro Mechanical Systém (integrace mechan. Prvků na křemík. čip)
PCMCIA	Personal Computer Memory Card International Association (rozhraní pro zásuvné karty)
PDU	Protocol Description Unit (způsob formátování dat ve službě SMS)
PC	Personal Computer (osobní počítač)
PCI	Peripheral Component Interconnect (standard systémové sběrnice PC)
PLC	Programable Logic Controller (prostředek pro programové řízení strojů)
PWM	Pulse Width Modulation (šířková pulzní modulace)
SAR	Succesive Approximation Register (prvek v jednom z typů AD převodníků)
$\Sigma\Delta$	Sigma – Delta (typ AD převodníku)
SMS	Short Message Service (jedna ze služeb GSM)
SMSC	Short Message Service Centrum (jeden z prostředků služby SMS)
SP	Space (znak 'mezera' s ASCII kódem 32)
TCP/IP	Industry Standard Architecture / Interenet Protocol (sada síťových protokolů)
USB	Universal Serial Bus (univerzální sériové rozhraní počítačů PC)
VLB	Video electronics standard association Local Bus (starší systémová sběrnice)

Úvod

Tato práce se zabývá problematikou úloh automatizovaných provozních měření. Nejvýznamnějším cílem práce je uvést poznatky o řadě konkrétních automatizovaných měřicích aplikací z různých odvětví praxe, na jejichž řešení se autor podílel.

Práce je sestavena ze sedmi kapitol. První dvě kapitoly jsou obecné a pokoušejí se v širších souvislostech uvést základní pojmy z měření a zhodnotit metody a prostředky, které byly použity při návrhu a praktické realizaci řady konkrétních měřicích úloh. Kapitola 1 vychází z pojmu „měřicí řetězec“ v běžném pojetí, tj. z posloupnosti *snímač – zesilovač – analogovo-digitální převodník – počítač* - ..., a ukazuje, že tento řetězec jako obecný model toků informací od měřených fyzikálních veličin po jejich konečné zpracování nemusí ve všech případech vyhovovat, že struktura měřicích prostředků může být zcela odlišná. Obecná část práce také v několika souvislostech a na několika příkladech uvádí, že automatizovaná měřicí aplikace nemusí být jen osazením měřicích řetězců prvky počítačové techniky, ale že se často jedná o složitější interaktivní vztah mezi měřicí, nebo v některých případech i měřenou soustavou a prostředky, které měřená data vyhodnocují, zpracovávají a vlastní proces měření řídí. Kapitola 2 se krátce zabývá zhodnocením možností využití počítačů kategorie PC v měřicích úlohách.

Podrobné popisy a hodnocení vybraných řešených měřicích aplikací jsou potom obsahem pěti dalších kapitol této práce. Do souboru vybraných řešení byly zařazeny měřicí aplikace, při jejichž návrhu, konstrukci, realizaci a zprovoznění v podmínkách praxe se vytvořil větší prostor pro dlouhodobější a systematictější odbornou činnost v problematice průmyslových, zcela nebo částečně automatizovaných měření. Dalším kritériem, které bylo při výběru měřicích aplikací pro zařazení do této práci zohledněno, je pestrost uvedeného souboru měřicích aplikací.

Měřicí aplikace uváděné v kapitolách 3 a 7 sledují standardní strukturu měřicího řetězce a mají z hlediska technických prostředků pro základní zpracování měřených signálů mnoho společného. U každé z nich je zcela jiné navazující počítačové zpracování a uživatelská interpretace informací, které odrážejí odlišnost aplikačních oblastí, kterých se obě kapitoly dotýkají.

V kapitolách 4 a 6 jsou uvedeny popisy řešení měřicích úloh, ve kterých je hodnota měřené veličiny odvozena z pohledu na měřenou soustavu TV kamerou. V případě kapitoly 4 je videosignál kamery zpracováván původní metodou jednoúčelovým elektronickým

obvodem podporovaným jednočipovým mikropočítačem. Pro náročnější zpracování obrazové informace vyskytující se v úloze, která je popsána v kapitole 6, je použit počítač typu PC s vestavěnou kartou pro digitalizaci videosignálu.

Kapitola 5 se zabývá zejména možnostmi přenosu obecných dat pomocí služby SMS systému GSM. Z rozsáhlého souboru standardů o protokolech a jejich technickém a programovém zajištění kapitola vybírá kompaktní a snadno použitelnou sadu prostředků, která dovoluje službu SMS použít pro přenos naměřených dat. V kapitole jsou uvedena omezení, která použití služby SMS pro přenos dat do měřicího řetězce vnáší. Možnost reálného využití služby při automatizovaném měření je dokumentována uvedením konkrétní aplikace.

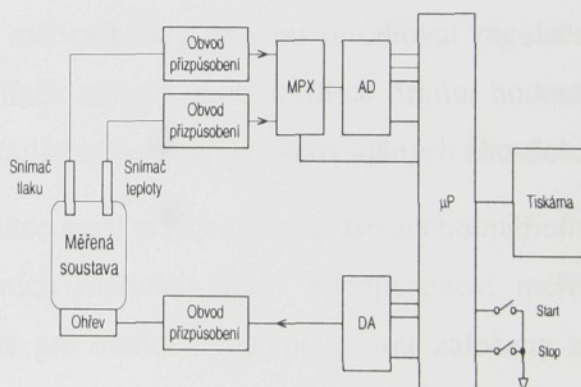
Poznámka:

Tato práce vznikla dílem díky a dílem navzdory textového editoru MS Word, který je součástí kancelářského balíku MS Office 2000 Premium, na notebooku Acer TravelMate 270 s operačním systémem MS Windows XP. Zatímco počítač a operační systém prakticky neklamaly, textový editor se v řadě situací chová nepředvídatelně. Nestabilní je podoba a umístění obrázků, dělení slov, rozdělení textu na stránky, náhled se neshoduje s vytištěným dokumentem, objekty z jiných aplikací lze vkládat jen někdy, ... Určitým řešením bylo rozdělení textu na menší oddíly a jejich samostatné zpracování. Uvedené a ještě další nedostatky nakonec vyústily v některé kompromisy ve formálním zpracování předloženého textu (volná místa na koncích kapitol a některých odstavců, nepřesné dělení slov, nejednotné okraje kolem vložených objektů, ...), za což se autor práce omlouvá.

1 Uspořádání automatizované měřicí úlohy

Pod pojmem „automatizovaná měřicí úloha“ se v současnosti většinou myslí taková aplikace měřicí techniky, ve které jsou využity automatizační a výpočetní prostředky s cílem vyloučit nebo alespoň v co největší míře omezit přítomnost a vliv člověka během procesu měření. Pro zavádění automatizace obecně, a tedy i automatizovaných měřicích systémů, existuje řada ekonomických, technických i společenských motivací (kalkuluje se s cenou lidské práce, požaduje se stále větší záruka objektivitu, pokračuje stupeň standardizace výrobních a kontrolních postupů, je snaha odstranit z výrobních procesů lidské monotónní činnosti vyžadující značné soustředění, ...). Automatizovanými systémy měření jsou vybavovány zejména automatické technologické procesy, pracoviště, na kterých se provádějí různé provozní zkoušky a vědecko-výzkumné laboratorní experimenty. V automatizovaných měřicích úlohách jsou v současnosti používány prostředky výpočetní techniky všech výkonnostních kategorií, od malých jednočipových mikropočítačů až po sítě se složitou strukturou a s distribuovaným výpočetním výkonem. Pro automatizaci některých měření, ve kterých jsou místa, kde informace vzniká, vzdálena od míst, kde je zpracovávána, je neméně významné užití komunikačních prostředků, od jednoduchého spojení dvou mikropočítačů až opět po složitě strukturované speciální či veřejné globální síti.

Blokové schéma uspořádání jednoduchého případu prostorově kompaktní automatizované měřicí úlohy s naznačením směru toků informací je znázorněno na obr. 1.1. Jedná se o ilustrativní případ, ve kterém je úkolem proměřovat časový průběh tlaku v uzavřené soustavě. Parametrem sledovaného děje je teplota v uzavřené nádobě. Případ je zjednodušením konkrétní skutečně řešené měřicí úlohy, při níž bylo prostřednictvím



Obr. 1.1
Příklad jednoduché automatizované měřicí úlohy

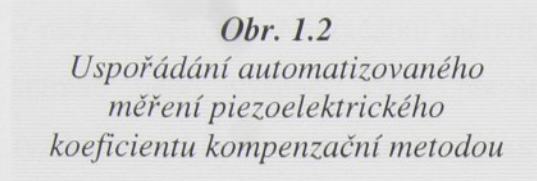
měřeného průběhu tlaku usuzováno na dynamiku průběhu složité biochemické reakce při hodnocení potravinářské suroviny. Mikropočítač, kterým je měřicí úloha osazena, má za úkol zejména měřit a registrovat hodnoty sledovaného tlaku na připojené tiskárně, detailněji to znamená určovat okamžiky vzorkování, ovládat multiplexor, který přepíná měřicí kanály k jednomu sdílenému analogovo-digitálnímu (AD) převodníku, řídit tento AD převodník, opravovat systematické a omezovat náhodné chyby snímače tlaku, zesilovače a dalších

analogových prvků obsažených v měřicím řetězci, formátovat data a odesílat je podle předepsaného protokolu na tiskárnu. Dalším úkolem mikropočítače v uvedeném příkladu je zajistit pro měření tlaku stabilní definované podmínky, tj., v tomto případě, teplotu. K tomu účelu obsahuje měřicí úloha další technické a programové prostředky, nezbytné pro vytvoření regulační smyčky. Jsou jimi zejména další měřicí kanál pro měření teploty a cesta pro působení opačným směrem od mikropočítače k měřené soustavě. Cesta je tvořena digitálně-analogovým (DA) převodníkem a zdrojem tepla s ovladatelným výkonem pro ohřev soustavy. Regulační algoritmus je realizován v mikropočítači programově jako samostatná úloha, která má jen malou vazbu kontrolního významu na úlohu, která zajišťuje vlastní měření a zpracování naměřených dat.

Pro oblast aplikací, která je v této práci diskutována především, tj. oblast měřicích úloh, je sice rozhodující směr toku informací od snímačů umístěných na proměřované soustavě k displejům, tiskárnám, vizualizacím, vědecko-technickým výpočtům, databázím, počítačovým a telekomunikačním sítím, ..., avšak zpětný směr toku informací je vyjádřením té skutečnosti, že automatizované měřicí úlohy nemusí být jen úlohy s automatickým zpracováním naměřených dat, že se s výhodou navrhnou také tak, že výpočetní a jiné automatizační prostředky nejen přijímají a zpracovávají naměřené informace, ale také se aktivně a interaktivně podílejí na vlastním procesu měření. Mohou tak např. startovat měřicí cykly, generovat budící signály, určovat polohu měřicí sondy, mohou obsahovat regulační smyčky pro zajištění stability definovaných podmínek měření, mohou hlídat limitní hodnoty vybraných fyzikálních veličin, a podílet se tak na zajištění bezpečnosti prováděných zkoušek.

Zásadní a neoddělitelnou součástí se interakce mezi prvky automatizovaného měřicího systému stává u automatizovaných kompenzačních měřicích úloh. Kompenzační měřicí metody fyzikálních veličin jsou vhodné zejména pro statická měření a jsou založeny na principu iteračního kompenzování efektu, který v soustavě vyvolává měřená fyzikální veličina, pomocí jiného akčního členu. Kompenzace je možná, protože měřicí soustava musí být uspořádána tak, aby výstupní fyzikální veličina tohoto akčního členu působila proti měřené fyzikální veličině (aby se odčítaly). Přidaný akční člen navíc musí mít přesně popsánu svoji převodní charakteristiku.

Na tomto principu byl navržen přístroj pro měření vlastností piezoelektrických materiálů, viz obr. 1.2. Piezoelektrický element z hmoty s neznámým koeficientem piezoelektrického jevu je začleněn do mechanické soustavy spolu s piezoelektrickým aktuátorem tak, že se jejich mechanická působení (prodloužení délky) v soustavě odčítají.



Musí být přesně známa závislost výstupní vzdálenosti aktuátoru na přivedeném budícím elektrickém napětí. K proměřovanému vzorku materiálu je přiloženo budící elektrické pole, to způsobí prodloužení vzorku, které má dále za následek vznik dodatečné mechanické síly v soustavě. Mechanická síla je indikována snímačem síly, signál je zpracován a předán mikropočítači. Ten v postupných krocích přes DA převodník a budící obvod piezoelektrického akčního

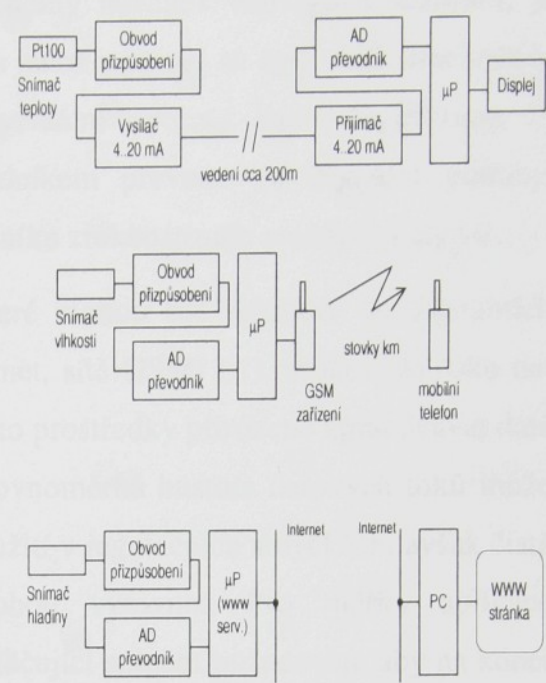
1.1 Měřicí řetězec

Každá měřicí úloha obsahuje nejméně jeden měřicí řetězec. Rozumí se jím většinou lineárně uspořádaný soubor technických zařízení a jiných funkčních modulů (např. realizovaných softwarově), kterými postupně prochází informace o měřené veličině. Na začátku měřicího řetězce je snímač nebo vysílač, který převádí měřenou fyzikální veličinu většinou na elektrický signál. Druhý konec měřicího řetězce je závislý na charakteru konkrétní měřicí aplikace, zejména na způsobu zpracování a interpretace naměřených dat. V jednoduchém případě jím může být ručkový měřicí přístroj umístěný bezprostředně vedle snímače, jindy jím může být např. mnoho kilometrů vzdálený displej mobilního telefonu nebo zobrazená internetová stránka. Na obr. 1.3 je znázorněno několik konkrétních příkladů měřicích aplikací s jedním měřicím řetězcem.

Má-li měřicí úloha více než jeden měřicí kanál, bývá možné a výhodné navrhnout její uspořádání tak, že některé prvky měřicích řetězců jsou sdíleny větším počtem měřicích kanálů.

V případech automatizovaných měřicích úloh se předpokládá začlenění výpočetní techniky do měřicího řetězce. Měřicí řetězec pak většinou lze rozdělit podle způsobu kódování informace na dvě části, na část analogovou a část digitální. Analogová část měřicího řetězce začíná snímačem a končí analogovo-digitálním (AD) převodníkem. Digitální část měřicího řetězce začíná AD převodníkem a pokračuje navazujícím výpočetním prostředkem, který může být jen začátkem složitého distribuovaného informačního systému.

Některé segmenty měřicích řetězců, zejména v analogové části, jsou v průmyslové praxi velmi často opakovány a jejich elektrické a mechanické konstrukční řešení se prakticky ustálilo na několika málo variantách. Pro praktické realizace řešení takových segmentů je na trhu velká nabídka jednotlivých komponent (snímačů, přizpůsobovacích obvodů, převodníků a dalších). Stále také postupuje snaha výrobců takové obvyklé segmenty měřicích řetězců integrovat do kompaktních celků. Dnes jsou tak dostupné např. snímače všech základních fyzikálních veličin (teplota, tlak, síla, vzdálenost, ...), které jsou vybaveny standardními



Obr. 1.3
Příklady měřicích řetězců

analogovými i digitálními rozhraními (0..10 V, 4..20 mA, RS232, RS485, Profibus, S-bus, ...). I když má takový kompaktní snímač fyzikální veličiny navenek analogové rozhraní, je možné, že uvnitř obsahuje číslicový mikropočítač, s jehož pomocí se řeší např. linearizace závislosti výstupního signálu snímače na hodnotě fyzikální veličiny, kalibrace, filtrace, ... V takovém snímači se měřený signál AD převodníkem převede do digitální podoby, programově se zpracuje a po té se pomocí DA převodníku zrekonstruuje analogový signál.

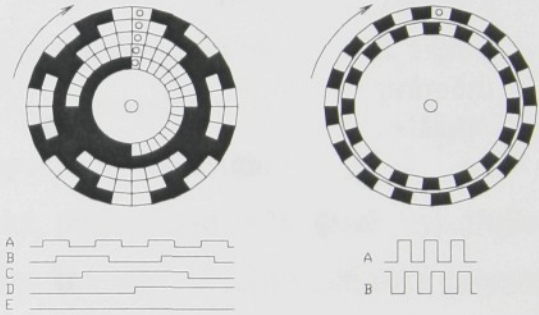
Některé výpočetní a komunikační prvky, které mohou být zahrnuty do digitálních částí měřicích řetězců (Operační systém, USB, Internet, síť GSM, ...), mohou do toku dat vnášet časové nerovnoměrnosti např. tím, že je pro tyto prostředky přirozené zpracovávat data po relativně velkých dávkách. Takto způsobená nerovnoměrná hustota datových toků může zcela vyloučit některé informační technologie pro použití v regulačních smyčkách, avšak čistě měřicí aplikace se s tímto jevem většinou mohou vyrovnat. Pro měřicí aplikace se vzorkováním v pravidelném časovém rastru je postačující splnění požadavku, aby na konci měřicího řetězce bylo možno zrekonstruovat takové pořadí měřených vzorků, v jakém byly tyto vzorky pořízeny měřicím AD převodníkem.

Některé snímací prvky, které se používají pro měření fyzikálních veličin, nedávají na svém výstupu elektrický signál, jehož časový průběh by přímo sledoval časový průběh měřené veličiny. Je tomu tak zejména u těch snímačů, které pracují na fyzikálním principu, který s měřenou veličinou souvisí jen zprostředkovaně. Požadovaná informace je ve výstupních signálech těchto snímačů obsažena v jiné podobě a tomu pak odpovídají také jiné způsoby zpracování informace pro její přípravu pro vstup do mikropočítače. Měřicí řetězce tak mají jinou strukturu než je nejčastěji uváděná sekvence: snímač fyzikální veličiny – měřicí zesilovač – AD převodník – mikropočítač - ... Konkrétní struktura měřicího řetězce je v těchto případech vždy závislá na formě informace, kterou snímací prvek poskytuje.

Příklady lze uvést z oblasti měření geometrických veličin. Pro měření vzdáleností a úhlů se používají tzv. absolutní a inkrementální snímače polohy, viz [1.3]. Pohyb je mechanicky přenášen na otáčení kódového kolečka, jehož poloha je detekována čtením kódu binárními optickými detektory. Konstrukce snímače polohy dává měřenou polohu do relativně složitěho vztahu s jinou fyzikální veličinou, která sama o sobě obecně nemá s polohou žádnou přirozenou souvislost. A tento nový vztah dvou fyzikálních veličin daný vnitřním uspořádáním snímače má rozhodující vliv na formu informace, která je k dispozici na výstupu snímače.

V případě absolutního odměřování polohy sám princip snímání dává na výstupu snímače n -bitová slova binárních signálů ($n = 8 - 12$), která jsou blízka přirozenému formátu informací v mikropočítači a mohou tak do něj vstupovat přímo, bez AD převodníku. Princip snímače používá pro konstrukci n -bitových výstupních slov Grayův kód, který je binárním, pozičním, optimálním (z hlediska využití šířky slova) kódem a ve srovnání s váhovým kódem má tu vlastnost, že sousedící kódová slova odpovídající cyklické posloupnosti hodnot $\{0, 1, 2, \dots, 2^{(n-1)}, 0, 1, \dots\}$ se vzájemně liší jen na jediné bitové pozici. Tato vlastnost je v dané aplikaci výhodná, protože nerozhodnost snímače na hranici dvou sousedících výsečí kódového kolečka může mít za důsledek chybu jen o velikosti 1. Převod kódu na pro mikropočítače přirozený binární váhový kód je snadnou záležitostí. Na obr. 1.4 (v levé části) je znázorněno kódové kolečko zjednodušeného 5-ti bitového rotačního snímače úhlu otočení.

Mechanicky konstrukčně podobné, ale jednodušší, avšak náročnější z hlediska zpracování poskytované informace jsou inkrementální snímače polohy, viz obr. 1.4 (v pravé části). Ty nedávají v každém okamžiku kompletní informaci o poloze, ale formou dvojice impulsních signálů informují jen o přírůstcích polohy. Navazující elektronické obvody tak musí ve vlastním čítacím registru nést hodnotu měřené polohy, z fázového posuvu přicházejících signálů vyhodnocovat kladné/záporné inkrementy a obsah čítacího registru podle nich o ± 1 upravovat. Teoreticky lze touto funkcí pověřit mikropočítač a vše realizovat programově, avšak prakticky je s ohledem na potřebnou rychlost zpracování pulsů nezbytné alespoň enkodér (konečný automat pro vyhodnocování impulsů) a nejnižší bity čítače realizovat hardwarově.

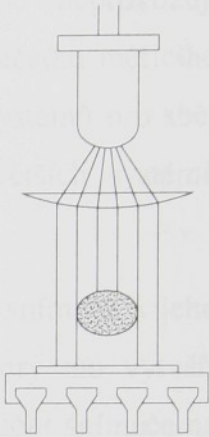


Obr. 1.4
Kódová kolečka absolutního a inkrementálního rotačního snímače úhlu otočení

Specifické postupy zpracování informací z primárních snímačů mají také metody měření vzdálenosti a dalších geometrických veličin (plošný obsah, poloha těžiště 2D útvaru, průměr vlákna, ...), které odvozují hodnotu měřené veličiny z optického projevu sledovaného děje, z obrazové informace. Jako snímače obrazu se používají kamery, které pracují s rastrovými optoelektrickými převodníky, které obsahují mnoho (desítky až miliony) elementárních prvků citlivých na osvětlení uspořádaných do lineárního nebo plošného útvaru. Ze snímacích prvků v kamerách jsou postupně zpřístupňovány analogové informace o osvětlení všech jednotlivých elementů fotocitlivého stínítka, digitalizují se a předávají

mikropočítači k dalšímu zpracování. V první fázi počítačového zpracování je většinou vytvořen model sledované scény, např. v podobě matice hodnot jasové funkce. Další fází bývá segmentace modelu scény, tj. rozdělení scény na sledovaný předmět a pozadí. Nakonec jsou z parametrů obrazu rozpoznaného předmětu zrekonstruovány požadované parametry skutečného sledovaného předmětu.

Metodou založenou na zpracování obrazové informace snímané lineárním CCD nebo CMOS snímačem se měří parametry a vlastnosti kontinuálně vyráběných produktů (průměr příze, neporušenost izolace vodičů, tvar plastových instalačních trubek, ...). Např. příze prochází prostorem mezi luminiscenční diodou s optickým kondensorem a snímacím prvkem, na kterém tak vytváří stín. Snímacím prvkem je integrovaný obvod, který obsahuje pod průhledným okénkem řadu 128 elementů, v nichž se v závislosti na intenzitě osvětlení cyklicky, vždy po určitou dobu, hromadí elektrické náboje. Na konci integračního cyklu jsou postupně jednotlivé náboje převáděny na napětí a jsou k dispozici na výstupu obvodu. Signál je přiveden na vstup AD převodníku a digitalizovaná informace postupuje dále do mikropočítače k dalšímu zpracování. V každém cyklu tak mikropočítač získá posloupnost 128 čísel vyjadřující rozložení intenzity osvětlení podél na světlo citlivé lineární snímače. V nejjednodušším případě lze na průměr sledované příze usoudit pouhým vyčíslením počtu prvků posloupnosti, které mají hodnotu nižší než je nastavený práh.



Obr. 1.5
K měření
průměru
vlákna

1.2 Snímač

Snímače jsou zařízení, která přijímají signál nebo podnět z okolí a převádějí jej na signál elektrický. Někdy se od tohoto obecnějšího pojetí snímačů vydělují tzv. vysílače, což v přísnějším rozlišení jsou zařízení, která převádějí jednu formu energie na druhou (nejčastěji elektrickou). Snímače se používají pro měření různých fyzikálních veličin, jako je teplota, síla, poloha, tlak, průtok, osvětlení, vzdálenost ... Snímače se obvykle neprovozují samostatně, ale bývají součástí větších celků, většinou mají své místo na začátku měřicího řetězce. Ty jsou dále součástí ještě složitějších celků - měřicích systémů, systémů pro sběr dat, regulačních smyček při automatickém řízení, případně speciálních větších systémů v jiných aplikačních oblastech.

Snímače mohou být hodnoceny z řady pohledů. Z hlediska pozice snímače v jeho vztahu k elektrickému obvodu, se kterým bezprostředně spolupracuje, který mu vytváří pracovní podmínky a přijímá a zpracovává jeho výstupní signál, je užitečné dělit snímače na aktivní a pasivní. Toto rozdělení snímačů vyjadřuje pozici snímače v tomto vztahu. Např. [1.1] uvádí klasifikaci snímačů podle stejného kritéria, avšak s přesně opačným výsledkem, protože autor [1.1] spíše než pozici snímače hodnotí pozici obvodů, které jsou v bezprostředním okolí snímače. Zůstaneme-li u snad jednoduššího a logičtějšího hodnocení chování snímačů samotných, platí, že aktivní snímače generují výstupní signál s určitou energií (elektrické napětí, proud) bez požadavku na přivedení vnějšího buzení, zatímco pasivní snímače jen mění v závislosti na měřené veličině některý svůj neenergetický parametr (elektrický odpor, kapacitu, indukčnost, ...) a pro detekci změny hodnoty tohoto parametru potřebují přivést vnější pomocný zdroj energie. Ze snímačů teploty lze jako příklad aktivního snímače uvést termočlánek, na jehož svorkách se vyskytuje termoelektrické napětí, i když není zapojen do žádného elektrického obvodu. Naopak, příkladem v uvedeném pojetí pasivního snímacího prvku je odporový snímač teploty, který musí být procházen měřicím proudem, aby se na jeho svorkách objevilo elektrické napětí závislé na měřené teplotě.

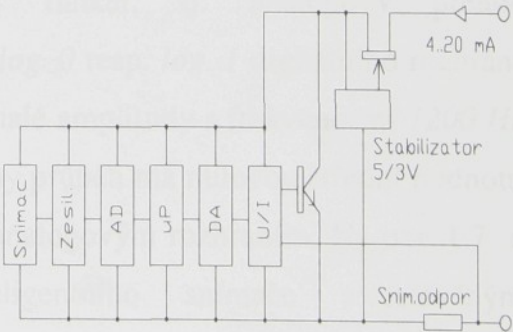
Logická by byla klasifikace snímačů podle fyzikální veličiny, pro jejíž měření je daný snímač určen. Avšak snímače pro měření různých fyzikálních veličin mohou mít stejný typ výstupního elektrického signálu a tedy i stejné požadavky na bezprostředně navazující elektrické obvody. Je proto vhodné pokusit se přednostně o klasifikaci snímačů podle typu výstupního signálu. Elektrické přizpůsobovací obvody, tzv. měřicí zesilovače, jsou nutné pro prakticky každý typ výstupního elektrického signálu snímače, protože jejich společnou vlastností je, že rozsah změn výstupní elektrické veličiny (napětí, proud, odpor, kapacita, ...)

je relativně velmi malý a nevhodný pro další zpracování. Základním úkolem měřicích zesilovačů je tedy přizpůsobení se charakteru prostředí, které je přirozené pro snímač, zesílení výstupního signálu snímače a jeho převedení na napěťový signál s rozsahem vhodným pro další zpracování, např. 0-10V, 0-5V, 0-1V, ...

U většiny snímačů je závislost mezi měřenou fyzikální veličinou a výstupní elektrickou veličinou nelineární. Přizpůsobovací obvody snímače mohou být navrženy tak, aby závislost linearizovaly a na svém výstupu poskytovaly signál, jehož závislost na měřené veličině lze vyjádřit již lineárním vztahem. Taková úprava signálu však vyžaduje použití nelineární elektrické komponenty, které mají často velký rozptyl parametrů koeficientů svých nelineárních charakteristik a malou jejich dlouhodobou stabilitu. Dřívější řešení této problematiky vedla většinou na složité sítě s rezistory a polovodičovými diodami. Dnes se problematika linearizace většinou přesouvá do digitální části měřicího řetězce, kde se provede výpočtem v mikropočítači.

Některé snímače vyžadují při zpracování svého výstupního signálu zohlednění hodnoty některé jiné přítomné fyzikální veličiny (např. teploty studeného konce termočlánku při měření teploty). Dříve pro takové situace navrhovaly přizpůsobovací obvody se speciálními prvky (kompenzační krabice), které řešily konkrétní situaci. Dnes se většinou upřednostňuje řešení, kdy se všechny fyzikální veličiny, které mohou mít vliv na výsledek měření hlavní veličiny, změří a převedou do digitální formy vzájemně nezávisle a v mikropočítači se následně jejich vliv zohlední odpovídajícím výpočtem.

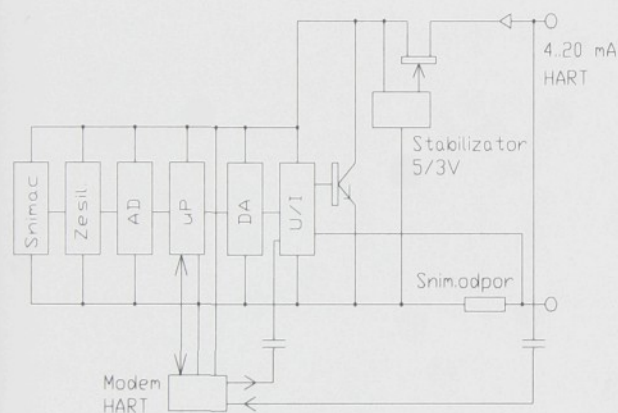
Další úlohou, která se dříve typicky řešila v analogové části měřicího řetězce, v obvodech přizpůsobení, a která se dnes většinou přesunula do oblasti výpočtu mikropočítačem, je kalibrace snímače. Kalibrace snímače byla chápána jako sladění konkrétního snímače s navazujícími elektronickými analogovými obvody tak, aby na jejich výstupu byl signál s informací o měřené veličině s požadovanými statickými parametry. Kalibrací se řeší rozptyl výrobních parametrů snímačů a přizpůsobovacích obvodů (u lineárních prvků se jedná o zesílení a posunutí nuly) a jejich dlouhodobá nestabilita. Kalibrování snímače v analogové části měřicího



Obr. 1.6
Vnitřní struktura inteligentního snímače

řetězce vede k začleňování dolad'ovacích rezistorů do elektronických obvodů, což v minulosti vedlo k dalšímu snížení jejich dlouhodobé stability a také spolehlivosti.

Z hlediska množství integrovaných funkčních bloků současná široká nabídka prvků, které se označují za snímače fyzikálních veličin, zahrnuje v sobě na jedné straně relativně jednoduché, čisté snímací prvky pracující na elektrickém, elektromechanickém, elektrochemickém nebo jiném principu. I základní zpracování signálů těchto snímačů se odehrává mimo vlastní snímač. Na druhé straně se nabízejí složité elektronické nebo mechatronické systémy, které se často označují za inteligentní snímače (smart sensor), ve kterých je vlastní snímací element integrován do jednoho celku spolu s elektronikou, výpočetním prostředkem, programovým vybavením, komunikačním rozhraním, ... Na obr. 1.6 je schématicky znázorněna vnitřní struktura inteligentního snímače s vestavěným mikropočítačem určeného pro standardní dvou vodičové připojení 4-20 mA.



Obr. 1.7

*Vnitřní struktura inteligentního snímače
s komunikací HART*

informace o měřené veličině. U tohoto protokolu jsou *log. 0* resp. *log. 1* digitálního rozhraní realizovány jako časové úseky harmonického signálu malé amplitudy s frekvencemi 1200 Hz resp. 2200 Hz superponované na linku 4-20 mA. Přidaný průběh má nulovou střední hodnotu a je frekvenčně posunut mimo část spektra užívanou analogovým rozhraním. Na obr. 1.7 je schématicky znázorněna vnitřní struktura inteligentního snímače s vestavěným mikropočítačem a s možností komunikovat s nadřazeným prostředkem podle pravidel protokolu HART, podrobnější informace o protokolu HART lze najít v [1.6] a [1.7].

Novým prostorem pro snímače zejména mechanických veličin je možnost zhotovovat mechanické systémy technologiemi výroby elektronických integrovaných obvodů. Přímě na

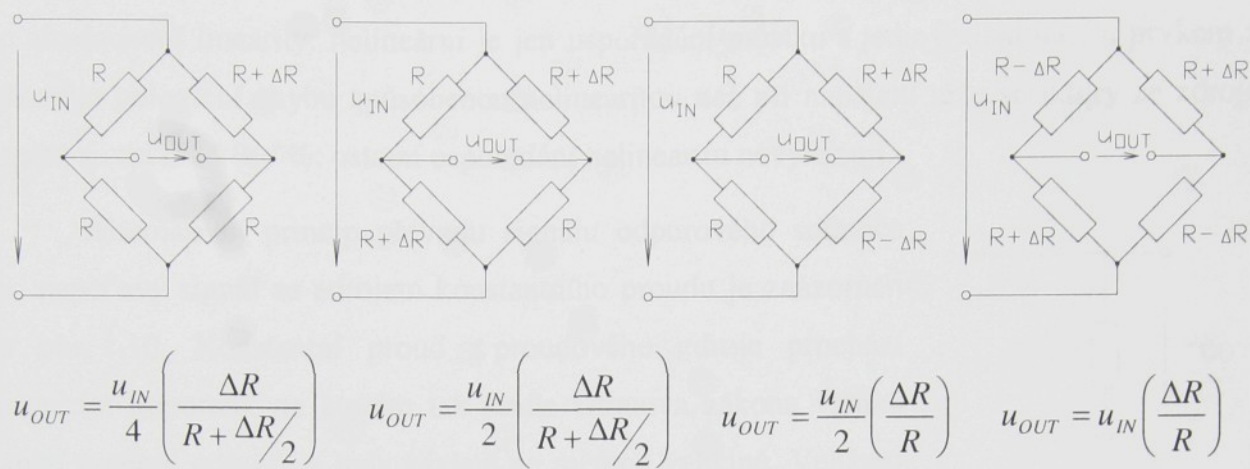
čipech integrovaných obvodů tak mohou vznikat elektromechanické systémy, tzv. MEMS (Micro Electro Mechanical System), které mohou být mít uplatnění jako aktuátory anebo snímače mechanických veličin. V současnosti jsou dostupné např. snímače typu MEMS od firmy Analog Devices pro měření zrychlení v jedné nebo ve dvou osách. Snímače mají na čipu integrovánu elasticky upevněnou seizmickou hmotnost a detektory její polohy, které pracují na kapacitním principu. Signály detektorů jsou na tomtéž čipu zesíleny, upraveny a použity jako modulační veličina šířkově modulovaného impulsního výstupu (PWM). Jiný typ MEMSu využívá gyroskopického jevu a je navržen pro měření úhlové rychlosti. Více o dostupných mikroeletromechanických systémech, viz [1.8].

1.3 Obvody přizpůsobení

Jak již bylo zmiňováno v předchozím odstavci, řada funkcí, kterými byly dříve pověřovány analogové obvody přizpůsobení, je v současnosti řešena v digitální části automatizované měřicí úlohy. Realizace těchto funkcí tak může být řešena programovým vybavením. Pro přizpůsobovací obvody snímačů, které mají na svém výstupu elektrický (napětový) signál sledující průběh měřené fyzikální veličiny, pak zbývá většinou jen základní úloha, tj. zajištění kompatibility statických parametrů signálu mezi snímačem a AD převodníkem, případně analogovým obvodem, který upravuje signál pro přenos informace na větší vzdálenost. Kompletním nebo aspoň podstatným řešením těchto případů je úprava přirozeného výstupního signálu snímače na dostatečně robustní napětový signál vhodného rozsahu. Elektronickému obvodu s takovou funkcí se většinou zjednodušeně říká zesilovač nebo převodník. Podrobné obvodové zapojení převodníku je prakticky závislé jen na elektrických vlastnostech snímacího prvku. Vzhledem k rozdílným odolnostem proti rušení signálu na vstupu a signálu na výstupu obvodu přizpůsobení, je jedním z kritérií pro jejich fyzické umístění vzdálenost od snímače, bývá výhodné mít tuto vzdálenost co nejmenší.

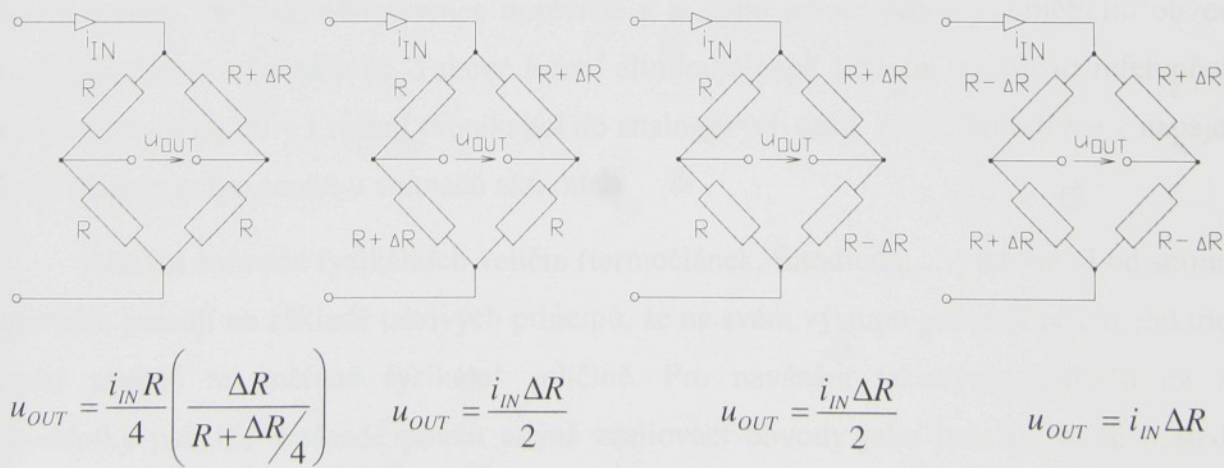
Významnou skupinu v průmyslu používaných snímačů tvoří pasivní snímací prvky, které převádějí měřenou fyzikální veličinu na změnu elektrického odporu, přičemž závislost je blízká lineárnímu vztahu. Do této skupiny patří zejména odporové snímače teploty, polovodičové a kovové piezorezistivní snímače síly, snímače relativní vlhkosti a některé další. Pro snímací prvky z této skupiny je nejčastějším bezprostředním obvodovým prostředím, ve kterém pracují, obvod můstku. Můstek se skládá ze čtyř prvků, z nichž některé mohou být pevnými rezistory o hodnotě R a jiné snímacími rezistory o hodnotě $R+\Delta R$ nebo $R-\Delta R$, kde ΔR je odchylka hodnoty snímače od jeho nominální hodnoty způsobená odchylkou hodnoty měřené veličiny od její nominální hodnoty. Některá uspořádání měřicích můstků jsou znázorněna na obr. 1.8 spolu se vztahem pro signálovou odezvu. Všechny zobrazené můstky jsou napájeny napětím přivedeným do svislé úhlopříčky čtvercové struktury. Z vodorovné úhlopříčky je odebírán měřicí napětový signál k dalšímu zpracování. Určitou nevýhodou můstků je to, že napájecí a měřicí napětí nemají společný referenční potenciál. Měřicí napětí je úměrné napájecímu a závislé na konstantní hodnotě R a proměnné hodnotě ΔR . Pro dvě vpravo zobrazená uspořádání je závislost výstupního napětí na ΔR lineární, pro dvě vlevo zobrazená uspořádání je tato závislost nelineární (lineární lomená funkce). Není-li tato nelinearita kompenzována např. spolu s nelinearitou snímače, způsobuje

systematickou chybu, která je úměrná relativní velikosti ΔR vzhledem k R a dosahuje velikosti asi 0.5 % / %.



Obr. 1.8 Různá uspořádání napětově napájených měřicích můstků

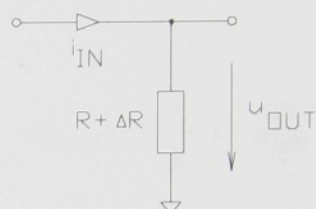
Ta uspořádání můstků, která poskytují lineární odezvu, nelze použít pro měření např. teploty, protože tyto struktury předpokládají snímače s kladným a také se záporným efektem měřicí veličiny na snímací prvek, a takové nejsou pro teplotu běžně k dispozici. Naopak pro měření např. mechanických sil lze dva (čtyři) piezorezistivní tenzometry umístit na mechanicky namáhanou konstrukci tak, že jeden (dva) je při rostoucí měřené veličině natahován a současně je jeden (dva) působením téhož podnětu stlačován. Výhodou takového uspořádání oproti uspořádánís jedním tenzometrem je pak výstupní signál se dvojnásobnou (čtyřnásobnou) intenzitou užitečné informace, který je lineárně závislý na měřené veličině. U takových uspořádání je také významná kompenzace vlivu teploty na snímací prvky.



Obr. 1.9 Různá uspořádání proudově napájených měřicích můstků

Podobné vlastnosti mají měřicí můstky, jsou-li napájeny zdrojem konstantního proudu, viz obr.1.9. Výstupní napětí je úměrné napájecímu proudu a intenzita výstupního signálu je tím větší, čím více snímacích prvků je v můstku zapojeno. Příznivější jsou výsledky po zhodnocení linearity: nelineární je jen uspořádání můstku s jediným snímacím prvkem a vykazuje poloviční chybu způsobenou nelinearitou než při napájení téže struktury ze zdroje napětí, tj. asi $0.25 \% / \%$; ostatní uspořádání nelinearity nevykazují.

Alternativní princip převodu signálu odporového snímače na napěťový signál se zdrojem konstantního proudu je znázorněn na obr. 1.10. Konstantní proud z proudového zdroje prochází snímacím odporem, na kterém tak podle Ohmova zákona vzniká napětí úměrné odporu, a tedy závislé na měřené veličině. Velikost proudu je omezena tepelným ztrátovým výkonem na snímacím prvku, vznikající teplo zvyšuje teplotu snímače a ta může měření znehodnocovat. Nevýhodou měření metodou podle Ohmova zákona je velké napětí na výstupu i při nulové hodnotě měřené veličiny, a tak relativně malý užitečný signál je superponován na velkou konstantní složku.

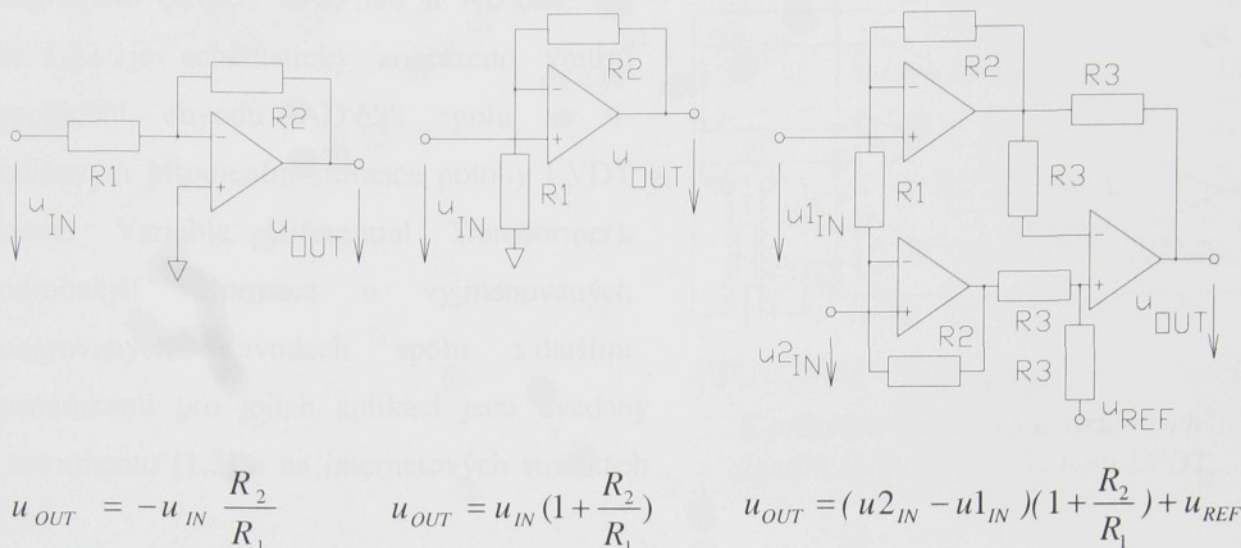


$$u_{OUT} = i_{IN} R + i_{IN} \Delta R$$

Obr. 1.10
K měření odporu
podle Ohmova
zákonu

Pokud je pasivní snímač součástí lineárního obvodu, je výstupní signál tohoto obvodu úměrný velikosti přivedeného budícího signálu, který má při stejnosměrných měřeních konstantní hodnotu. Po zesílení je signál ze snímače zpracováván AD převodníkem, který velikost signálu vyjadřuje relativně k tzv. referenční hodnotě. Je výhodné odvodit buzení obvodu snímače a referenční hodnotu AD převodníku od jednoho zdroje, protože potom je vlastní měření na hodnotě reference nezávislé a je dáno jenom poměry v měřicím obvodu, jehož součástí je také snímač. Takové řešení eliminuje např. teplotní závislosti referenčních zdrojů a do určité míry i rušení pronikající do analogových částí měřicího řetězce z napájení. Tento princip nelze použít u snímačů aktivních.

Aktivní snímače fyzikálních veličin (termočlánek, fotodioda, ...) na rozdíl od snímačů pasivních pracují na základě takových principů, že na svém výstupu generují přímo elektrické napětí závislé na měřené fyzikální veličině. Pro navázání takových snímačů na AD převodníky pak lze v zásadě použít stejné zesilovací obvody jako jsou ty, které následují v měřicím řetězci za můstky nebo snímači jejichž odpor je vyhodnocován na základě Ohmova zákona. Pro tyto obvody - měřicí zesilovače se používají různá zapojení s operačními zesilovači, z nichž tři jsou základní: invertující, neinvertující a přístrojový zesilovač.



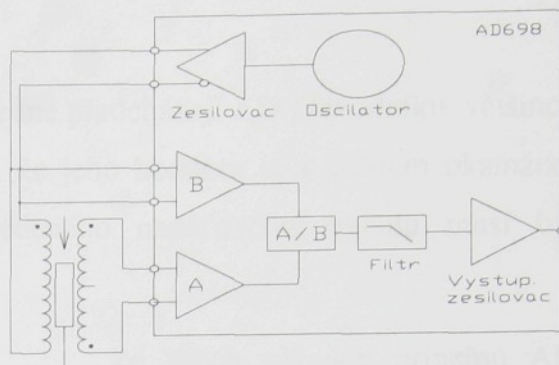
Obr. 1.11

Standardní zapojení měřicích zesilovačů: invertující, neinvertující a přístrojový

Dalším článkem řetězce, který bezprostředně následuje za měřicím zesilovačem, bývá analogovo-digitální převodník. Řada výrobců AD převodníků nabízí integrované jednočipové řešení zesilovače a vlastního převodníku. Parametr zesílení integrovaných zesilovačů je často programovatelný prostřednictvím vnějšího rozhraní čipu v mezích 10^0 až 10^3 , a umožňuje tak snadné přizpůsobení k výstupnímu signálu snímače.

Pasivní snímače, jejichž principem je využití vlivu měřené fyzikální veličiny na kapacitu, vlastní nebo vzájemnou indukčnost elektrického prvku, většinou pracují v podmínkách buzení střídavým harmonickým signálem. Takto jsou vyhodnocovány např. poměry na kapacitním můstku nebo v lineárním diferenčním transformátoru užívaném pro měření mechanické vzdálenosti. Výstupní signál takového snímače je pak také střídavý, přičemž hodnota měřené fyzikální veličiny se vyhodnocuje z poměru amplitud obou signálů. Je-li amplituda budícího signálu konstantní a známá, může být její hodnota zahrnuta do multiplikativní kalibrační konstanty celého řetězce a zohledněna až při výpočtu v mikropočítači, v opačném případě je nutno ji průběžně měřit a zmíněný podíl rovněž průběžně vyhodnocovat. Elektronické obvody, které bezprostředně navazují na snímač pracující ve střídavém obvodu a převádějí jeho signál na elektrické napětí s průběhem odpovídajícím průběhu měřené veličiny, v minimální verzi obsahují generátor budícího harmonického signálu, přesný usměrňovač a filtr typu dolní propust. Taková sestava funkčních celků doplněná ještě o výpočet podílu amplitud vstupního a výstupního signálu pro snímač LVDT je dostupná také v integrované podobě, např. firma Analog Devices vyrábí

integrované obvody AD 598 a AD 698. Na obr. 1.12 je schématicky zobrazeno vnitřní uspořádání obvodu AD 698 spolu se 4-vodičovým připojením snímače polohy LVDT (Linear Variable Differential Transformer), podrobnější informace o vyjmenovaných integrovaných obvodech spolu s dalšími poznámkami pro jejich aplikaci jsou uvedeny v dokumentu [1.5] a na internetových stránkách [1.8].

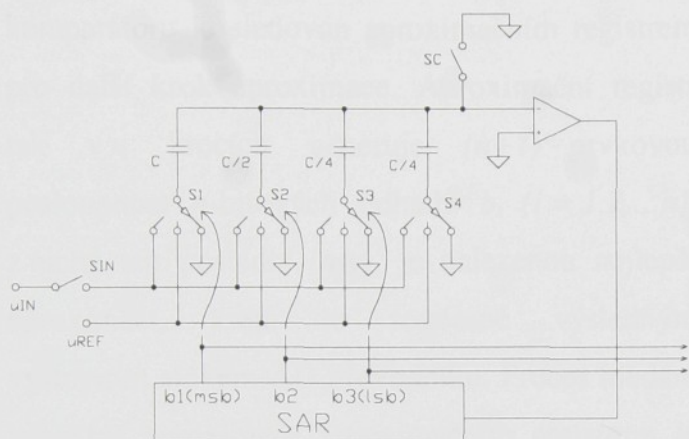


Obr. 1.12
K principu zpracování střídavých signálů snímače polohy typu LVDT

Snímač typu LVDT byl použit v měřicí aplikaci popsané v kapitole 7 této práce jako alternativní snímač k základní variantě, kterou je levnější, avšak méně spolehlivý snímač polohy – potenciometrický.

1.4 AD převodník

Z obvodů, které v měřicím řetězci bezprostředně předcházejí AD převodníku, většinou přichází napětový signál, o němž se předpokládá, že jeho hodnota je v každém okamžiku úměrná hodnotě měřené veličiny. Rozsah přivedeného napětového signálu musí být přizpůsoben napětovému rozsahu AD převodníku.



Obr. 1.13

Struktura AD převodníku s postupnou aproximací

Ze všech různých principů AD převodu se při zpracování signálů v posledních letech nejvíce uplatňuje princip postupné aproximace, viz [1.2]. Současné AD převodníky s postupnou aproximací dosahují frekvence vzorkování v řádu 10^6 Hz a rozlišení do 16 bitů. Základní sestava 3-bitového monolitického AD převodníku s postupnou aproximací s interními spínanými kondenzátory je znázorněna na obr. 1.13. Převodník se skládá ze

struktury kondenzátorů C , $C/2$, $C/4$, ... a bezkontaktních spínačů S_{IN} , S_C , S_1 , S_2 , ..., z napětového komparátoru a z aproximačního registru SAR (Successive Approximation Register). U starších typů aproximačních AD převodníků se místo struktury s kondenzátory používaly DA převodníky s R - $2R$ odporovými žebříčky, která však při vyšších rozlišeních vyžadovaly náročné a nákladné nastavování přesných hodnot jednotlivých rezistorů laserem při výrobě převodníků. Před vlastním AD převodem jsou spínače S_{IN} a S_C spojeny a spodní póly kondenzátorů jsou tak připojeny ke vstupnímu napětí u_{IN} a horní póly kondenzátorů jsou připojeny ke společnému vodiči. V tomto režimu jsou všechny kondenzátory nabíjeny/vybíjeny na vstupní napětí u_{IN} („track“ nebo „sample“ mód). Převod začíná rozepnutím spínačů S_{IN} („hold“ mód) a S_C . Vstup komparátoru je tak uvolněn od společného potenciálu a napětí na něm se při přepojování kondenzátorů spínači S_1 , S_2 , ... může měnit. Spodní póly kondenzátorů jsou při převodu připojovány buď ke společnému vodiči s nulovým napětím 0 V nebo ke vstupu referenčního napětí u_{REF} . Připojování kondenzátorů řídí aproximační registr svými binárními výstupy ($\log 0$ – připojeno k u_{REF} , $\log 1$ – připojeno k 0 V). Kdyby byly všechny kondenzátory připojeny k 0 V, bylo by napětí na vstupu komparátoru $-u_{IN}$, kdyby byly všechny kondenzátory naopak připojeny k u_{REF} , bylo by napětí na komparátoru rovno

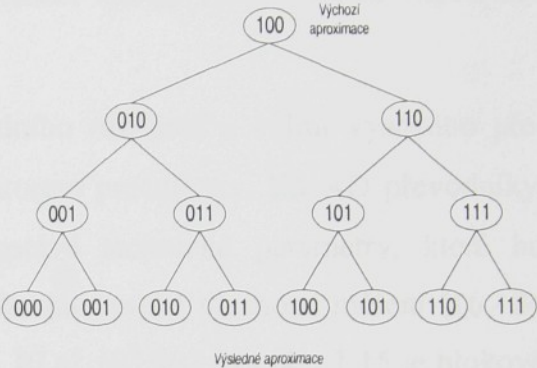
$u_{REF} - u_{IN}$. Každé výstupní slovo aproximačního registru tedy dává napětí na vstupu komparátoru v mezích $-u_{IN}$ a $u_{REF} - u_{IN}$, přesněji, pro toto napětí platí vztah:

$$u = -u_{IN} + u_{REF} \cdot (b_1/2 + b_2/4 + b_3/8),$$

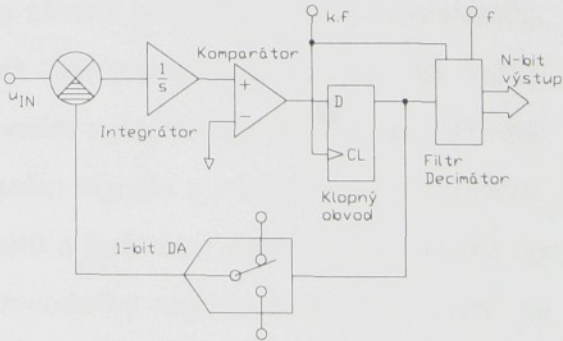
kde b_i ($i = 1,2,3$) jsou hodnoty jednotlivých bitů výstupního slova aproximačního registru. Komparátor v jednotlivých krocích vyhodnocuje znaménko tohoto napětí. Výstup komparátoru je sledován aproximačním registrem, který z něj odvozuje své výstupní slovo pro další krok aproximace. Aproximační registr tak v n krocích generuje $(n+1)$ -prvkovou posloupnost n -bitových odhadů b_i ($i = 1,2,...n$), z nichž ten poslední, n -tý, je nalezenou nejlepší aproximací, která je současně výsledným výstupním slovem AD převodníku. Proces hledání výsledné aproximace aproximačním registrem je znázorněn binárním stromem zobrazeným na obr. 1.14, větvení je určeno stavem komparátoru. Metoda odpovídá numerické metodě řešení rovnic, které se říká metoda půlení intervalu (bisekce) nebo optimální taktice při dětské hře, kdy si jeden myslí číslo a druhý, který ho má uhodnout, v každém kroku zmenší kritický interval na polovinu.

Na základě principu s postupnou aproximací pracuje mnoho typů sériově vyráběných AD převodníků. Zmiňme zde jen dva 12-ti bitové typy, AD7890 od firmy Analog Devices a TLC1549 od Texas Instruments, které byly použity v konstrukcích popsanych dále v této práci.

Frekvence poskytování digitálních vzorků AD převodníkem často několikanásobně přesahuje potřebnou frekvenci vzorkování, která je nejméně dvojnásobkem frekvence nejvyšší harmonické zastoupené v měřeném signálu. V takovém případě může být výhodné AD převodník provozovat v režimu tzv. převzorkování. Převodník digitalizuje analogový signál s frekvencí rovnou



Obr. 1.14
Vývoj postupné aproximace



Obr. 1.15
Vnitřní struktura AD převodníku typu $\Sigma\Delta$

k -násobku frekvence požadované a na výstupu AD převodníků je zařazen číslicový filtr typu dolní propust, a tzv. decimátor, který propustí na výstup převodníku jen každý k -tý vzorek z výstupu filtru. Filtrem a decimátorem současně může být např. operace aritmetický průměr aplikovaná na digitalizované vzorky z AD převodníku. Naznačeným postupem se omezí vliv kvantizačního šumu AD převodníku a dalších náhodných šumů, které mají nulovou střední hodnotu, a vzroste tak efektivní rozlišovací schopnost digitalizačního zařízení. Z frekvenčního hlediska se převzorkováním kvantizační šum rozprostře do k -násobně širšího spektra frekvencí a významná jeho část je tak v oblasti, kterou číslicový filtr nepropustí k dalšímu zpracování.

Na principu minimálního (1 bitového) základního rozlišení a velmi vysokého převzorkování s následným číslicovým filtrem a decimátorem pracují tzv. $\Sigma\Delta$ AD převodníky. Tento typ AD převodníků v posledních letech dostává technické parametry, které ho předurčují do aplikací, ve kterých je preference požadavku vysoké přesnosti měření (16 - 24 bitů) a ne příliš vysoké frekvence vzorkování (řádově 10 až 10^4 S/s). Na obr. 1.15 je blokově znázorněna vnitřní struktura základního typu AD převodníku typu $\Sigma\Delta$.

Na trhu je dostupných několik desítek různých typů $\Sigma\Delta$ AD převodníků. V jednom měřicím zařízení pro sledování tlaků v pneumatických soustavách, kterým je věnována jiná část této práce, byl použit typ AD7716 od firmy Analog Devices. Tento typ se vyznačuje tím, že má na čipu čtyři nezávislé kompletní $\Sigma\Delta$ převodníky (ne multiplexor) se společným rozhraním pro sériové připojení k mikropočítači a umožňuje tak přesně synchronní vzorkování všech analogových vstupů.

Další typ AD převodníku pracuje na tzv. integračním principu. Ten je založen na měření určité části periody cyklického děje, při němž dochází k definované změně náboje v pracovním kondenzátoru, přičemž rychlost změny je závislá na hodnotě vstupního signálu. Výhodou integračního principu je to, že na výsledek AD převodu má stejný vliv každý okamžik určitého časového úseku. Důsledkem ve srovnání s jinými typy převodníků je větší odolnost proti šumu obsaženému ve vstupním sledovaném signálu a v referenčních napětích. Integrační AD převodníky dosahují rozlišení do 16 bitů a frekvenci poskytování vzorků do stovek Hz. Na integračním principu pracují také převodníky napětí – frekvence, které ve spojení s čítačem (často integrovaným do mikropočítače) mohou také sloužit jako AD převodníky.

Činnost AD převodníků je většinou řízena vedle stojícím mikropočítačem, který také přebírá a dále zpracovává výstupní data z AD převodníku. Pro připojení AD převodníku k obecnému mikropočítači jsou AD převodníky vybaveny řídicími signály a datovým rozhraním, které výměnu dat zajišťuje. Mezi řídicími signály bývá signál pro startování AD převodu, pro sledování stavu AD převodu, ... Datová rozhraní jsou v zásadě dvojího typu, paralelní a synchronní sériová. Paralelní rozhraní mají větší datovou propustnost, nevýhodou je vysoký počet datových vodičů, AD převodníky s paralelním rozhraním mohou být vybaveny vyrovnávací pamětí FIFO pro několik digitalizovaných vzorků. Bez ohledu na počet bitů sériová rozhraní mívají jeden hodinový a jeden datový signál a jeden až dva signály řídicí nebo synchronizační. Pro sériová datová rozhraní integrovaných obvodů existuje několik standardů (I²C, SPI, MicroWire...), často však bývá použito rozhraní mimo všechna doporučení.

AD převodníky potřebují pro svoji funkci zdroj referenčního napětí, od kterého se odvozuje napěťový rozsah vstupního napětí. Některé typy AD převodníků mají zdroj referenčního napětí integrovaný do své struktury, u jiných typů AD převodníků, je nutno referenční napětí přivést z externího zdroje. Převodník dále může být vybaven integrovaným zesilovačem vstupního signálu s pevným nebo programovatelným zesílením, může obsahovat také přizpůsobovací obvody pro přímé připojení nejběžnějších snímacích prvků (např. k $\Sigma\Delta$ AD převodníku AD7711 obsahuje zdroj konstantního proudu pro přímé připojení odporového snímače teploty). Některé AD převodníky mají integrovaný multiplexor (MPX), který dovoluje k vlastnímu systému AD převodníku programově připojovat jeden z více (2 až 16) vstupních kanálů. Jsou i AD převodníky, které obsahují vlastní řadič, který po nakonfigurování řídí celou činnost převodníku včetně integrovaných funkčních modulů.

Další stupeň integrace spolupracujících funkčních bloků na jediný čip představují AD převodníky integrované do struktur jednočipových mikropočítačů a signálových procesorů. Tyto užitečné kombinace v současnosti vyrábějí řada výrobců (Texas Instruments, Analog Devices, Microchip, Atmel, ...), podrobněji viz [1.8], [1.9], [1.10].

1.5 Programové zpracování měřených signálů

Měřicí systémy s automatizovaným provozem jsou v současnosti nejčastěji projektovány s výrazným zapojením počítačových a jiných digitálních prostředků do jejich struktury. Při návrhu nových automatizovaných měřicích zařízení je v současnosti využití výpočetních a počítačových automatizačních prvků samozřejmostí. Avšak i měřicí aplikace, které byly postaveny v minulosti, jsou často předmětem rekonstrukcí s cílem zcela nebo alespoň částečně automatizovat jejich další provozování. Spolu s požadavkem na automatizaci běžného provozu průmyslových měřicích zařízení vznikají a rostou i požadavky na automatizaci jejich údržby. V moderních měřicích systémech se vyžadují prvky pro autodiagnostiku měřicích zařízení, automatické zálohování kritických článků měřicích řetězců a také automatická kalibrace a další funkce.

Prostředky výpočetní techniky se tak objevují také uvnitř měřicích řetězců, kde se mohou přímo podílet na zpracování měřených signálů a přebírat na sebe některé dílčí úlohy, které v minulosti byly standardně řešeny analogovými obvody. Tyto úlohy lze rozdělit do dvou hlavních skupin, na ty, které ovlivňují statickou charakteristiku měřicího řetězce a ty, které mají vliv na charakteristiku dynamickou.

Početní zpracování signálu vytváří možnost pro přesnou linearizaci, která patří do první skupiny úloh a které si dává za cíl opravit případnou nelineární závislost výstupní hodnoty měřicího řetězce na hodnotě měřené fyzikální veličiny. Nelinearita řetězce je nejčastěji způsobena snímačem. Při výpočtem prováděné linearizaci se číselně vyjádřené digitalizované vzorky, upravují transformací, která je inverzní funkcí k analyticky vyjádřené nelinearitě nelinearizovaného měřicího řetězce. Není-li analytické vyjádření nelinearity snímacího prvku dostupné nebo je-li k dispozici jen omezený výpočetní výkon nebo nedostatečná nabídka matematických nástrojů, lze při linearizaci pracovat s po částech lineární funkcí, které je aproximací inverzní nelinearity snímače, případně lze vzorky transformovat pomocí tabulky.

K operacím se statickou charakteristiku patří také kalibrace měřicího řetězce, jejímž cílem může být např. splnění požadavku mít na výstupu řetězce k dispozici číselné vyjádření hodnoty měřené veličiny připravené k formálnímu doplnění fyzikální jednotky. Kalibrace se realizuje transformací digitalizovaných vzorků lineárním vztahem $y=ax+b$, kde a a b jsou parametry kalibrace, tzv. multiplikativní a aditivní kalibrační koeficient. Jeden způsob určení kalibračních koeficientů výpočtem na základě hodnot získaných z experimentu je popsán na konci kapitoly 3 v této práci.

Ne všechny prvky, ze kterých je složen měřicí řetězec, mají dlouhodobě stálé parametry, a proto správnou kalibraci měřicího řetězce je nutno v pravidelných intervalech ověřovat. Při platnosti předpokladu linearit všech prvků řetězce, které jsou do kalibrace zahrnuty, postačí ověřit shodu naměřené hodnoty se známou správnou hodnotou ve dvou bodech měřicího rozsahu. K ověření nastavení kalibrace je nutno mít k dispozici jiný přesný měřicí prostředek. Z hlediska robustnosti postupu je výhodné volit body vzájemně dostatečně vzdálené, např. 10% a 90% měřeného rozsahu.

Kalibračním výpočtem lze nejen kompenzovat náhodné chyby, ale v omezené míře jím lze měřicí kanál kalibrovat podle potřeby do různých měřicích rozsahů. Kalibrací měřicího kanálu na větší vstupní citlivost však snižuje efektivní rozlišení AD převodníku tím, že část jeho rozsahu se dostává mimo oblast použití. Pokud je takto řešená změna měřicího rozsahu očekávána, je nutno pro ni vytvořit prostor i v počtu efektivních bitů výstupního slova AD převodníku.

```
function UPRAV_VZOREK(x: Word): Single;
const f = 0.8; // konstanta filtru
var x1, x2, x3 : Single;

begin
  x1 := CalM*x + CalA; // kalibrační konstanty
  x2 := 0.96*x1 + 0.034*x1*x1 + 0.006*x1*x1*x1; // linearizace
  x3 := f*x2 + (1-f)*xOld; // filtrace
  xOld := x3; // globální proměnná
  UPRAV_VZOREK := 100*x3 // výsledek v %
end;
```

Obr. 1.16

Příklad programového zpracování jednoho vzorku z AD převodníku

Dynamická charakteristika měření může být upravena číslicovým filtrem. Obecně mohou být v měřicím řetězci zařazeny filtry různých typů a řádů, avšak nejčastějším případem filtru, který se používá při základním zpracování digitalizovaných signálů je filtr typu dolní propust 1. řádu. Takový filtr má podobný význam jako pasivním integrační RC členek vřazený do signálové cesty v analogové části měřicího řetězce. Uvedený filtr lze snadno realizovat výpočtem podle vztahu $y_n = k \cdot (y_{n-1}) + (1-k) \cdot x_n$, kde pro koeficient k platí $0 < k < 1$. Filtr pro výpočet aktuálního vzorku filtrované posloupnosti y_n používá lineární kombinaci aktuálního vzorku z AD převodníku x_n a hodnotu předešlého vzorku výsledné

posloupnosti y_{n-1} . Tím vnáší do zpracování signálu určitý prvek setrvačnosti, který potlačuje rychlé změny v signálu a nemá přitom vliv na statickou charakteristiku měřicího řetězce. Na obr. 1.16 je uveden výpis příkladu funkce pro zpracování vzorku z AD převodníku, který obsahuje postupně kalibraci měřicího řetězce, linearizaci závislosti na výsledku měření na hodnotě fyzikální veličiny a filtraci číslicovým filtrem 1.řádu.

Literatura

- [1.1] Kester, W.: Practical Design Techniques for Sensor Signal Signal Conditioning. Analog Devices, 1999.
- [1.2] Sheingold, D., H.: Analog-Digital Conversion Handbook. 3. Edition, Prntice-Hall, 1986
- [1.3] Hewlett Packard: Optoelectronics Design's Catalog. 1993.
- [1.4] Ďaďo, S.-Kreidl, M.: Senzory a měřicí obvody. ČVUT Praha, 2000.
- [1.5] Internet:
http://www.analog.com/Analog_Root/static/marketSolutions/motorControl/pdf/ad598.pdf
- [1.6] O'Grady, A.: Adding HART Capability to the AD421, Loop Powered 4-20mA DAC Using the 20C15 HART Modem. Application Note 534, Analog Devices, (<http://www.analog.com>).
- [1.7] Ďaďo, S.: HART – komunikační protokol pro inteligentní snímače. In: Automatizace č.9/1997, str. 545-549.
- [1.8] Domovská stránka firmy Analog Devices: <http://www.analog.com>.
- [1.9] Domovská stránka firmy Texas Instruments: <http://www.ti.com>.
- [1.10] Domovská stránka firmy Microchip: <http://www.microchip.com>.

2. Využití počítačů PC v měřicích úlohách

Považujeme-li 16-ti bitový počítač PC (Personal Computer) od firmy IBM z roku 1981 (procesor Intel 8088, 640 KB operační paměti, diskový operační systém) za výchozí moment, lze říci, že se tato kategorie počítačů, tzv. „pécéčka“, dynamicky vyvíjí již déle než 20 let. Za toto období se všechny výkonové a kapacitní parametry těchto počítačů zlepšily o několik řádů, zásadně se změnily jejich komunikační schopnosti a vlastnosti podsystémů pro komunikaci s obsluhou. Zejména díky síti Internet, jejím technologiím a službám se z osobního počítače stále více stává inteligentní multimediální terminál pro přístup k informačním, vzdělávacím a zábavným serverům rozmístěným po celém světě. Další oblast, kde jsou osobní počítače čteně využívány, je podpora a automatizace kancelářských a inženýrských prací. Nejméně jeden osobní počítač je dnes samozřejmou a takřka povinnou výbavou každého kancelářského pracoviště a není daleko doba kdy i každé domácnosti.

Ne tak jednoznačné a všeobecně přijímané je použití osobních počítačů v průmyslových aplikacích, v přímém napojení na technologické procesy. Odpůrci průniku počítačů PC do tohoto prostoru aplikací většinou argumentují nejasnými standardy, až příliš rychlým vývojem osobních počítačů a jejich systémového programového vybavení, nezaručenou spolehlivostí, nestabilitou, a problematickou odezvou v reálném čase. Přednostně prosazují do těchto míst úzce specializované řídicí systémy PLC (Programable Logical Controler), CNC (Computer Numeric Control), kompaktní jedno a více smyčkové regulátory a další typické prostředky průmyslové automatizace.

Zastánci nasazování PC do oblasti průmyslové automatizace naopak zmiňují jejich cenovou i fyzickou dostupnost, vybavení kvalitními podsystémy pro komunikaci s člověkem, širokou nabídku rozšiřujících modulů a periférií, relativně vysokou míru všeobecně dostupných informací o systémech, nabídku vývojových prostředí pro tvorbu aplikací, funkčních softwarových komponent i hotových aplikací.

Aniž bychom se zde pokoušeli spor obecně soudit, je zřejmé, že zastánci obou názorů mají do určité míry pravdu a že východiska je třeba hledat opakovaně v zohledňování detailních podmínek konkrétních situací. Je také možné uvažovat pro daný případ o kompromisní kombinaci obou typů prostředků, která potlačí nevýhody a zvýrazní výhody každého z nich. Z vyjmenovaných „pro“ a „proti“ je také patrné, že svůj podíl na

nejednoznačném přijetí počítačů PC pro tuto významnou aplikační oblast má jak technické, tak programové vybavení systému.

Určitým kompromisem na úrovni technického systémového vybavení, který ale nic zásadního neřeší, jsou vyráběné varianty počítačů PC, které se svým zejména mechanickým provedením přibližují průmyslovým zařízením. Takové systémy mají lépe odrušený a zabezpečený napájecí zdroj, mají kvalitnější systém ventilace, robustnější konektory, lépe kryté jednotky pro výměnné disky, šasi kompatibilní se skříněmi pro průmyslovou elektroniku a některé další méně podstatné úpravy. Cena takových počítačů bývá 2 až 3 násobkem ceny podobné sestavy provedené standardně.

V oblasti systémového programového vybavení také neexistuje pro PC žádné snadné řešení. Využití operačních systémů MS Windows nebo Linuxu je v systémech, které vyžadují rychlé, přesné a spolehlivé reakce na vnější podněty, problematické. Bez omezení se neobejde ani řešení tak základní úlohy jako je provádění výpočtů v pravidelném časovém rastru. Dostupné alternativy k MS Windows a k Linuxu, které potřebné parametry mají, jsou řádově dražší a nenabízejí tak širokou sadu ovladačů a další podpory pro periférie a integrované podsystémy.

S vědomím, řady potenciálních problémů, které vycházejí ze samé podstaty počítačů této kategorie a které vedou na různá omezení a kompromisy ve výsledném řešení, zůstávají počítače PC vybavené operačním systémem typu MS Windows nejméně jednou z rovnocenných alternativ výpočetního prostředku, kolem kterého může být celá aplikace automatizovaného měření projektována. S ohledem na tento cíl je tedy účelné zabývat se různými způsoby jak osobní počítač doplnit o technické a programové prostředky umožňující příjem resp. generování signálů ze snímačů resp. pro akční členy.

Existují dva zásadně odlišné způsoby jak počítačem PC zpracovávat vnější signály. První způsob předpokládá doplnění počítače o zásuvný modul připojený k systémové sběrnici počítače, kterou je dnes nejčastěji sběrnice PCI. U notebooků, kde není systémová sběrnice z mechanických důvodů běžně k dispozici, plní do určité míry tuto funkci rozhraní PCMCIA. Druhý způsob využívá některého z instalovaných standardních vnějších rozhraní počítače (sériová asynchronní rozhraní COM1, COM2, paralelní rozhraní LPT, síťové rozhraní Ethernet, USB, PS/2, Bluetooth, interface pro připojení multimediálních zařízení IEEE 1394 (FireWire), infračervené rozhraní IrDA, ...).

2.1 Měření pomocí zásuvných modulů

Zásuvné moduly (rozšiřující karty) se umísťují do připravených pozic v počítači. Pozice jsou opatřeny konektorem, který zajišťuje připojení vloženého modulu k systémové sběrnici počítače, a tedy i možnost výměny informací mezi modulem a procesorem, případně přímo mezi modulem a pamětí počítače. Systémová sběrnice počítačů PC pro připojení zásuvných modulů prošla vývojem od výchozí sběrnice ISA (Industry Standard Architecture) navržené firmou IBM v roce 1980, viz [2.1], přes EISA (Extended Industry Standard Architecture), VLB (Video electronics standard association Local Bus) až po současný standard - sběrnici PCI (Peripheral Component Interconnect), která má ve srovnání se sběrnicí výchozí řádově vyšší datovou propustnost, viz [2.2]. Se sběrnicemi EISA a PCI lze ještě v současnosti uvažovat při návrhu rozšíření sestavy počítače, i když sběrnice EISA je vhodná jen pro méně náročné aplikace a je také stále problematičtější z hlediska dostupnosti základních desek, které ji obsahují, i samotných rozšiřujících modulů, které jsou pro ni vyrobeny. První specifikace PCI vznikla v roce 1992, v roce 1993 její revize definovala PCI konektor a PCI rozšiřující desky. Poslední revize specifikace definovala provoz sběrnice s frekvencí 66 MHz, avšak většina standardních PCI prvků v současnosti pracuje s frekvencí poloviční, tedy jeden sběrniceový přenos trvá 30 ns. PCI je v současnosti nejrozšířenější systémovou sběrnicí pro pracovní stanice a servery, i jiných typů než jsou ty, které vycházejí z počítače PC od firmy IBM.

Pro měřicí aplikace se nabízí velké množství typů karet s AD převodníky. Podle požadavků na přesnost a rychlost měření analogových vstupů jsou používány převodníky s postupnou aproximací, integrační, sigma-delta a paralelní, viz např. nabídka firmy Omega v [2.3]. Karty, u kterých objem digitalizovaných dat za jednotku času přesahuje datovou propustnost systémového rozhraní, mají integrovanou vyrovnávací paměť pro dočasné uložení dat změřených za určitý časový úsek. V takovém případě jsou naměřená data přenášena do systému až po skončení vlastního měření. Takto pracují např. karty, které mohou nahradit digitální osciloskop. Zásuvné moduly s AD převodníky bývají vybaveny vstupním multiplexorem, který dovoluje postupné měření většího počtu vstupních signálů jedním časově sdíleným AD převodníkem. Vyžaduje-li měřicí aplikace přesně synchronní vzorkování dvou a více vstupních kanálů, je nutno, aby na kartě byly nezávisle pracující, avšak synchronně aktivované AD převodníky nebo alespoň vzorkovací zesilovače.

Kanály měřicích karet jsou většinou uzpůsobeny pro vstup napětíových signálů, rozsah vstupního signálu bývá volitelný mezi několika variantami (0-10V, 0-5V, -10V-+10V, ...)

nebo mají vstupní zesilovač s programovatelným zesílením. Méně běžné jsou karty se vstupy přizpůsobenými pro přímé připojení výstupních signálů snímačů fyzikálních veličin (odporový snímač teploty, termočlánek, ...).

Některé rozšiřující karty pro počítače PC určené pro měření jsou vybaveny dalšími funkčními bloky, které mohou být v měřicích aplikacích využity. Takto vybavené karty se pak označují jako „multifunkční“. Častým požadavkem při měření je přítomnost zdroje přesných časových okamžiků s možností odvodit od nich začátek AD převodu nebo aktivovat přerušení systému. Tuto funkci obvykle zastane integrovaný obvod – programovatelný čítač/časovač typu 8253. Dalším funkčním blokem, kterým bývají měřicí karty vybaveny, je DA převodník. Je významný zejména pro automatizované měřicí úlohy pro zajištění interakce mezi měřenou soustavou a výpočetním prostředkem, který měření vyhodnocuje a řídí. Počet DA kanálů na kartě bývá vzhledem k počtu AD kanálů nízký, protože každý DA kanál vyžaduje kompletní obvodovou realizaci. Alternativou k DA kanálům jsou generátory impulsních signálů s šířkovou modulací (PWM - Pulse Width Modulation), jejich význam a možnosti využití jsou podobné jako u DA kanálů. Kromě analogových vstupů a výstupů bývají na multifunkčních kartách také binární vstupní a výstupní signály, které rovněž mohou být prostředkem pro zajištění interakce mezi počítačem a procesem měření.

Vlastní konstrukce rozšiřujících karet pro sběrnici PCI je možná s použitím integrovaného řadiče pro periferní desky PCI, který v sobě má stavový automat řídících protokolů. Komplikací je nutnost vybavit desku číslem, tzv. 'PCI Device ID', které musí být jedinečné. Přidělit jej má právo jen sdružení, 'PCI Special Interest Group'. Možným kompromisním řešením pro malé vývojářské firmy a konstruktéry je např. modul nabízený českou firmou Tedia, který je v podstatě převodníkem mezi sběrnicí PCI a jednodušším standardním rozhraním pro přídatné moduly, které může být typu ISA nebo PC/104. Bližší informace jsou uvedeny na webové adrese [2.7].

Pro měřicí aplikace jsou také dostupné zásuvné moduly pro připojení absolutních nebo inkrementálních snímačů polohy a dalších typů snímačů, které nemají na výstupu analogový signál. Pro řešení úloh, ve kterých se na hodnotu měřené veličiny usuzuje z obrazové informace, se používají rozšiřující karty pro zachytávání videosignálu z černobílých či barevných kamer. V kapitole 6 této práce je popsána měřicí aplikace, ve které se měří tloušťka průhledné vrstvy nanesené na rovinné sklo. Metoda pracuje s obrazovou informací z televizní černobílé kamery a pro digitalizaci videosignálu se používá zásuvná karta typu

DT 3155 od firmy Data Translation připojená na sběrnici PCI osobního počítače. Bližší informace k této kartě a k dalším zásuvným kartám vhodným pro měřicí úlohy, viz [2.6].

Zpracovávat analogové vstupní a výstupní signály je přirozenou funkcí také všech typů obecně rozšířených zvukových karet. Jejich některá použití pro měřicí aplikace jsou známa a zveřejněna na Internetu, avšak tato řešení většinou neopouštějí domácí experimenty nebo studentské projekty.

Uvnitř počítačů PC jsou v bezprostřední blízkosti zásuvným kartám intenzivní zdroje rušení (spínaný napájecí zdroj počítače, rychlé cykly počítačových sběrnic, ...). Také napájecí napětí, které je v PC pro zásuvné karty k dispozici, ne vždy vyhovuje svojí velikostí a přítomností rušivých složek požadavkům pro napájení přesných analogových obvodů.

2.2 Měření pomocí standardních rozhraní

K výbavě počítačů PC vždy patřila univerzální vnější rozhraní, jejichž prostřednictvím počítač komunikuje se svým okolím, vyměňuje si informace se svými periferiemi nebo s jinými počítači. Pro měřicí aplikace jsou standardní počítačová rozhraní jednou z možností, jak dostat naměřená data do počítače a naopak jak počítačem na měřenou soustavu a měřicí zařízení působit. Typicky jsou standardní rozhraní v počítačích PC realizována podsystémy se specializovanými řadiči, které na jedné straně komunikují se systémem a na druhé straně končí konektorem na skříní počítače, a fyzicky tak vytvářejí vlastní rozhraní.

Komunikační rozhraní v zařízení, které komunikuje s PC, bývá řešeno analogicky. Zařízení má v sobě prakticky vždy také procesor, počítač nebo mikropočítač, který řídí jeho funkce, a řadič, který vytváří kompatibilní rozhraní pro komunikaci s PC. Mikropočítače, kterými se taková spolupracující zařízení osazují, mají často řadič rozhraní integrovaný přímo na svém čipu. Programové řešení rozhraní na úrovni instrukcí mikropočítače, tedy bez specializovaného řadiče, je u některých rozhraní s menší průchodností dat také možné, ale používá se jen výjimečně.

Vnější zařízení počítače, kterým se rozšiřují jeho možnosti do oblasti měření, někdy označované jako měřicí ústředna, tedy obvykle obsahuje řídící mikropočítač, AD převodníky pro převod přicházejících analogových signálů na data, DA převodníky pro generování analogových signálů z dat a řadič rozhraní, který zajistí přenos dat mezi mikropočítačem a počítačem PC. Řídící mikropočítač řídí AD převodníky, tedy adresuje multiplexor, iniciuje AD převod, vyjímá data z AD převodníku, předzpracovává je a předává řadiči a k odeslání do PC. Pro měřicí aplikace je významné, že AD převodník je řízen mikropočítačem ve vnějším zařízení, ve kterém lze jednoduchými prostředky zajistit jeho přesné a spolehlivé časování, což obecně není snadné v PC s operačním systémem orientovaným na komfort uživatele. V opačném směru toku informací mikropočítač vyjímá data, která přišla z PC, z řadiče rozhraní a předává je DA převodním k rekonstrukci výstupních analogových signálů.

Jedním z vnějších rozhraní počítačů je asynchronní sériové rozhraní. Patří k nejstarším, a je tedy technicky velmi dobře podporované nejen ze strany PC, ale také mnoha mikropočítačů od různých výrobců. V počítačích PC jsou přímo systémem podporována až 4 tato rozhraní, se speciálními řadiči na zásuvných kartách jich může být i několik desítek. Rozhraní je znakově orientované, nejmenší jednotkou dat při přenosu je jeden znak. Skládá se z 5-8 bitů datových a 2-4 bitů systémových. Maximální přenosová rychlost pro standardní řadič v PC je 115 200 bps (bitů za sekundu). Přenos může být zabezpečen paritou. Pro

realizaci fyzické vrstvy tohoto rozhraní existuje několik standardů. Asynchronní sériová rozhraní PC standardně vyhovují doporučení RS 232, které umožňuje duplexní přenos mezi dvěma počítači na vzdálenost několik desítek metrů. Jiný standard, který se používá v průmyslové automatizaci, má označení RS 422, ten také umožňuje duplexní provoz mezi dvěma systémy, jejich vzdálenost může dosahovat až jednotek kilometrů. Další standard - RS 485 vytváří možnost sestavit sériovou sběrnici a komunikovat tak v poloduplexním režimu mezi více systémy opatřenými identifikačním prvkem - adresou. Výkonnou průmyslovou sběrnici založenou na fyzické vrstvě podle doporučení RS 485 je Profibus. Standardy RS 232, RS 422 a RS 485 (s omezením) lze mezi sebou vzájemně převádět pomocí převodníků.

Paralelní rozhraní bylo u původních počítačů PC jen jednosměrné a určené pro přenos dat z počítače do tiskárny, výměna dat byla řízena jednoduchým dialogem obou komunikujících zařízení (handshaking). V současnosti se počítače PC dodávají standardně s rozšířenou variantou paralelního rozhraní označovanou podle odpovídajícího standardu IEEE 1284. Tato varianta je již obousměrným univerzálním rozhraním řízeným stavovým automatem a schopným pracovat v několika módech. Ve srovnání se sériovým asynchronním rozhraním je nevýhodou paralelního rozhraní větší počet vodičů - 8 datových, 4 řídící a 5 stavových, naopak výhodou je datová propustnost paralelního rozhraní, která může být až 10x vyšší. Toto rozhraní je stále používáno zejména pro komunikaci s tiskárnami, i když komplexnějším způsobem, s podporou Plug&Play a dalšími funkcemi. V měřicích aplikacích je paralelní rozhraní méně časté než sériové, jako příklad jeho použití lze uvést řádkové kamery vhodné pro geometrická a fotometrická měření od firmy Eureka, viz [2.4].

USB (Universal Serial Bus) je moderní sériové rozhraní, v současné době definované pro tři rychlosti přenosu, 480 Mbps (mega bit za sekundu), 12 Mbps a 1.5 Mbps. Rozhraní lze větvit pomocí rozbočovačů – hubů, k jednomu USB portu tak lze připojit až 127 různých zařízení. Rozhraní je čtyřvodičové, dva vodiče jsou pro přenos dat, na dva další je přivedeno stejnosměrné napětí 5 V, kterým mohou být zařízení s malou spotřebou napájena, vzdálenost mezi dvěma zařízeními nesmí překročit 5 m. Výhodou USB je podpora systému Plug&Play a možnost připojovat a odpojovat zařízení za chodu PC.

Síťové rozhraní Ethernet je určeno pro připojení počítače do lokální počítačové sítě LAN (Local Area Network). Pro přenos informací po sítích tohoto typu se používají standardy a protokoly, které mohou být s výhodou využity také v měřicích aplikacích, v nejjednodušším případě pro přenos naměřených dat mezi měřicí ústřednou a počítačem PC.

Měřicí aplikace je pak z pohledu přenosu dat lokální počítačovou sítí se dvěma počítači. Rychlost přenosu dnes běžně používaných adaptérů pro rozhraní Ethernet je 100 Mbps při vzdálenosti počítačů do 100 m. Přenos dat je organizován po paketech, jejich velikost, tvar a způsob zpracování je dán použitým protokolem. Při výběru protokolu bývá omezujícím faktorem jeho realizovatelnost na straně měřicí ústředny. Vhodnými protokoly jsou TCP (Transmit Control Protocol) a UDP (User Datagram Protocol), podrobněji viz [2.5], které jsou standardní v technice počítačových sítí a na straně PC je pro ně široká podpora. Zpracování nespojového protokolu UDP je relativně rychlé a jednoduché, avšak tento protokol není schopen podat informaci, že paket byl doručen do místa určení, a tato funkce, pokud je požadována, musí být zajištěna na úrovni aplikace. Protokol TCP je spojový, po dobu spojení zajišťuje duplexní výměnu paketů mezi dvěma počítači v síti a poskytuje kompletní zajištění přenosu. Realizace tohoto protokolu je náročná, vyžaduje určitý výpočetní výkon a jeho současné provozování spolu s dalšími funkcemi aplikace na malém procesoru měřicí ústředny může být problematické. Pro stranu měřicí ústředny jsou pro tyto vyjmenované protokoly dostupné moduly, které v sobě zahrnují univerzální jednočipový mikropočítač, řadič síťového rozhraní a odpovídající programové vybavení. Začínají se objevovat také jednočipové mikropočítače s kompletním síťovým rozhraním integrovaným na čipu (Maxim). Obě tato řešení typicky nabízejí konstruktérovi měřicí ústředny aplikační rozhraní pro základní komunikaci po síti prostřednictvím protokolů TCP a UDP. Některé moduly nabízejí i kompletní implementaci protokolů vybraných internetových služeb (e-mail, www), které pak dovolují učinit z měřicí ústředny účastníka Internetu. V takovém případě však prostředky, které se pro přenos dat používají, jsou sdíleny více aplikacemi a uživateli, přestávají být plně k dispozici pro danou měřicí aplikaci, vznikají kolize, klesá efektivní rychlost přenosu a mizí záruka pro dobu odezvy.

Digitální univerzální rozhraní počítačů PC mají pro měřicí aplikace ve srovnání se zásuvnými kartami tu výhodu, že je při jejich použití snadnější vřadit do měřicího řetězce galvanické oddělení. To může být významné z hlediska bezpečnosti a rušení. Přesné analogové obvody, které jsou citlivé na indukované rušení nebo na rušení přicházející napájením, spolu s AD převodníkem lze umístit do prostředí těmito rušivými jevy méně zatíženého a naměřená data přenést např. přes optické oddělovače.

V kapitolách 3 a 7 této práce jsou popsány měřicí aplikace, které pro přenos naměřených dat používají asynchronní sériové rozhraní RS 232. Řada měřicích převodníků pro měření tlaků v pneumatických soustavách, které jsou popsány v kapitole 3, v současné

době pokračuje ověřováním prvního vzorku dalšího zařízení určeného k podobným účelům, avšak s rozhraním USB. Podrobný popis této verze převodníku není do práce z časových důvodů zahrnut, v kapitole 3 je jen krátká zmínka a fotografie prototypu.

Také měřicí zařízení popisované ve čtvrté kapitole této práce přenáší naměřené informace do počítače PC pomocí asynchronního sériového rozhraní. Vnější měřicí periférie je navržena jako jed nouúčelový mikropočítač, který zpracovává videosignál z kamery. Ze série pohledů na polotovar lékařského teploměru v něm určuje výšku sloupce rtuti.

Literatura

- [2.1] Solari, E.: ISA & EISA Theory and Operation. Annabooks 1992. ISBN 0929392159.
- [2.2] Informační stránka o sběrnici PCI: <http://www.techfest.com/hardware/bus/pci.htm>.
- [2.3] Data Acquisition Systems Handbook. Vol. 28, Newport, Omega, 1992.
- [2.4] Domovská stránka firmy Eureka: <http://www.eureca.com>.
- [2.5] Dostálek, L.-Kabelová, A.: Velký průvodce protokoly TCP/IP a systémem DNS. 2. aktualizované vydání, Computer press, Praha 2000. ISBN 8072263234.
- [2.6] Domovská stránka firmy Neovision: <http://www.neovision.cz>.
- [2.7] Domovská stránka firmy Tedia: <http://www.tedia.cz>.

3 Měření tlaků v pneumatických soustavách

Tato kapitola vychází ze zkušeností získaných několikaletou spoluprací s vývojovým, výrobním a servisním pracovištěm ČKD Praha, při níž byla realizována řada zkušebních stavů pro zkoušky a měření parametrů základních prvků a ucelenějších částí pneumatických brzdových systémů kolejových vozidel. Z celého měřicího řetězce zde není diskutována problematika samotných pneumatických soustav, ani těch jejich vlastností, které mají vliv na základní parametry měření jako je počet vstupních kanálů, rozlišení a frekvence měřicích vzorků. Specifikace těchto parametrů je plně v kompetenci uvedeného spolupracujícího pracoviště a stejně tak tomu je i s řešením otázky volby použitých snímačů. Na tomto místě je věnována pozornost jen elektronické části měřicího řetězce a některým aspektům následného počítačového zpracování získaných dat.

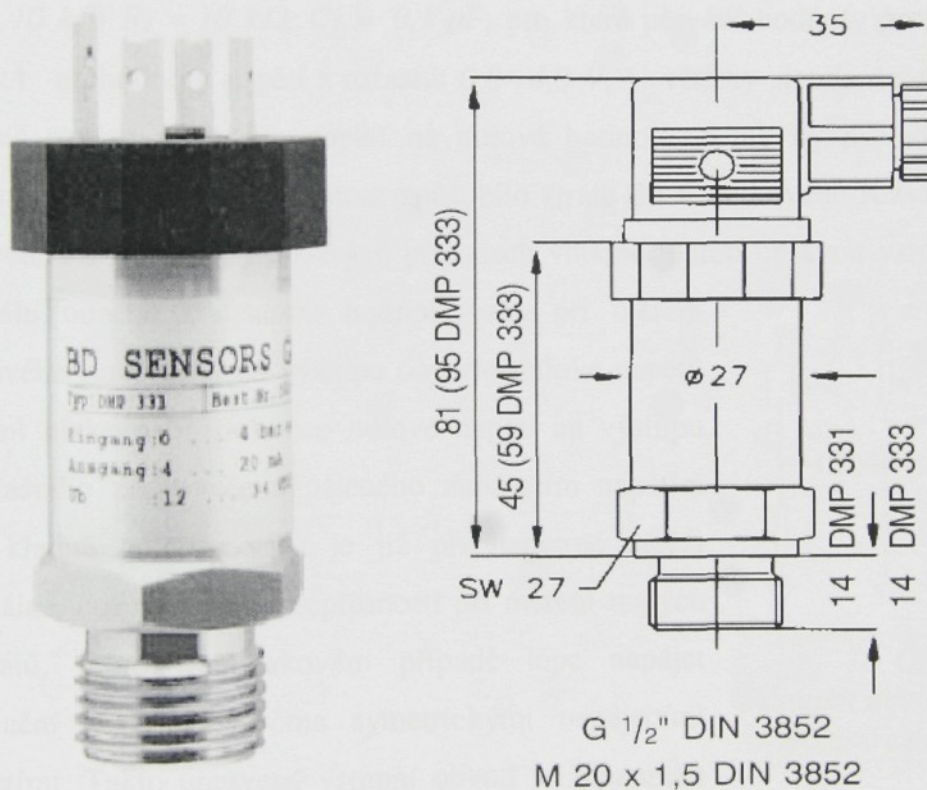
Na měřicí systém každého konkrétního zkušebního stavu byly specifikovány přesné požadavky. Ty vycházely zejména z vlastností měřené soustavy, ze závazných předpisů pro metodiku provádění zkoušek, z organizačních předpisů a ze zvyklostí pracoviště. Požadavky byly obecně různé, lze však vybrat a shrnout některé společné základní vlastnosti všech dosud realizovaných měřicích systémů:

- snímače tlaku s normalizovaným výstupním signálem 4-20 mA,
- současná (ne synchronní) měření na více vstupních kanálech,
- na jednotlivých kanálech ne jednotná frekvence vzorkování,
- jednorázová měření s délkou několika sekund až minut,
- rozlišení AD převodníků nejméně 10 bitů,
- standardní sériové asynchronní rozhraní,
- zpracování měřených dat na počítači typu PC (grafy, tisk, archiv, ...).

Uvedeným požadovaným vlastnostem poloautomatického měřicího zařízení lze z hlediska mechanické konstrukce nejlépe vyhovět samostatným kompaktním přístrojem s vlastním síťovým napájením, který na jedné straně přijímá analogové signály ze snímačů a na druhé straně vysílá data do standardního vnějšího rozhraní počítače PC. Vstupní obvody jednotlivých kanálů měřicího systému vycházejí z vlastností výstupního signálu použitých snímačů. V úloze jsou používány tlakové snímače s polovodičovým tenzometrickým můstkem s integrovaným zesilovačem a převodníkem na proudový výstup.

3.1 Použité snímače a jejich výstupní signály

Elektrické proudové rozhraní snímače je tvořeno jen dvěma vodiči, které zajišťují jak cestu pro výstupní signál, tak také napájení měřicího můstku a vnitřní elektroniky celého snímače. V širokém rozsahu napájecího napětí U_{cc} (12 – 30 V) je hodnota proudu procházejícího snímačem lineárně závislá na hodnotě vstupního tlaku. Jmenovitému rozsahu hodnot vstupního tlaku $0 - p_{MAX}$ odpovídá unifikovaný rozsah proudového signálu 4–20 mA. Příklad řešení mechanické konstrukce takového snímače je pro ilustraci znázorněn na obr. 3.1, jedná se o výrobek firmy DB Sensors, bližší informace, viz odkaz [3.1].



Obr. 3.1

Fotografie a náčrt piezorezistivního snímače tlaku s integrovaným zesilovačem a proudovým převodníkem

V každém z měřicích kanálů je proudový signál snímače nejprve pomocí snímacího odporu převeden na signál napěťový. Napěťové signály se lépe zpracovávají, protože jsou pro ně uzpůsobeny vstupy snad všech integrovaných multiplexorů, analogo-digitálních

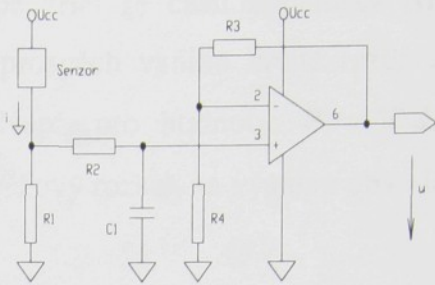
převodníků, filtrů a dalších obvodů, viz [3.2], [3.3]. Ihned po převodu signálu na napětí prochází signál pasivním filtrem s charakteristikou dolní propusti, který zajistí potlačení rušení případě superponovaného k užitečnému signálu ze snímače (rušení prakticky nebylo zjištěno, ale v jiném prostředí ho nelze vyloučit) a je zesílen. Obvodové schéma vstupního obvodu jednoho kanálu je znázorněno na obr. 3.2 a platí pro něj převodní vztah:

$$u = i \cdot R_1 \cdot (1 + R_3/R_4) \tag{3.1}$$

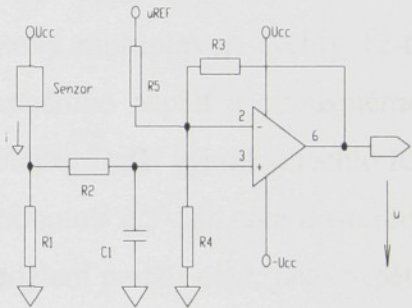
Uvedený obvod byl opakovaně použit s hodnotami prvků $R_1 = 100 \, \Omega$, $R_2 = 100 \, k\Omega$, $R_3 = 10 \, k\Omega$, $R_4 = 10 \, k\Omega$, $C_1 = 0,1 \, \mu F$, pro které převádí hodnoty proudu z rozsahu 4 - 20 mA na hodnoty napětí z rozsahu 0,8 - 4,0 V. U většiny standardních AD převodníků začíná rozsah vstupních napětí na nulové hodnotě, a tak by přivedení signálu takto posunutého do kladných hodnot způsobilo ztrátu 20 % celkového rozsahu dynamiky AD převodníku. Proto je v takových případech vhodné malou úpravou vstupního obvodu od signálu odečíst konstantní hodnotu, aby při měření nulového tlaku bylo na výstupu obvodu nulové napětí. Velmi nízké nebo dokonce nulové napětí na výstupu operačního zesilovače napájeného napájecím napětím jen kladné polarity však je již při nepatrné zátěži nereálné, což způsobuje nepřesnosti při měření malých signálů, proto je v takovém případě lépe napájet operační zesilovač dvěma symetrickými napájecími napětími. Takto upravený vstupní obvod je znázorněn na obr. 3.3. Platí pro něj převodní vztah:

$$u = i \cdot R_1 \cdot (1 + R_3/R_4 + R_3/R_5) - u_{REF} \cdot R_3/R_5. \tag{3.2}$$

Např. s hodnotami parametrů: $R_1 = 50 \, \Omega$, $R_3 = 7,5 \, k\Omega$, $R_4 = 4 \, k\Omega$, $R_5 = 30 \, k\Omega$, $u_{REF} = 2,5 \, V$ převádí přesně proudový rozsah 4 - 20 mA na napěťový rozsah 0 - 2,5 V. Při takto přesném převodu rozsahu snímače na rozsah AD převodníku hrozí nebezpečí, že vlivem odchylky hodnoty jednoho nebo více z použitých prvků od nominální hodnoty se rozsah snímače na jednom či na obou koncích do rozsahu AD převodníku nevejde a část



Obr. 3.2
Vstupní obvod pro proudový snímač



Obr. 3.3
Vstupní obvod pro proudový snímač s posunutím nuly

rozsahu snímače nebude možné měřit. Bývá proto lépe zřící se části dynamiky AD převodníku, např. symetricky 2% na každé straně, ve prospěch vzniku určité rezervy, která omezí pravděpodobnost zmíněného nebezpečí. Např. pro hodnoty: $R_1 = 50 \Omega$, $R_3 = 10 k\Omega$, $R_4 = 5,6 k\Omega$, $R_5 = 43 k\Omega$, $u_{REF} = 2,5 V$ je napěťový rozsah na výstupu obvodu 0,02 - 2,445 V.

3.2 Podsystem pro digitalizaci analogových signálů

Upravené napěťové signály jsou přivedeny na vstupy multiplexoru, který působí jako řízený bezkontaktní přepínač a připojuje signál z jednoho svého, aktuálně vybraného vstupu ke svému jedinému výstupu. Výběr signálu, který se tak dostává dále ke zpracování je prováděn binárními vstupy multiplexoru, standardně se používá binární váhový kód. Řízení přepínání měřicích vstupů je jedním z úkolů pro mikropočítač, který řídí celý přístroj. Prakticky může být multiplexor řešen jako samostatný integrovaný obvod nebo tento funkční celek může být součástí jediného IO spolu s dalšími funkčními celky.

Příkladem takových komplexních IO je řada AD 7890 od firmy Analog Devices, viz odkaz [3.4], z níž byly některé výrobky v některých zde zmiňovaných měřicích úlohách použity. Tyto IO v sobě obsahují již zmíněný osmikanálový multiplexor, rychlý 12-ti bitový AD převodník s postupnou aproximací, zdroj referenčního napětí a obousměrné synchronní sériové rozhraní pro připojení řídicího mikropočítače. Další výhodou těchto IO je, že integrovaný zdroj referenčního napětí s nominální hodnotou 2,5V je také dostupný na jednom z vývodů součástky a lze jej po impedančním oddělení použít např. jako napětí u_{REF} u výše zmíněného vstupního obvodu pro proudové snímače, pro napájení měřicích můstků, ...

Na obr. 3.4 je znázorněna vnitřní struktura IO. Řada AD 7890 obsahuje konkrétní typy: AD 7890-2, AD 7890-4 a AD7890-10, které se vzájemně liší jen napěťovými rozsahy vstupních signálů na analogové straně ($0 - 2,5V$, $0 - 4,096V$ a $-10 - +10V$). Na digitální straně nabízí AD 7890 několik variant sériové komunikace se spolupracujícím zařízením, obvykle mikroprocesorem, signálovým procesorem či jednočipovým mikropočítačem. Všechny varianty lze rozdělit do dvou skupin podle směru signálu hodin $SClk$ sériového synchronního rozhraní na případ, kdy přenášená data jsou taktována hodinovým signálem generovaným samotným IO AD 7890, a na případ, kdy synchronizační hodinový signál vychází z mikropočítače. Zatímco první skupina

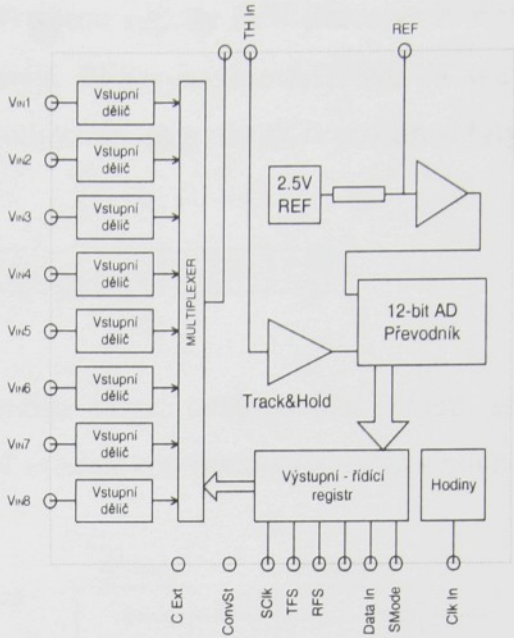
(MASTER, Self-Clocking) je připravena spíš pro signálové procesory, druhá (SLAVE, External Clocking) je vhodnější pro obecné mikropočítače, které nebývají vybaveny speciálním sériovým rozhraním tohoto druhu. Základní volba se provádí vstupem *SMode*: všechny zde uváděné případy pracují s rozhraním typu SLAVE, což vyžaduje přivedení úrovně *log.1* na tento vstup.

Signál *SClk* je společným taktovacím signálem pro čtení a pro zápis dat. Další signály pro zápis do řídicího registru AD 7890 jsou *TFS* (Transmit Frame Synchronization) a *DataIn*. Po závěrné hraně signálu *TFS* se na *DataIn* očekává posloupnost nejméně šesti řídicích bitů taktovaná závěrnou hranou signálu *SClk*. Posloupnost je třeba ukončit návratem *TFS* na klidovou úroveň *log.1*. Posloupnost je tvořena bity:

A_2	A_1	A_0	CONV	STBY	X
-------	-------	-------	------	------	---

Bity A_2 , A_1 a A_0 adresují multiplexor a vybírají tak jeden z osmi analogových vstupů pro AD převod. Zápis *log.1* na pozici bitu *CONV* startuje AD převod, zápis *log.0* na toto místo povoluje startovat AD převody náběžnými hranami impulsů přiváděnými na vstup *ConvSt*. Sedmibitová sekvence řídicích bitů s *log.1* pro pozici *STBY* převede IO AD7890 do pohotovostního stavu, ve kterém je omezena jeho funkce a snížena spotřeba napájecího proudu, naopak zápis *log.0* na bit *STBY* převede obvod do provozního režimu.

Všechny řídicí bity ze zapsané posloupnosti uplatní svůj význam v jeden okamžik, po zápisu všech bitů. V případě, že se jednou řídicí posloupností mění vstup multiplexoru a současně se startuje AD převod, je nezbytné mezi vstup *CExt* a zem zapojit externí kondenzátor, který je součástí vnitřního časovacího obvodu, který určuje časovou prodlevu, o kterou je každý start AD převodu posunut. Vznikne tak časový prostor potřebný pro ustálení přepnutí multiplexoru a vzorkovacího zesilovače. Další důvod pro takovou prodlevu vzniká, zařadíme-li mezi výstup *MUXOut* a vstup *SHIn* např. pasivní filtr s integračním RC článkem, pak je třeba zohlednit i jeho dynamiku.



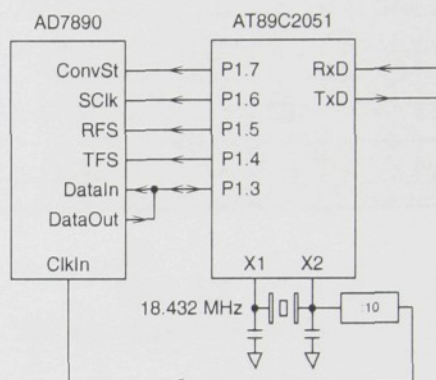
Obr. 3.4
 Vnitřní struktura IO AD 7890 –
 podsystému pro digitalizaci
 analogových signálů

Pro čtení registru výstupních dat AD převodníku jsou signály *RFS* (Receive Frame Synchronization) a *DataOut*. Po závěrné hraně signálu *RFS* vybavuje AD7890 na svůj datový výstup *DataOut* s každou náběžnou hranou hodinového signálu *SClk* postupně bity 16-ti bitové výstupní posloupnosti:

0	A ₂	A ₁	A ₀	D ₁₁	D ₁₀	D ₉	D ₈	D ₇	D ₆	D ₅	D ₄	D ₃	D ₂	D ₁	D ₀
---	----------------	----------------	----------------	-----------------	-----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

První bit posloupnosti má hodnotu *log.0*, pak následuje adresa analogového vstupu, ze kterého byl převod uskutečněn a 12-ti bitový binární váhový kód hodnoty vzorku s bitem s nejvyšší váhou na prvním místě.

Při časově optimalizované obsluze převodníku lze dosáhnout periody vzorkování asi 8.5 μ s. Takové propustnosti lze dosáhnout jen při spolupráci převodníku s procesorem vybaveným hardwarovou jednotkou odpovídajícího synchronního rozhraní. Pokud je obsluha realizována programově nespecializovanými standardními vstupními a výstupními signály jednočipového mikropočítače, např. typu 8051, je zkracování periody vzorků omezeno zejména dobou potřebnou pro provádění instrukcí.



Obr. 3.5
Příklad propojení
převodníku AD 7890
s mikropočítačem typu
8051

3.3 Zpracování digitalizovaných dat a jejich přenos do počítače PC

Jak již bylo zmíněno, možností, jak pracovat s převodníkem AD 7890 v základním režimu SLAVE je více, liší se způsobem startu AD převodu, zda zápis do řídicího registru a čtení datového registru probíhá současně či po sobě, ... Pro aplikace měření tlaků v pneumatických soustavách byla navržena a sestavena taková kombinace možností, která preferuje přesnost měření před jeho rychlostí, tj. jsou vyloučeny veškeré operace se sériovým rozhraním během vlastního AD převodu (ovlivňování měření průnikem signálu *SClk*) a AD převod je iniciován signálem *ConvSt* po dostatečné časové prodlevě pro ustálení multiplexoru a vzorkovacího zesilovače (cca 5 ms). Výsledné použité připojení AD7890 k jednočipovému mikropočítači AT 89C2051 je znázorněno na obr. 3.5, viz také např. [3.5]. Pro propojení podle obr. 3.5 jsou na obr. 3.6 znázorněny průběhy signálů,

které byly generovány a sledovány připojeným mikropočítačem během vykonávání podprogramu pro jeden kompletní cyklus obsluhy AD převodníku. Z obrázku je patrný dopad každé instrukce na průběh signálů

ConvSt, *TFS*, *RFS*, *SClk* a kombinovaného signálu pro přenos dat. Průběhy nejsou zachyceny v přesném časovém měřítku, zkusím je způsobeno, že se předpokládá jednotná délka vykonávání všech instrukcí, což v praxi není splněno. V tomto smyslu by se zobrazeným průběhům více podobaly skutečné průběhy generované některým z nových mikropočítačů s modifikovanou strukturou řadiče, které ve snaze po zvýšení výpočetního výkonu vykonávají řadu instrukcí v malém, konstantním počtu taktů systémových hodin. Uvedený segment programu obsahuje celkem 95 instrukcí. Při

vykonávání programu jednočipovým mikropočítačem typu 8051 s původním jádrem 89 z těchto instrukcí potřebuje k vykonání 12 period oscilátoru a 6 instrukcí potřebuje 24 period. Pro mikropočítačem AT89C2051 řízeným krystalem o frekvenci 18,432 MHz je tak doba vykonávání cca 65 μs. Tato doba ale nemůže být reálnou periodou programově řízeného přístupu k AD převodníku, je jen její spodní mezí, ke které se v závislosti na dalších funkcích mikropočítače lze více či méně přiblížit.

Mikropočítač v celém přístroji vykonává zejména funkci převodníku mezi synchronním sériovým rozhraním AD převodníku a asynchronním sériovým rozhraním počítače PC. Při konfiguraci asynchronního sériového rozhraní byly zvoleny jeho následující parametry: 57 600 Bd, 8 bitů, bez parity a 1 stop bit. Asynchronním sériovým mikropočítačem je periodicky vysílána dávka 8 bytů, která obsahuje informace o čtyřech analogových vstupech AD převodníku. Struktura dávky je znázorněna v tabulce na obr. 3.7, řádky tabulky vyjadřují jednotlivé byty dávky, zápis x.y značí y-tý bit ve 12-ti bitovém slovu odpovídajícímu analogovému vstupu x (vstupy jsou zde číslovány 0, 1, 2 a 3). Ze zobrazené tabulky i z jednoduché kalkulace je patrná určitá nadbytečnost velikosti dávky, pro přenos 48 datových bitů je vyhrazeno místo pro 64 bitů. Důvodem je snaha o

	7	6	5	4	3	2	1	0
1	1	0	0.11	0.10	0.9	0.8	0.7	0.6
2	0	0	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
3	0	0	1.11	1.10	1.9	1.8	1.7	1.6
4	0	0	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0
5	0	0	2.11	2.10	2.9	2.8	2.7	2.6
6	0	0	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0
7	0	0	3.11	3.10	3.9	3.8	3.7	3.6
8	0	0	3.5	3.4	3.3	3.2	3.1	3.0

Obr. 3.7
 Struktura datové dávky

zvýšení robustnosti přenosu a jednodušší formátování dat do struktury před jejím vysláním. Zvýšení robustnosti je dosaženo odlišením prvního bytu dávky od ostatních. Jen u tohoto bytu je na pozici nejvyššího bitu hodnota $\log.1$, u všech ostatních bytů dávky je $\log.0$. Přijímající zařízení se tedy může v toku dávek orientovat v tom smyslu, že dokáže detekovat začátek nové dávky i po případném přerušení vysílání. Pozice druhého nejvýznamnějšího bitu zůstává v tomto případě pro přenos měřených dat nevyužitou, v některých zařízeních byl tento prostor využit pro přenos jiných informací. Při uvedených parametrech rozhraní lze za 1 s přenést teoreticky až 720 dávek s délkou po osmi bytech ($8 \text{ bitů dat} + \text{start bit} + \text{stop bit} = 10 \text{ bitů}$, $10 \text{ bitů} \times 8 \text{ znaků} = 80 \text{ bitů na jednu dávku}$, $80 \times 720 = 57\,600 \text{ bitů}$). Pro další zvýšení robustnosti přenosu je ale lépe alespoň občas, např. po každé dávce ponechat vedení v klidu na dobu vyslání jednoho znaku (10 bitů). Řadič asynchronního rozhraní na přijímací straně tak může příjmem start bitu obnovit synchronizaci, a tak i svoji korektní činnost po případném výpadku synchronizace způsobené např. přerušením spojení.

Se zohledněním uvedeného jevu lze dávky vysílat s frekvencí až 640 Hz , což odpovídá periodě asi $1,5 \text{ ms}$. Z porovnání datové propustnosti obou sériových rozhraní vyplývá, za dobu vyslání jedné dávky dat asynchronním sériovým rozhraním do nadřazeného počítače lze získat asi po čtyřech digitalizovaných 12-ti bitových vzorcích ze čtyř analogových vstupů AD převodníku, tedy ne všechna získaná data lze odeslat do počítače PC. Nadbytečná data lze např. vůbec nepořizovat nebo je lze zapomínat, ale lépe je pro každý vstup ze všech slov získaných během vysílání dávky počítat aritmetický průměr a ten pak použít v následující dávce.

V jiné podobné aplikaci bylo požadováno měřit jeden tlak s frekvencí nejméně 2000 Hz, a sedm dalších tlaků kontrolovat s frekvencí řádově menší. Pro tento účel byla využita stejná deska s AD7890 a AT89C2051, ale jiná je organizace přístupu k AD převodníku a struktura

	7	6	5	4	3	2	1	0
1	1	X ₁	0.11	0.10	0.9	0.8	0.7	0.6
2	0	X ₂	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0

Obr. 3.8
Struktura datové dávky

vysílaných datových dávek. Každá dávka obsahuje pouze 2 byty podle tabulky zobrazené na obr. 3.8. Oba obsahují na nejnižších bitech po polovině celého 12-ti bitového slova prvního měřicího kanálu a synchronizační bit na pozici nejvýznamnějšího bitu. Místa druhého nejvýznamnějšího bitu jsou použita pro postupný přenos informací o všech zbývajících vstupech. Přitom bit X₁ má opět význam pro synchronizaci přenosu a má hodnotu log.1 pouze v té dávce, která na místě bitu X₂ má nejvýznamnější bit datového slova druhého vstupu, tedy bit s označení 1.11. V dalších dávkách se na pozici X₂ střídají postupně bity 1.10, 1.9, ..., 1.1, 1.0, 2.11, 2.10, ..., 7.0. Pro kompletní přenos dat od všech vstupů je tedy potřeba přenést 84 dávek. Frekvence vysílání 2-bytových dávek může být až 2 880 Hz, pokud se během měření upustí od vysílání synchronizační pauzy. Přednostní první měřicí analogový vstup je tedy přenášen s frekvencí 2 880 Hz, ostatních sedm pomocných vstupů s frekvencí 84 x menší, tedy cca 34 Hz.

Pro další měřicí aplikaci (ověřování funkce systému protismyku) byly specifikovány náročnější požadavky na množství, rozlišení a frekvenci měřených dat: celkem osm měřicích vstupů s rozlišením 14 bitů, frekvence měření 2 000 Hz na čtyřech vstupech a 200 Hz na zbývajících čtyřech vstupech, délka měření 120 s. I kdyby se omezilo použití dříve zmíněné synchronizační mezery mezi dávkami, vychází, že za jednu sekundu je třeba přenést asynchronním sériovým rozhraním 2 000 . 20 . 4 + 200 . 20 . 4 = 176 000 bitů. I tato hodnota, která nepočítá se synchronizačními mezerami, je vyšší než 115 200 bps, která je maximální přenosovou rychlostí asynchronních sériových portů jak u počítačů typu PC, tak u mikropočítače typu 8051 (s frekvencí oscilátoru 22,118 MHz), a není proto možné přenášet všechna naměřená data bezprostředně po jejich vzniku, tj. v reálném čase.

Přenášet data pomaleji než jsou při měření pořizována, tzv. v relativním čase má dvě nevýhody. První je technická, mikropočítač u AD převodníku je třeba doplnit o vyrovnávací paměť s dostatečnou kapacitou, do které se všechna data na přechodnou dobu

uloží, pro danou aplikaci vychází paměť RAM o velikosti 2 112 kB. Druhou nevýhodou je složitější organizace měření, pořízení dat má fázi vlastního fyzického měření a následně fázi přenosu dat z paměti převodníku do PC, což vede k tomu, že během vlastního měření není možno na PC sledovat průběh měření, případně do měřeného děje zasahovat, a následná fáze přenosu dat do PC může zejména při často opakovaných měřeních trvat pro obsluhu nepříjemně dlouho, pro danou aplikaci vychází cca 3 - 3,5 min podle množství zařazených synchronizačních prvků. Pro snížení významu obou zmíněných nevýhod byla navržena kombinace přenosu naměřených dat v reálném a v relativním čase.

Řešení se snaží již v průběhu měření přenášet do PC alespoň část dat tak, aby bylo možno kontrolovat jeho průběh. Do vyrovnávací paměti u AD převodníku se přitom ukládá jen ta část dat, kterou z důvodů datové propustnosti sériového rozhraní nebylo možno přenést ihned. Po skončení měření se i tato část dat přenesou do PC, kde jsou rozdělená data zpětně zkompletována a jsou připravena pro následné zpracovávání standardním způsobem. Přechodného snížení objemu dat, která se přenášejí v reálném čase, může být dosaženo snížením šířky slova jednotlivých vzorků, snížením počtu kanálů nebo přenesením menšího počtu vzorků za jednotku času. V dané aplikaci stačilo rozdělit slova 14-ti bitových vzorků na dvě poloviny, dávky takto vysílané v reálném i v relativním čase tak navíc mohou mít formálně shodnou strukturu, během měření se vysílá o každém vzorku sedm nejvýznamnějších bitů a později se tyto údaje upřesní o dalších sedm binárních řádů. V 5-ti bajtové dávce se na každém z prvních čtyř bytů přenášejí sedmibitové informace o jednom ze čtyř 'rychlých' vstupů, na posledním bytu se přenáší informace vždy o jednom z 'pomalých' vstupů. Se synchronizační mezerou po každé čtvrté dávce vychází potřebná přenosová rychlost: 105 000 bps, nejbližší vyšší standardní rychlost je 115,2 kBd.

Požadované rozlišení 14 bitů nedovolilo použít dříve popsany převodník AD 7890, který poskytuje jen 12-bitový AD převod. Místo něj byly použity dva AD převodníky typu AD 7716, každý pro čtyři vstupní kanály. Tento převodník pracuje na zcela jiném principu AD převodu – jedná se sigma-delta převodník. Převodníky pracující na tomto principu mají ve srovnání s převodníky s postupnou aproximací až o deset bitů vyšší rozlišení, jsou přesnější, avšak digitalizované vzorky poskytují v počtu desítek, stovek, maximálně tisíců za sekundu. V době návrhu měřicího zařízení (1998) byl AD 7716 nejrychlejším na trhu dostupným sigma-delta převodníkem, v jednom pouzdře obsahuje čtveřici nezávislých AD převodníků se společným sériovým rozhraním pro obousměrný

přenos dat do/z mikropočítače, při rozlišení 16 bitů umožňuje frekvenci vzorkování přes 2000 Hz. Také jednočipový mikropočítač AT 89C2051, který byl použit ve všech aplikacích bez vyrovnávací paměti, byl nahrazen typem AT 89C51, který poskytuje systémovou sběrnici pro připojení paměti RAM.

Dávka dat není jen prostor pro přenesení dat, ale jejich časová posloupnost také informuje PC o časovém rastru měření. To je významná vlastnost, která se jinak v prostředí operačního systému typu MS Windows řeší obtížně. Tímto způsobem je generování ekvidistantních taktů v délkách řádu milisekund přeneseno z PC do mikropočítače u AD převodníku, kde naopak s jejím řešením není žádný problém. Jednotlivé dávky přicházející do počítače, který je vybaven některým z 32-bitových operačních systémů MS Windows a jsou byte po byte ukládány do vyrovnávací paměti typu fronta. Tato činnost je řízena nižšími službami vlastního operačního systémem a po správném nakonfigurování všech jejich parametrů pracuje přesně a spolehlivě. Aplikační vrstva pak ne nutně synchronně s vlastním měřením, a tedy bez nároku na přesné časování, vybírá z čela fronty jednotlivé byty či celé dávky, přiřazuje jim čas podle pořadí ve frontě a již během měření nebo až po jeho skončení je dále zpracovává, vykresluje grafy, tiskne protokoly, ukládá naměřená data do archívu, ...

3.4 Kalibrace

Při svém vzniku ve snímači a dále pak průchodem analogovou částí měřicího řetězce, multiplexorem a v AD převodníku může být signál zkreslen. Do řetězce se zařazují komponenty se zaručenou velmi malou odchylkou od linearit v celém rozsahu očekávaných hodnot signálu, avšak řada odchylek od jmenovitých hodnot rezistorů a referenčních napětí má vliv na chybu celkového zesílení a offsetu měřicího řetězce. Souhrnné chybové působení řetězce na signál lze pak vyjádřit chybovou lineární transformací:

$$x_1 = a_1 \cdot x + b_1. \quad (3.3)$$

V ideálním případě, tj. když $a_1 = 1$ a $b_1 = 0$, je transformace identitou a řetězec signál lineární chybou nezatežuje. V ostatních případech může být řešením podrobit naměřená data v počítači lineární transformaci:

$$x_2 = a_2 \cdot x_1 + b_2, \quad (3.4)$$

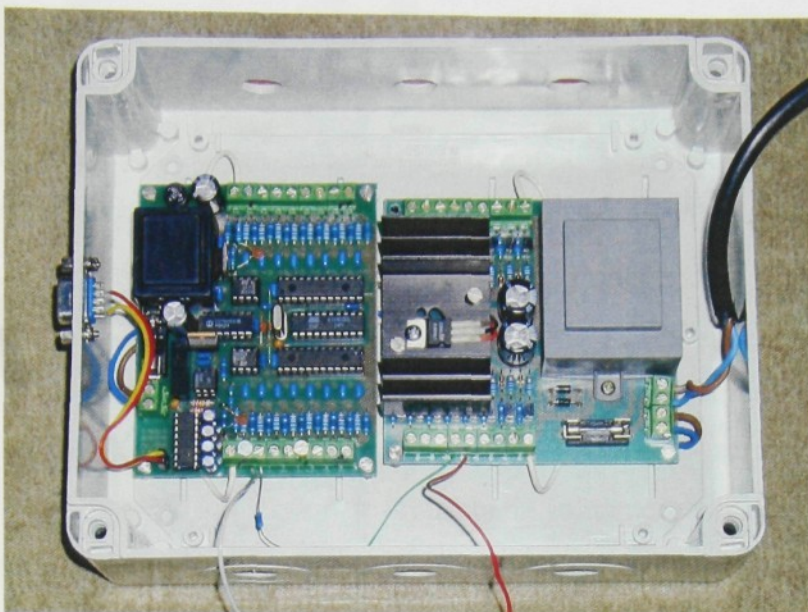
která je k chybové transformaci inverzní, a chybu tak eliminuje. Koeficienty a_2 a b_2 lze určit výpočtem ze známých hodnot koeficientů a_1 a b_1 , nebo kalibrací měřicího kanálu. Kalibrace všech navržených zařízení pro měření v pneumatických soustavách brzdových systémů se provádí pomocí zátěžové pumpy, která generuje tlak s vysokou přesností. Kalibrace se provádí ve dvou bodech: v 10 % a v 90 % měřicího rozsahu. Pro n -bitový AD převodník platí pro výpočet koeficientů a_2 a b_2 vztahy:

$$\begin{aligned}
 a_2 &= 0,8 \cdot (2^n - 1) / (D_{90} - D_{10}), \\
 b_2 &= (2^n - 1) \cdot (0,1 - 0,8 \cdot D_{10} / (D_{90} - D_{10})),
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

kde D_{10} a D_{90} jsou odečtené výstupní hodnoty AD převodníku při tlacích nastavených na hodnoty rovné 10 % a 90 % měřeného rozsahu. Data přepočítaná podle vztahu (3.4) jsou čísla v intervalu $<0, 2^n - 1>$, na který je tak převeden celý rozsah hodnot měřeného tlaku.

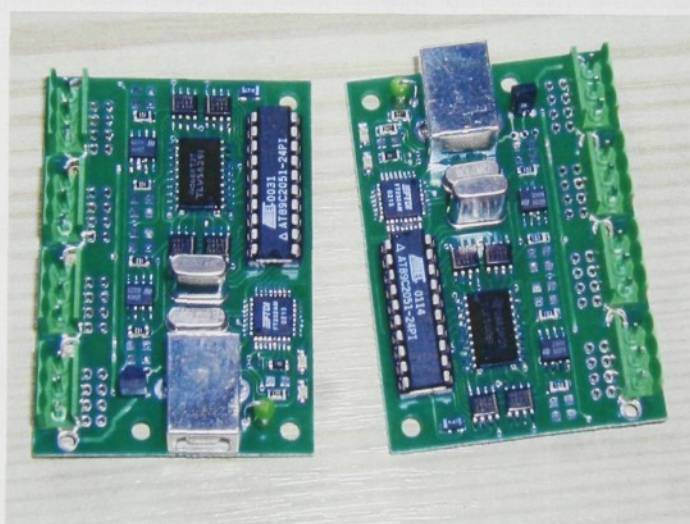
Na závěr odstavce o měření tlaků v pneumatických soustavách je formou tabulky uveden přehled vyřešených měřicích úloh s uvedením jejich základních parametrů. Dále je na fotografiích na obr. 3.9 zobrazen přístroj z posledního řádku tabulky, který se používá pro měření tlaků na modelu brzdového systému vlaku o deseti vagónech. Na obr. 3.10 je fotografie nejnovějšího převodníku z řady, kterou se zabývá tento odstavec. Převodník má 4 vstupy 4-20 mA, frekvenci vzorkování každého z nich 2 kHz, bez použití vyrovnávací paměti. S nadřazeným počítačem PC převodník komunikuje prostřednictvím standardního rozhraní USB.

Počet vstupů	Rozlišení AD převodníku	Max. frekvence vzorkování	Min. frekvence vzorkování	Rozhraní	Poznámka
4	12	200 Hz	200 Hz	RS232	
4	14	2000 Hz	200 Hz	RS232	Vyrov. paměť
8	12	2000 Hz	200 Hz	RS232	Vyrov. paměť
16	12	30 Hz	30 Hz	RS232	



Obr. 3.9

Měřicí převodník se 16 vstupy a sériovým rozhraním RS232C



Obr. 3.10

Měřicí převodník se 4 vstupy a s rozhraním USB

Literatura

- [3.1] Domovská www stránka firmy BD Sensors : <http://bdsensors.cz>.
- [3.2] Punčochář, J.: Operační zesilovače v elektronice. BEN, Praha 1996, ISBN8090198430.
- [3.3] Analog Devices: Design-In Reference Manual.1994.
- [3.4] Data Sheet AD 7890 (<http://analog.com>).
- [3.5] MacKenzie, I., S.: The 8051 Microcontroller, 2. Edition, Prentice-Hall, 1995.

4 Měření výšky sloupce rtuti v kapiláře

Měření výšky sloupce rtuti ve skleněné kapiláře se používá při výrobě rtuťových lékařských teploměrů. Měření je součástí jedné z výrobních operací, tzv. ‘vyměřování’, při kterém se zjišťují dva parametry rozpracovaného měřicího ústrojí teploměru. Podle zjištěných hodnot se pak pro každý teploměr vybírá stupnice s odpovídající hustotou dělení a upravuje se podélný rozměr stupnice, čímž se určuje posunutí stupnice podél kapiláry v obalové trubici teploměru. Rozdílná citlivost jednotlivých měřicích ústrojí je způsobena tolerancí rozměru vnitřní světlosti kapiláry, poloha stupnice v teploměru je závislá na objemu rtuti v měřicím ústrojí. Měření se provádí na polotovaru teploměru, ve kterém již je vytvořen základ výsledného měřicího ústrojí, polotovar se skládá z nádoby, kapiláry a obalové trubice, polotovar je naplněn rtutí. K dokončení výrobku ještě zbývá vložit do teploměru stupnici a zatavit obalovou trubicí.

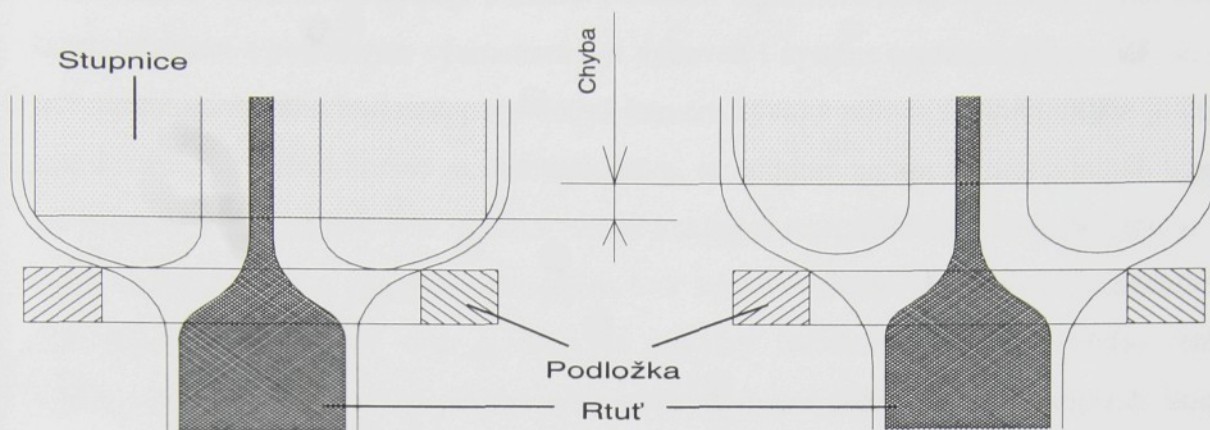


Obr. 4.1
*Polotovaru
teploměru*

4.1 Měřená veličina

Na obr. 4.1 je náčrt měřeného polotovaru teploměru. Výška rtuti h se měří od referenční, nulové hladiny, která je dána místem, kde přechod mezi nádobkou a obalovou trubicí má velikost d . Při měření je teploměr umístěn tak, že jeho podélná osa je svislá a je podepřen zespodu podložkou s otvorem, který má právě průměr d . Teploměr je vlastní tíhou tlačěn dolů až ke kontaktu s podložkou, tím je definována svislá poloha teploměru před měřením. Pro správné zastřižení konce stupnice před jejím vložením do teploměru by bylo lépe odměřovat výšku hladiny rtuťového sloupce od referenční hladiny odvozené od dna obalové stupnice uvnitř teploměru, tj. od úrovně, o kterou se nakonec opře vložená stupnice, nebyl však nalezen žádný způsob, jak na této úrovni teploměr před měřením mechanicky zajistit. Při měření tak dochází k náhodné chybě způsobené rozdílem obou úrovní. Část této chyby je systematická a lze ji zohlednit při výpočtu, část chyby je však náhodná. Na obr. 4.2 jsou znázorněny vlivy tvaru přechodu nádoby na obalovou trubicí na chybu v umístění stupnice do teploměru. Náhodnost nesystematické chyby je dána tolerancemi při tváření polotovaru teploměru, však podle výrobce teploměrů ji lze ve většině případů zanedbat. Pokud se chyba uplatní, má za důsledek jen aditivní chybu hoto-

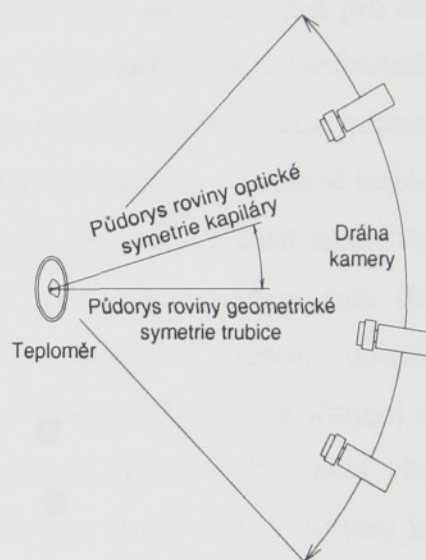
vého teploměru a ta se projeví při výstupní kontrole výrobku při testování jakoukoli teplotou, čímž je zajištěno její zjištění a vyřazení teploměru.



Obr. 4.2

Vznik chyby měření tvarovou odlišností teploměrů

Podložka, kterou je teploměr při měření podložen, má polohu mechanicky pevně spojenou s konstrukcí měřicího zařízení. Součástí zařízení je také průmyslová televizní kamera, která je základním prvkem systému pro měření výšky sloupce rtuti v polotovaru teploměru. Výška sloupce je určována z výstupního video signálu kamery, která do něj podle standardizovaných pravidel moduluje informaci o pohledu na sledovanou scénu. Přijmeme-li obvyklé dělení scény na předmět a pozadí, je zde předmětem část prostoru uvnitř kapiláry s vrcholem sloupce rtuti a pozadím je vše ostatní, co kamera 'vidí', tedy kapilára, obalová trubice, vše za teploměrem, všechny odlesky, stíny, ...



Obr. 4.3

Vzájemná poloha dráhy kamery a měřeného teploměru

Kapilára v teploměru není prostá tenká skleněná trubička, ale její příčný profil je navržen tak, aby pro pozorovatele vytvořil efekt zvětšovacího skla, lupy, aby opticky zvětšoval příčný rozměr sloupce rtuti. To na jednu stranu výrazně usnadňuje odečítání délky sloupce jak pro lidské oko, tak i pro průmyslovou kameru, avšak obtížnější je nalezení sloupce při pohledu na teploměr a to opět jak pro lidské oko, tak pro kameru, rtuť je vidět jen při malé odchylce pozorovatele od osové roviny válcové optiky kapiláry. Osová

rovina optiky kapiláry však navíc svírá s rovinou geometrické symetrie obalové trubice úhlovou odchylku, která vykazuje značný rozptyl kolem nulové hodnoty. Lidé si při hledání sloupce většinou pomáhají pomalým otáčením teploměru kolem jeho osy před očima, mechanismem s podobným významem byl vybaven i systém automatického měření. Kolem pevně uloženého teploměru vykonává kamera kývavý pohyb. Dráha pohybu je čtvrtinou kružnice v rovině kolmé na osu teploměru, se středem na ose kapiláry, svisle v místě středu intervalu očekávaných výskytů vrcholu sloupce rtuti. Během celého pohybu je kamera nasměrována a zaostřena do středu své kruhové dráhy. Situace je naznačena na obr. 4.3. Rameno, které nese kameru je součástí otevřeného kinematického řetězce s příznivými průběhem úhlové rychlosti otáčivého pohybu ramene v krajních bodech dráhy, takže pohyb dráhy je klidný a bez rázů. Perioda kývavého pohybu kamery je cca 2 s.

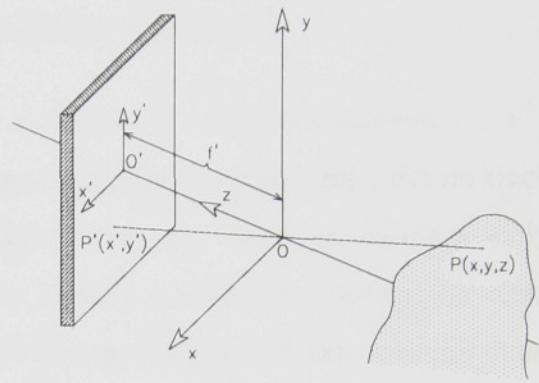
Jen vnější povrchy nádoby, trubice a přechodu mezi nimi jsou dostupné pro mechanické upevnění teploměru při měření. Měřený sloupec rtuti však zůstává mechanicky nedosažitelný 'hluboko' uvnitř a jeho pozice vzhledem k povrchu je dána řadou geometrických parametrů. Z důvodů tolerancí ve velikostech a tvarech kapiláry a obalové trubice a náhodných jevů při vytváření svarů a zátavů jednotlivých skleněných částí teploměru nelze přesně zajistit, aby velmi tenký kruhový průřez válcového sloupce rtuti měl v průřezu obalové trubice pevné místo. Proto při skutečném měření dochází k nepřesnostem a k odchylkám oproti uvedeným zásadám. Tyto neurčitosti lze shrnout do jednoho jevu: střed kružnice, po jejíž části vykonává kamera kývavý pohyb není vždy uvnitř sloupce rtuti. Důsledkem tohoto jevu je, že obraz sloupce rtuti nemá při kývání kamery v obraze scény pevné místo, ale jeho pozice ve vodorovném směru závisí na okamžité fázi polohy kamery na její dráze. Později bude ukázáno, že navržená a použitá metoda určení výšky sloupce rtuti počítačového zpracováním výstupního signálu kamery není na vodorovný pohyb prvků scény citlivá. Podrobněji se invariantními jevy při měření na základě zpracování obrazové informace zabývají práce [4.4] a [4.5].

4.2 Obrazová informace

V monochromatické televizní kameře se převádí složitý optický fyzikální jev, který vzniká při osvětlení nějaké skupiny předmětů na elektrický signál. Osvětlené prvky

ve sledované scéně odráží světlo, to prochází objektivem kamery a vytváří uvnitř ní na rovinném citlivém stínítku plošný obraz. Fotometrická analýza této transformace je složitá a obvykle se neprovádí, naopak jednodušší a pro měření geometrických veličin důležitější je matematický model geometrie této transformace, kterým je zobrazovací metoda, zvaná středové promítání, viz např. [4.1].

Středové promítání je transformací 3D prostoru do 2D roviny. Základní vlastností středového promítání je společný bod - průsečík všech spojníc bodů s jejich obrazy, tzv. střed promítání. Pro popis transformace zavedme ve 3D prostoru pravoúhlý 3D souřadný systém $O(x, y, z)$ s počátkem O ve středu promítání a s osou z v optické ose kamery. V rovině $z = f'$, v rovině obrazů, v průmětně zavedme 2D souřadný systém $O'(x', y')$ s počátkem v bodě $(0, 0, f')$ a s osami x' a y' rovnoběžnými s osami x a y . Ve vyjádření ve 3D souřadném systému je vektor vzoru P kolineární s vektorem obrazu P' , a proto platí:



Obr. 4.4
Středová projekce

$$x' = k \cdot x \qquad y' = k \cdot y \qquad \text{a} \qquad f' = k \cdot z. \tag{4.1}$$

Dosazením z poslední rovnosti (4.1) do prvních dvou dostaneme:

$$x' = f' / z \cdot x \qquad \text{a} \qquad y' = f' / z \cdot y. \tag{4.2}$$

Pro případ, že všechny body sledované scény leží v přibližně stejné vzdálenosti od středu promítání lze zlomek $f'/z = -m$ považovat za konstantní a vztahy se zjednoduší:

$$x' = -mx \qquad \text{a} \qquad y' = -my. \tag{4.3}$$

Vhodnou volbou jednotek na osách souřadných systémů a orientací těchto os lze vztahy dále zjednodušit:

$$x' = x \qquad \text{a} \qquad y' = y. \tag{4.4}$$

Uvedené výsledné vztahy umožňují určit polohu obrazu určitého bodu reálné scény. Pro problematiku úloh geometrických měření by však větší význam měly vztahy, které by naopak umožňovaly ze znalosti polohy bodu obrazu usoudit na polohu bodu ve scéně. Takové inverzní formule pro výpočet nečárkovaných souřadnic z čárkovaných lze odvodit až pro vztahy, ve kterých se po zjednodušení na pravé straně neobjevuje souřadnice z . Výchozí vztahy lze pro výpočet inverzní úlohy použít jen tehdy, je-li k dispozici nějaká další vhodná doplňková informace o poloze sledovaného bodu.

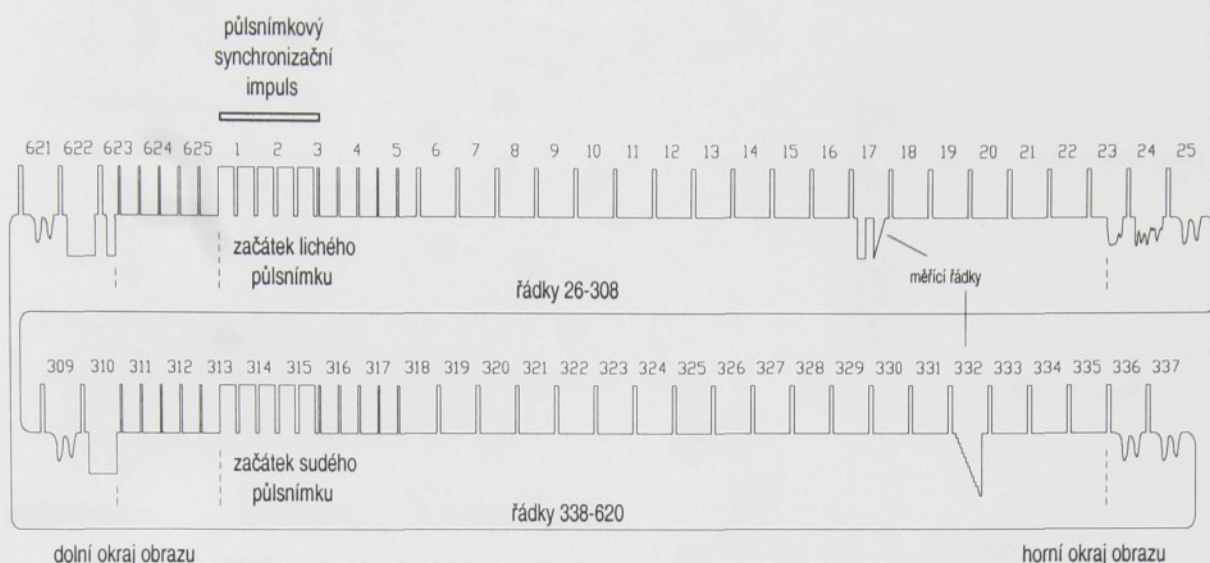
Obraz na světlocitlivém stínítku (intenzita osvětlení jako funkce souřadnic x' , y') se dále převádí na elektrický signál. Hromadně se rozšířily převodníky pracující na třech různých principech primárního opticko-elektrického převodu: vakuové snímací elektronky, snímače CCD s snímače CMOS. Přestože kamery s vakuovými snímacími elektronkami se dnes již prakticky nepoužívají, v době jejich rozšíření vzniklo několik standardů pro televizní kamery, které vycházely z jejich principu činnosti. Další dopad na tyto standardy měla fyziologie lidského zraku, protože původně jediná možnost využití televizních kamer byla snímat obraz pro jeho zobrazení na televizním monitoru, kde je pozorován člověkem. Všechny tyto standardy, jsou z důvodů kompatibility obecně respektovány dodnes, a tak se používají i pro kamery pracující na zcela odlišných principech a také v aplikacích, kde příjemcem jejich signálu není člověk, ale technické zařízení, např. počítač. Standardizace se týká hlavně vstupních a výstupních signálů kamer zejména pak jejich hlavního výstupu – videosignálu.

4.3 Videosignál

Videosignál je spojitý časový průběh napětí, který má řadu prvků periodicity. Hlavní perioda je dlouhá 40 ms, říká se jí snímek a amplitudová modulace signálu během ní obsahuje kompletní informaci o snímaném obraze. Ve standardním pojetí je tedy videosignál periodický jen v případě, že se scéna, kterou kamera sleduje, v čase nemění. Snímek je tvořen dvěma po sobě jdoucími pulsnímkami a každý z nich se dále dělí na $312\frac{1}{2}$ řádku.

Další periodický jev se týká řádků. Řádek je 64 μ s dlouhý úsek videosignálu a v jednom snímku jich je obsaženo 625. Pro většinu z nich platí, že v podstatné části je jejich průběh modulován intenzitou osvětlení podél některého úzkého vodorovného proužku

obrazu, na které je obraz rozdělen. Pokud je v obraze pruh složený ze stejných proužků, jsou stejné i odpovídající řádky videosignálu a ten je v tomto úseku periodický.

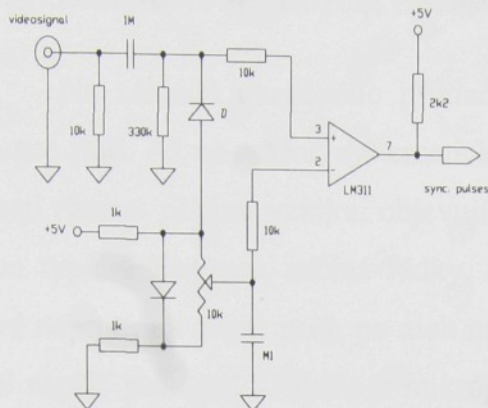


Obr. 4.5

Perioda videosignálu s vyznačením rozložení synchronizačních impulsů

Periodické je také střídání pulsímků: lichý – sudý – lichý - ..., v lichých pulsímcích se postupně vysílají řádky patřící lichým proužkům obrazu v sudých pulsímcích řádky od sudých proužků. Každý pulsínek tak obsahuje informace o celém rozměru obrazu, ale s hrubším proužkováním. V dalším pulsímku se přenášejí řádky mezilehlé a tím se rozklad obrazu na proužky zjemní a spolu s efektem setrvačnosti luminiscenční látky na stínítku obrazovky monitoru vše lépe vyhovuje fyziologií lidského zraku. V těch počítačových aplikacích, kdy postačí menší rozlišení obrazu ve svislém směru, nebo když je požadována vyšší rychlost zpracování obrazové informace, lze většinu kamer přepnout do režimu neprokládaného řádkování, kdy oba pulsímků přenášejí informace o stejných proužcích obrazu. Perioda videosignálu je pak poloviční, tj. 20 ms.

Vedle úseků, kdy je amplituda videosignálu modulována osvětlením podél odpovídajícího proužku obrazu, je do každého řádku vřazen synchronizační impuls. Některé řádky jsou pro potřebu synchronizace věnovány celé. Synchronizační prvky slouží zejména pro to, aby zařízení, které videosignál přijímá, bylo schopno detekovat okamžiky začátků pulsímků a řádků, a tak z každého přeneseného snímku zpětně rekonstruovat původní obraz. Synchronizační impulsy se výrazně liší od ostatních úseků videosignálu svojí amplitudou, takže je lze jednoznačně rozpoznat. Přesný popis a podrobné vysvětlení televizní normy lze najít např. v knize [4.2]. Obr. 4.5 převzatý z této publikace přehledně



Obr. 4.7
Obvod pro oddělení směsí
synchronizačních impulsů

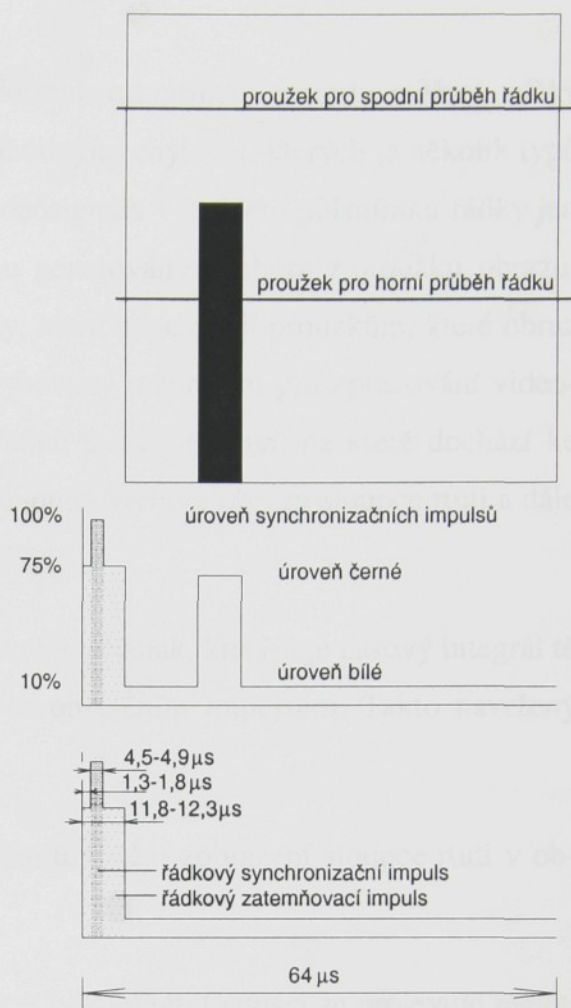
znázorňuje strukturu videosignálu s prokládaným řádkováním během jednoho snímku. Připomeňme některé prvky televizní normy znázorněné na uvedeném obrázku, které jsou důležité pro zpracování signálu rozhraním mikropočítače:

- První, druhý a polovina třetího řádku každého pulsímků obsahuje pulsímkový synchronizační impuls vytvořený pěti kratšími impulsy s velkým plněním,

- Až 23. řádkem v lichém a 336. řádkem v sudém pulsímků začíná posloupnost 287 řádků obsahujících informace o vlastním obrazu, ostatní řádky mají jiný, speciální význam,

- Po začátku a před koncem každého pulsímků je v několika řádcích zdvojená frekvence řádkových synchronizačních impulsů.

Příklady detailních průběhů videosignálu podél řádků odpovídajících dvěma vybraným různým proužkům obrazu jsou znázorněny na obr. 4.6. Binární obraz zvolený pro tento příklad je zjednodušením skutečného obrazu, který byl zpracováván při úloze měření sloupce rtuti v polotovaru teploměru. Tmavý obdélník vystupující ze spodního okraje obrazu je zobrazením sloupce rtuti v měřeném teploměru.



Obr. 4.6
Detaily průběhu řádku

4.4 Počítačové zpracování videosignálu

Na základě uvedeného příkladu lze zformulovat princip metody měření výšky sloupce rtuti. Až na rušení, systematickými a náhodnými chybami, kterých je několik typů a mají různou příčinu vzniku, objevují se ve videosignálu v každém pulsímku řádky jen dvou typů. Pulsímkem začíná řádky, které jsou generovány odshora z proužků obrazu, které neprotínají obraz rtuti, po nich následují ty, které odpovídají proužkům, které obraz rtuti napříč protínají. Dokáže-li mikropočítač vybavený rozhraním pro zpracování videosignálu rozpoznat od sebe zmíněné dva typy řádků a určit hranici, na které dochází ke změně typu řádku, dokáže také určit svislou souřadnici vrcholu obrazu sloupce rtuti a dále podle vztahů (4.3) nebo (4.4) určit i měřenou výšku.

Pro klasifikaci řádků do dvou tříd byl navržen příznak, kterým je časový integrál té části řádku, která není překryta řádkovým synchronizačním impulsem. Takto navržený příznak má několik předností:

- hodnota příznaku není závislá na vodorovném umístění zobrazení sloupce rtuti v obrazu,
- integrální kritérium je svojí podstatou robustní, v konkrétní situaci se projevuje malou citlivostí na náhodné poruchy obrazu a na šum ve videosignálu,
- je možno vybrat z několika způsobů technického řešení určení hodnoty uvedeného příznaku, nebo některé z jeho aproximací.

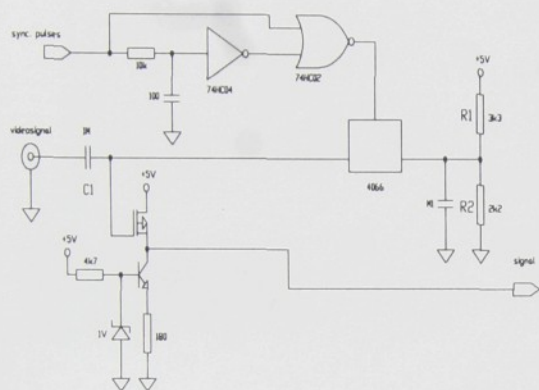
Základní metody přípravy videosignálu pro následné počítačové zpracování jsou popsány v [4.3]. Jak již bylo uvedeno, při zpracování videosignálu je nezbytné rozpoznat a využít řádkové a pulsímkové synchronizační impulsy, které se liší od ostatních úseků videosignálu svojí amplitudou. Z obr. 4.6 je patrné, že amplituda synchronizace je o 25% vyšší než je úroveň modulace odpovídající nejčernější barvě v obrazu. Oddělení synchronizačních impulsů lze tedy provést napětovým komparátorem porovnáním videosignálu s vhodně nastavenou referenční hodnotou. Před přivedením signálu na vstup komparátoru je ještě nutno obnovit jeho stejnosměrnou složku, která se ztratila při průchodu přes kapacitní vazby koncových zesilovačů a v kameře. Nejjednodušší řešení zavaděče stejnosměrné složky s jednou diodou je znázorněno na obr. 4.7, kde je spolu

Obvod pro oddělení řádkových a pulsímkových synchronizačních impulsů

Získání samotných řádkových synchronizačních impulsů je náročnější, protože v některých úsecích videosignálu je jejich frekvence dvojnásobná a šířka poloviční (vyrovňovací a udržovací impulsy). Možným řešením je soustava monostabilních klopných obvodů. Všechny impulsy jsou nejprve zkráceny na jednotnou šířku a od každého takového impulsu je odvozen pomocný impuls, který má šířku mezi polovinou a celou periodou řádkových impulsů. Tímto pomocným impulsem jsou součinným hradlem maskovány zkrácené impulsy tak, že projdou jen impulsy se základní periodou $64 \mu\text{s}$. Na obr. 4.8 je příklad zapojení takové sestavy klopných obvodů a hradel, kterou lze popsanou funkci zajistit. Na stejném obrázku je znázorněno také obvodové řešení již zmíněného filtru pro pulsnímkové synchronizační impulsy.

63

znázorněn na obr. 4.9. Impulsy ze synchronizační směsi jsou zkráceny na jednotnou délku a pomocí CMOS spínače 4066 je těmito pulsy nabíjen kondenzátor C_1 na napětí, které je určeno odporovým děličem R_1 , R_2 . Až do dalšího nabití, tj. po dobu jednoho řádku, je videosignál posunut o napětí na C_1 . Signál je dále impedančně oddělen a připraven pro další zpracování.



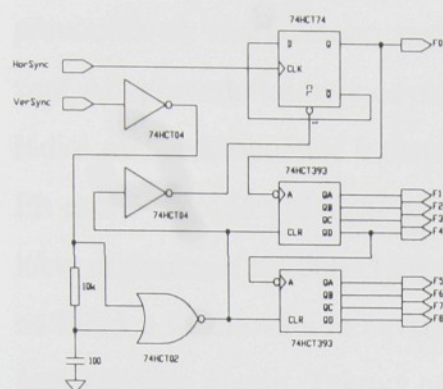
Obr. 4.9

Obvod pro obnovení stejnosměrné složky signálu

přímým způsobem zavést čítání jednotlivých řádků a informaci, zda aktuální řádek je či není ve vymezeném okně, odvodit z hodnoty čítače řádků, přičemž z obr. 4.5 je vidět, že jen 24. až 309. řádek v každém pulsnímku obsahuje informaci o obrazu, ostatní jsou schovány v pulsnímkovém zatemňovacím impulsu a z hlediska obsahu obrazu nemají žádný význam. Čítač řádků je prostý binární čítač, který čítá řádkové synchronizační impulsy a je nulován náběžnou hranou pulsnímkového synchronizačního impulsu, viz obr. 4.10. Čítač řádků je zde uveden jen pro úplnost, frekvence čítaných impulsů ($64 \mu s$) většinou dovoluje realizovat čítání řádků i programově v mikropočítači.

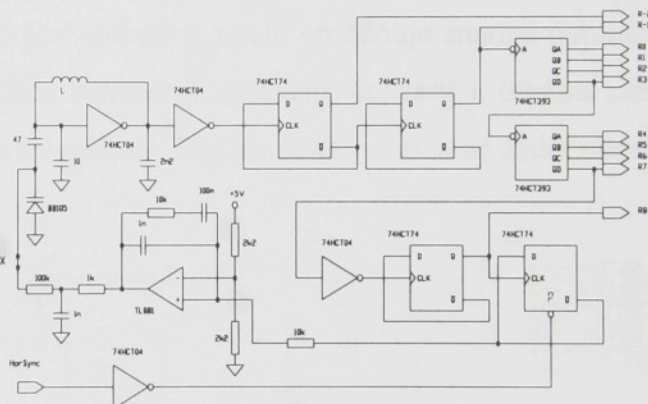
K vymezení okna svislými hranicemi podobným způsobem chybí impulsy k čítání, které by řádek dostatečně jemně rozdělovaly na drobnější časové úseky. Potřeba podobných impulsů vzniká také při zpracování jednotlivých řádků číslicovými prostředky, kdy je potřeba provést vzorkování řádku v dostatečně jemném časovém rastru. Pro uvedené a jiné další funkce je výhodné zřídit jemnou časovou základnu, která je synchronizována přijímaným videosignálem. Základní perioda časové základny je dána nejkratšími časovými úseky řádku, které je potřeba při zpracování řádku rozlišovat. S ohledem na šířku

pásma videosignálu standardních televizních kamer, nemívá význam dělit řádek na více než 512 obrazových elementů – pixelů, což odpovídá vzorkovací frekvenci 8 MHz.



Obr. 4.10
Čítač řádků

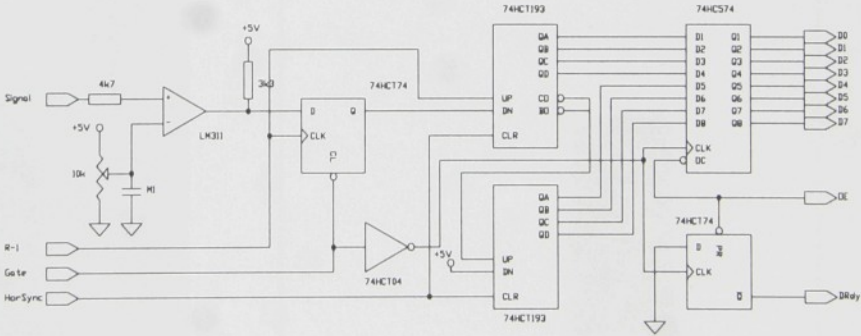
čtem vyhodnocuje střidu impulsů na výstupu fázového detektoru a přes zpětnou vazbu vedenou bodem X dolad'uje LC oscilátor tak, aby sledovaná střida byla 1:1. Po doznění přechodového děje je fáze čítání taková, že čítač přetéká z hodnoty 2047 na hodnotu 0 právě při příchodu řádkového synchronizačního impulsu. Na výstupech čítače R_{-2} , R_{-1} , R_0 , ... R_8 je pak binární váhový kód čísla z intervalu $\langle 0, 2047 \rangle$, které sleduje průběh každého řádku od jeho začátku do konce. Z obr. 4.6 vyplývá, že prvních asi $12 \mu s$ z každého řádku je řádkový zatemňovací impuls, a tedy až hodnota asi 384 na čítači indikuje začátek toho úseku řádku, který obsahuje informaci o obrazu. Při dělení řádku na 512 obrazových elementů lze jako čítač pixelů použít devět nejvyšších binárních řádů čítače R_0 , R_1 , ... R_8 . Výstupy R_{-1} a R_{-2} pak označují každou čtvrtinu pixelu. Při takovémto dělení řádky na pixely mají pixely, jejichž hodnota je určena snímaným obrazem indexy 96 až 511, pro ostatní vyplývá z definice videosignálu hodnota ještě nižší než odpovídá černému odstínu, a nemá tedy význam je jakkoli zpracovávat.



Obr. 4.11
Časová základna synchronizovaná
řádkovými impulsy

Při návrhu mikropočítače pro měření výšky sloupce rtuti byly ověřovány dvě různé metody vyčíslení příznaku pro jednotlivé řádky. První se snažila co nejvíce vycházet z dříve uvedené definice a pro vyčíslení integrálu, používala analogový integrátor a AD převodník se vzorkovacím zesilovačem. Signály pro počáteční nulování integrátoru a řízení AD převodníku byly odvozeny z uvedené časové základny tak, aby na konci každého řádku měl mikropočítač k dispozici připravenou hodnotu příznaku k dalšímu zpracování. Při druhé metodě vyčíslení příznaku je integrál nahrazen součtem vzorků, které jsou získány digitalizací každého řádku. Četnost vzorkování vychází z již zmíněných 512 pixelů na řádek a kvantování je navrženo s rozlišením jediného bitu, tj. jen na dvě úrovně stupně šedi každého pixelu. Takový návrh obou parametrů digitalizace vycházel ze subjektivního hodnocení pohledu na mnohem podrobněji digitalizovaný obraz kamery a byl podpořen výsledky simulací celé metody a motivován velmi jednoduchou technickou realizací výpočtu kritéria příznaků.

Oba uvedené principy byly zkušebně realizovány a v laboratorních podmínkách poskytly řadu dat pro jejich srovnání. Z hodnocení vyplynulo preferovat druhou metodu, protože obě zmíněné metody dávaly prakticky stejné výsledky v hodnotách příznaku a druhá metoda, ve které je větší podíl digitální techniky, navíc umožňuje snadné doplnění některých dalších funkcí. Doplnkové funkce usnadňují nasazení, seřízení a údržbu zařízení v reálném provozu a zvyšují tak jeho robustnost. Jde zejména o možnost zadat obdélníkový výřez, ve kterém je obraz hodnocen, a o možnost vizuálně kontrolovat na obrazovce monitoru binární obraz, který pak již přímo vstupuje do vyhodnocení.

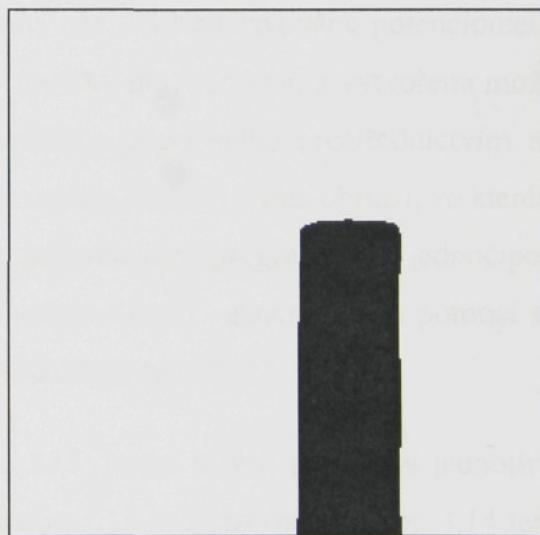
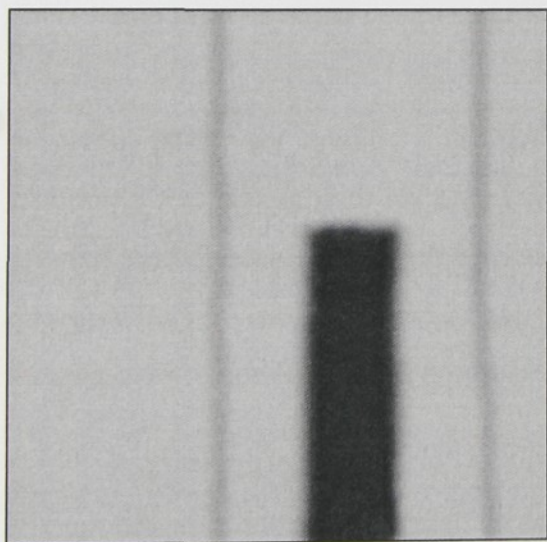


Obr. 4.12
Čítač pro výpočet hodnoty příznaku

Vyhodnocení kritéria příznaku vybranou metodou předpokládá rozdělení řádku na úseky odpovídající světlým a tmavým místům podél příslušného proužku obrazu. Rozdělení lze provést napětovým komparátorem. Na jeden jeho vstup je přiveden signál a na druhém vstupu je přivedena rozhodovací úroveň, tzv. práh. Na výstupu komparátoru je pak *log.0* nebo *log.1* podle toho je-li odpovídající místo tmavé nebo světlé. Zvolená metoda je citlivá na

správné nastavení prahu, což je její relativní nevýhodou oproti metodě s integrátořem. Řadou praktických zkoušek v laboratorních i v reálných podmínkách bylo zjištěno, že obraz teploměru je možno prahováním převést na binární aniž by došlo k významné ztrátě užitečné informace. Černé pixely v zásadní většině odpovídají obrazu sloupce rtuti, Bílé odpovídají pozadí. Na obr. 4.13a je znázorněn nasnímaný snímek teploměru, na obr. 4.13b je pak tento snímek oprahovaný. Tenké svislé pruhy podél sloupce rtuti v šedém obrázku jsou rušení způsobené vnější stěnou kapiláry. Pruhy jsou však vždy světlejší než obraz rtuti, a tak je lze potlačit vhodným nastavením parametru prahování.

V hodnotách již diskrétní, avšak v čase stále spojitý signál na výstupu komparátoru je vzorkován klopným obvodem hodinovým signálem s pevnou periodou 125 ns. Tím je každý řádek převeden na posloupnost bitů. Celá posloupnost má 512 prvků, ale, jak již bylo uvedeno, prvních 95 z nich má jistě hodnotu $\log.0$. Ostatní bity mají hodnotu $\log.0$, odpovídají-li místu v obrazu tmavému, tedy obrazu sloupce rtuti, a $\log.1$, odpovídají-li světlému místu obrazu. Zjistíme-li v posloupnosti počet bitů s hodnotou $\log.0$, zjistíme tím po odečtení 95, v kolika pixelech aktuální řádek protíná sloupec rtuti. Řádky, ve kterých je tento počet významný, jsou klasifikovány jako řádky, které procházejí sloupcem rtuti.



Obr. 4.13a, b

Nasnímaný (256x256 pixelů, 16 odstínů šedi) a oprahovaný snímek teploměru

Počet bitů s hodnotou $\log.0$ lze na každém řádku vyhodnocovat již během vzorkování binárním čítačem s několika pomocnými obvody, viz obr. 4.12. Na začátku řádku je čítač nulován řádkovým synchronizačním impulsem a poté během řádku inkrementován

v taktu pixelů vždy, když se na výstupu vzorkovacího klopného obvodu objeví $\log.0$. Je-li pro zpracování vybrán jen úsek řádku určením svislých mezí výřezu v obraze, lze čítání povolit jen uvnitř tohoto úseku, na obr. 4.12 je tento povolovací signál označen *GateR*. Tím nedojde ke zbytečnému čítání konstantních prvních 95 bitů a navíc, je-li šířka výřezu omezena na maximálně 255 pixelů, lze mít čítač jen 8-mi bitový, což dále zjednoduší jeho čtení mikropočítačem. Mikropočítač sleduje průběh videosignálu a synchronně s ním průběh vznikajících dat prostřednictvím signálu *DRdy*, který ho informuje, že čítání na řádku skončilo, že data na registru jsou platná a lze je převzít. Přechodem dat se příznak *DRdy* automaticky vynuluje. Mikropočítač data převezme a dále zpracuje jen tehdy, patří-li do úseku řádků vymezené vodorovnými hranicemi výřezu, ostatních případech data ignoruje. K této činnosti buď musí mikropočítač programově udržovat index aktuálního řádku, k čemuž potřebuje pulsnímkový synchronizační impuls k nulování čítače mezi pulsnímkami, anebo musí mít zajištěn přístup pro čtení dříve popsaného externího čítače řádků. V čase od spodního okraje nastaveného výřezu do vrchního okraje výřezu v následujícím pulsnímku, minimálně v čase, po který probíhá pulsnímkový zatemňovací impuls, tj. 27 řádků, tj. asi 1,8 ms, může mikropočítač provést vyhodnocení posloupnosti příznaků, určit z ní výpočtem výšku hladiny sloupce rtuti a vyslat vypočtenou hodnotu nadřazenému výpočetnímu prostředku.

Prahovací úroveň je pro jednoduchost na obr. 4.12 nastavována potenciometrem. V realizovaném zařízení byl tento prvek nahrazen DA převodníkem a vytvořena možnost nastavení prahovací hladiny z nadřazeného počítače připojeného prostřednictvím asynchronního sériové rozhraní RS 232. Podobně je možno nastavit výřez obrazu, ve kterém se provádí vyhodnocení. Vodorovné hranice jsou zohledňovány programově v jednočipovém mikropočítači, svislé vymezení je zajištěno signálem *GateR* generovaným pomocí sekcí integrovaného více funkčního programovatelného čítače typu 8253.

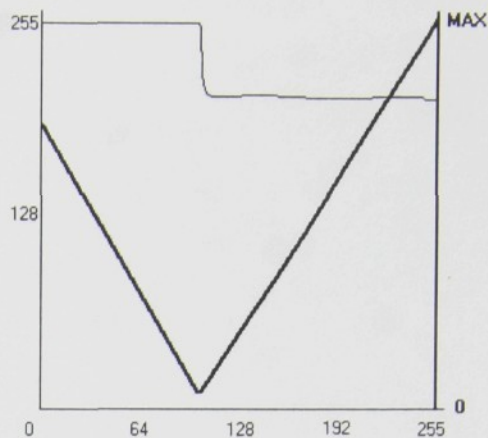
Průběh posloupnosti: $s(i)$, $i = 0, 1, \dots, 255$ počtu bílých pixelů na jednotlivých řádcích odshora dolů pro obrázek teploměru z obr. 4.13 je znázorněn na obr. 4.14 tenkou linií. Náhlý pokles hodnot posloupnosti v určitém místě je zřejmý. Při numerickém určení místa (indexu), kde k poklesu dochází, byly ověřovány dvě metody.

První metodou bylo nalezení maxima posloupnosti diferencí:

$$d(i) = s(i) - s(i+1), \quad i = 0, 1, \dots, 254.$$

Druhá metoda je výpočetně složitější, avšak pro více zarušené obrazy dávala stabilnější výsledek, a tak byla použita v konečné verzi. Metoda nejprve určí maximum max a minimum min ze všech prvků posloupnosti $s(i)$. Dále se předpokládá, idealizovaná posloupnost $t(i)$, která pro hodnoty indexu $0, 1, \dots, n$ nabývá hodnoty nalezeného maxima a pro hodnoty indexu $n+1, n+2, \dots, 255$ nabývá hodnoty nalezeného

minima. Jediným neurčeným parametrem posloupnosti $t(i)$ je hodnota n . Hodnota n se určí z podmínky, aby celková odchylka definovaná jako součet kladně vzatých odchylek stejnohlých prvků posloupností $s(i)$ a $t(i)$ byla nejmenší.



Obr. 4.14
Průběh počtu bílých pixelů
(tence) a závislost celkové
odchylky na n (silně)

$$E(n) = \sum_{i=0}^{255} |s(i) - t(i)| = \left[\sum_{i=0}^n (max - s(i)) \right] + \left[\sum_{i=n+1}^{255} (s(i) - min) \right] = \quad (4.5)$$

$$= (n+1) \cdot max - \sum_{i=0}^n s(i) - (255-n) \cdot min + \sum_{i=n+1}^{255} s(i)$$

Celková odchylka $E(n)$ se vypočte postupně pro všechny hodnoty $0 \leq n \leq 255$, prohledáním se určí minimum takto vzniklé posloupnosti a jemu odpovídající hodnota indexu je považována za pořadí řádku, který odpovídá elementárnímu proužku obrazu, který nejlépe koresponduje s vrcholem sloupce rtuti. Průběh závislosti celkové odchylky na indexu n obr. 4.14 vyznačen silnou linií, rozsah hodnot na svislé ose grafu je $0 - MAX$, kde MAX je největší z vypočtených hodnot celkové odchylky.

Pro výpočty všech $E(n)$ je také možné použít rekurentní předpis, který je úspornější z hlediska objemu potřebných početních výkonů:

$$E(0) = \max - s(0) - 255 \cdot \min + \sum_{i=1}^{255} s(i)$$

$$E(n) = E(n-1) + \max - \min - 2 \cdot s(n)$$
(4.6)

Literatura

- [4.1] Urban, A.: Deskriptivní geometrie. SNTL Praha, 1977.
- [4.2] Vít, V.-kolektiv: Televizní technika. SNTL Praha, 1979.
- [4.3] Tůma, P.: Optické periférie počítače. Diplomová práce, ČVUT FEL, Praha 1984.
- [4.4] Tůma, P.: Průmyslové využití metod zpracování obrazové informace. Písemná práce ke zkoušce kandidátského minima, VŠST Liberec 1991.
- [4.5] Tůma, P.: Měření v obrazech. Kandidátská disertační práce, ČVUT FS, Praha 1992.

5 Přenos naměřených dat pomocí služby SMS

V některých případech měřicích aplikací naměřená data vznikají ve značné vzdálenosti od místa, kde jsou pak následně zpracovávána. V takovém případě je nezbytné získaná data na danou dálku přenášet. Pro dálkový přenos dat lze navrhnout a realizovat vlastní komunikační prostředky, jejich projekce a budování však naráží na řadu technických, organizačních a legislativních překážek a omezení. Pro některé aplikace může být výhodné použít pro přenos dat veřejné komunikační sítě, jako je telefonní síť, Internet, rádiová síť Packed Radio, ... V posledních letech se k takovým prostředkům přiřadily sítě GSM (Global System for Mobile communication), které nabízejí služby, které jsou pro přenos dat přímo určeny. V nabídce operátorů jsou také další služby, které mají jiný původní účel, které lze ale také pro přenos dat použít.

Tento odstavec je shrnutím a zobecněním zkušeností z řešení projektu, ve kterém byl navržen a předán k uvedení do zkušebního provozu přenos dat získaných měřením parametrů a průtoků médií a energií pro potřeby účtování jejich spotřeby v bytovém hospodářství. Další aplikace využívající podobného principu k přenosu naměřených dat je připravována pro sledování parametrů provozu malých vodních děl. Obě zmíněné aplikace používají ve svém měřicím řetězci pro přenos naměřených dat službu SMS (Short Message Service).

5.1 Služba SMS

Služba SMS je organizována jako jednosměrný nespojový protokol. Při přenosu není vytvořeno souvislé spojení mezi vysílající stranou a příjemcem zprávy a zjednodušeně lze přenos popsat takto: Na přenosu zprávy se podílí SMSC (Short Message Service Centrum), které v první fázi zprávu přijme od zdroje zprávy a uloží ji. Uložené zprávy se SMSC pokouší doručit do místa jejich určení. Pokud uspěje, je zpráva z SMSC vymazána, pokud doručení není možné provést a dále trvá platnost zprávy, pokusí se SMSC o doručení později. Prakticky bylo ověřeno, že doba mezi odesláním zprávy a jejím doručením trvá nejméně jednotky sekund, maximální doba záleží na momentálním vytížení sítě a žádný z operátorů ji nezaručuje. Typicky, v rámci dosahu signálu jedné sítě GSM, u nepohybujících se zařízení byla zjištěná doba doručení vždy menší než 10 s. Z uvedených vlastností služby SMS vyplývá, že měřicí řetězec využívající tuto službu tím způsobem, že jedna zpráva obsahuje jeden měřicí vzorek, jsou vhodné pro aplikace

s periodou měření delší než cca 10 s. Takovou datovou propustnost služby však lze násobit akumulací většího počtu vzorků do jedné zprávy SMS. V každém případě je vhodné doplnit data informací o čase jejich vzniku, aplikace by měly být odolné proti občasnému pozdržení dávky, záměny pořadí dvou dávek apod.

SMS je jednou ze základních standardních služeb technologie GSM. Uživatelé používají tuto službu především pro přenos krátkých textových zpráv z jednoho koncového zařízení na jiné. Ve většině odeslaných zpráv SMS je tedy v jejich uživatelské datové oblasti zakódován text pořízený prostřednictvím klávesnice mobilního telefonu a určený pro zobrazení na displeji jiného mobilního telefonu, i když přenášené informace obecně mohou mít různý význam, původ a charakter. Při standardním využití služby SMS je kódování informací před odesláním a jejich zpětné dekódování po přijetí řešeno programovým vybavením mobilních telefonních přístrojů a na uživatelské úrovni není nutno, ani možno se jím jakkoli zabývat. Jiná situace může nastat, použijeme-li službu SMS pro přenos technologických informací, když zpráva vzniká v jiném technickém prostředku než je mobilní telefon, nebo když je zpráva určena pro zpracování na takovém zařízení.

5.2 Kódování znaků ve službě SMS

Prostor pro uživatelská data v jedné zprávě SMS je omezen na maximálně 140 bytů, přičemž na hodnoty jednotlivých bytů není kladeno žádné další omezení. Zpráva tedy může obecně obsahovat informace v libovolném formátu. Pokud je obsahem SMS zprávy text, který byl pořízen mobilním telefonním přístrojem, nebo text, který je určen pro zobrazení na takovém přístroji, může být složen jen ze znaků speciální sady, tzv. abecedy. Je standardizováno několik abeced pro různá národní prostředí, jedna z nich je však povinná pro všechna zařízení, na kterých je služba SMS implementována. Každá abeceda obsahuje 128 znaků (včetně CR, LF a SP), pro kódování každého znaku je tedy potřeba 7-mi bitové kódové slovo $x_7\ x_6\ x_5\ x_4\ x_3\ x_2\ x_1$. Tabulka

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	@	Δ	sp	0	i	P	ı	p
1	£	_	!	1	A	Q	a	q
2	\$	Φ	“	2	B	R	b	r
3	¥	Γ	#	3	C	S	c	s
4	è	Λ	α	4	D	T	d	t
5	é	Ω	%	5	E	U	e	u
6	ú	Π	&	6	F	V	f	v
7	ì	Ψ	‘	7	G	W	g	w
8	ò	Σ	(	8	H	X	h	x
9	Ç	Θ	)	9	I	Y	i	y
A	lf	Ξ	*	:	J	Z	j	z
B	φ		+	;	K	Ä	k	ä
C	ø	Æ	,	<	L	Ö	l	ö
D	cr	æ	-	=	M	Ñ	m	ñ
E	Å	β	.	>	N	Ü	n	ü
F	å	ı	/	?	O	§	o	à

Obr. 5.1
Základní sada znaků pro službu SMS

znaků základní abecedy včetně kódů jednotlivých znaků je uvedena na obr. 5.1, významnější bity kódu daného znaku $x_7 x_6 x_5$ jsou určeny sloupcem a méně významné bity $x_4 x_3 x_2 x_1$ řádkem pozice znaku v tabulce. Kódování znaků abecedy pro službu SMS je ve velké části shodné s kódováním znaků podle doporučení ASCII, za pozornost ale stojí např. znak „@“, který zde má kód s hodnotou 0000000, avšak podle ASCII má kód 0100000. Kód 0011011 (1Bh) nemá grafickou interpretaci, ale slouží pro bezprostředně následující kód jako příznak rozšířené abecedy. Dvojice po sobě jdoucích kódů, kde první má hodnotu 1Bh, pak dohromady představuje kód jednoho znaku podle další tabulky zobrazené na obr. 5.2.

Rozšířený kód	1B0A	1B14	1B28	1B29	1B2F	1B3C	1B3D	1B3E	1B40	1B65
Znak	ff	^	{	}	\	[	]		~	€

Obr. 5.2
Rozšíření základní sady znaků pro službu SMS

Sedmibitové kódy znaků lze do datového prostoru, který je strukturován po bytech, umístit různými způsoby. Nejjednodušší by bylo ukládání kódu každého znaku do jednoho bytu, takové kódování textu ve zprávách SMS je sice možné, ale tento způsob nevyužívá plně vymezený prostor (ukládají se sedmibitové kódy do osmibitových bytů). Pro službu SMS je standardizováno úsporné kódování textu s pakováním znaků, které dovoluje datový prostor o velikosti 140 bytů maximálně využít a uložit do něj až $140 \times 8 / 7 = 160$ znaků.

Pakování znaků pro účely služby SMS lze definovat popisem osmi případů a pravidlem, které každou jinou situaci na vyjmenované případy převede. Osm případů rozlišených počtem znaků výchozího textu je znázorněno v tabulce na obr. 5.3. V této tabulce platí následující způsob značení: Předpokládejme znak X_i z uvažované abecedy, tento znak je kódován sedmicí bitů $x_{i7}, x_{i6}, x_{i5}, x_{i4}, x_{i3}, x_{i2}$ a x_{i1} , např. je-li uvažovaným znakem znak „I“, jsou podle uvedené tabulky jednotlivé bity jeho kódu 0110001. Pravidla pro pakování lze shrnout do tří bodů:

1. Platí-li o počtu znaků ke kódování $N = 0$, je úloha vyřešena - skončit, jinak přejít k bodu 2. tohoto pravidla.

2. Platí-li o počtu znaků ke kódování $1 \leq N \leq 8$, řeší úlohu jeden z případů 1 až 8 uvedených v tabulce - provést kódování podle tabulky a skončit, jinak přejít k bodu 3. tohoto pravidla.
3. Kóduje se osm znaků podle posledního případu uvedeného v tabulce a dále pokračovat podle bodu 1. tohoto pravidla.

Při kódování znaků do datového prostoru jsou postupně obsazovány jeho byty počínaje prvním z nich, přičemž klesá N – počet znaků, které zbývají k zakódování. Postup se ukončí podle toho, co nastane dříve, buď umístěním posledního znaku textu zprávy, anebo vyčerpáním vymezeného prostoru, tj. obsazením posledního, 140. bytu datového prostoru, což nastane po umístění 160. znaku výchozího textu.

Uvedený popis obousměrné korespondence mezi znaky textu a obsahem odpovídající části vyrovnávací paměti SMS zprávy ať již před jejím odesláním nebo po jejím přijetí je sice jed-

Znaky	Případ č.	Byte č.	7	6	5	4	3	2	1	0
X_1	1	1	0	x_{17}	x_{16}	x_{15}	x_{14}	x_{13}	x_{12}	x_{11}
X_1X_2	2	1	x_{21}	x_{17}	x_{16}	x_{15}	x_{14}	x_{13}	x_{12}	x_{11}
		2	0	0	x_{27}	x_{26}	x_{25}	x_{24}	x_{23}	x_{22}
$X_1X_2X_3$	3	1	x_{21}	x_{17}	x_{16}	x_{15}	x_{14}	x_{13}	x_{12}	x_{11}
		2	x_{32}	x_{31}	x_{27}	x_{26}	x_{25}	x_{24}	x_{23}	x_{22}
		3	0	0	0	x_{37}	x_{36}	x_{35}	x_{34}	x_{33}
$X_1X_2X_3X_4$	4	1	x_{21}	x_{17}	x_{16}	x_{15}	x_{14}	x_{13}	x_{12}	x_{11}
		2	x_{32}	x_{31}	x_{27}	x_{26}	x_{25}	x_{24}	x_{23}	x_{22}
		3	x_{43}	x_{42}	x_{41}	x_{37}	x_{36}	x_{35}	x_{34}	x_{33}
		4	0	0	0	0	x_{47}	x_{46}	x_{45}	x_{44}
$X_1X_2X_3X_4X_5$	5	1	x_{21}	x_{17}	x_{16}	x_{15}	x_{14}	x_{13}	x_{12}	x_{11}
		2	x_{32}	x_{31}	x_{27}	x_{26}	x_{25}	x_{24}	x_{23}	x_{22}
		3	x_{43}	x_{42}	x_{41}	x_{37}	x_{36}	x_{35}	x_{34}	x_{33}
		4	x_{54}	x_{53}	x_{52}	x_{51}	x_{47}	x_{46}	x_{45}	x_{44}
		5	0	0	0	0	0	x_{57}	x_{56}	x_{55}
$X_1X_2X_3X_4X_5X_6$	6	1	x_{21}	x_{17}	x_{16}	x_{15}	x_{14}	x_{13}	x_{12}	x_{11}
		2	x_{32}	x_{31}	x_{27}	x_{26}	x_{25}	x_{24}	x_{23}	x_{22}
		3	x_{43}	x_{42}	x_{41}	x_{37}	x_{36}	x_{35}	x_{34}	x_{33}
		4	x_{54}	x_{53}	x_{52}	x_{51}	x_{47}	x_{46}	x_{45}	x_{44}
		5	x_{65}	x_{64}	x_{63}	x_{62}	x_{61}	x_{57}	x_{56}	x_{55}
		6	0	0	0	0	0	0	x_{67}	x_{66}
$X_1X_2X_3X_4X_5X_6X_7$	7	1	x_{21}	x_{17}	x_{16}	x_{15}	x_{14}	x_{13}	x_{12}	x_{11}
		2	x_{32}	x_{31}	x_{27}	x_{26}	x_{25}	x_{24}	x_{23}	x_{22}
		3	x_{43}	x_{42}	x_{41}	x_{37}	x_{36}	x_{35}	x_{34}	x_{33}
		4	x_{54}	x_{53}	x_{52}	x_{51}	x_{47}	x_{46}	x_{45}	x_{44}
		5	x_{65}	x_{64}	x_{63}	x_{62}	x_{61}	x_{57}	x_{56}	x_{55}
		6	x_{76}	x_{75}	x_{74}	x_{73}	x_{72}	x_{71}	x_{67}	x_{66}
		7	0	0	0	0	0	0	0	x_{77}
$X_1X_2X_3X_4X_5X_6X_7X_8$	8	1	x_{21}	x_{17}	x_{16}	x_{15}	x_{14}	x_{13}	x_{12}	x_{11}
		2	x_{32}	x_{31}	x_{27}	x_{26}	x_{25}	x_{24}	x_{23}	x_{22}
		3	x_{43}	x_{42}	x_{41}	x_{37}	x_{36}	x_{35}	x_{34}	x_{33}
		4	x_{54}	x_{53}	x_{52}	x_{51}	x_{47}	x_{46}	x_{45}	x_{44}
		5	x_{65}	x_{64}	x_{63}	x_{62}	x_{61}	x_{57}	x_{56}	x_{55}
		6	x_{76}	x_{75}	x_{74}	x_{73}	x_{72}	x_{71}	x_{67}	x_{66}
		7	x_{87}	x_{86}	x_{85}	x_{84}	x_{83}	x_{82}	x_{81}	x_{77}

Obr. 5.3
Pakování jednoho až osmi znaků textu pro službu SMS

noduchý a přesný, avšak pro použití v konkrétních aplikacích nedává dobrý návod jak konverzi v praxi realizovat. Proto jsou dále naznačeny postupy, z nichž lze odvodit programovou realizaci konverze.

Předpokládejme posloupnost osmi znaků $X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_8$. Jejím při-

0	X ₁₇	X ₁₆	X ₁₅	X ₁₄	X ₁₃	X ₁₂	X ₁₁
0	X ₂₇	X ₂₆	X ₂₅	X ₂₄	X ₂₃	X ₂₂	X ₂₁
0	X ₃₇	X ₃₆	X ₃₅	X ₃₄	X ₃₃	X ₃₂	X ₃₁
0	X ₄₇	X ₄₆	X ₄₅	X ₄₄	X ₄₃	X ₄₂	X ₄₁
0	X ₅₇	X ₅₆	X ₅₅	X ₅₄	X ₅₃	X ₅₂	X ₅₁
0	X ₆₇	X ₆₆	X ₆₅	X ₆₄	X ₆₃	X ₆₂	X ₆₁
0	X ₇₇	X ₇₆	X ₇₅	X ₇₄	X ₇₃	X ₇₂	X ₇₁
0	X ₈₇	X ₈₆	X ₈₅	X ₈₄	X ₈₃	X ₈₂	X ₈₁

X ₂₁	X ₁₇	X ₁₆	X ₁₅	X ₁₄	X ₁₃	X ₁₂	X ₁₁
X ₃₁	X ₂₇	X ₂₆	X ₂₅	X ₂₄	X ₂₃	X ₂₂	X ₂₁
X ₄₁	X ₃₇	X ₃₆	X ₃₅	X ₃₄	X ₃₃	X ₃₂	X ₃₁
X ₅₁	X ₄₇	X ₄₆	X ₄₅	X ₄₄	X ₄₃	X ₄₂	X ₄₁
X ₆₁	X ₅₇	X ₅₆	X ₅₅	X ₅₄	X ₅₃	X ₅₂	X ₅₁
X ₇₁	X ₆₇	X ₆₆	X ₆₅	X ₆₄	X ₆₃	X ₆₂	X ₆₁
X ₈₁	X ₇₇	X ₇₆	X ₇₅	X ₇₄	X ₇₃	X ₇₂	X ₇₁
0	X ₈₇	X ₈₆	X ₈₅	X ₈₄	X ₈₃	X ₈₂	X ₈₁

X ₂₁	X ₁₇	X ₁₆	X ₁₅	X ₁₄	X ₁₃	X ₁₂	X ₁₁
0	X ₃₁	X ₂₇	X ₂₆	X ₂₅	X ₂₄	X ₂₃	X ₂₂
0	X ₄₁	X ₃₇	X ₃₆	X ₃₅	X ₃₄	X ₃₃	X ₃₂
0	X ₅₁	X ₄₇	X ₄₆	X ₄₅	X ₄₄	X ₄₃	X ₄₂
0	X ₆₁	X ₅₇	X ₅₆	X ₅₅	X ₅₄	X ₅₃	X ₅₂
0	X ₇₁	X ₆₇	X ₆₆	X ₆₅	X ₆₄	X ₆₃	X ₆₂
0	X ₈₁	X ₇₇	X ₇₆	X ₇₅	X ₇₄	X ₇₃	X ₇₂
0	0	X ₈₇	X ₈₆	X ₈₅	X ₈₄	X ₈₃	X ₈₂

Obr. 5.4

Schéma jednoho kroku výpočtu při pakování osmi znaků

rozeným výchozím formátem je osmice bytů, z nichž každý obsahuje sedmibitový kód jednoho znaku, pro velkou většinu běžně užívaných znaků je toto kódování shodné se standardem ASCII. Byty si lze představit uspořádaný pod sebou s jednotlivými bity zapisanými v obvyklém pořadí, tj. bit s největší vahou vlevo. Vznikne tak čtvercová matice M binárních hodnot znázorněná v levé tabulce na obr. 5.4.

Navrhovaný postup pakování probíhá v sedmi iteračních krocích K_n ($n=1,2,..7$), z nichž každý je proveden jen s byty na $8-n$ posledních řádcích matice M a se skládá ze dvou fází. V první fázi kroku se kopírují bity z pozice s nejmenší vahou do pozice bitu s nejvyšší vahou předcházejícího bytu, v druhé fázi kroku se posouvají všechny bity v bytech o jednu pozici vpravo. Střední a pravá část tabulky na obr. 5.4 znázorňuje matici M pro provedení první a druhé fáze prvního kroku iterace. Kompaktně a přesněji lze celou iteraci popsat algoritmem:

```

for n := 1 to 7 do
  begin
    for i := n to 7 do  $M_{i,1} := M_{i+1,8}$ ;
    for i := n+1 to 8 do
      begin
        for j := 8 downto 2 do  $M_{i,j} := M_{i,j-1}$ ;
         $M_{i,1} := 0$ 
      end
    end
  end

```

Uvedeným postupem pakování osmi znaků se uvolní poslední, osmý řádek původní matice, zatímco prvních sedm řádků představuje sedm bytů obsahujících informaci o všech osmi

znacích připravenou k uložení do vyrovnávací paměti k odeslání zprávy SMS. Při pako-

vání menšího počtu znaků, je postup analogický, jen iteračních kroků je příslušně méně a nedojde ke kompletnímu uvolnění posledního řádku obdélníkové matice, a tedy ani k úspoře datového prostoru. Taková situace však nastává při zpracování každé zprávy nejvýše jednou a jen tehdy, není-li počet znaků zprávy dělitelný osmi.

```

      clr C
      mov R3, #7
L2:   mov A, R5
      mov R0, A
      mov A, R3
      mov R2, A
L1:   mov A, @R0
      rl A
      rrc A
      clr C
      rrc A
      mov @R0, A
      dec R0
      djnz R2, L1
      mov A, @R0
      rl A
      rrc A
      mov @R0, A
      djnz R3, L2

```

Uvedený algoritmus je již sice dostatečně konstruktivní pro naprogramování, jeho konkrétní efektivní programová realizace je však závislá na instrukčním souboru použitého procesoru, případně na nabídce příkazů a procedur použitého programovacího jazyka. Jako příklad je zde uveden výpis části programu sestaveného pro jednočipové mikropočítače typu 8052 (v registru R5 se očekává adresa posledního z osmice znaků určených k pakování, ostatní proměnné mají lokální význam).

Je-li textová zpráva před odesláním kódována, je třeba ji po přijetí dekodovat zpět do původní textové podoby.

Souvislost přijatých bytů a výsledných znaků zprávy je dán již uvedenou tabulkou, která popisuje konverzi osmi elementárních situací pro osm různých skupin přijatých bytů. Pravidlo, podle kterého lze převést dekodování každé libovolně dlouhé zprávy převést na postupnou aplikaci v tabulce vyjmenovaných případů, lze formulovat takto:

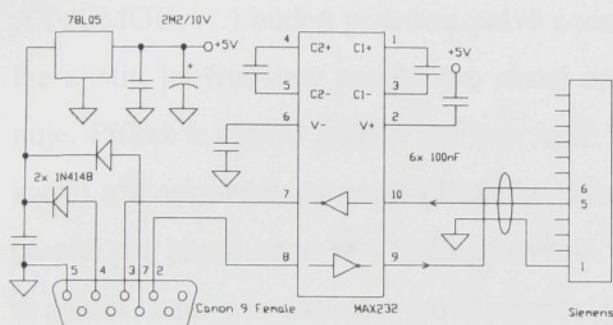
1. Platí-li o počtu bytů k dekodování $N=0$, je úloha vyřešena – skončit, jinak přejít k bodu 2. toho pravidla.
2. Platí-li o počtu bytů k dekodování $1 \leq N \leq 6$, úlohu řeší jeden z případů 1 až 6 uvedených v tabulce, provést a skončit, jinak přejít na bod 3. tohoto pravidla.
3. Platí-li o počtu bytů k dekodování $N \geq 8$, dekodovat 7 z nich podle případu 7 uvedeného v tabulce, provést a přejít na bod 1. tohoto pravidla, jinak přejít na bod 4. tohoto pravidla.
4. Podle počtu požadovaných výsledných znaků dekodovat buď podle případu 7 nebo podle případu 8 uvedených v tabulce, provést a skončit.

Při dekodování bytů z uživatelského datového prostoru přijaté zprávy postupně klesá N – počet bytů, které zbývají k převedení na znaky textu. Postup končí dekodová-

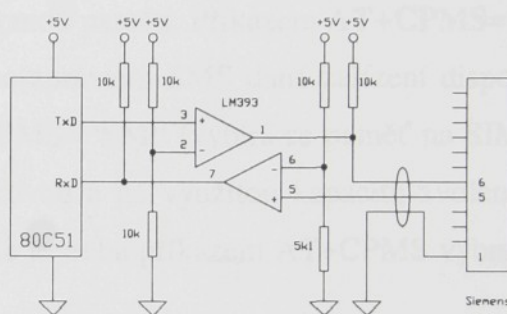
ním všech přijatých bytů, případně získáním požadovaného počtu znaků textu zprávy. Informace o celkovém počtu znaků zprávy a další systémové informace jsou přenášeny spolu se zakódovaným textem nebo jinými daty.

5.3 Komunikační uživatelské rozhraní mobilních koncových zařízení

Odesílat a číst zprávy SMS jinak než přes svoji klávesnici a displej umožňují některé mobilní telefony a průmyslové moduly prostřednictvím svého vnějšího sériového rozhraní a sady tzv. AT příkazů. Standardizací připojení se zabývá organizace ETSI, viz. odkaz [5.1], ale přesto některé parametry sériového rozhraní a vlastnosti příkazů bývají závislé na konkrétním typu telefonu. Vše, co bylo a bude zde uvedeno, bylo ověřeno s přístroji od firmy Siemens.



Obr. 5.5a
Připojení mobilního telefonu k RS232



Obr. 5.5b
Připojení mobilního telefonu k mikropočítači

Asynchronní sériové rozhraní koncových zařízení vychází z doporučení RS232. Obvyklé jsou jedna ze standardních přenosových rychlostí (9600 Bd, 19200 Bd, ...), start bit, 8 datových bitů, jeden stop bit, bez, bez parity. U rozhraní mobilních telefonů nebývají dodrženy standardní napěťové úrovně logických hodnot, a tak je jim třeba připojené zařízení přizpůsobit. Příklad zapojení vhodného kabelu s elektronikou pro úpravu úrovní napětí signálů pro telefony Siemens je znázorněn na obr. 5.5a. Průmyslové moduly lze k standardnímu rozhraní RS232 připojit přímo. K jednočipovým mikropočítačům s napájením 5V lze mobilní telefon připojit např. přes přizpůsobovací obvod zobrazený na obr. 5.5b.

S připojeným zařízením GSM lze vyměňovat informace prostřednictvím dialogu, jehož základem jsou již zmíněné AT příkazy. Všechny AT příkazy i odpovědi přístroje GSM na ně jsou čitelné formátované řetězce znaků, takže počáteční ověření komunikace

lze provést pomocí znakového terminálu, např. programu Hyperterminal, který je distribuován společně s MS Windows. Doporučeními pro implementace AT příkazů v zařízeních GSM se zabývají dokumenty ETSI, viz [5.2] a zejména pak dokument [5.3], ve kterém jsou podrobně popsány příkazy související se službou SMS. Zde jsou dále uvedeny a v nezbytném rozsahu popsány jen ty příkazy, které byly použity pro odesílání, příjem a správu zpráv SMS při zajištění přenosu naměřených dat.

AT+CPMS (Preferred Message Storage)

Některá koncová zařízení GSM mají možnost ukládat zprávy SMS do různých typů paměti (v přístroji, na SIM kartě, archiv, ...). Příkazem AT+CPMS lze vybrat jednu z těchto pamětí, čímž se zajistí, že další příkazy pro práci se zprávami (AT+CMGR, AT+CMGD, ...) budou pracovat právě s touto vybranou pamětí. Příkazem **AT+CPMS=?** lze zjistit, jakými typy paměti pro různé operace se zprávami SMS dané zařízení disponuje. Příkaz k výběru paměti má tvar např. **AT+CPMS="SM"** (vybírání se paměť na SIM kartě) a z odpovědi na tento příkaz lze zjistit celkovou a již využitou kapacitu zvolené paměti pro různé operace s SMS zprávami. Obvykle je třeba příkazem AT+CPMS vybrat tu paměť, kam jsou ukládány nově příchozí zprávy.

AT+CMGF (Message Format)

Příkazem se volí mód zadávání zprávy SMS. Prakticky existují dva módy zadávání SMS zpráv, textový a PDU. Při textovém módu se komunikačním rozhraním předává pouze číslo adresáta a textová data zprávy. Telefon pak automaticky (a v tom je textový mód bližší odesílání zprávy z klávesnice) sestaví tzv. blok PDU (Protocol Description Unit) zprávy, čímž ji připraví pro odeslání, při tom k datům doplní nezbytné systémové informace (časová platnost zprávy, délku zprávy...). Druhý způsob, tzv. PDU mód, předpokládá, že se komunikačním rozhraním předá telefonu již sestavený blok PDU připravený k odeslání. Textový mód podporuje jen malý počet typů telefonních přístrojů, PDU mód je rozšířen obecně. Textový mód neumožňuje vřadit do zprávy jiné znaky než ty, které patří do aktuální abecedy pro službu SMS. PDU mód se volí příkazem **AT+CMGF=0**, textový mód příkazem **AT+CMGF=1**. Všechny podporované možnosti parametru lze zjistit příkazem **AT+CMGF=?**, aktuální nastavení lze získat z odpovědi na příkaz ve tvaru **AT+CMGF?**.

Vzhledem k větší nezávislosti na typu použitého GSM zařízení a plné dostupnosti uživatelského datového prostoru, byly všechny operace s SMS zprávami navrženy a realizovány v módu PDU. Proto i následující AT příkazy pro čtení a odesílání zpráv jsou uvedeny jen v této variantě.

AT+CMGR (Read Message)

Zprávy SMS v paměti jsou při ukládání systémem telefonu opatřeny indexem, tj. přirozeným číslem menším nebo rovným kapacitě paměti, který zprávu identifikuje pro další operace s ní. Při určování indexu zprávy systém hledá nejnižší možnou volnou hodnotu. Odpověď na příkaz AT+CMGR, který zpřístupňuje obsah jedné zprávy závisí na módu, do kterého je přístroj přepnut příkazem AT+CMGF. Např., je-li telefon přepnut do PDU módu a ve vybrané paměti telefonu je uložena zpráva s indexem 3, vypadá odpověď na příkaz **AT+CMGR=3** takto:

```
+CMGR: 1,,155
```

```
0791246030500200040C912460505884270000208081 ...
```

```
OK
```

První číslo v prvním řádku odpovědi znamená status zprávy, má hodnotu 0 pro přijaté a nepřečtené zprávy, hodnotu 1 pro přijaté a přečtené zprávy, hodnotu 2 pro uložené a neodeslané zprávy a hodnotu 3 pro uložené a odeslané zprávy. V prázdném poli může být alfanumerická identifikace odesílatele zprávy (získaná z telefonního seznamu) a posledním číslem je délka uložené zprávy. Na dalších řádcích odpovědi je blok dat s PDU přijaté zprávy. Správnost operace je potvrzena promptem „OK“. Pokud by zpráva v paměti neexistovala, byla by odpověď takováto:

```
+CMGR: 0,,0
```

```
OK
```

AT+CMGS (Send Message)

Příkaz je určen pro vložení a bezprostřední odeslání zprávy. Jeho tvar závisí na módu nastaveném příkazem AT+CMGF. Pro PDU mód vypadá jeho použití např. takto:

```
AT+CMGS=173
```

```
0011000A ... <Ctrl Z>
```

```
OK
```

Datový blok s PDU odesílané zprávy v tomto příkladu začíná hodnotami 00 11 00 0A ... a vlastní PDU je dlouhý 173 bytů.

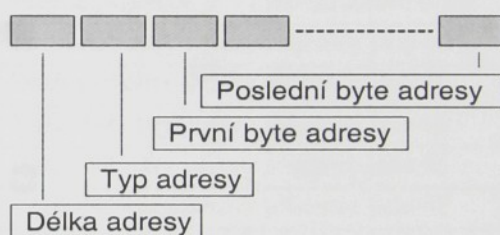
AT+CMGD (Delete Message)

Příkaz AT+CMGD ruší v paměti předem vybrané příkazem AT+CPMS zprávu se zadaným indexem. Např. příkaz **AT+CMGD=3** odstraní z paměti zprávu s indexem 3 a uvolní tak tuto hodnotu indexu pro jinou zprávu.

Jak již bylo naznačeno, se zprávami SMS lze pracovat ve dvou různých módech. Ve srovnání s textovým módem je mód PDU základní, v hierarchii úrovní služeb je blíže fyzickému přenosu dat a dále od klasického způsobu zapisování a čtení zpráv SMS, je podporován výrazně větším počtem typů koncových zařízení GSM, dává víc možností pro řízení služby SMS a dovoluje do zpráv kódovat data v libovolném binárním formátu. Proto byl mód PDU přednostně zvolen ve všech řešených aplikacích. Blok PDU se skládá z řady bytů a jeho struktura je podrobně popsána v rozsáhlém dokumentu [5.4]. Zde jsou uvedeny jen vybrané informace a v takovém rozsahu, jak byly použity v souvislosti s přenosem naměřených dat.

Transportní vrstva služby SMS rozeznává šest různých bloků PDU, použití dvou z nich je pro uživatele služby SMS nezbytné, pro odeslání zprávy z mobilního zařízení je nutno sestavit PDU blok SMS-SUBMIT a zpráva přijatá mobilním zařízením obsahuje PDU blok SMS-DELIVER. Pro možnost směrování přenosu dat nižšími vrstvami služby předchází

blokům PDU informace o adrese SMC, které je vždy jedním z účastníků přenosu. Další typy bloků jsou používány pro zajištění a podporu přenosu dat.



Obr. 5.6
Struktura pole s adresou

Datové bloky příkazů AT+CMGS a AT+CMGR začínají informací o adrese SMSC. Posloupnost bytů nesoucí informaci o této adrese mají strukturu přesně definovanou v [5.5] a zjednodušeně znázorněnou na obr. 5.6. První byte je v hexadecimální soustavě vyjádřený počet bytů, které dále popisují vlastní adresu. Je-li tato hodnota 00h, znamená to, že další byty pole chybí a při odesílání zprávy se jako adresa se použije hodnota, která je uložena na SIM kartě nebo v EEPROM telefonu). V opačném případě pole bytů pokračuje určením typu adresy, pro stručnost uvedme jen jednu možnou hodnotu: 91h, která znamená, že v každé slabice každého z dalších bytů je binárně kódována jedna

cifra telefonního čísla (podle pořadí v telefonním čísle liché cifry jsou na pozicích nižších slabik). Pokud by byl počet cifer čísla lichý, doplní se na volnou vyšší slabiku posledního bytu pole hodnota *Fh*. Např. pro adresu SMSC operátora T-mobile CZ s telefonním číslem 0603052000 vypadá pole bytů podle obr. 5.6 takto: 07 91 24 60 30 50 02 00.

V datových blocích příkazů AT+CMGS a AT+CMGR se také vyskytují adresy adresáta a odesílatele zprávy. Tyto jsou kódovány posloupností bytů formálně shodnou s tou, která je znázorněna na obr. 5.6, avšak délka adresy zde má jiný význam. Její hodnota určuje počet cifer telefonního čísla, tj. počet skutečně užitečně zaplněných slabik v poli, tedy ne také případné té slabiky, která má z definice hodnotu *Fh*.

7	6	5	4	3	2	1	0	Jméno parametru podle ETSI	Význam hodnoty parametru
0	0	0	1	0	0	0	1	TP-Message-Type-Indicator	Zpráva je typu SMS SUBMIT
								TP-Reject-Duplicates	Neodmítat zdvojené zprávy
		0						TP-Valid-Priority-Format	Časová platnost určena relativně číslem
								TP-Status-Report-Request	Nepožaduje se zaslání zprávy o stavu
								TP-User-Data-Header-Indicator	Uživatelská data neobsahují hlavičku
								TP-Replay-Path	Nepožaduje se adresa SMSC pro odpověď
0	0	0	0	0	0	0	0	TP-Message-Reference	Referenci zprávy spravuje zařízení GSM
0	0	0	0	1	0	1	1	TP-Destination-Address	Délka adresy příjemce zprávy je 12 cifer
1	0	0	1	0	0	0	1		Adresa příjemce je v mezinárodním tvaru
0	0	1	0	0	1	0	0		První dvě cifry adresy příjemce jsou 42
0	1	1	0	0	0	0	0		Další dvě cifry adresy příjemce jsou 06
0	1	0	1	0	0	0	0		Další dvě cifry adresy příjemce jsou 05
0	1	0	1	1	0	0	0		Další dvě cifry adresy příjemce jsou 85
1	0	0	0	0	1	0	0		Další dvě cifry adresy příjemce jsou 48
0	0	1	0	0	1	1	1		Další dvě cifry adresy příjemce jsou 72
0	0	0	0	0	0	0	0	TP-Protocol-Identifier	Žádný protokol vyšší vrstvy
0	0	0	0	0	0	0	0	TP-Data-Coding-Scheme	Implicitní sedmibitová abeceda pro data
1	0	1	0	1	0	1	0	TP-Validity-Period	Platnost zprávy nastavena na čtyři dny
0	1	1	0	0	1	0	0	TP-User-Data-Length	Uživatelská data: 100 sedmibitových slov
								TP-User-Data	První byte uživatelských dat
									Uživatelská data podle obr. 4.3.3
									Poslední byte uživatelských dat

Obr. 5.7
Struktura a příklad bloku PDU pro příkaz AT+CMGS

Posloupnost bytů dat pro příkaz AT+CMGS se skládá z pole bytů, které obsahují informaci o SMSC podle obr. 5.6 a z bloku PDU SMS-SUBMIT, jehož délka vyjádřená v bytech je parametrem příkazu. Struktura použité varianty PDU SMS-SUBMIT je znázorněna na obr. 5.7, popis obecné struktury je součástí dokumentu [5.4].

Posloupnost bytů dat pro příkaz AT+CMGR se skládá z pole bytů, které obsahují informaci o SMSC podle obr. 5.6 a z bloku PDU SMS-DELIVER. Struktura typicky využívané varianty PDU SMS-DELIVER je znázorněna na obr. 5.8, podrobný popis všech variant je uveden opět v dokumentu ETSI [5.4].

7	6	5	4	3	2	1	0	Jméno parametru podle ETSI	Význam hodnoty parametru
0	0	0	0	0	1	0	0	TP-Message-Type-Indicator TP-More-Messages-to-Send TP-Status-Report-Indication TP-User-Data-Header-Indicator TP-Replay-Path	Zpráva je typu SMS DELIVER Nejsou další zprávy k doručení Neobsazeno Není požadována zprávy o stavu Uživatelská data neobsahují hlavičku Neexistuje cesta pro odpověď
0	0	0	0	1	0	1	1	TP-Originating-Address	Délka adresy odesílatele zprávy je 12 cifer
1	0	0	1	0	0	0	1		Adresa příjemce je v mezinárodním tvaru
0	0	1	0	0	1	0	0		První dvě cifry adresy příjemce jsou 42
0	1	1	0	0	0	0	0		Další dvě cifry adresy příjemce jsou 06
0	1	0	1	0	0	0	0		Další dvě cifry adresy příjemce jsou 05
0	1	0	1	1	0	0	0		Další dvě cifry adresy příjemce jsou 85
1	0	0	0	0	1	0	0		Další dvě cifry adresy příjemce jsou 48
0	0	1	0	0	1	1	1		Další dvě cifry adresy příjemce jsou 72
0	0	0	0	0	0	0	0	TP-Protocol-Identifier	Žádný protokol vyšší vrstvy
0	0	0	0	0	0	0	0	TP-Data-Coding-Scheme	Implicitní sedmibitová abeceda pro data
1	0	0	1	1	0	0	1	TP-Service Centrum Time Stamp	Čas přijetí zprávy SMSC – rok: 1999
0	0	1	0	0	0	0	0		Čas přijetí zprávy SMSC – měsíc: únor
0	0	1	0	0	0	0	1		Čas přijetí zprávy SMSC – den: 12.
0	1	0	1	0	0	0	0		Čas přijetí zprávy SMSC – hodina: 05
0	1	1	1	0	1	0	1		Čas přijetí zprávy SMSC – minuta: 57
0	0	0	0	0	0	1	1		Čas přijetí zprávy SMSC – sekunda: 30
0	0	1	0	0	0	0	1		Časové pásmo, jednotka = 15 min
0	1	1	0	0	1	0	0	TP-User-Data-Length	Uživatelská data: 100 sedmibitových slov
								TP-User-Data	První byte uživatelských dat
									Uživatelská data podle obr. 4.3.3
									Poslední byte uživatelských dat

Obr. 5.8
Struktura a příklad bloku PDU pro příkaz AT+CMGR

5.4 Přenos dat pomocí služby SMS

Doposud uvedený výběr definic, doporučení a pravidel týkajících se služby SMS systému GSM představuje ověřený kompaktní prostředek, který umožňuje zařadit službu SMS do měřicího řetězce a přenášet s její pomocí naměřená data bezdrátově na značnou

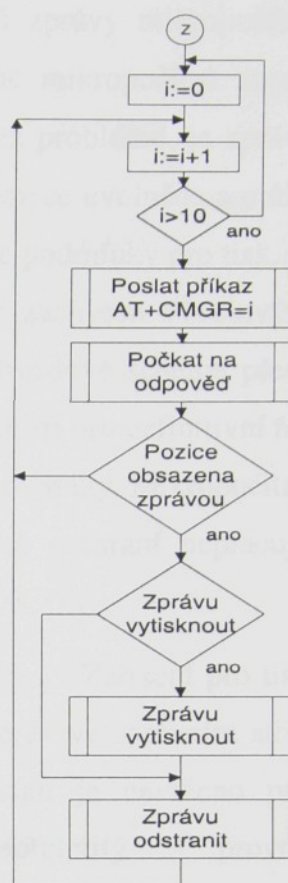
vzdálenost. Zásadní podmínkou jeho nasazení je dostupnost signálu některého z operátorů GSM na obou stranách datového přenosu. Vlastnosti služby SMS vytvářejí určitá další omezení parametrů měřicího řetězce zejména pokud jde o datovou propustnost přenosu a zpoždění mezi vysláním a přijetím dávky dat.

Konkrétním příkladem realizovaného systému, který využívá představený prostředek pro přenos naměřených dat, je systém pro přenos měřených provozních parametrů soustavy jezů na odlehlém místě. Systém je v současnosti využíván jako záložní systém, který je aktivován automaticky při výpadku nedostatečně spolehlivého, avšak provozně méně nákladného systému hlavního, který pro přenos dat využívá analogového telefonního vedení s modemy.

Technologická soustava je lokálně řízena modulárním systémem PLC Omron, který měří sledované veličiny, udržuje jejich aktuální hodnoty v souvislé oblasti své paměti a odvozuje z nich akční zásahy do soustavy. PLC je vybaven několika sériovými asynchronními rozhraními, z nichž jedno je věnováno právě komunikaci se záložním systémem pro přenos dat do vzdáleného správního střediska.

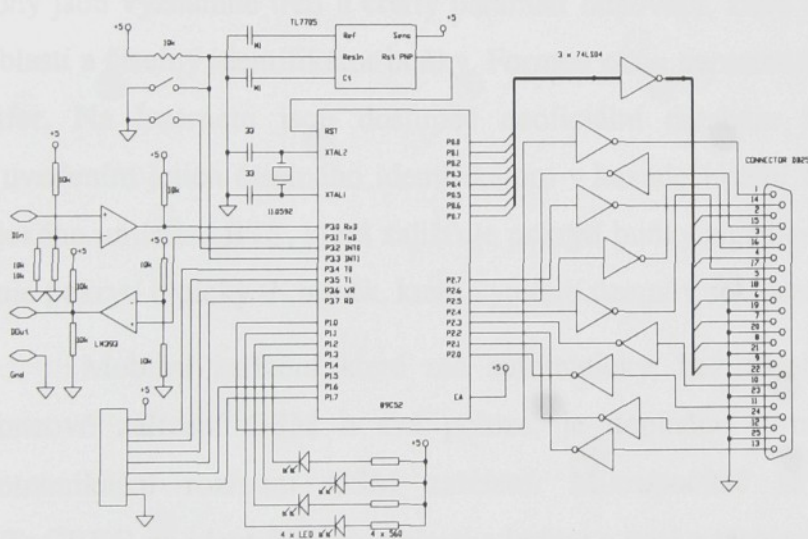
Mezi řídicím PLC a zařízením GSM je mikropočítač, který se, je-li aktivován, jedním svým sériovým portem prostřednictvím firemního protokolu firmy Omron Hostlink periodicky dotazuje na hodnoty sledovaných veličin a svým druhým sériovým portem cyklicky vydává připojenému průmyslovému modulu příkaz AT+CMGS s datovým blokem, ve kterém jsou zakódována všechna data o sledované soustavě. Na základě tohoto AT příkazu modul GSM zajistí odeslání zprávy SMS.

Ve správním středisku je umístěn druhý průmyslový modul GSM, který odeslané zprávy SMS přijímá. K němu je přes sériové rozhraní připojen mikropočítač, jehož úkolem je automatický tisk zpráv SMS, které jsou doručeny na průmyslový modul. Základní funkci mikropočítače vřazeného mezi zařízení GSM a malou řádkovou tiskárnu lze popsat takto: Mikropočítač příkazem AT+CMGR cyklicky, index po indexu, prohledává paměť na SIM kartě, do které jsou ukládány všechny doručené SMS zprávy.



Obr. 5.9
Algoritmus pro tisk
zpráv SMS

V okamžiku, kdy mikropočítač z odpovědi modulu rozpozná, že je pozice indexu obsazena novou zprávou, zjistí jejího odesílatele, čas odeslání zprávy a uloží obsah textové zprávy do své paměti. Z uvedených zjištěných parametrů zprávy mikropočítač rozhodne, zda je zpráva určena k vytisknutí. V kladném případě mikropočítač zapne tiskárnu a zprávu vytiskne. Po ověření, že tisk zprávy proběhl bez problému, je zpráva z paměti na SIM kartě odstraněna příkazem AT+CMGD. Tím je pozice uvolněna a může být obsazena další přijatou zprávou. V případě, že zpráva nesplňuje podmínky pro tisk, je z paměti pouze odstraněna. Algoritmus činnosti mikropočítače je zachycen vývojovým diagramem znázorněným na obr. 5.9. Na obr. 5.10 je uvedeno obvodové schéma předchozí jednodušší verze mikropočítače pro tisk zpráv, která byla výchozí pro definitivní řešení a která je schopna plnit všechny základní funkce tak, jak byly popsány. Mikropočítač je připraven pro připojení k mobilnímu telefonu, proto sériové rozhraní nepracuje s doporučenými napětíovými úrovněmi, ale s úrovněmi logiky CMOS 3V.



Obr. 5.10

Obvodové schéma mikropočítače pro automatický tisk přijatých zpráv SMS

Zařízení pro tisk zpráv ve správním středu disku je navrženo pro nepřetržitý provoz s napájením zálohovacím NiCd akumulátorem 30 Ah, 6V, který zajistí, že i při výpadku napájecího napětí, při četnosti 60 zpracováváných zpráv za den vydrží v činnosti nejméně 5 dnů. Mikropočítač průběžně kontroluje

stav baterie, teplotu v místnosti, ověřuje funkci tiskárny, ... V případě, že zjistí problematickou hodnotu některé ze sledovaných veličin, odešle příkazem AT+CMGS upozornění v podobě zprávy SMS na osobní mobilní telefon osoby zodpovědné za správnou funkci celého systému.

Dále je zmíněna ještě jedna aplikace služby SMS systému GSM, s jejíž pomocí sice nebyla řešena žádná typicky měřicí úloha, která je ale zajímavá tím, že sám základní

systém sítě GSM může být zdrojem užitečné informace o fyzikální veličině, o poloze. Aplikace poskytuje držiteli koncového zařízení GSM informaci, na jejímž základě je možno přibližně určit polohu jiného mobilního koncového zařízení GSM, pokud je toto zařízení na území, které je pokryto signálem sítě GSM. Aplikace využívá té skutečnosti, že území, které pokrývá signál jednoho operátora, je rozděleno na disjunktní buňky o velikosti stovek metrů až desítek kilometrů (podle typu terénu a zástavby), které jsou opatřeny jedinečným číselným identifikátorem. Každé mobilní zařízení, které je v provozu a v dosahu signálu sítě, je prostřednictvím režijních kanálů informováno o tom, do kterého segmentu sítě momentálně patří.

Mobilní zařízení poskytuje informaci o příslušnosti k segmentu v řetězci obsaženém v odpovědi na dotazovací AT příkaz **AT+CREG?**, pokud byla před tím forma odpovědi nakonfigurována konfiguračním příkazem **AT+CREG=2**. Odpověď na dotazovací příkaz pak může mít např. takovýto tvar: **+CREG: 1,1,"361A","4E5B"**. Pro určení polohy jsou významné třetí a čtvrtý parametr odpovědi, které obsahují číselný identifikátor oblasti a číselný identifikátor buňky. Formou obou parametrů je čtveřice hexadecimálních cifer. Na Internetu jsou dostupné neoficiální databáze buněk pro české operátory s uvedením jejich číselného identifikátoru v hexadecimální nebo dekadické podobě a fyzického umístění BTS, která zajišťuje pokrytí buňky signálem. Každá BTS obvykle zajišťuje pokrytí typicky tří buněk, které vyplňují území v sektorech kolem BTS.

Mobilní zařízení které má automaticky, bez zásahu obsluhy informovat jiné koncové zařízení GSM o své poloze, je doplněno o mikropočítač, připojený přes komunikační rozhraní GSM zařízení. Mikropočítač se nejprve dotáže příkazem **AT+CREG** na identifikátory oblasti a buňky a poté z těchto informací sestaví text zprávy SMS a zajistí její odeslání dalším AT příkazem **AT+CMGS** koncovému zařízení, které polohu zjišťuje. Celý tento proces je možno iniciovat připojeným mikropočítačem opakovaně v pravidelném časovém rastru, nebo při detekci přestupu mobilního GSM zařízení z jedné buňky do jiné a zjištěnou polohu doplnit informací o čase přestupu a podávat tak průběžně informaci o poloze stanice na území. Další možností je proces zjištění polohy a odeslání informace iniciovat po přijetí požadavku, který může mít podobu zprávy SMS. Ze systémové části takové zprávy SMS je možné zjistit adresu (telefonní číslo) zařízení, které polohu požaduje, a reagovat tak cíleně na požadavky od různých koncových zařízení GSM. Všemi uvedenými a i dalšími módy přístupu lze

vybavit mikropočítač připojený k mobilnímu zařízení a přepínat pak mezi nimi pomocí konfiguračního pokynu, který může být přenesen také jako zpráva služby SMS.

V uvedené aplikaci mikropočítač komunikuje s připojeným zařízením GSM. Pomocí AT příkazů mikropočítač z koncového GSM zařízení získává informace a aktivuje jeho funkce. Protože možnosti AT příkazů jsou mnohem širší než je jen již zmíněná správa SMS zpráv, nabízí se řada zobecnění funkcí sestavy mikropočítače s GSM zařízením. Sestava může přijmout zprávu SMS, ve které bude obsažen jeden nebo i více některých ze sady AT příkazů. Pomocí takto dálkově distribuovaných AT příkazů je pak možno ovládat na dálku činnost mobilního zařízení GSM nebo zjišťovat jeho stav, např. informaci o tom, ve které buňce je mobilní zařízení momentálně zaregistrováno, tedy informaci o tom, kde přibližně se zařízení nachází. Odpovědi na jednotlivé AT příkazy lze připojeným mikropočítačem zpracovávat, sestavovat z nich jiné zprávy SMS a řídit jejich odesílání zpět, případně na jiné, třetí GSM zařízení.

Další GSM službou, která je vhodná pro přenos technologických informací, je služba GPRS (General Packet Radio Service), viz [5.5]. Pro zahájení přenosu informací pomocí této služby může služba SMS splnit jednu pomocnou, ale nezbytnou úlohu. Při přihlašování se mobilního telefonu k přenosu dat pomocí GPRS operátor přiděluje telefonu jeho tzv. IP adresu, která pak telefon identifikuje v síti Internet. V prostředí Internetu jsou data přenášena po paketech, které v sobě obsahují IP adresu adresáta i odesílatele paketu. Pokud vysílající a přijímající strany nemají se svým GSM nebo ISP (Internet Service Provider) operátorem vyjednáno přidělování statické IP adresy, je jim IP adresa přidělena dynamicky, při každém přihlášení se k síti jiná, strany pak navzájem neznají své IP adresy a ani jedna ze stran nemůže zahájit výměnu dat vysláním prvního paketu. A právě sdělení své přidělené IP adresy protější straně lze realizovat pomocí služby SMS, která používá jinou adresaci, pomocí telefonního čísla, které je každému koncovému zařízení GSM vždy přiřazeno staticky.

Literatura

- [5.1] Dokument ETSI: Digital cellular telecommunication system (Phase 2+); AT command set for GSM Mobile Equipment (ME)(GSM 07.07 version 5.1.1).
- [5.2] Dokument ETSI: Digital cellular telecommunication system (Phase 2+); Use of Data Terminal Equipment – Data Circuit terminating; Equipment (DTE-

DCE) interface for Short Message Service (SMS) and Cell Broadcast Service (CBS)(GSM 07.05 version 5.5.0).

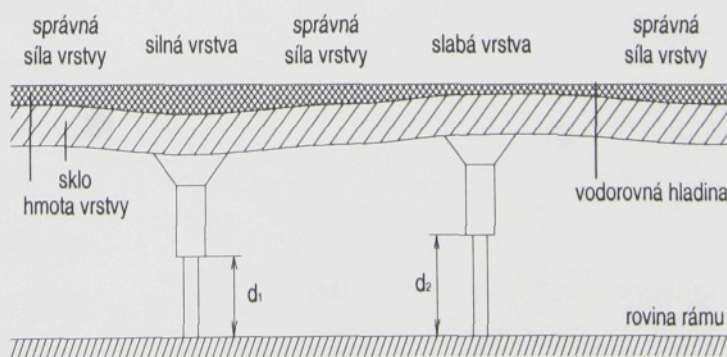
- [5.3] Dokument ETSI: Digital cellular telecommunication system (Phase 2+); Technical realization of the Short Message Service (SMS) Point-to-Point (PP)(GSM 03.40).
- [5.4] Dokument ETSI: Digital cellular telecommunication system (Phase 2+); Point-to-Point (PP) Short Message Service (SMS) support on mobile radio interface (GSM 04.11 version 7.0.0 Release 1998).
- [5.5] Hernych,M., Tůma,P.: Využití GSM sítí pro přenos průmyslových dat. in Konferencia s medzinárodnou účasťou Kybernetika a informatika 2002.

6 Měření síly transparentních vrstev

Technická a stavební skla se speciálními vlastnostmi se vyrábějí vkládáním mezivrstev z různých průhledných materiálů mezi tabule obyčejného plochého skla. Výsledné vrstevnaté struktury pak mají povrchové a optické vlastnosti blízké vlastnostem čistého skla, ale vložené materiály jim navíc dávají požadované tepelné a mechanické parametry. Vyrábějí se tak např. skla protipožární, neprůstřelná a další. Nejběžnějším příkladem jsou čelní automobilová skla, která mají příčnou strukturu sklo-plast-sklo, kde hlavními úkoly vložené plastové vrstvy je udržet sklo pohromadě, zajistit aspoň omezenou průhlednost a zabránit vzniku nebezpečných velkých ostrých střepů při případném mechanickém poškození skla, např. při autonehodě. Pro speciální použití se vyrábějí struktury až se 7 vrstvami (4x sklo, 3x mezivrstva) standardně v základním formátu 2 x 3 m.

6.1 Měřená vrstva

Umístění mezivrstvy mezi skla se dosahuje různými způsoby podle toho, jaké mechanické vlastnosti má materiál vrstvy. Některé druhy materiálů mají při aplikaci podobu fólie a jsou dodávány v rolích. V takovém případě se folie ořízne na požadovaný formát, v čistém prostředí se vloží mezi skla a při okrajích se mechanicky zafixuje. V komoře při zvýšeném tlaku a teplotě se pak po určité době fólie v sestavě nataví, zprůhlední a mechanicky spojí (slepí) k sobě s obě skla. Jiné materiály (např. ty, které dávají sklům odolnost proti prohoření) se dodávají v podobě tekutého gelu a aplikují se rozléváním na sklo, na kterém je podél okrajů vytvořena hráz ze silikonového tmelu. Čirá gelovitá hmota se na spodní sklo rozlije do připravené hráze a rozlitá se nechává po určitou dobu zrát, přičemž hmota zatuhne. Rovinu skla je při tom nezbytné udržovat v přesně vodorovné poloze. Po vyzrání je hmota vrstvy natolik



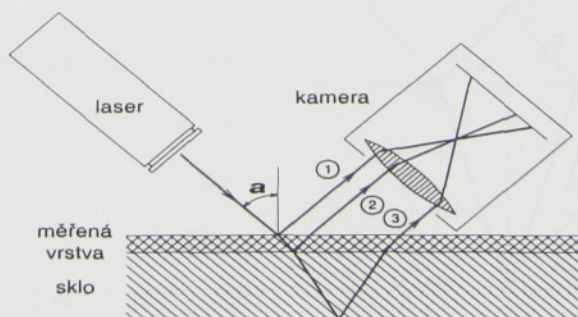
Obr. 6.1

Vliv nastavení výšky podpěr na sílu vrstvy

tuhá, že je možno na ni přiložit další tabuli skla a podobně jako v případě s fólií celou sestavu působením tlaku a teploty spojit.

Zrání – samovolné vytvrzování hmoty vrstvy se děje ve zvláštní místnosti, kde jsou tabule položeny na speciálních rámech. Každá taková tabule skla standardního formátu $2 \times 3 \text{ m}$ s nanesenou hmotou několik hodin leží na 72 podpěrách, z nichž každá má ručně nastavitelnou výškou. Přesnost nastavení podpěr, a tedy i přesnost nastavení horizontální roviny skla má zásadní význam na výslednou rovnoměrnost vrstvy po procesu zrání. Ta je pro kvalitu vyráběného skla kritická, a proto je síla nanesené vrstvy každé tabule proměřována. Měření má dva významy. Jednak lze podle jeho výsledku vyloučit z dalšího zpracování tabule s výrazně nerovnoměrnou vrstvou a dále lze z odchylek od požadované hodnoty průběžně (po každé tabuli) odvozovat zásahy do seřízení výšky podpěr rámu, ve kterém probíhalo zrání vrstvy příslušné tabule. Situace při procesu zrání a vliv nastavení výšky podpěr na tloušťku vrstvy je znázorněn na obr. 6.1. Podpěra s příliš nízkou nastavenou výškou d_1 způsobuje nežádoucí zesílení vrstvy a je potřeba ji pro příští tabuli zvýšit, naopak podpěra s nastavenou výškou d_2 způsobuje zeslabení vrstvy a měla by být pro zrání další tabule snížena.

Z technologie výroby vyplynulo pro metodu měření tloušťky vrstvy několik bodů zadání: nominální hodnota tloušťky vrstvy je 2 mm , požadované rozlišení při měření je 5 mm , měření se musí provádět nedestruktivní bezkontaktní metodou přibližně v místech plochy, kde při zrání vrstvy je tabule v kontaktu s podpěrami. Po několika neúspěšných úvahách a experimentech s jinými principy měření (ultrazvuk, fotometrie, elektrická kapacita, ...) byla celá pozornost věnována vývoji optické metody, která využívá fyzikálních dějů vznikajících při průchodu světelného paprsku rozhraním dvou prostředí s odlišnými indexy lomu, viz [6.1] a [6.5]. Přestože dostatečná vzájemná odlišnost a stálost absolutních indexů lomu vzduchu, měřené hmoty a použitého skla je základní podmínkou použitelnosti navržené metody, nepodařilo se přes veškeré úsilí získat věrohodnou informaci o tomto optickém parametru nanášené hmoty. Proto byla jeho hodnota určena z dodaného vzorku



Obr. 6.2

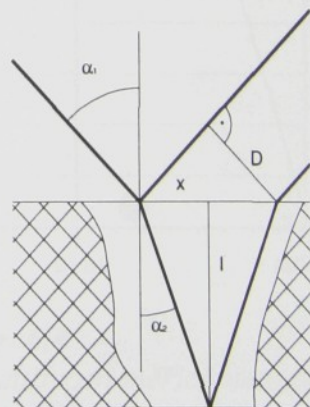
Uspořádání optiky při měření tloušťky vrstvy

experimentálním měřením ve fyzikální laboratoři. Protože experimentální určení byl jediný známý způsob, jak hodnotu zjistit, a navíc zjištěná hodnota absolutního indexu lomu hmoty $n_h = 1,3$ je dostatečně odlišná od tabulkových hodnot absolutního indexu lomu vzduchu ($n_v = 1,0$) a skla ($n_s = 1,5$), bylo spolu se zadavatelem s vědomím určitých rizik rozhodnuto dokončit vývoj metody a realizovat průmyslové měření na jejím základě.

6.2 Uspořádání měřicí soustavy

Měřicí zařízení využívá jako zdroj světla červený polovodičový bodový laser, který vysílá paprsek pod úhlem α na vrstvu do místa měření. Odražené paprsky (1), (2) a (3) jsou zachyceny televizní kamerou a přes její objektiv zaostřený na nekonečno vytvářejí na fotocitlivém stínítku obraz, který je dále převeden na elektrický signál, digitalizován a získaná obrazová data jsou podkladem pro počítačové vyhodnocení měření. Výsledné ověřené uspořádání optické části měření je znázorněno na obr. 6.2. Při vývoji měřicí metody bylo ověřováno také jednodušší uspořádání, ve kterém ve srovnání se zobrazeným schématem chyběl objektiv kamery a paprsky (1), (2) a (3) dopadaly přímo na její citlivé stínítko. Při idealizovaných podmínkách v laboratoři poskytovaly obě uspořádání optické trasy podobně kvalitní obrazy k následnému zpracování. Při zkouškách s reálnými vzorky se však ukázalo, že ve variantě bez objektivu je kvalita obrazu značně závislá na kvalitě lesklého povrchu vrstvy hmoty. I při jeho malém porušení, kdy při odrazu a průchodu paprsku rozhraním vzduch-hmota dochází k částečné difuzi paprsku, byl obraz méně kontrastní a stopy paprsků byly širší a méně výrazné. Optická soustava znázorněná na obr. 6.2 generuje i další paprsky, které vznikají vícenásobnými odrazy od rozhraní, ale jejich intenzita je velmi malá, tak malá, že je prakticky neregistruje.

Z uspořádání optické trasy je zřejmé, že obraz, který snímá kamera, je tvořen stopami paprsků (1), (2), (3) a také několika dalších paprsků, které vznikají vícenásobným odrazem od rovin rozhraní, a mají tedy mnohem menší intenzitu. V ideálním případě všechny lomené i odražené paprsky leží v jediné rovině. Stopy těchto paprsků, tj. jejich průsečíky se stínítkem kamery leží na průniku této roviny s rovinou stínítka, tedy na přímce. V idealizovaném případě by tedy na místě



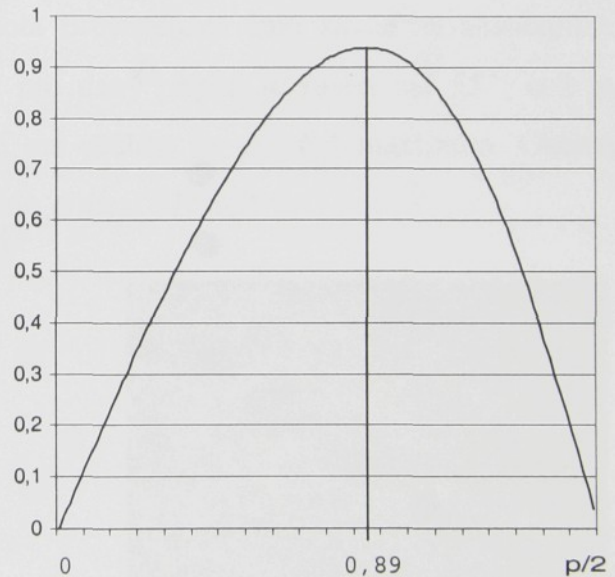
Obr. 6.3
K popisu průchodu
paprsku vrstvou

plošné televizní kamery mohla být použita kamera řádková s lineárním snímačem CCD, viz [6.2]. Výhodné by bylo, že takové kamery mívají řádově vyšší rozlišení (např. až 10 000 bodů, viz např. [6.3]) ve srovnání s rozlišením TV kamer (v jednom směru max. několik stovek bodů). Experimenty s reálnými vzorky, s mechanickou konstrukcí blízkou reálnému stroji však ukázaly, že uspokojivé zachycení potřebných bodů obrazu řádkovým snímačem je podmíněno příliš náročným nastavením geometrie mechaniky a optiky měřicí soustavy. Takové nastavení se v provozních podmínkách ukázalo jako velmi obtížně dosažitelné a z důvodů tuhosti konstrukce celého zařízení také jako nestabilní.

Z obr. 6.2 vyplývá, že parametrem uspořádání je úhel α . Závisí na něm přesnost a také robustnost měřicí metody. Konkrétně na úhlu α je závislá základní citlivost měřicí metody, viz detailnější obr. 6.3, na kterém je úhel α označen jako α_l . Základní citlivost je vyjádřena jako podíl vzdálenosti stop paprsků (1) a (2) v obrazu k tloušťce vrstvy a měla by být co největší pro potlačení vlivu náhodných jevů. Vzdálenost stop paprsků na stínítku kamery je úměrná vzdálenosti skutečných paprsků D , pro kterou lze ze zákona o lomu a z geometrie dráhy paprsku, viz [6.4], [6.6], odvodit vztah:

$$D = l \cdot \frac{2 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{\sqrt{\left(\frac{n_h}{n_v}\right)^2 - (\sin \alpha)^2}} \quad (6.1)$$

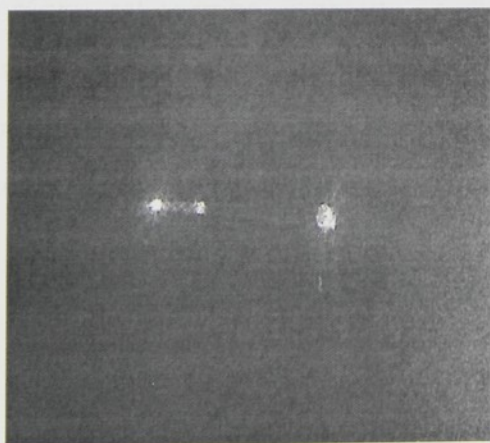
Závislost vzdálenosti paprsků na síle vrstvy je podle vztahu (6.1) přímou úměrností, kde koeficient úměrnosti je funkcí úhlu α . Funkce má globální maximum pro hodnotu úhlu $\alpha = 0,89$ rad a její průběh pro hodnoty úhlu 0 až $\pi/2$ a pro hodnoty absolutních indexů lomu hmoty vrstvy a vzduchu $n_h=1,3$ a $n_v=1,0$ je znázorněn na obr. 6.4. Ze samotného hlediska citlivosti měřicí metody je tedy výhodné, aby úhel α byl blízký hodnotě 51° .



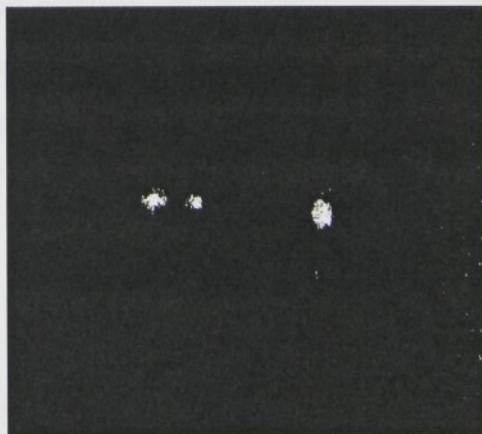
Obr. 6.4
Závislost koeficientu citlivosti měřicí metody na úhlu osvětlení paprskem laseru α

Další kritérium pro nastavení úhlu α souvisí i intenzitami světelných paprsků, které přicházejí do kamery. Důležité jsou zejména paprsky (1) a (2), jejichž stopy na stínítku kamery vytvářejí důležité prvky obrazu pro jeho následné vyhodnocení, ale v obraze se vyskytuje také stopa paprsku (3). Tyto paprsky by měly mít srovnatelné intenzity, protože kamery mají svoji citlivost nastavenou jednotně pro celý obraz a jsou jen částečně odolné proti bodovému přesvícení. Výrazný nepoměr jasů sledovaných bodů by komplikoval až znemožnil vyhodnocení obrazu. Z tohoto hlediska se při praktických zkouškách jako zcela nepoužitelné ukázaly kamery vybavené automatikou, které neměly možnost manuálního nastavení citlivosti.

Ke vzájemnému přiblížení intenzit paprsků dopadajících do kamery bylo potřeba snížit intenzitu paprsku (1), který byl výrazně nejsilnější. K jeho oslabení byl využit polarizační filtr umístěný před objektivem kamery, který částečně oslabuje intenzity všech procházejících paprsků, ale míra oslabení každého z nich závisí na míře a úhlu jeho polarizace. Důležitou úlohu v tomto fyzikálním ději hraje Brewsterův úhel. Je-li úhel α roven právě jeho hodnotě, je odražený paprsek (1) polarizován zcela, a tak vliv polarizačního filtru na paprsek je maximální a teoreticky ho lze kvalitním filtrem potlačit zcela. Důležité při tom je, že ostatní paprsky jsou po složitějším průchodu optickou soustavou polarizovány jen částečně. Hodnota Brewsterova úhlu závisí na absolutních indexech lomu obou optických prostředí a pro daný případ je rovna asi 55° , což je ‘naštěstí’ hodnota blízká hodnotě, při které má průběh na obr. 6.4 maximum. Oběma zmíněným kritériím tedy vyhovují hodnoty úhlu α mezi 51° a 55° .



Obr. 6.5
Digitalizovaný snímek kamery



Obr. 6.6
Oprahovaný snímek

6.3 Obrazová informace

Z naznačených základních principů měřicí metody vyplývá, že tloušťka měřené vrstvy se bude určovat výpočtem ze vzdálenosti stop paprsků (1) a (2) na stínítku kamery. Prvním úkolem počítačového vyhodnocení výstupního videosignálu kamery tedy je určit vzájemnou vzdálenost dvou malých světlých oblastí v obraze. Na obr. 6.5 je znázorněn snímek z kamery pořízený v reálných provozních podmínkách. Na obrázku jsou viditelné stopy paprsku (1) – největší shluk světlých bodů vpravo, paprsku (2) nejmenší shluk světlých bodů uprostřed a paprsku (3) – vlevo. Na obr. 6.6 je pak znázorněn binární obraz získaný z obrazu uvedeného na obr. 6.5 prahováním.

Při otáčení snímací televizní kamery kolem její optické osy se v obraze mění směr přímky - spojnice stop sledovaných paprsků. Odlišení případů, kdy směr přímky je vodorovný nebo svislý, nemá prakticky žádný význam, pokud je před vlastním zpracováním digitalizovaný statický obraz uložen v paměti počítače v nějaké abstraktní datové struktuře, např. v matici hodnot jasové funkce. V takovém případě pro záměnu vodorovného směru za svislý postačí při výpočtech zaměnit řádkové indexy za sloupcové. V jiné situaci, je-li obraz alespoň částečně zpracováván v reálném čase přímou manipulací s videosignálem, je nutno respektovat odlišné postavení vodorovného a svislého směru ve videosignálu. V řadě případů lze vhodným natočením kamery řešení úlohy podstatně ovlivnit a zjednodušit. Obecně lze říci, že snáze lze vyhodnocovat ty velikosti a vzdálenosti v obraze, které jsou rovnoběžné s jeho svislým okrajem, ty, které jsou kolmé na řádky televizního rozkladu. Výhodné vlastnosti svislých měření byly s výhodou využity při měření sloupce rtuti v polotovarů teploměru popsáném v jiném odstavci této kapitoly, rozdíly v přístupu k měření vzdáleností podél os x a y budou patrné také při určování vzájemné vzdálenosti bodů při měření tloušťky vrstvy.

6.4 Vyhodnocení obrazové informace

Při určování vzdálenosti dvou oblastí rozdílných velikostí a nepravidelných tvarů v rovinném obraze (předem není zaručeno ani to, že oblasti jsou souvislé) je nejprve třeba upřesnit pojem takové vzdálenosti. Pro tento, ale i pro další účely předpokládejme na chvíli, že pracujeme s maticovou formou digitalizovaného obrazu, viz [6.7]. Obraz je binární, tedy pro prvky matice M , které představují elementy obrazu, platí $M_{i,j} = 0$ (pro

černý bod) nebo $M_{i,j} = 1$ (pro bílý bod). Pro konkrétnost předpokládejme, že matice je čtvercová a množina hodnot řádkového i sloupcového indexu je $\{1, 2, \dots, 256\}$. Taková matice může být např. modelem obrazu znázorněného na obr. 6.6 nebo naopak tento obraz může být obrazovou interpretací takové matice. Matice odpovídá poli 256×256 obrazových elementů, které je výřezem z celého TV obrazu. Při umístění tohoto výřezu symetricky do středu TV obrazu, patří do něj řádky, které mají hodnotu čítače řádků zobrazeného na obr. 6.10 v mezích 39 až 294 a na každém z těchto řádku ty pixely, pro které je hodnota čítače časové základny podle obr. 6.11 v mezích 176 až 431.

Vzájemnou vzdálenost dvou oblastí určíme jako vzájemnou vzdálenost bodů, které polohu každé z oblastí co nejlépe charakterizují. K určení těchto bodů lze využít analogie s mechanikou tuhých těles a za charakteristický bod oblasti považovat její hmotný střed, těžiště. Výpočet těžiště je stabilní a nevyžaduje žádné další podmínky pro tvar oblasti. Pro jeho určení je ale třeba vymežit zónu Z jako množinu uspořádaných dvojic (i, j) , ve které se všechny body oblasti nacházejí a nenacházejí se v ní žádné jiné bílé body. Pro souřadnice x_T a y_T těžiště takové oblasti pak platí vztahy:

$$X_T = \frac{\sum j \cdot M_{i,j}}{\sum M_{i,j}} \quad Y_T = \frac{\sum i \cdot M_{i,j}}{\sum M_{i,j}} \quad (6.2)$$

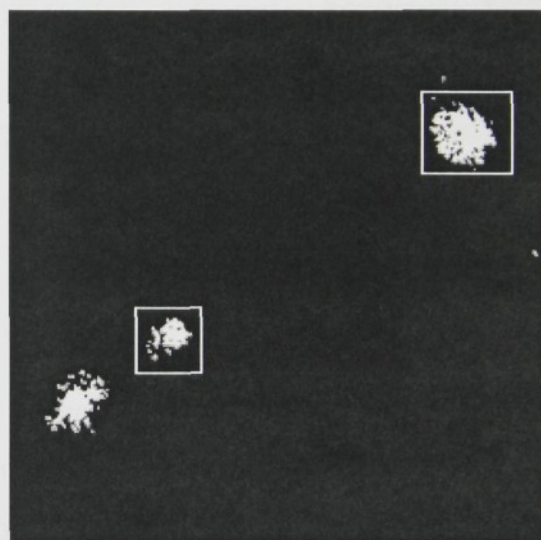
Všechny součty v uvedených výrazech se provádějí přes všechny body (i, j) patřící do zóny Z . Součty s prvky matice M mají v korespondujícím obraze svůj názorný význam: hodnota $\sum M_{i,j}$ představuje počet bílých bodů ve vymezené zóně, hodnota $\sum j \cdot M_{i,j}$ je součet x -ových souřadnic všech bílých bodů zóny a hodnota $\sum i \cdot M_{i,j}$ je součet y -ových souřadnic všech bílých bodů zóny. Hodnoty x_T a y_T určené podle uvedených výrazů tak představují průměrnou x -ovou a y -ovou souřadnici všech bodů světlé oblasti, jsou to racionální čísla a rozsahy hodnot odpovídají rozsahům indexů uvažované matice. Zóna Z se většinou specifikuje jako dvourozměrný interval $\langle I_1, I_2 \rangle \times \langle J_1, J_2 \rangle$, takové zóně pak v korespondujícím obraze odpovídá obdélníkový výřez a vztahy (6.2) mají konstruktivnější podobu:

$$X_T = \frac{\sum_{j=J_1}^{J_2} j \cdot \sum_{i=I_1}^{I_2} M_{i,j}}{\sum_{i=I_1}^{I_2} \sum_{j=J_1}^{J_2} M_{i,j}} \quad Y_T = \frac{\sum_{i=I_1}^{I_2} i \cdot \sum_{j=J_1}^{J_2} M_{i,j}}{\sum_{i=I_1}^{I_2} \sum_{j=J_1}^{J_2} M_{i,j}} \quad (6.3)$$

V popisované aplikaci nebylo možno nastavit disjunktní zóny sledovaných oblastí napevno, protože odchylky tloušťky skla a tloušťky vrstvy od jejich nominálních hodnot rozprostřely možný výskyt dvojice oblastí na velkou plochu v obraze. Jako vhodné řešení se ukázalo nejprve přibližně identifikovat nejvýraznější světlou oblast v celém obraze, považovat ji za stopu paprsku (1) a do jejího odhadnutého geometrického středu umístit střed pravoúhlé zóny pro přesné určení těžiště stopy paprsku (1). Relativně k umístění první zóny byla s konstantním posunutím po obou osách umístěna druhá pravoúhlá zóna pro určení těžiště stopy paprsku (2). Vzájemná vzdálenost d oblastí pak byla určena jako vzdálenost těžiště první oblasti se souřadnicemi x_{T1} , y_{T1} od těžiště druhé oblasti se souřadnicemi x_{T2} , y_{T2} podle vztahu:

$$d = \sqrt{(x_{T1} - x_{T2})^2 + (y_{T1} - y_{T2})^2} \quad (6.4)$$

Na snímcích zobrazených na obr. 6.5 a obr. 6.6 má spojnice stop paprsků (1), (2) a (3) směr blízký směru vodorovnému. Jak již bylo zmíněno, nominální směr spojnice je určen natočením kamery kolem její optické osy. Směr spojnice je však náhodná veličina, přičemž náhodné odchylky od nastaveného směru spojnice v obraze jsou způsobeny obtížně analyzovatelnými tolerancemi rozměrů a úhlů mechanického uspořádání



Obr. 6.7
*Otočený oprahovaný snímek
s naznačenými zónami pro určení
těžišť oblastí*

měřicího pracoviště, skleněné tabule i nanesené vrstvy. Na reálném provozním mechanismu byly zjišťovány statistické parametry této náhodné veličiny a bylo

zjištěno, že maximální odchylky jsou natolik výrazné, že neumožňují navrhnout vyhodnocení vzdálenosti bodů se zjednodušujícím předpokladem, že svislá souřadnice všech bodů je stejná. Výraz (6.4) by se tím zjednodušil na prostý rozdíl $d = x_{T1} - x_{T2}$. Z důvodu nesymetrie struktury videosignálu vzhledem ke směřům souřadných os by takový předpoklad byl ještě významnější po pootočení kamery o 90° kolem její optické osy. Pak by pro vzdálenost těžišť platilo $d = y_{T1} - y_{T2}$, což je formálně stejný výraz jako pro

osu x , ale další zjednodušení by bylo způsobeno tím, že technická realizace výpočtu x -ových souřadnic těžišť je obvodově náročnější než souřadnic y -ových (viz dále).

Protože byly odmítnuty návrhy zmíněných zjednodušujících předpokladů, byla úloha určení vzájemné vzdálenosti těžišť řešena podle složitějšího, ale obecného vztahu (6.4). Aby se vyloučila nutnost úvah o znaménkách rozdílů $x_{T1}-x_{T2}$ a $y_{T1}-y_{T2}$ a úloha se tím zbytečně nerozpadala na více případů, byla kamera pootočena o 45° kolem své osy ve srovnání s natočením při snímání obrazu znázorněného na obr. 6.5, tím se o 45° změnil i směr spojnice stop paprsků a je jisté, že stopa paprsku (1) je umístěna v obraze vpravo nahoře a stopa paprsku (2) má relativně k ní pozici vlevo a dole, viz obr. 6.7.

Pro první hrubou orientaci v obraze i pro následný přesný výpočet vzájemné vzdálenosti těžišť objektů ve vymezených oblastech byly z obrazu opakovaně určovány tzv. projekce oblastí ve vodorovném a ve svislém směru. Projekcí ve vodorovném směru se při tom myslí vektor řádkových součtů Ph_i té části jasové matice $\mathbf{M}$ obrazu, která koresponduje s danou oblastí určenou např. intervaly indexů $\langle I_1, I_2 \rangle \times \langle J_1, J_2 \rangle$. Projekcí ve svislém směru je analogicky vektor sloupcových součtů Pv_j stejné částí téže matice. Platí:

$$Ph_i = \sum_{j=J_1}^{J_2} M_{i,j} \quad Ph_j = \sum_{i=I_1}^{I_2} M_{i,j} \quad (6.5)$$

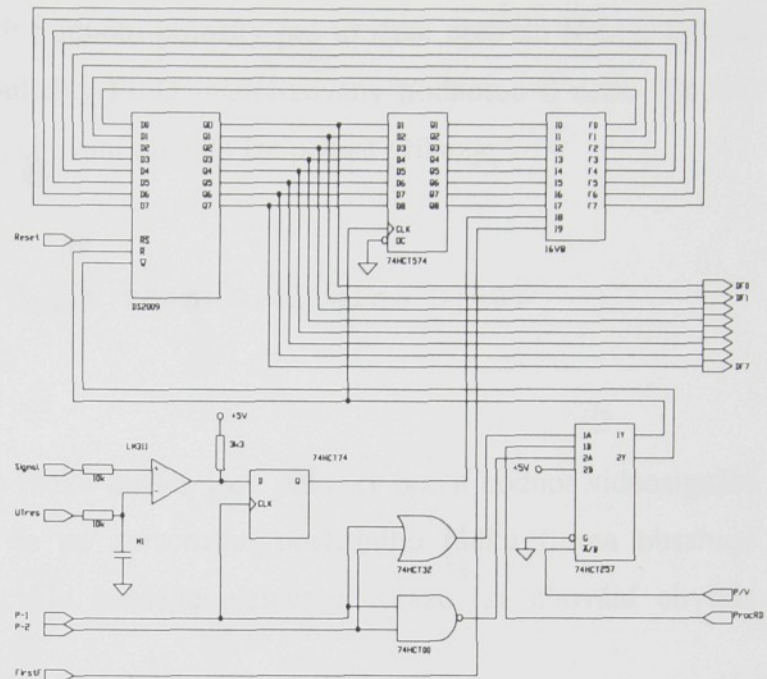
Taková definice projekcí však není v tomto případě konstruktivní, protože v navržené metodě vyhodnocení obrazové informace matice $\mathbf{M}$, ani žádná její menší část nikdy neexistuje a hodnoty obou vektorů jsou získávány postupným podmíněným inkrementováním výchozí nulové hodnoty během televizního snímku podle aktuální úrovně videosignálu.

6.5 HW realizace algoritmu pro zpracování obrazové informace

Samotná vodorovná projekce (vektor řádkových součtů matice $\mathbf{M}$) byla v jednoduché podobě využita již v dříve popisovaném měření výšky sloupce rtuti v teploměru. Hodnoty prvků projekce byly na každém řádku matice určeny binárním čítačem, viz obr. 4.12. Tento obvod byl použit i v aplikaci pro měření síly byl vrstvy. Mikropočítač při spolupráci s tímto obvodem jednak získává pro další zpracování hodnoty prvků vektoru vodorovné projekce, ale také tím aktualizuje programový čítač řádků

(nulovaný snímkovým synchronizačním impulsem) a z něj pak odvozovat signály pro řízení procesu získání svislé projekce.

Určení hodnot prvků svislé projekce (vektoru sloupcových součtů matice M) je složitější. Odlišnost situace spočívá v tom, že informace o jednotlivých prvcích matice M lze z videosignálu kamery přímo získávat jen po řádcích. Informace o hodnotách každého řádku matice M jsou soustředěny do kompaktních souvislých úseků snímku, zatímco informace o hodnotách sloupců matice M jsou rovnoměrně a nesouvisle rozptýleny do celého snímku. Výpočet jednoho řádkového součtu lze tedy provést odděleně



Obr. 6.8
Obvod pro výpočet prvků svislé projekce

od výpočtu ostatních řádkových součtů, avšak při výpočtu sloupcových součtů je nutno udržovat všechny jejich hodnoty rozpracované po dobu od prvního až po poslední řádek snímku. Pro technické řešení tedy vyplývá, že k výpočtu všech řádkových součtů postačí jediný čítač, jehož hodnota je na konci řádku předána procesoru a vynulována pro zpracování řádku dalšího, zatímco pro vektor sloupcových součtů je potřeba tolik registrů (čítačů), kolik má uvažovaná matice M sloupců, a všechny jejich konečné hodnoty jsou dostupné až po započítání posledního příspěvku z posledního zpracovávaného řádku.

Prakticky je pole několika desítek až stovek diskrétních binárních čítačů obtížně realizovatelné. Při programovém řešení čítání by měl procesor v čase vymezeném dvěma po sobě jdoucími pixely, tj. za několik desítek ns, aktualizovat index paměťové buňky a podmíněně ji podle vnějšího signálu inkrementovat, což je také těžko dosažitelné standardními výpočetními prostředky. Byl proto pro výpočet sloupcových součtů fiktivní matice M navržen zvláštní obvod s rychlou osmibitovou pamětí typu FIFO s 256 položkami. Všechny položky paměti, které představují čítací registry pro jednotlivé sloupce, jsou během řádku cyklicky odebírány z čela fronty, kombinačním logickým obvodem jsou

zpracovány a upravené se ukládají zpět do fronty na její konec. Kombinační obvod, který je technicky řešen pomocí programovatelného pole GAL typu 16V8, přijímá hodnotu položky z čela fronty, dále dostává binární informace o hodnotě aktuálního elementu obrazu a také o tom, zda aktuálně zpracováváný odpovídá prvnímu řádku matice. Z těchto informací odvozuje aktualizovanou hodnotu položky pro uložení zpět do fronty. Během zpracování prvního řádku, jsou položky FIFO inicializovány hodnotou 0 nebo 1 podle odpovídající hodnoty videosignálu, chování obvodu lze popsat příkazy:

```
if (USignal>UTres) then D:=1 else D:=0;
FIFO := D
```

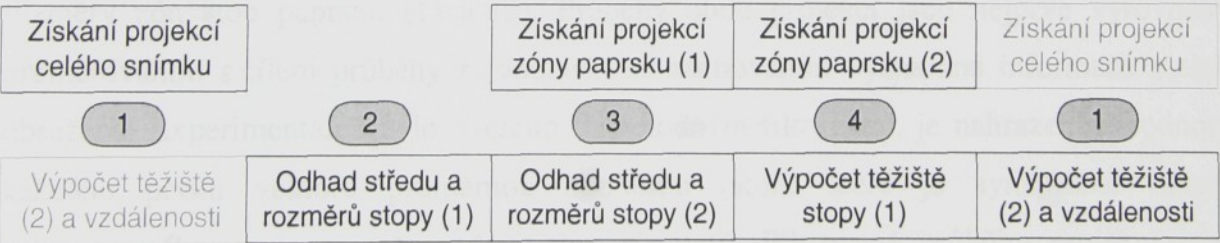
Během zpracování dalších řádků matice jsou položky podle hodnot videosignálu podmíněně inkrementovány tak, že po zpracování posledního řádku fronta obsahuje hodnoty sloupcových součtů. V cyklu každého elementu obrazu lze chování obvodu popsat příkazy:

```
D:=FIFO;
if (USignal>UTres) then D:=D+1;
FIFO := D
```

Na obr. 6.8 je znázorněno obvodové řešení výpočtu prvků svislé projekce. Vstup *Signal* je upravený videosignál a byl odvozen na obr. 6.9, napět'ový vstup *UTres* představuje rozhodovací hladinu pro prahování videosignálu napět'ovým komparátorem. Impulsní signály *P₂* a *P₁* jsou výstupní signály časové základny zobrazené na obr. 6.11. a jsou z nich generovány čtecí a zapisovací impulsy pro paměť FIFO. Signál *FirstF* informuje kombinační tabulku v obvodu GAL o tom, že je zpracováván první řádek matice. Tento signál je generován mikropočítačem na základě vnitřního programového čítače řádků řádků. Hodnotou *log.1* signálu *V/P* se mikropočítač vzdává přístupu k paměti a poskytuje ho časové základně synchronizované videosignálem, naopak při *log.0* tohoto signálu je zablokován přístup k paměti ze strany videosignálu a mikropočítač může přečíst obsah fronty pomocí svého výstupního signálu *ProcRD* přes datové signály *DF₀*, *DF₁*, ..., *DF₇*, se kterými tvoří osmibitové paralelní rozhraní pro mikropočítač.

Z uvedených popisů funkcí specializovaných obvodových řešení vyplývá, že jsou navrženy pro úzkou spolupráci s řídicím mikropočítačem a jsou jimi realizovány jen ty funkce, které by mikropočítač nestihl provádět. Činnost mikropočítače je cyklická, každý cyklus se skládá ze čtyř fází, pro každou z nich je vymezen časový prostor jedné periody TV snímku, tj. 20 ms. V každé fázi mikropočítač podporuje získávání dalších dat z videosignálu a současně vykonává výpočty na datech již získaných. Na konci každého cyklu je k dispozici nadřazenému prostředku výsledná hodnota měřené vzdálenosti. Perioda poskytovaných výsledků měření odpovídá čtyřem TV snímkům, tedy 80 ms.

V první fázi každého cyklu jsou získány prvky projekce ve vodorovném směru v obou směrech celého snímku a probíhají závěrečné výpočty vyhodnocení předešlého cyklu. V druhé fázi jsou ze získaných projekcí odhadnuty středy a rozměry stop paprsků (1) a (2). Dále jsou z těchto odhadnutých hodnot navrženy hranice pravoúhlých zón tak, aby každá z těchto zón opisovala jednu ze stop paprsků. Ve třetí fázi jsou pořízeny projekce v obou směrech ze zóny opsané stopě paprsku (1). Ve čtvrté fázi jsou ze získaných projekcí stopy paprsku (1) vypočteny souřadnice jejího těžiště a získány projekce v obou směrech ze zóny opsané stopě paprsku (2). V páté fázi jsou z projekcí vypočteny souřadnice těžiště oblasti vytvořené stopou paprsku (2), je vypočtena vzdálenost obou těžišť a výsledek odeslán nadřazenému prostředku, současně je tato fáze první fází nového cyklu a jsou v ní tedy získány projekce v obou směrech celého snímku pro výpočet dalšího měření. Přehledně je rozdělení získání dat a výpočtů z nich do jednotlivých fází znázorněno na obr. 6.9.



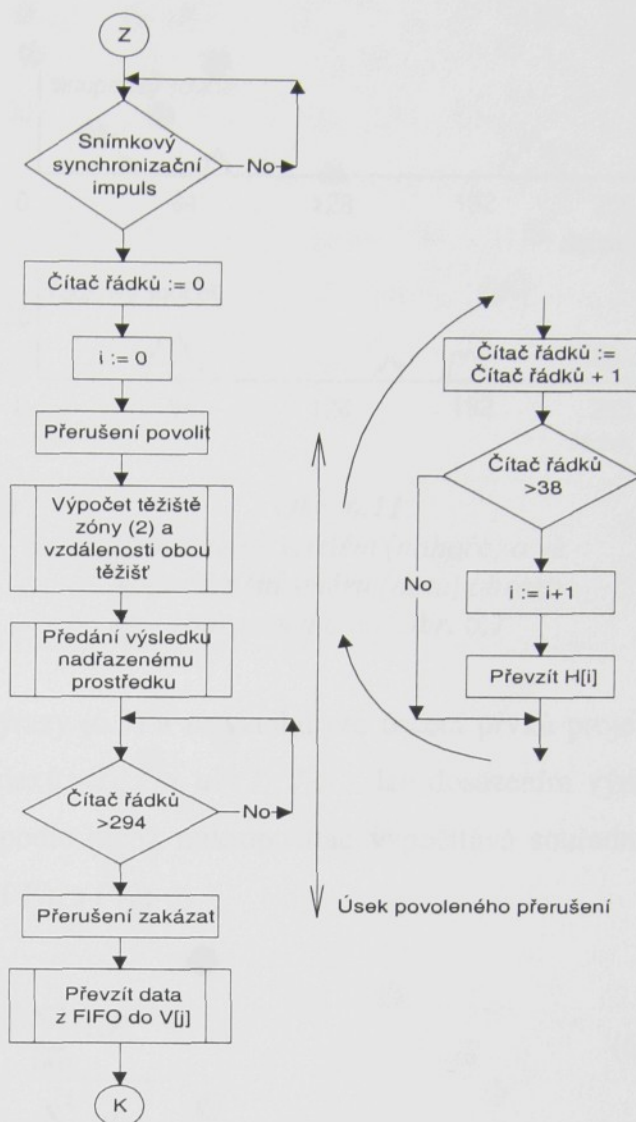
Obr. 6.9
Fáze postupného získávání dat a následných výpočtů

V jednotlivých fázích se získávají prvky projekcí buď celého snímku nebo některé z vymezených zón a současně v nich probíhají výpočty s daty pořízenými ve fázích dřívějších. Jako příklad činnosti mikropočítače v jednotlivých fázích výpočtu je na obr. 6.10 znázorněn vývojový diagram, který vyjadřuje činnost mikropočítače během

první fáze cyklu. Výpočty probíhají v hlavním programu, zatímco získávání prvků projekce ve vodorovném směru se odehrává v obsluze přerušení od konce TV řádku. Čtení prvků projekce ve svislém směru se provede v hlavním programu před koncem fáze. V ostatních fázích je struktura činnosti mikropočítače podobná, jen parametry zpracovávané zóny a prováděné výpočty jsou jiné. Výjimkou je druhá fáze, ve které se provádí jenom výpočet a žádné nové informace z videosignálu se nezískávají.

Projekce v obou směrech obrazu z příkladu zobrazeného na obr. 6.7 jsou znázorněny na obr. 6.11. Obě jsou získávány v první fázi cyklu a v druhé fázi jsou z nich odhadovány středy a

rozměry zón stop paprsků (1) a (2). Průběhy obou projekcí jsou nejprve vyrovnány průměrováním s cílem průběhy zjednodušit se zachováním významné informace v nich obsažené. Experimentálně bylo ověřeno, že vhodným filtrováním, je nahrazením hodnoty každého prvku vektoru průměrnou hodnotou okolí, které je symetrické kolem nahrazovaného prvku a má velikost dvacet prvků. Filtrované průběhy projekcí jsou zobrazeny na obr. 6.12. Z principu měřicí metody je zřejmá korespondence polohy vln - maxim v průbězích obou projekcí s polohou stop všech tří paprsků (1), (2) a (3). Poslední lokální maximum ve vyrovnaném průběhu sloupcových součtů a první lokální maximum ve vyrovnaném průběhu řádkových součtů jsou důsledkem paprsku (1), prostřední maxima v obou projekcích jsou způsobena paprskem (2). Z polohy vyjmenovaných maxim lze tedy odhadnout středy zón, které stopy paprsků (1) a (2) oklopují. Rozměry



Obr. 6.10
Algoritmus činnosti mikropočítače v první fázi cyklu

obou pravoúhlých zón jsou dány šířkami příslušných vln. Do zóny jsou zahrnuty ty řádky a sloupce, které tvoří odpovídající vlny v průbězích řádkových a sloupcových součtů.

Výpočty souřadnic těžišť prováděné v dalších fázích cyklu zpracovávají projekce získané ze zón, které obklopují stopy paprsků. Výpočty vycházejí

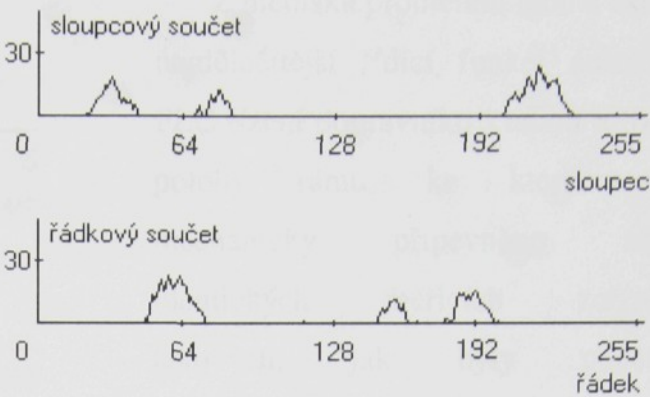
z definice hmotného středu vyjádřené výrazy (6.3) a ze vztahů pro určení prvků projekcí (6.5). Je-li zóna vymezena intervaly indexů $\langle I_1, I_2 \rangle$ a $\langle J_1, J_2 \rangle$, lze dosazením výrazů (6.5) do vztahů (6.3) odvodit vztahy, podle nichž mikropočítač vypočítává souřadnice těžiště zóny ze známých vektorů projekcí Ph_i a Pv_j :

$$X_T = \frac{\sum_{j=J_1}^{J_2} j \cdot P_{v_j}}{\sum_{j=J_1}^{J_2} P_{v_j}} \quad Y_T = \frac{\sum_{i=I_1}^{I_2} i \cdot P_{v_i}}{\sum_{i=I_1}^{I_2} P_{v_i}} \tag{6.6}$$

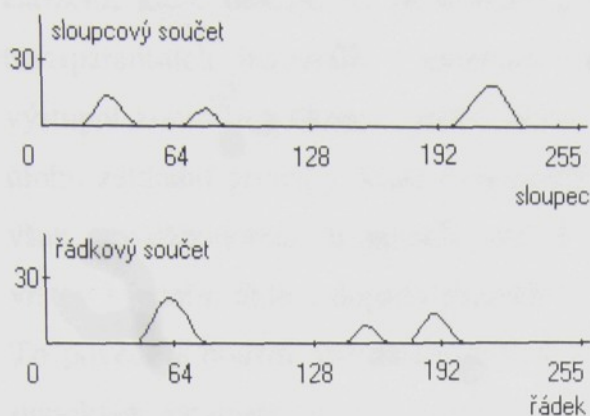
Hodnoty jmenovatelů obou zlomků jsou shodné, protože počet bílých pixelů v zóně je jen jeden a nezáleží na tom, je-li zóna prohledávána po řádcích či po sloupcích, stačí tedy provést výpočet hodnoty jen pro jeden z nich.

V poslední fázi cyklu mikropočítač provádí výpočet vzdálenosti těžišť obou sledovaných oblastí podle vztahu (6.4). Po výpočtu je výsledná hodnota uložena do výstupního registru a na vyžádání nadřazeným řídicím prostředkem, kterým je v dané aplikaci systém typu PLC, je odeslána k dalšímu zpracování. Komunikace mezi PLC a měřicími mikropočítači probíhá přes sériové rozhraní RS485 podle pravidel konfigurace master-slave formou povelů a dotazů.

Systém PLC nejenom přebírá, shromažďuje a poskytuje nadřazeným vrstvám strukturovaného řízení hodnoty měřené sedmi popsány měřicími zařízeními, ale také řídí celý segment linky, na kterém proměření tabule skla probíhá.



Obr. 6.11
Projekce ve svislém (nahore) a ve vodorovném směru (dole) obrazu zobrazeného na obr. 6.7



Obr. 6.12

*Projekce z obr. 6.11 vyrovnané
průměrováním*

dopravníku. V každé zastavovací poloze je provedeno měření současně v sedmi místech. Celkově je tak vytvořen pravidelný rovnoměrný rastr 63 bodů, ve kterých je vrstva hmoty nanesené na tabule skla změřena.

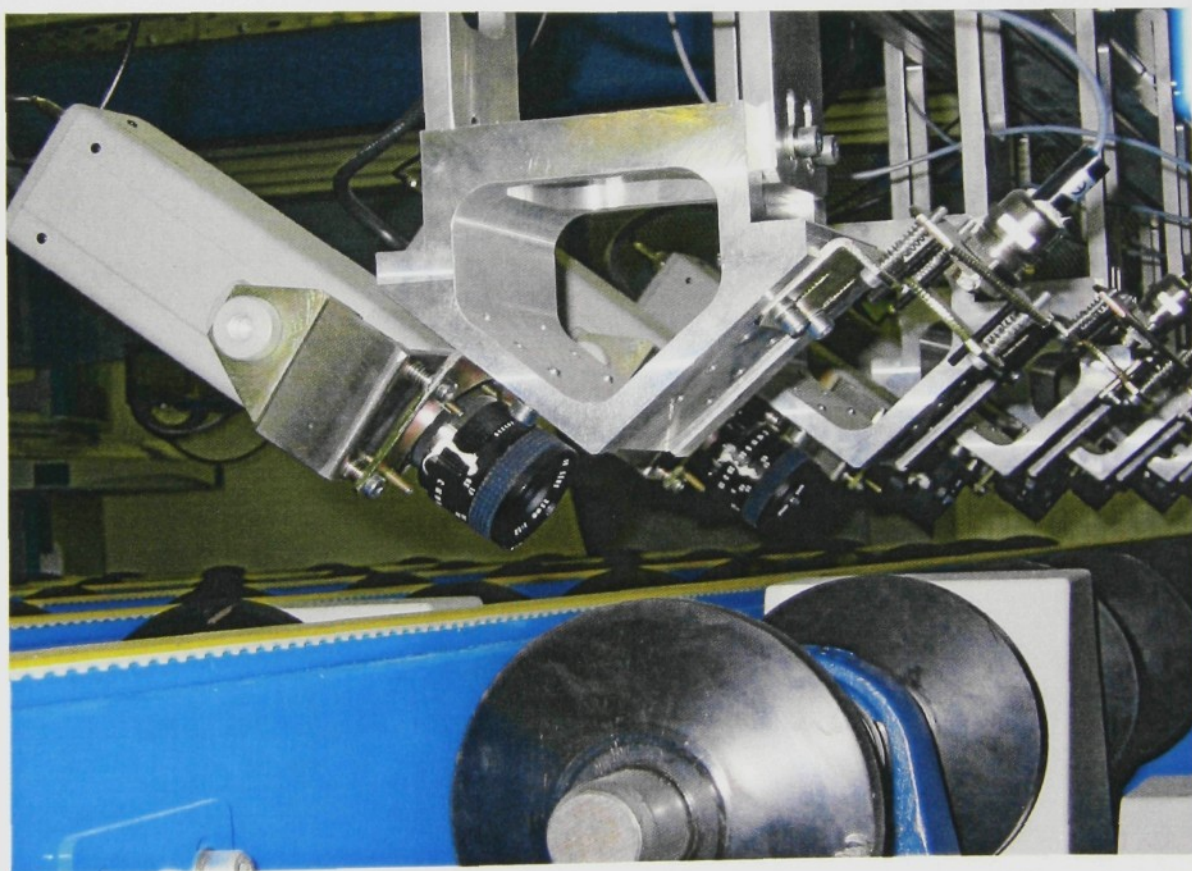
Řídicí systém PLC je připojen prostřednictvím lokální sítě typu Ethernet k počítači typu PC, který sbírá a spravuje data o celém technologickém procesu. O každé proměření tabuli je v systému PLC vytvořen datový objekt, který je pak předáván do zmíněného PC, kde jsou data archivována, může z nich být vytvořen a znázorněn 3D model vrstvy nanesené na tabuli skla, může být vytisknut protokol o měření a zejména získán předpis, jak upravit výšky podpěr, na kterých tabule s nanesenou vrstvou ležela při procesu zrání, aby příští tabule zrála v poloze, které zajistí rovnoměrnost nanesené vrstvy.

Při vývoji snímače pro nedestruktivní bezkontaktní měření síly vrstvy transparentního materiálu bylo sestaveno a využito vývojové prostředí s počítačem typu PC, s vestavěnou kartou pro digitalizaci obrazu a s programovým vybavením pro vývoj aplikací počítačového zpracování obrazové informace. Všechny uvedené a použité principy a algoritmy byly před implementací na cílové platformě v prostředí tohoto vývojového systému opakovaně simulovány a ověřovány s videosignály získanými nejprve v laboratorních a později také v reálných podmínkách. Všechna data použitá v příkladech v tomto odstavci vybrána z experimentů, které byly prováděny při vývoji popisovaného měřicího zařízení.

Popsané měřicí zařízení bylo realizováno, viz fotografie na obr. 6.13 a s jeho provozem jsou více než jednoroční dobré zkušenosti. V současnosti je ve fázi vývoje další

Z hlediska proměření tabule skla je nejdůležitější řídicí funkcí automatu PLC řízení dopravníku s tabulí a řízení polohy rámu, ke kterému je mechanicky připevněno sedm identických měřicích zařízení, takových, jak byly popsány v předchozím textu. Rám s měřicími zařízeními je rovnoběžný s šířkou tabule a během proměřování se pohybuje a postupně zastavuje v devíti pozicích podél délky tabule, které stojí na

zařízení, které pracuje na podobných principech, jehož úkolem je měření síly vrstev transparentních materiálů v hotových mnohavrstvých tabulích, které se provádí při výstupní kontrole na konci výroby. První experimenty ověřily možnost použít i pro tuto úlohu základní principy, které byly použity pro popsané měření jedné vrstvy na skle, je však pravděpodobné, že nebude možné dostatečně přesně a robustně měřit síly všech vrstev s jedním úhlem dopadu paprsku laseru a s jedním natočením polarizačního filtru. To povede k použití servomechanizmů a dalších mechanických prvků pro přestavování optických parametrů měření a následně k výraznému prodloužení doby měření jednoho místa tabule.



*Obr. 6.13
Pohled na měřicí zařízení*

Literatura

- [6.1] Horák,Z.-Krupka,F.: Fyzika – příručka pro vysoké školy technického směru. SNTL,ALFA, Praha 1976.
- [6.2] Domovská stránka firmy Eureka: <http://www.analog.com>.
- [6.3] Line Image Sensors Data Book. OKI, 1991.
- [6.4] Schröder, G.: Technická optika. SNTL Praha, 1981.
- [6.5] Baudyš,A.: Technická optika. skriptum ČVUT, Praha, 1989.
- [6.6] Václavík, A.: Technická optika II. skriptum ČVUT, Praha 1984.
- [6.7] Sonka M.,Hlavac,V.,Boyle R.: Image Processing, Understanding and Machine Vision, PWS Boston, 1999.

7 Automatizace provozních laboratorních měření ve mlýnech

Tématem této kapitoly je popis aktuálního stavu měřicího systému, který je řešen ve spolupráci s rakouskou firmou Egger, která vyrábí laboratorní měřicí přístroje pro vyhodnocování parametrů obilí a mouky. Přístroje se používají v laboratořích mlýnů a velkých průmyslových pekáren a slouží zejména k obchodnímu ohodnocení obilí a mouky a také pro dosažení standardních parametrů mouky a pekařských výrobků. V současnosti se jedná o čtyři různé měřicí přístroje, které se mohou používat v různých sestavách (vždy nejvýše po jednom) ve spojení s jedním společným počítačem. Centrální sdílený počítač je typu PC, je vybaven operačním systémem MS Windows a speciálním aplikačním programovým vybavením. Úkolem centrálního počítače je vést obsluhu procesem zkoušky současně na všech připojených přístrojích, přijímat a shromažďovat informace ze zkoušek, získaná data vyhodnocovat, výsledky měření zobrazovat, archivovat a tisknout protokoly o zkouškách.

7.1 Měřené signály

Všechny současně vyráběné měřicí přístroje jsou starší konstrukce a byly původně (před cca 20 lety) navrženy s mechanickým zapisovačem pro záznam na papír v rolích pro vytváření dokumentace o měření. Rozšiřování vybavení laboratorních přístrojů o možnost počítačového zpracování naměřených dat je dodatečným krokem a spočívá v přidání potenciometrického nebo indukčního (LVDT) snímače polohy k mechanismu zapisovači. Všechny záležitosti kolem mechanické konstrukce přístrojů, principu měření a snímání měřených veličin jsou v kompetenci výrobce těchto zařízení, a nejsou zde proto nijak zmiňovány a diskutovány. Podle zadání bylo nutno vyjít ze stávající koncepce zařízení a doplnit ji o systém sběru a zpracování dat na počítači. Zadavatelem byla upřednostňována taková řešení, která nevyžadují instalaci hardwarových rozšíření nebo úprav centrálního počítače, aby mohly být použity běžně dostupné sestavy PC vybavené jen standardními rozhraními a odpovídajícím speciálním programovým vybavením.

Systém, jehož úkolem je koncentrovat a digitalizovat signály ze čtyř snímačů umístěných ve vzdálenostech maximálně desítky metrů v okolí centrálního počítače lze řešit mnoha způsoby. Podmínka, aby do skříně počítače PC nebyla doplňována žádné hardwarové komponenty, vylučuje ta řešení, která jsou založena na kartách určených pro připojení k vnitřním sběrnici počítače (ISA, PCI), a vyplývá z ní, že systém je nutno

propojit s PC prostřednictvím některého jeho standardního vnějšího rozhraní (paralelní port, sériový port, USB). Protože v době návrhu celého systému nebyly dostatečně rozšířeny prostředky pro realizaci vlastního mikropočítačového zařízení s rozhraním USB a s paralelním portem se v dané aplikaci počítalo pro připojení tiskárny, bylo jako nejvhodnější rozhraní vybráno rozhraní asynchronní sériové, tj. jeden z portů COM1, COM2, které vyhovují standardu RS232C.

I po tomto výběru rozhraní pro připojení k počítači stále zůstává nevyřešena otázka volby mezi dvěma odlišnými koncepcemi řešení. Jedna koncepce předpokládá svedení analogových signálů ze snímačů do jednoho místa, kde jsou dále analogově upraveny, přes multiplexor přivedeny k AD převodníku a postupně digitalizovány. Následně jsou data formátována do dávek a přes asynchronní sériové rozhraní v pravidelném časovém taktu přenášena do PC. Všechny uvedené funkce jsou obvykle soustředěny do samostatného zařízení spolu s jednočipovým mikropočítačem, který činnost celého zařízení řídí. Druhá, odlišná koncepce řešení předpokládá předzpracování a digitalizaci každého signálu samostatně (v přístroji, v blízkosti snímače) a dále pak přenos dat k centrálnímu počítači po digitální sériové sběrnici.

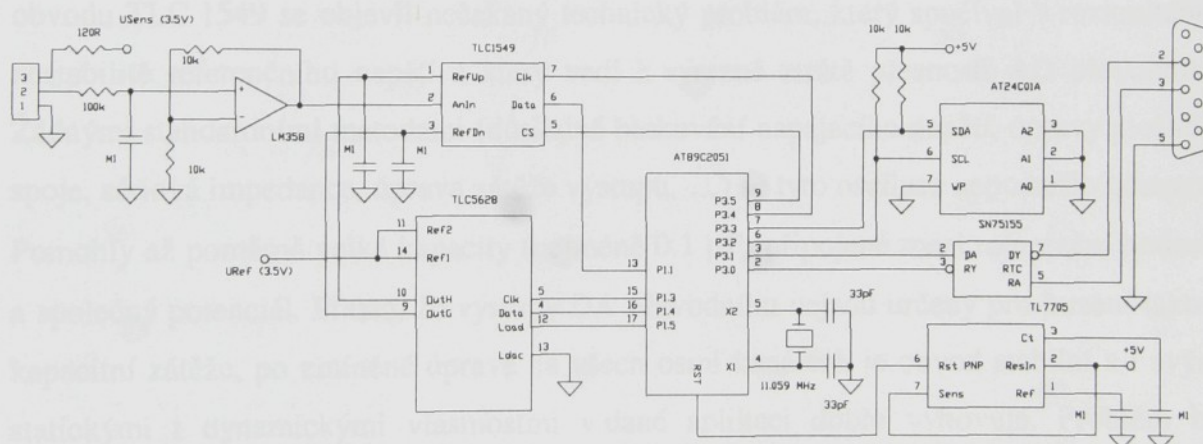
V kontextu dané konkrétní aplikace při volbě mezi dvěma zmíněnými variantami řešení nebyly k nalezeny žádné přesvědčivé objektivní argumenty jednoznačně upřednostňující jednu z nich. Obě řešení mají z hlediska technického, provozního i obchodního určité přednosti a nedostatky, a tak rozhodovaly subjektivní preference dané zejména dřívějšími nedobrymi zkušenostmi s řízením sériové sběrnice asynchronním sériovým rozhraním počítače PC s operačním systémem typu MS Windows při rychlém přenosu dat. Byla tak vybrána první z obou zmíněných koncepcí. Podobné řešení bylo použito také v několika zařízeních pro měření tlaků v pneumatických soustavách popisovaných v kapitole 3. V uvedené kapitole je také podrobně zhocen vliv propustnosti dat sériového asynchronního rozhraní na vlastnosti přenosu měřených dat, který se uplatňuje také ve zde uváděné měřicí aplikaci.

Jak již bylo zmíněno, ve všech čtyřech měřicích zařízeních je zdrojem signálu potenciometrický snímač polohy nebo indukční snímač LVDT. Potenciometr je zapojen jako proměnný napěťový dělič s výstupním napětím lineárně závislým na úhlu otočení, napájení děliče je zajištěno z převodníku. Elektronika převádějící signály snímače LVDT na napětí je součástí měřicího přístroje. Výstupní signály obou typů snímače jsou dále zpracovávány jednotným obvodem, který zajišťuje jejich filtraci, impedanční oddělení a

zesílení, viz schéma na obr. 7.1. Základem je standardní zapojení s operačním zesilovačem zapojeným jako neinvertující zesilovač, kterému předchází pasivní RC filtr pro potlačení vysokofrekvenčního šumu, viz [7.1].

7.2 Převod signálů na data

V zařízení pro digitalizaci více signálů nebyl použit analogový multiplexor jako tomu bylo v aplikacích popisovaných v kapitole 3 této práce. Na místo toho zde má každý měřicí kanál vlastní AD převodník, sdílené je až jejich řízení společným mikropočítačem. Takové řešení má ve srovnání s řešením s multiplexorem některé výhodné vlastnosti, např. vzorkování všech signálů může být přesně synchronní, což ale v dané aplikaci nemá význam. Naopak významná je zde možnost snadno kalibrovat každý měřicího kanál nastavením referencí AD převodníku, a využít tak celý jeho vstupní rozsah (10 bitů) pro digitalizaci užitečných hodnot vstupního signálu. Je tak lépe využita přesnost AD převodníku, což vede k možnosti použít AD převodník s menší rozlišovací schopností, tj. s menším počtem bitů výstupního slova.



Obr. 7.1

Obvodové zapojení jednoho měřicího kanálu

Pro takové řešení je obvodově zvláště výhodné použít AD převodník, který má dostupné napěťové vstupy pro nezávislé určení obou mezí rozsahu vstupního měřeného signálu. Jedním z mála standardně vyráběných AD převodníků s takovou vlastností je výrobek firmy Texas Instruments TLC 1549, viz [7.2]. Jedná se o integrovaný 10-ti bitový AD převodník s postupnou aproximací se synchronním sériovým rozhraním pro výstup dat tvořeným trojicí signálů *CS*, *CLK* a *DAT*. Převodník má napěťové vstupy U_{LoRef} a

U_{HiRef} pro přivedení úrovní, které definují napěťový rozsah měřicího vstupu U_{In} na analogové straně, kterému pak odpovídá rozsah výstupních slov $0 - 1023$ na straně digitální.

Napěťové úrovně na signálech U_{LoRef} a U_{HiRef} je možno nastavovat např. ručně pomocí potenciometrů, v dané aplikaci však bylo zvoleno řešení, které vytváří pro uživatele větší komfort, které umožňuje kalibrovat měřicí kanály pomocí připojeného osobního počítače. Referenční napětí jsou vytvářena DA převodníky řízenými mikropočítačem, který má hodnoty kalibračních parametrů uloženy ve svých registrech, zálohovaných pamětí typu EEPROM. Osmibitové údaje pro DA převodníky jsou určovány iteračně pomocí speciálního kalibračního programu, který běží na počítači PC a který má také prostřednictvím komunikačního rozhraní a mikropočítače v převodníku přístup do jeho registrů. Při kalibraci mikropočítač v převodníku pracuje ve speciálním kalibračním režimu. Pro čtyři měřicí kanály je potřeba generovat osm referenčních napětích, k tomuto účelu byl použit osmikanálový osmibitový DA převodník TLC 5628 viz [7.3].

Při propojení výstupů integrovaného obvodu TLC 5628 s referenčními vstupy obvodu TLC 1549 se objevil nečekaný technický problém, který spočíval v rozkmitání a nestabilitě referenčního napětí a který vedl k výrazné ztrátě přesnosti AD převodníků. Žádnými standardními metodami (důsledné blokování napájecího napětí, úpravy plošného spoje, sériová impedance, úprava zátěže výstupu, ...) se tyto oscilace nepodařilo odstranit. Pomohly až poměrně velké kapacity (nejméně $0.1 \mu F$) připojené mezi referenční hodnotu a společný potenciál. Přesto, že výstupy DA převodníku nejsou určeny pro buzení takové kapacitní zátěže, po zmíněné úpravě na všech osmi kanálech je obvod stabilní a i svými statickými i dynamickými vlastnostmi v dané aplikaci dobře vyhovuje. Problém byl diskutován se střediskem technické podpory výrobce obou součástek (Texas Instruments), ale ani několikaměsíční výměna E-mailů nevedla k vysvětlení jevu. Nakonec byla úprava s kondenzátory použita ve výsledné konstrukci řešení, která byla opakovaně realizována. Schéma zapojení jednoho kanálu měřicího převodníku je znázorněno na obr. 7.1. Další tři kanály jsou obvodově shodné, svými vstupy pro referenční napětí AD převodníku jsou připojeny ke společnému DA převodníku a datovým výstupem svého AD převodníku vždy k jednomu ze vstupů jednočipového mikropočítače AT 89C2051. Ovládání signálů CS a CLK je společné.

7.3 Přenos naměřených dat do počítače PC

Měřicí převodník může pracovat ve dvou různých režimech: v měřicím a v kalibračním. Při měření přístroj vysílá do asynchronního sériového rozhraní v pravidelném taktu dávky dat s informacemi o měřených hodnotách. Protože požadavky na periodu vzorků jsou u jednotlivých kanálů různé, jsou ve struktuře dávky vyhrazeny kanálům nestejně veliká datová pole. Podrobněji je konstruování pravidelných dávek dat při nerovnoměrných požadavcích měřicích kanálů popisováno v kapitole 3. Zde je na obr. 7.2 uvedena jen jedna perioda posloupnosti čtyřbajtových datových dávek navržených pro danou aplikaci. V každé dávce je obsažena kompletní desetibitové datové slovo získané z měřicích kanálů 0 a 1 a jedna pětibitová polovina slova jednoho z kanálů 2 a 3. V tabulce na obr. 7.2 označení bitu např. 2.0 znamená nultý bit kanálu 2. V měřicím režimu je frekvence popsanych dávek vysílaných měřicím převodníkem do počítače PC 960 Hz.

0	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3
0	3.9	3.8	3.7	3.6	3.5	0	0
1	1.2	1.1	1.0	x	2.2	2.1	2.0

0	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3
0	3.4	3.3	3.2	3.1	3.0	0	1
1	1.2	1.1	1.0	x	2.2	2.1	2.0

0	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3
0	4.9	4.8	4.7	4.6	4.5	1	0
1	1.2	1.1	1.0	x	2.2	2.1	2.0

0	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3
0	4.4	4.3	4.2	4.1	4.0	1	1
1	1.2	1.1	1.0	x	2.2	2.1	2.0

Obr. 7.2
Struktura datové dávky

Z frekvence dávek, z jejich délky vyjádřené v počtu bytů a z počtu bitů vysílaných při vyslání jednoho bytu (jeden start bit, osm datových bitů a jeden stop bit) vychází potřebná přenosová rychlost sériového rozhraní: $960 \cdot 4 \cdot 10 = 38\,400 \text{ Bd}$, nejbližší vyšší standardní rychlost je 57 600 Bd.

Dávky dat přicházející do počítače jsou činností nakonfigurovaných systémových prostředků operačního systému typu MS Windows postupně ukládány do vyrovnávací paměti, která má vlastnost fronty. Se zápisem každého příchozího bytu na konec fronty operační systém vygeneruje zprávu, kterou např. vývojový prostředek Delphi vyhodnotí jako událost a od ní může být odvozena určitá akce aplikačního programového vybavení. Prvním úkolem aplikačního programu je odebírat z čela fronty jednotlivé dávky a

zpracovávat je. Tj. nejdříve z nich rekonstruovat desetibitová slova jednotlivých kanálů a ty ukládat do oddělených vyrovnávacích pamětí pro další zpracování, to probíhá již po jednotlivých kanálech a pro každý z nich odlišným způsobem. Ve výpisu programu na obr. 7.3 je uveden výpis procedury, která rekonstrukci dat a jejich rozdělení na kanály realizuje. Procedura pracuje s funkcemi, které mají vazbu na systémové prostředky sReadBuf (čtení bytů z čela fronty) a sReadBufUsed (počet přijatých bytů ve frontě)

```

procedure RecByte;
var
  B : Byte;
  BB : array[1..4] of Byte;
  AD0, AD1, AD2, AD3, AD3L, AD3H, AD4L, AD4H : Word;
begin
  if gSynced then
    while (sReadBufUsed>3) and gSynced do
      begin
        ReadBuf(BB,4);
        sSynced := (BB[4]>$7f) and (BB[3]<$80) and (BB[2]<$80) and (BB[1]<$80);
        if gSynced then begin
          AD0:= (BB[1] shl 3 + (BB[4] and $70 shr 4));
          if gIndex0 < gMaxIndex0 then
            begin Inc(gIndex0); gBuf0[gIndex0] := AD0 end;
          AD1:= (BB[2] shl 3 + (BB[4] and $07));
          if gIndex1 < gMaxIndex1 then
            begin Inc(gIndex1); gBuf1[gIndex1] := AD1 end;
          case BB[3] and $03 of
            0 : AD2H:= BB[3] and $7c shr 2;
            1 : begin
                  AD2L:= BB[3] and $7c shr 2;
                  AD2:= AD2H shl 5 + AD2L;
                  if gIndex2 < gMaxIndex2 then
                    begin Inc(gIndex2); gBuf2[gIndex2] := AD2 end
                end;
            2 : AD3H:= BB[3] and $7c shr 2;
            3 : begin
                  AD3L:= BB[3] and $7c shr 2;
                  AD3:= AD3H shl 5 + AD3L;
                  if gIndex3 < gMaxIndex3 then
                    begin Inc(gIndex3); gBuf3[gIndex3] := AD3 end
                end
          end;
        end;
      end;
    else begin sReadBuf(B,1); gSynced := B>127 end
  end;
end;

```

Obr. 7.3

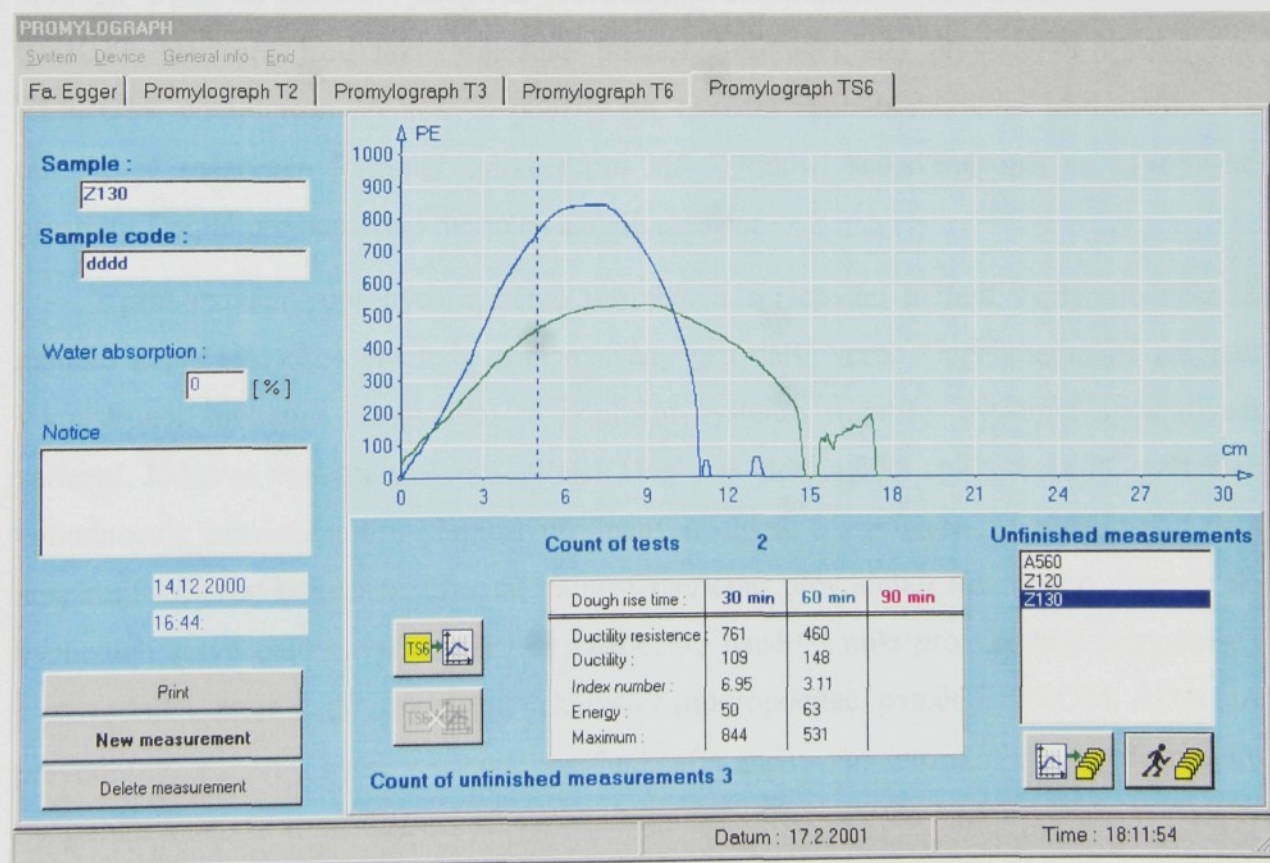
Výpis procedury pro zpracování datových dávek z převodníku

a s aplikačními globálně deklarovanými proměnnými gIndex0, ..., gIndex3 (aktuální indexy při ukládání do vyrovnávacích pamětí kanálů), gMaxIndex0, ..., gMaxIndex3 (maximální hodnoty indexů pro jednotlivé kanály), gBuf0, ..., gBuf3 (pole vyrovnávací pamětí pro jednotlivé kanály) a gSynced (příznak synchronizace čtveřic

bytů odebíraných z čela fronty s dávkami). Uvedená procedura je oproti té, která byla skutečně použita, zjednodušena, pro stručnost z ní byly vyjmuty prvky zvyšující robustnost celé aplikace.

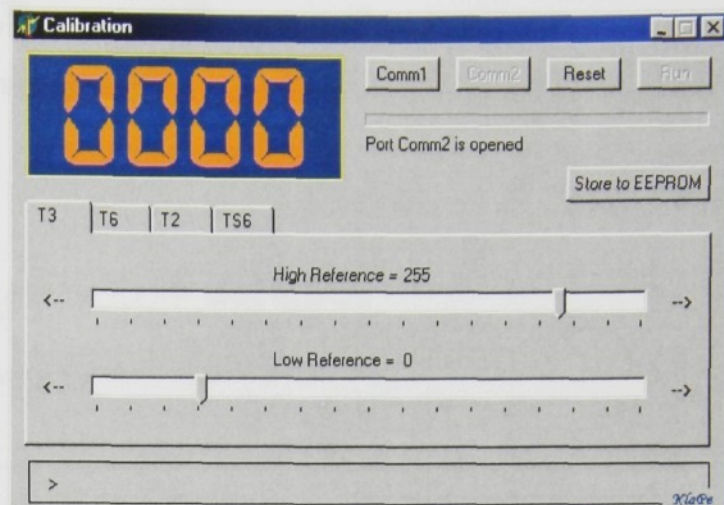
7.4 Počítačové zpracování měření

Zpracování dat jednotlivých kanálů se částečně provádí již v průběhu měření, kdy jsou naměřená data průběžně vykreslována do grafů, a částečně po dokončení zkoušky, kdy jsou naměřená data vyhodnocena a jsou z nich určeny hledané parametry mouky. Ke každé provedené zkoušce může být vytisknut protokol o měření. Všechny naměřené i vypočtené hodnoty mohou být archivovány v integrované databázi. V rámci jedné, jednou spuštěné aplikace mohou být současně a nezávisle zpracovávána měření na všech čtyřech připojených měřicích zařízeních. Na obr. 7.4 je zobrazen ovládací panel pro jeden vybraný měřicí přístroj (Promylograph TS6).



Obr. 7.4
Měřicí aplikace – panel pro měření přístrojem TS6

V režimu kalibrace měřicí převodník automaticky nevysílá žádné pravidelné dávky dat, ale místo toho reaguje na povely a odpovídá na dotazy, které přicházejí prostřednictvím komunikačního rozhraní. Jsou tak zpřístupněny hodnoty měřicích AD převodníků a registrů pro kalibrační DA převodníky. Kalibrační proces každého měřicího kanálu probíhá interaktivně tak, že



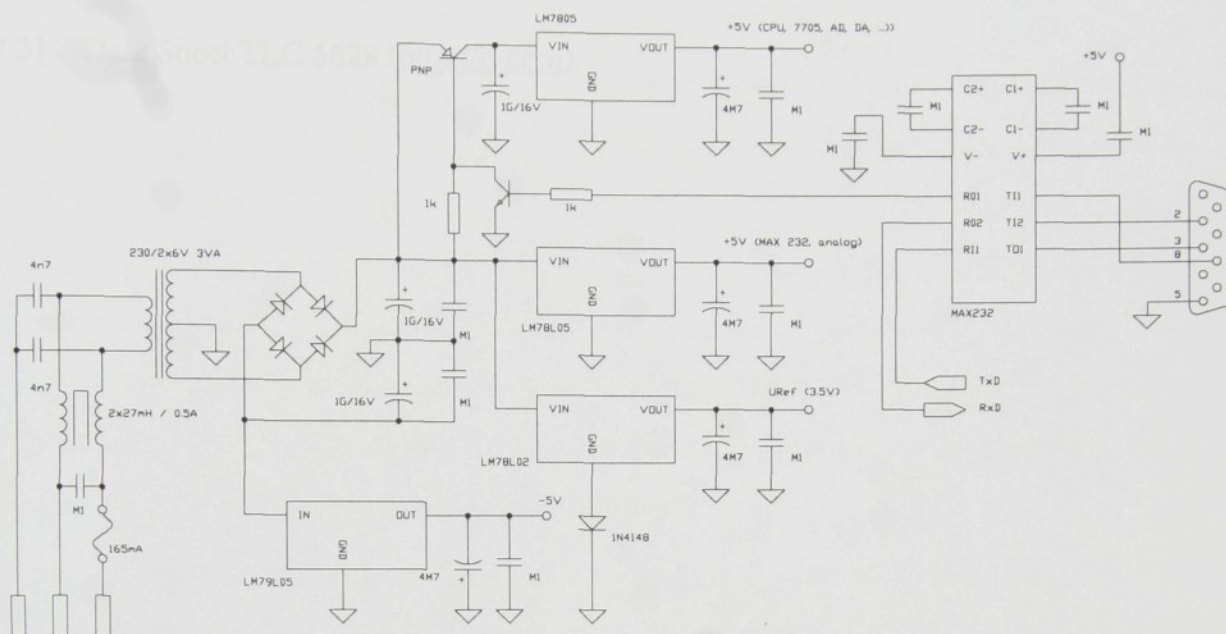
Obr. 7.5
Formulář programu pro kalibraci převodníku

se měřicí snímač zafixuje na nulové hodnotě a změnou referenční hodnoty U_{LoRef} se nastaví výstup AD převodníku na nulu, poté se snímač zafixuje v poloze maximální hodnoty a úpravou U_{HiRef} se nastaví výstup AD převodníku na maximální výstupní číselnou hodnotu, tj. 1023. Nakonec jsou takto nalezené hodnoty referencí AD převodníku uloženy do EEPROM, odkud jsou přečteny a použity při každém zapnutí měřicího převodníku. Na obr. 7.5 je znázorněn formulář aplikace pro MS Windows sestavené opět ve vývojovém prostředí Delphi pro kalibraci měřicích kanálů zařízení.

Z provozování popsaných systémů pro sběr a zpracování měření vyplynulo několik námětů a požadavků, které byly zpracovávány pro další verzi. Nejvýznamnější změnou v konstrukci měřicího převodníku je doplnění systému o prvky zvyšující spolehlivost zařízení. Jedná se variantu systému „Watch Dog“, ve které měřicí aplikace na PC průběžně vyhodnocuje pravidelnost a platnost přijímaných dávek a v případě, že přicházející data nesplňují kriteria, pokusí se obnovit činnost měřicího převodníku tím, že ho převede do výchozího stavu chvilkovým snížením napájecího napětí k nule pro všechny komponenty v převodníku, které mají „sekvenční“ charakter (mikropočítač, paměť EEPROM, AD a DA převodníky) a mohly by se setrvávat v nefunkčním stavu. Pro tuto inicializaci převodníku byl použit jeden ze signálů standardního rozhraní RTS (Request To Send).

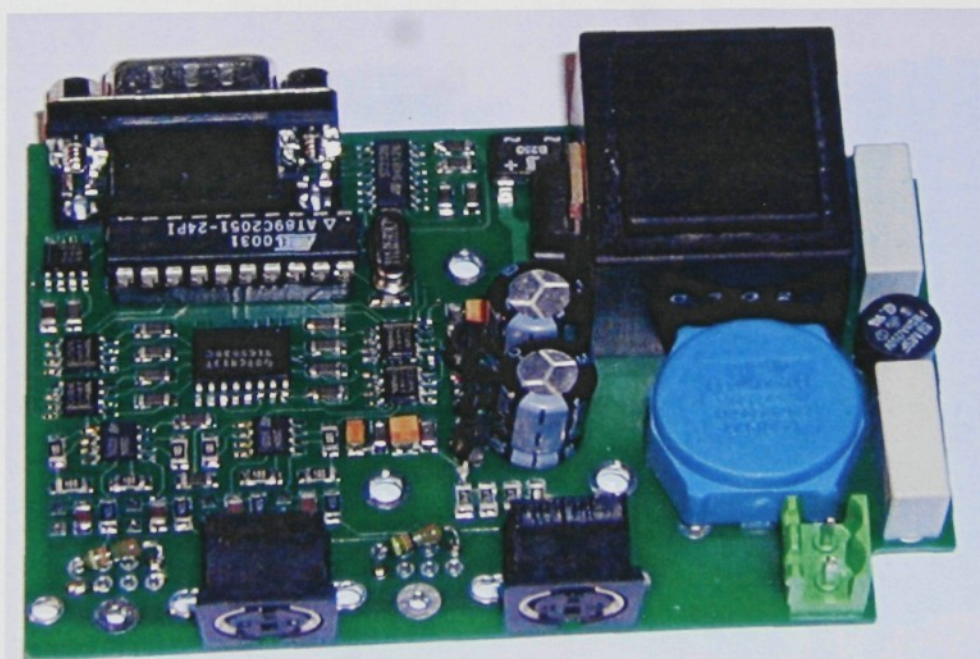
Pro úplnost uváděného popisu zařízení je na obr. 7.6 zobrazeno obvodové schéma zapojení napájecího zdroje, který je také umístěn na desce.

Na obr. 7.7 je fotografie dvoukanálové varianty desky měřicího převodníku (od plné čtyřkanálové varianty se liší jen osazením konektory.



Obr. 7.6

Schéma zapojení napájecích obvodů s prvky zvyšující spolehlivost zařízení



Obr. 7.7

Osazená deska měřicího převodníku

Literatura

- [7.1] Punčochář, J.: Operační zesilovače v elektronice. BEN, Praha 1996, ISBN8090198430.
- [7.2] Data Sheet TLC 1549 (<http://ti.com>).
- [7.3] Data Sheet TLC 5628 (<http://ti.com>).

Závěr

Předložená práce je především souborem dokumentů, které shrnují principy, metody a prostředky použité při řešení konkrétních automatizovaných měřicích úloh z několika odlišných odvětví praxe. Všechny měřicí aplikace uvedené v kapitolách 3, 4, 6 a 7 byly skutečně realizovány a v současnosti (březen 2003) je jejich uživatelé provozují. Aplikace, která je zmíněna v kapitole 5, doposud není plně využívána, ale příčinou jsou organizační opatření; z technického hlediska je aplikace plně funkční a připravena pro zahájení provozu.

Jako základní východisko k měřicím aplikacím obecněji, a tedy také k těm, které jsou v práci uvedeny, předchází specializovaným částem práce kapitoly 1 a 2, které jsou obecnějšího charakteru. Jsou v nich zmíněny základní pojmy a diskutovány standardní i netradiční technické prostředky pro měření, zejména z pohledu jejich použití v dále popisovaných měřicích aplikacích.

Měřicí úlohy popisované v kapitolách 3 a 7 sledují standardní základní strukturu měřicího řetězce. Signály jsou při tom zpracovávány postupně dvěma procesory, jednočipovým mikropočítačem v měřicím převodníku a procesorem v PC. Podíl obou procesorů na zpracování signálů byl navržen neobvykle, s důrazem na to, aby byly využity výhody a potlačeny nevýhody každého z obou typů výpočetních prostředků. Na jednočipovém mikropočítači běží jednoúlohová, přehledná aplikace, která provádí vlastní pořízení dat v přesných časových okamžicích. Takto vzniklá data jsou přenášena do PC, ve kterém pokračuje jejich zpracování již bez velkých nároku na časovou přesnost, ale s využitím řádově vyššího výkonu procesoru, velikosti paměti, kvalitního grafického podsystemu pro zobrazení dat a diskové kapacity pro archivaci měření. V řešeních automatizovaných měřicích aplikací uvedených v kapitolách 3 a 7 jsou dále původní dvě drobnosti technického charakteru: kalibrace AD převodníku pomocí dvou referenčních hladin generovaných DA převodníkem ovládaným z nadřazeného počítače a efektivní prostředek pro zvýšení spolehlivosti jednočipového mikropočítače typu watch-dog realizovaný programově v PC.

Měřicí úloha popsaná v kapitole 4 využívá původní metodu zpracování videosignálu specializovaným elektronickým obvodem podporovaným jednočipovým mikropočítačem. Tímto řešením bylo dosaženo výrazného snížení ceny měřicího

zařízení ve srovnání s řešením, které je pro takovéto aplikace obvykle používáno, tj. s použitím PC vybaveného kartou pro digitalizaci videosignálu.

V kapitole 5 byla představena sada technických a programových komponent, která představuje ucelený prostředek pro snadné využití služby SMS pro přenos dálkový dat v měřicích aplikacích. Uvedená sada je účelovým výběrem z rozsáhlého souboru obecných informací a standardů, které jsou o systémech GSM a službě SMS k dispozici.

Původní je bezkontaktní optická měřicí metoda pro plošné určení tloušťky transparentní vrstvy nanesené na transparentní podložce popsána v kapitole 6. Jsou zde uvedeny základní fyzikální zákony, ze kterých metoda vychází, je provedena diskuse a optimalizace vzhledem k parametru, který má na citlivost měření rozhodující vliv. Dále jsou popsány technické prostředky, s jejichž pomocí je měření realizováno a algoritmus programového vyhodnocení získaných informací. Význam kapitoly 6 je i v tom, že řešení v ní popsané se stalo výchozím bodem pro aktuálně vyvíjenou variantu metody pro měření síly transparentních vrstev ve vícevrstvých strukturách.