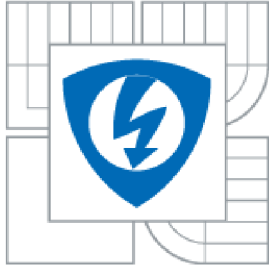




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ZAŘÍZENÍ PRO LINEÁRNÍ ODMĚŘOVÁNÍ POLOHY

FACILITY FOR LINEAR MEASUREMENT OF POSITION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

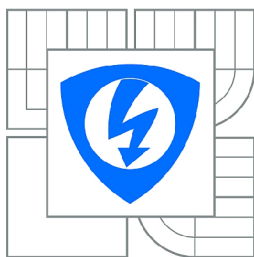
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MARTIN ŠÍPULA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. LADISLAV KÁŇA

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Martin Šipula

ID: 83060

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Zařízení pro lineární odměřování polohy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte dostupné systémy umožňující indikaci a zobrazení lineárních mechanických posuvů. Porovnejte vlastnosti zejména elektrooptických a elektromagnetických systémů se zaměřením na dosažení maximální rozlišitelnosti. Navrhněte možnou realizaci systému s využitím inkurantních prvků. Požadované tech. parametry jsou: max. lineární posuv 400 mm, přesnost $5 \cdot 10^{-3}$ mm.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] NOVÁK, P.: Mobilní roboty - pohony, senzory, řízení. BEN, Praha, 2005. ISBN 80-7300-141-1.
- [2] MATOUŠEK, D.: Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR. BEN, Praha, 2006, ISBN 80-7300-209-4.

Termín zadání: 29.1.2010

Termín odevzdání: 26.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Ladislav Káňa

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Předmětem práce je úvod do problematiky lineárního odměřování polohy. Jsou popsány základní principy indukčních, kapacitních, magnetických a optických snímačů polohy. Práce se dále věnuje technologii výroby snímačů a způsobům zpracování signálů získaných snímači. V práci jsou srovnány inkurantní a průmyslově vyráběné optické a magnetické senzory. Uvedených poznatků je dále využito pro návrh celkové koncepce a řídicího programu zařízení pro lineární odměřování polohy. Jsou navrženy dva typy zařízení. Jeden typ je realizován, prakticky vyzkoušen a proměřen.

Abstract

The subject of the work is an introduction to the problems of linear encoder position. Described are the basic principles inductance, capacitive, magnetic and optical position sensors. The thesis compares used sensors and industrially produced optical and magnetic sensors. That knowledge is also used to design the overall concept and management program for the equipment for measuring linear position. In the thesis there are designed two types of devices. One type is implemented, tested in practice, and measured.

Klíčová slova

Odměřování, poloha, snímač, senzor, čidlo, mikrokontrolér

Keywords

Measurement, location, sensor, microcontroller

ŠIPULA, M. *Zařízení pro lineární odměřování polohy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 76 s.
Vedoucí diplomové práce Ing. Ladislav Káňa.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma *Zařízení pro lineární odměřování polohy* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Ladislavu Káňovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Rovněž bych rád poděkoval firmě Spezial Electronic Praha, která zdarma poskytla zkušební vzorky obvodu AS5311 a vhodné magnetické měřítko.

Obsah

Úvod	10
1. Měření rozměrů a polohy	11
1.1 Základní pojmy	11
2. Senzory polohy a jejich základní principy	13
2.1 Indukčnostní senzory polohy	13
2.1.1 Senzor na principu vířivých proudů	14
2.1.2 Senzory s proměnnou vzduchovou mezerou	15
2.1.3 Senzory s otevřeným magnetickým obvodem	15
2.1.4 Induktivní fázové senzory	16
2.1.5 Selsyny a resolvery	17
2.1.6 Magnetostrikční senzory polohy	18
2.2 Kapacitní senzory polohy	18
2.2.1 Kontaktní kapacitní senzory	19
2.2.2 Bezkontaktní kapacitní senzory	20
2.3 Magnetické senzory polohy	21
2.3.1 Jazýčkové kontakty	21
2.3.2 Hallův snímač	21
2.3.3 Magnetorezistivní senzory	23
2.3.4 Indukční senzory	23
2.4 Optické senzory polohy	23
2.4.1 Fotorezistor	24
2.4.2 Fotodioda	24
2.4.3 CCD snímač	25
2.4.4 Inkrementální optoelektronické senzory	25
2.4.5 Absolutní optoelektronické senzory s prostorovým kódem	26
2.4.6 Optoelektronické senzory s triangulací	27
3. Komunikace a výroba senzorů	28
3.1 Technologie výroby senzorů	28
3.2 Komunikace senzorů	29
3.2.1 Proudová smyčka 4 – 20 mA	29
3.2.2 Inkrementální výstup	31
3.2.3 Pulzní šířková modulace (PWM)	33
3.2.4 Sériový výstup	33
3.2.5 Sběrnice	33
4. Výběr senzoru pro lineární odměřování	35
4.1 Optický senzor a inkurantní řešení	35
4.2 Optický senzor a průmyslové řešení	36
4.3 Magnetický senzor a inkurantní řešení	37
4.4 Magnetický senzor a průmyslové řešení	37
4.4.1 Magnetický senzor – finální výrobek	37
4.4.2 Magnetický senzor – integrovaný obvod	38
4.5 Porovnání a volba senzoru	40
5. Návrh řídicího obvodu zařízení pro lineární odměřování polohy	42
5.1 Blokové schéma	42
5.2 Senzor a převodník	43
5.3 Zobrazení naměřených hodnot	47
5.4 Ovládání	48

5.5 Komunikace s výpočetním systémem	49
5.6 Řídící obvod	49
5.7 Program řídicího obvodu	50
5.8 Napájení	54
6. Návrh mechanické konstrukce	55
7. Praktická realizace a měření zařízení	57
7.1 Realizace zařízení „TYP A“	57
7.2 Realizace zařízení „TYP B“	58
7.3 Měření výstupních hodnot - zařízení „TYP B“	59
8. Závěr	61
Seznam použitých zdrojů	62
Seznam příloh	63

Seznam obrázků

Obr. 1.1	Blokové schéma obecného měřicího řetězce.....	11
Obr. 2.1	Princip indukčnostního senzoru s vířivými proudy.....	14
Obr. 2.2	Indukčnostní senzory.....	15
Obr. 2.3	Lineární diferenční transformátorový senzor polohy.....	16
Obr. 2.4	Princip induktosynu napájeného do jezdce.....	17
Obr. 2.5	Schematické zapojení resolveru.....	17
Obr. 2.6	Magnetostrikční senzor polohy.....	18
Obr. 2.7	Vybrané typy kapacitních senzorů polohy.....	19
Obr. 2.8	Diferenční kapacitní senzor s proměnnou plochou.....	19
Obr. 2.9	Princip bezkontaktního kapacitního senzoru.....	20
Obr. 2.10	Princip Hallova snímače.....	22
Obr. 2.11	Struktura inteligentního Hallova senzoru.....	22
Obr. 2.12	Inkrementální senzor polohy.....	26
Obr. 2.13	Senzor úhlové polohy s prostorovým kódem.....	27
Obr. 2.14	Princip senzoru na triangulačním principu.....	27
Obr. 3.1	Proudová smyčka (blokové schéma).....	30
Obr. 3.2	Inkrementální výstup.....	32
Obr. 3.3	Inkrementální výstup (blokové schéma).....	32
Obr. 3.4	Čtyřnásobná interpolace z inkrementálních výstupů.....	32
Obr. 4.1	Plastové měřítko pro optické odměřování. Skutečný vzorek z HP 640C.....	35
Obr. 4.2	Průmyslově vyráběný optický senzor a měřítko.....	36
Obr. 4.3	Průmyslově vyráběný magnetický senzor a měřítko.....	38
Obr. 4.4	Integrovaný obvod AS5311 a měřítko z magnetických dvojpólů.....	38
Obr. 5.1	Blokové schéma zařízení pro lineární odměřování polohy.....	43
Obr. 5.2	Vnitřní zapojení (blokové schéma) obvodu AS5311.....	44
Obr. 5.3	Princip a rozlišení obvodu AS5311.....	44
Obr. 5.4	Inkrementální výstup obvodu AS5311.....	45
Obr. 5.5	Sériový výstup SSI obvodu AS5311.....	45
Obr. 5.6	Výstup PWM obvodu AS5311.....	46
Obr. 5.7	Popis vývodů obvodu AS5311.....	47
Obr. 5.8	Vývojový diagram řídicího programu, část 1/3.....	51
Obr. 5.9	Vývojový diagram řídicího programu, část 2/3.....	52
Obr. 5.10	Vývojový diagram řídicího programu, část 3/3.....	53
Obr. 5.11	Napájecí zdroj zařízení pro odměřování polohy.....	54
Obr. 6.1	Návrh mechanické konstrukce zařízení „TYP B“.....	55
Obr. 6.2	Nastavení měřítka u obvodu AS5311.....	56
Obr. 7.1	Realizovaný „TYP B“ při praktickém zkoušení.....	60

Seznam tabulek

Tab. 5.1 Význam informací z výstupu MagINC a MagDEC	46
Tab. 5.2 Popis vývodů LCD displeje.....	48
Tab. 7.1 Zapojení pinů LCD displeje k pinům zařízení pro odměřování polohy	57
Tab. 7.2 Zapojení pinů konektoru SV2 na straně mikrokontroleru a AS5311	59

Úvod

Tato práce se věnuje teoretickému rozboru a základním principům senzorů, typům a způsobům měření fyzikálních veličin a fyzickému odměřování polohy. Budou prostudovány snímače pracující na indukčním, kapacitním, optickém a magnetickém principu. Jednotlivé typy snímačů budou srovnávány z hlediska svých vlastností a vhodnosti použití. Probrány budou základní technologie při výrobě senzorů a způsoby komunikace se senzory.

Ze získaných poznatků bude vybrán nejvhodnější senzor. Všechny získané informace budou aplikovány při návrhu zařízení pro lineární odměřování polohy. Zařízení má sloužit k přesnému měření v normálních prostorech. Nejsou od něj vyžadovány žádné zvláštní požadavky na elektrické krytí nebo odolnost proti nečistotám. Navržené řešení bude sestaveno jako tzv. nepřenosná koncepce zařízení. V našem případě to znamená, že nebude sestaveno s maximální možnou miniaturizací a nepředpokládá se využití napájení z baterie, které by vyžadovalo i minimální proudový odběr celého zařízení. Celý koncept tohoto zařízení bude popsán ve více blocích, aby bylo možné snadněji vysvětlit funkci. Navržená koncepce zařízení musí pracovat alespoň s přesností 5 μm a na délce, která činí 400 mm.

Další část projektu bude věnována návrhu mechanické koncepce a vytvoření vývojového diagramu řídicího programu. Rovněž bude vytvořen řídicí program. Celé zařízení pro lineární odměřování polohy bude prakticky realizováno a otestováno.

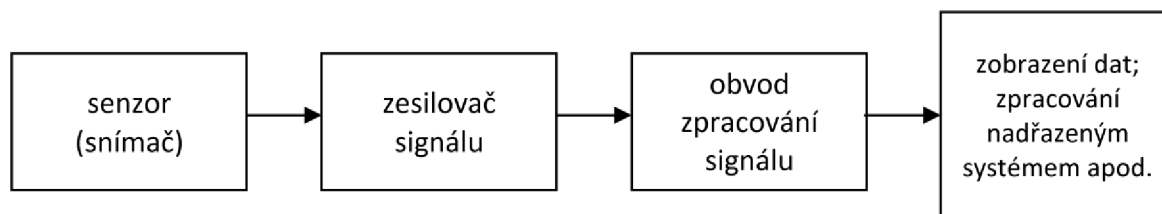
1. Měření rozměrů a polohy

Odměrování polohy a jakékoliv měření rozměrů obecně je v dnešní době stále významnější a ne zcela zvládnutým problémem. Žádný průmysl nebo technický obor ať už jde o strojírenství, elektrotechniku či automatizaci se neobejde bez potřeby získat co možná nejpřesnější rozměrové či poziční údaje o daném objektu. Postupem času tedy vznikaly různé postupy pro získání těchto údajů. Stále složitější výrobky si vyžadovaly objevení nových postupů pro měření. Málokteré průmyslové odvětví si dnes vystačí s měřidlem, které postrádá jakoukoliv elektroniku. Téměř s jistotou lze říci, že v dnešní průmyslové výrobě byla všechna dnešní měřidla, ať už jde o svinovací metr nebo plastové pravítko vyrobena pomocí sofistikovaných metod digitálního elektronického měření. A nejedná se jen o výrobu měřidel, ale téměř všechny výrobky kolem nás. Díky digitálním měřidlům je dnes možné dosáhnout dříve nevídaných přesností a tím i dalšímu zdokonalení samotných výrobků. Nemalé nároky jsou kladeny rovněž na rychlost získání těchto dat a efektivitu při dalším zpracování.

V dalších kapitolách budou představeny základní principy senzorů pro měření, jejich praktické využívání a bude rozebrána možnost použití těchto metod pro dosažení úspěšného cíle tohoto projektu.

1.1 Základní pojmy

Jelikož se budeme zabývat pouze elektronickým způsobem měření, popíšeme si *obecný měřicí řetězec* (obr. 1.1), který je u elektronických měřidel obvyklý.



Obr. 1.1 Blokové schéma obecného měřicího řetězce

Měřicí řetězec lze obecně popsat několika bloky. Prvním a zcela nezbytným blokem je *senzor* neboli též *snímač*, který transformuje sledovanou veličinu a to nejčastěji na elektrický signál. Podrobně jsou senzory rozebrány v následujících kapitolách.

Vzhledem k tomu, že snímaný signál, veličina či samotný senzor neposkytují vždy dostatečně velký výstupní elektrický signál, následuje za senzorem *zesilovač signálu*. Účelem zesilovače je zesílit signál na takovou úroveň, aby jej bylo možné dále zpracovat. Při zesílení signálů je nutné zajistit dostatečný odstup signálu od šumu a odfiltrvat rušivé složky elektrického, magnetického nebo elektromagnetického pole, které působily na senzor, vedení od senzoru nebo zesilovač.

Dalším blokem jsou *obvody zpracování signálu*. Pokud nám senzor poskytl analogový signál, můžeme jej zde před dalším zpracováním převést do diskrétní podoby. V tomto bloku může být použit např. mikropočítač, který zpracuje získané hodnoty. Výsledek zpracování může být např. odeslán na monitor, displej nebo odeslán k dalšímu zpracování.

V dnešní době se čím dál častěji můžeme setkat i se senzory, které mají možnost obousměrné komunikace. Tyto senzory v sobě zahrnují všechny potřebné bloky komunikačního řetězce a jejich výstupem je pouze univerzální sběrnice.

Jelikož je měření a zpracování signálů velice obecný pojem, může být schéma měřicího řetězce doplněno nebo naopak zkráceno o několik bloků. To záleží hlavně na tom, k jakému účelu, s jakým typem senzoru a v jakých podmínkách je měření prováděno.

2. Senzory polohy a jejich základní principy

Senzor je funkční prvek tvořící vstupní blok měřicího řetězce, který je v přímém styku s měřeným prostředím. Místo pojmu senzor se používají též termíny *snímač*, *převodník* nebo *detektor*. Pod pojmem *převodník* však budeme v této práci označovat část, která slouží k transformaci změřených dat na výstupní signál, se kterým se dále pracuje. Citlivá část senzoru se někdy označuje jako *čidlo*. Senzor snímá sledovanou fyzikální, chemickou nebo biologickou veličinu a transformuje ji na výstupní (míronosnou) veličinu – nejčastěji analogový signál nebo číslicový elektrický signál. [1]

Senzorů existuje celá řada typů a můžeme je rozdělit do několika skupin:

Dle styku s měřeným prostředím:

bezdotykové, dotykové

Dle transformace signálu:

aktivní, pasivní

Dle výstupu:

analogový, digitální

Dle použité technologie:

elektrické, elektromechanické, mechanické, optoelektronické, pneumatické, polovodičové aj.

Dle fyzikálního principu:

chemické, indukčnostní, kapacitní, magnetické, odporové, optické, piezoelektrické aj.

Dle měřené veličiny:

snímače optických veličin, magnetických veličin, tlaku, mechanických veličin (poloha, posun, rychlost aj.), snímače teploty aj.

Další kapitoly se zabývají základními principy senzorů pro měření polohy. V této části jsme uvedli několik základních kategorií, podle kterých lze senzory rozdělit. Senzory polohy budou popisovány dle jedné z kategorií, a to podle fyzikálního principu. Budou zde diskutovány jednotlivé principy senzorů a možnost aplikace v problematice lineárního odměřování polohy.

2.1 Indukčnostní senzory polohy

Indukčnostní senzory mají v automatizační technice a průmyslu široké využití. Tyto senzory se řadí do kategorie pasivních bezdotykových senzorů.

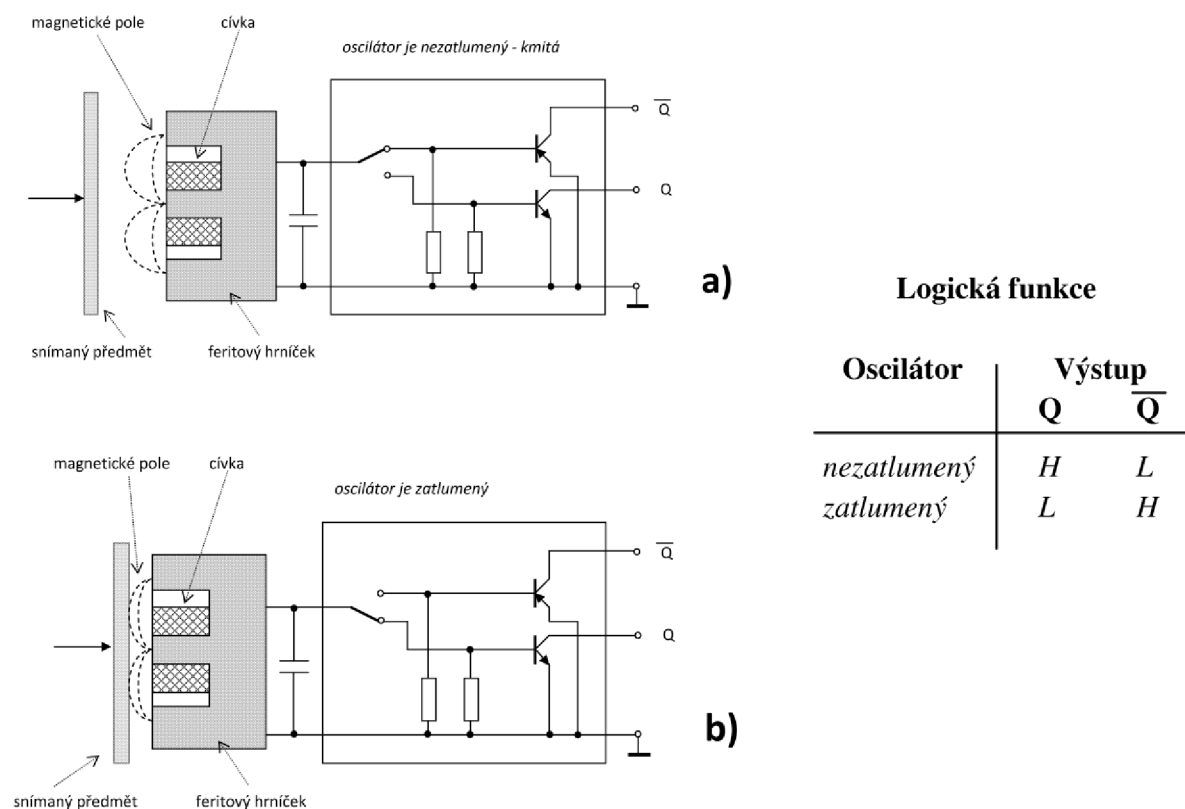
Měřená veličina je převáděna na změnu indukčnosti (jedna cívka, tzv. tlumivkové senzory) nebo vzájemné indukčnosti (nejméně dvě cívky – tzv. transformátorové senzory). Magnetický obvod senzorů může být otevřený nebo uzavřený, uspořádání jednoduché nebo diferenciální. [1]

Typické použití indukčnostních senzorů:

- defektoskopie
- hlášení polohy akčního členu
- inspekční úloha – přítomnost, správná poloha a zjišťování chybějících částí
- měření vzdálenosti a polohy
- náhrada mechanických koncových spínačů
- počítání kusů
- regulační úlohy (poloha, rychlost)

2.1.1 Senzor na principu vířivých proudů

Na jádru feritového hrníčku je umístěna cívka, která tvoří aktivní prvek senzoru. Cívkou protéká vysokofrekvenční střídavý proud generovaný oscilátorem a tím vytváří magnetické pole, které vystupuje z otevřené strany hrníčku. To je také aktivní plocha senzoru. Pokud k aktivní ploše senzoru přiblížíme nějaký předmět z elektricky vodivého materiálu, dojde k deformaci magnetického pole a tím ovlivníme i oscilátor. Princip je dobře patrný i z obrázku (obr. 2.1).



Obr. 2.1 Princip indukčnostního senzoru s vířivými proudy:
a) nezatlučený oscilátor, b) zatlučený oscilátor

Snímaný předmět se v terminologii indukčnostních snímačů nazývá *tlumící clonka*. Dle [2] jsou indukčnostní senzory nejvíce citlivé na přítomnost tlumící clonky z konstrukční oceli.

Běžně používané průměry těchto senzorů jsou do 80 mm. Tomu odpovídá spínací vzdálenost asi 60 mm. Příčinou tohoto omezení je již velký příkon a elektromagnetické rušení

senzoru. Naopak při průměru cívky 5 mm se dostaneme na hodnotu spínací vzdálenosti < 3 mm. K obdobným hodnotám dojdeme i při nahlédnutí do [3], tj. firemního katalogu komerčních produktů.

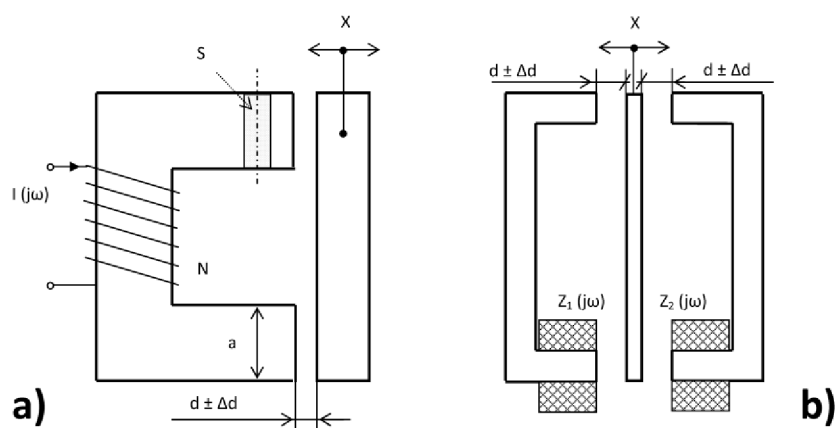
Typy provedení:

Dle [3] mají indukční senzory nejčastěji válcovitý tvar, kde čelní plocha tvoří aktivní plochu snímače. Dále existuje provedení ve tvaru kvádrů, ale i dalších složitějších tvarů, které si nejspíš vyžádala praxe. Senzory jsou vyráběny vzhledem k nutnosti rozličného použití v provedení se závitovým pouzdrům nebo s uchycovacími otvory. Senzory jsou převážně zalaty do jednoho celku, kdy na jedné straně je snímač a na druhé straně vývod pro připojení. Drobnou zajímavostí je, že na senzorech ještě bývá zpravidla umístěna LED, která indikuje sepnutí.

2.1.2 Senzory s proměnnou vzduchovou mezerou

Je to nejvýznamnější typ senzoru s proměnnou reluktancí (veličina charakterizující magnetický odpor). Vidíme, že se měřeným posuvem x mění vzduchová mezera v rozmezí $d \pm \Delta d$ (obr. 2.2a). Dle [1] je-li $d \ll a$, pak je možné zanedbat rozptylový tok mimo vzduchovou mezeru a pro kmitočty asi do 10 kHz také vliv ztrát ve feromagnetiku. Tyto senzory lze tedy použít pro měření malých posuvů x .

Pokud využijeme diferenční uspořádání senzoru (obr. 2.2b) a můstkového měřicího obvodu, dosáhneme dvojnásobné citlivosti a zmenšení nelinearity. Toto je dle [1] v souladu s obecnými vlastnostmi diferenčního uspořádání, jelikož napětí nerovnováhy můstku je pro malé odchylky od rovnováhy úměrné rozdílu relativních změn impedancí ramen můstku.

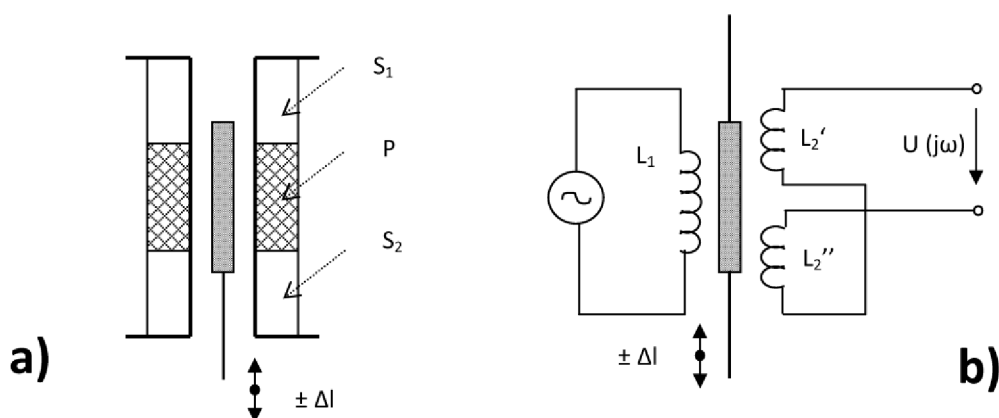


Obr. 2.2 Indukční senzory:
a) indukční mezerový senzor, b) diferenční indukční senzor

2.1.3 Senzory s otevřeným magnetickým obvodem

Indukční senzory s otevřeným magnetickým obvodem (obr. 2.3) jsou často používané pro měření polohy. Jejich základem je válcová cívka (častěji několik cívek), uvnitř které se pohybuje feromagnetické jádro. Vyrábějí se jako tlumivkové nebo transformátorové, nejčastěji v diferenčním uspořádání, kdy dvě sekundární cívky jsou zapojeny proti sobě. V rovnovážné poloze posuvné feromagnetické jádro zasahuje do poloviny délky obou cívek, výsledné výstupní napětí je tedy nulové. Při posuvu jádra se napětí na jedné cívce zvýší

a na druhé sníží. Pro rozpoznání směru výchylky je zpravidla nutné k měření napětí nerovnováhy můstku použít fázově citlivý usměrňovač (synchronní detektor). Jeho referenční napětí je odvozeno z napájecího napětí. Nejrozšířenějším senzorem tohoto typu je LVDT (Linear Variable Differential Transformer). [1]



Obr. 2.3 Lineární diferenční transformátorový senzor polohy:
a) uspořádání snímače, b) náhradní schéma

2.1.4 Induktivní fázové senzory

Induktivní fázový senzor, též nazývaný induktosyn je druh transformátorového indukčního senzoru, v němž jsou používány cívky realizované technikou plošných spojů.

Induktosyn se skládá z měřítka, tj. pevné dlouhé ploché cívky ve tvaru meandru s krokem p na izolantu (sklo, keramika, nemagnetický kov s izolační vrstvou) a jezdce se dvěma cívkami (meandry). Tvar cívek jezdce a měřítka je stejný a při jejich vzájemném posuvu se mění vzájemná indukčnost M mezi každou z cívek jezdce a měřítka. Největší hodnoty dosahuje indukované napětí při úplném překrytí obrazců vinutí jezdce a měřítka, nulová hodnota indukovaného napětí a tedy i M je při vzájemném posuvu o čtvrt kroku $- p/4$. [1]

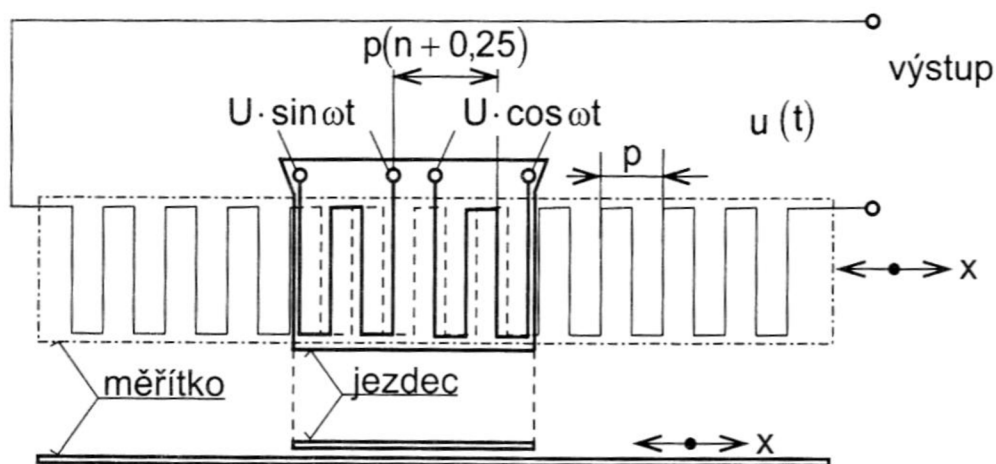
Uspořádání s napájením do jezdce

Jelikož sousední rovnoběžné delší úseky cívky jsou protékány opačnými proudy (obr. 2.4), v mezilehlém úseku měřítka se indukují napětí opačné fáze, takže výsledné napětí je nulové. Obdobně při posuvu o další čtvrtinu kroku se vinutí překrývají a indukuje se opět napětí o maximální amplitudě, ale opačné fázi. [1]

Celkové indukované napětí v měřítku je rovno:

$$u_2(t) = u_{21}(t) + u_{22}(t) = KU(\cos\varphi \cdot \cos\omega t + \sin\varphi \cdot \sin\omega t) = KU \cos(\omega t - \varphi) \quad (2.1)$$

Měronosnou veličinou je nyní fázovací úhel φ , tj. veličina nezávislá na kmitočtu a amplitudě, která se dá snadno měřit čítačem.



Obr. 2.4 Princip induktsynu napájeného do jezdec. Převzato z [1].

Induktosyny se používají jak v lineárním, tak i rotačním provedení. Dle [1] dosahuje přesnost induktivních fázových senzorů až 0,001 mm nebo 0,0005 úhlového stupně. Pro měření úhlové polohy se častěji používají revolvery, které mají uzavřený magnetický obvod a díky tomu mnohem vyšší výstupní signál.

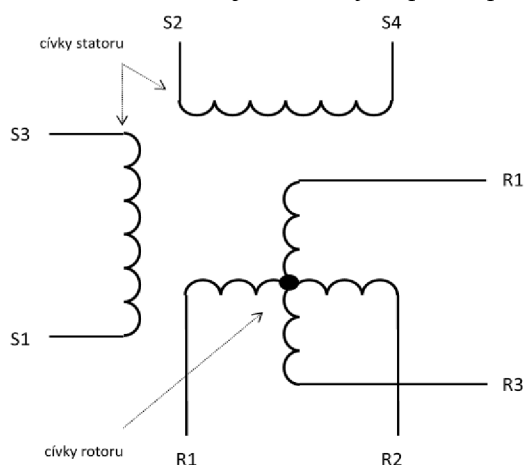
2.1.5 Selsyny a resolvery

Selsyny a resolvery jsou transformátorové senzory, které se využívají pro měření úhlové polohy. Lze je přirovnat k elektrickým asynchronním strojům, které mají satorové a rotorové vinutí (obr. 2.5).

Resolver má dvoufázové vinutí satoru a jednofázový rotor. Magnetické pole rotoru indukuje ve satorových vinutích napětí s amplitudami závislými na úhlu natočení rotoru. K vyhodnocení používáme stejné obvody jako u induktsynu.

Selsyn má trojfázové vinutí satoru. Dle [1] dvojice selsynů napájených do spojených rotorů a s propojeným satorovým vinutím funguje jako „elektrický hřídél“ pro přenos úhlové polohy nebo její dálkové ovládání.

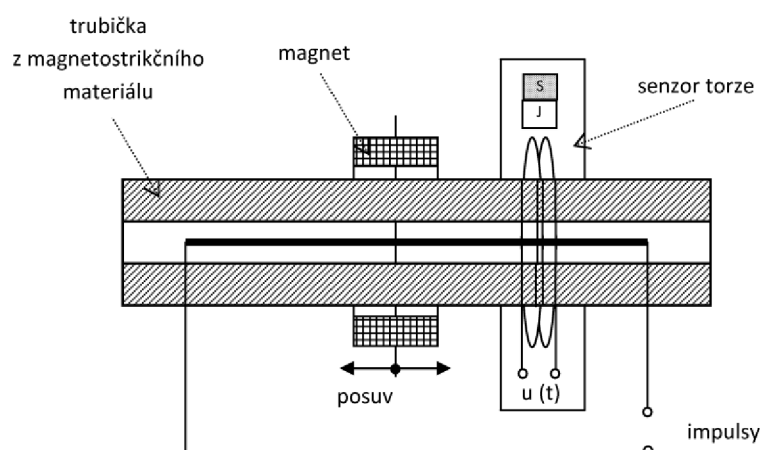
Selsyny a resolvery jsou velmi robustní a mají velké výstupní napětí.



Obr. 2.5 Schematické zapojení resolveru

2.1.6 Magnetostrikční senzory polohy

U těchto senzorů je využita magnetostrikční zpožďovací linka ve formě trubky z magnetostrikčního materiálu (obr. 2.6). V ose trubky je vodič napájený impulsem proudu. S pohybem objektu je spojen prstencový magnet navlečený na trubku. Axiální pole prstence a kruhové magnetické pole vodiče vytvoří impuls kroučícího momentu, který se šíří ke koncům trubky a zde se utlumí. Mechanickou deformací vyvolaná změna magnetické reluktance (tj. magnetického odporu) trubky generuje na výstupu indukčního senzoru torze napětový impuls $u(t)$. Z rychlosti šíření mechanického rozruchu v materiálu trubky (kolem 3000 m/s) a doby mezi budícím $i(t)$ a výstupním $u(t)$ impulsem se určí poloha v číslicovém tvaru. Opakovatelnost $< 0,002\%$, nelinearita $< 0,05\%$ a malá přestavná síla v kombinaci s možností měřit posuvy až do 5 m řadí tyto senzory mezi perspektivní typy. Existuje několik odlišností v provedení tohoto senzoru (např. místo trubky se používá přímo vodivý magnetostrikční drát nebo se užívá jiný detektor torze, odražený puls se používá ke kompenzaci teplotní závislosti rychlosti šíření, která je jinak značná). [1]



Obr. 2.6 Magnetostrikční senzor polohy

2.2 Kapacitní senzory polohy

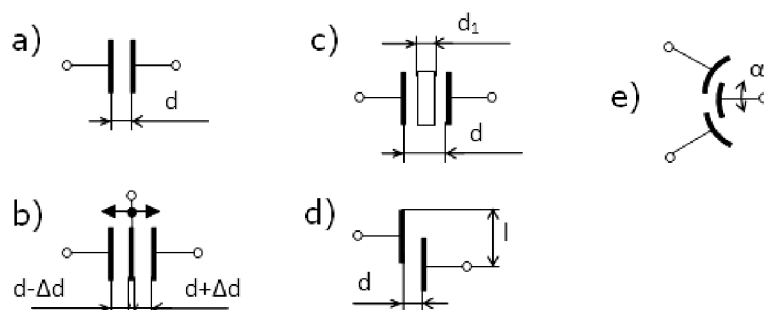
Tyto senzory jsou vhodné pro měření veličin, které ovlivňují kapacitu kondenzátoru. Kapacitní senzory se vyrábí v dotykovém a bezdotykovém provedení. U dotykových neboli kontaktních senzorů je měřený objekt spojen s elektrodou, která je součástí senzoru. Bezdotykové neboli bezkontaktní provedení detekují přítomnost objektů díky deformaci elektrického pole.

Typické použití kapacitních senzorů:

- detekce a odměřování polohy
- detekce přiblížení
- hlídání hladin kapalin a sypkých hmot
- snímání nekovových předmětů

2.2.1 Kontaktní kapacitní senzory

Uvedeme si základní typy. Patří zde jednoduchý deskový snímač s proměnnou mezerou, diferenční deskový snímač s proměnnou mezerou, deskový snímač s proměnnou tloušťkou dielektrika, deskový snímač s proměnnou plochou překrytí, deskový diferenční snímač s proměnnou plochou překrytí, válcový snímač s proměnnou plochou překrytí a diferenční snímač s proměnnou plochou překrytí. Některé typy jsou znázorněny (obr. 2.7).

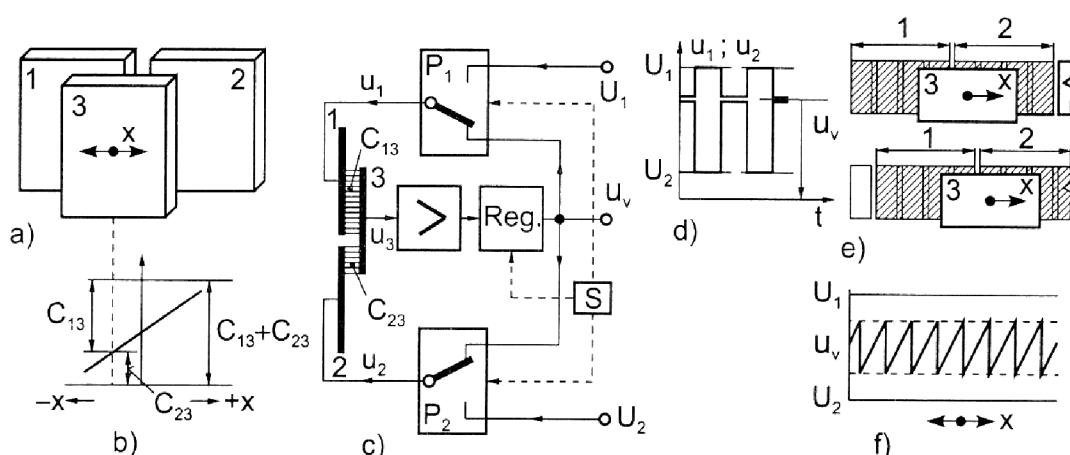


Obr. 2.7 Vybrané typy kapacitních senzorů polohy: a) jednoduchý deskový snímač s proměnnou mezerou, b) diferenční deskový snímač s proměnnou mezerou, c) deskový snímač s proměnnou tloušťkou dielektrika, d) deskový snímač s proměnnou plochou překrytí, e) diferenční snímač s proměnnou plochou překrytí

Kapacitní senzor s proměnnou plochou překrytí

Tento typ senzoru je velmi vhodný pro lineární odměřování polohy. Lze jej sestavit dostatečně přesný. Dle [1] lze tento typ využít až do délky posuvu 2 m a rozlišovací schopnost lze dosáhnout cca. 1 μm , s chybou 5 μm na 500 mm.

Princip je znázorněn na obrázku (obr. 2.8). Jedná se o vzájemné překrývání elektrod (1, 2, 3) a tím dosáhneme změnu plochy. Vzájemná poloha je detekována přepínači P_1 a P_2 . Z přepínačů získáme průběhy napětí. Pomocí nich a vhodných obvodů pro další zpracování signálů získáme zařízení pro odměřování polohy. Tento princip se využívá u řady průmyslově vyráběných měřidel, např. digitální posuvky.

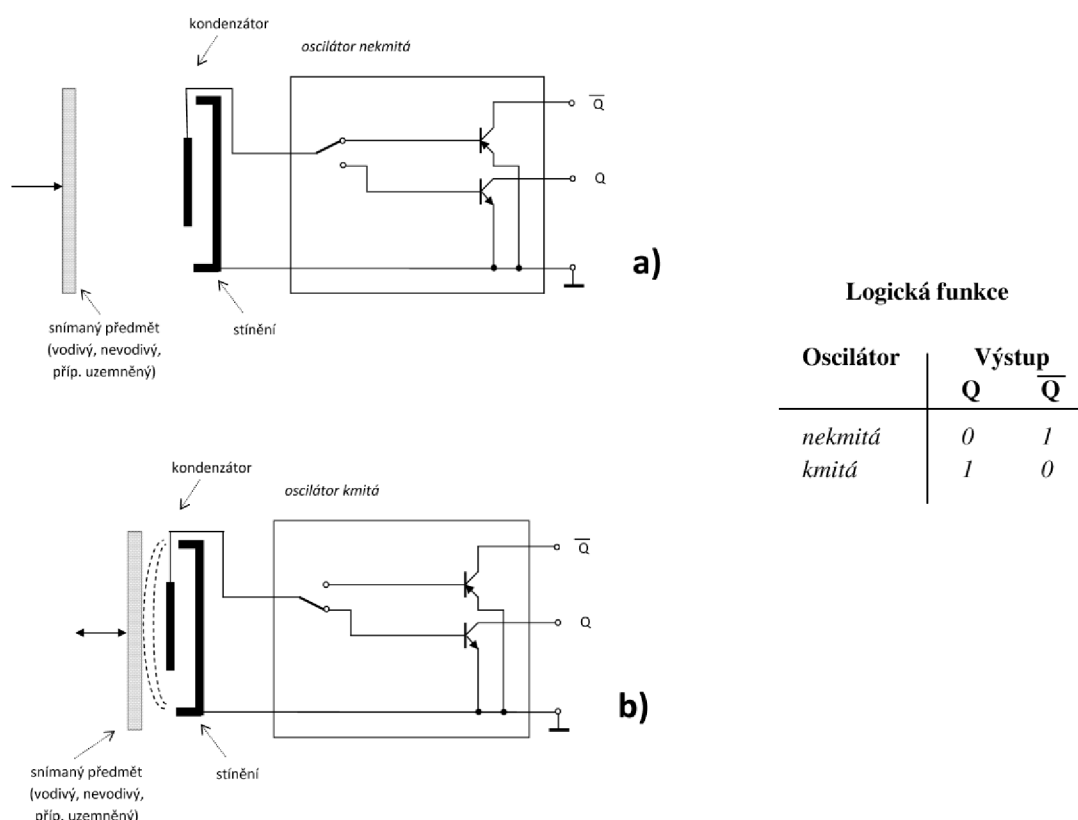


Obr. 2.8 Diferenční kapacitní senzor s proměnnou plochou: a) princip, b) převodní charakteristika, c) měřicí obvod, d) průběhy napětí, e) senzor pro velké posuvy (1, 2 – satorové elektrody), f) výstupní napětí při posuvu elektrody 3. Převzato z [1].

2.2.2 Bezkontaktní kapacitní senzory

Dle [1] jde o senzory, které detekují vodivé i nevodivé předměty. Označují se jako senzory přiblížení nebo polohové spínače.

Aktivním prvkem kapacitního senzoru je kotoučová elektroda uvnitř válcového pouzdra, které působí jako stínění. Obě tyto elektrody vytvářejí kondenzátor se základní kapacitou. Přiblížením clonky ke snímací ploše senzoru se změní kapacita. Kondenzátor je součástí RC oscilátoru, jehož výstupní napětí je závislé na aktivní kapacitě mezi elektrodou senzoru a stíněním. Výstupní napětí oscilátoru je usměrněno, vyfiltrováno a přivedeno do obvodu, který potlačí případné poruchy signálu. Tím je k dispozici řídicí signál pro koncový stupeň. [2] Celý princip dobře znázorňuje následující obrázek (obr. 2.9).



Obr. 2.9 Princip bezkontaktního kapacitního senzoru: a) oscilátor nekmítá, b) oscilátor kmitá

Největší změna kapacity nastane, pokud bude clonka vodivá a uzemněná. Vodivá a neuzemněná clonka způsobí, že se kapacita o něco zvýší. Nevodivá clonka bude detekována jen velmi blízko snímače a kapacita se bude měnit jen změnou permitivity.

Již ze samotného principu vyplývá, že tyto senzory jsou náchylnější na rušivé vlivy. Jsou to převážně elektromagnetická střídavá pole. Přes snímací elektrodu jsou naindukována do vysokoimpedančního vstupu oscilátoru rušivá napětí, která vybudí jeho kmitání. Zdrojem rušení mohou být tyristorové regulátory, zářivky, magnetické ventily a rádiové vysílače. Mezi další vlivy patří vlhkost, znečištění nebo teplota. Některé z trvale působících vlivů lze eliminovat změnou frekvence oscilátoru. Toto opatření si ovšem žádá zásah výrobce.

Typy provedení

Dle [4] mají kapacitní senzory podobné provedení jako indukčnostní senzory na principu vířivých proudů. Jde tedy o válcové nebo kvádrové tvary. Rozhraní pro komunikaci bývá rovněž stejné.

2.3 Magnetické senzory polohy

Magnetismus jako fyzikální jev má celou řadu uplatnění a jedním z mnoha je i využití tohoto jevu pro nejrůznější senzory.

Magnetické spínače využívají nejčastěji jako zdroj magnetického pole permanentní magnety (magneticky tvrdé ferity nebo magnety NdFeB). Permanentní magnet bývá nejčastěji součástí magnetického senzoru, ale může být připevněn i na měřeném objektu. Změna magnetického pole je pak vyvolána změnami magnetického toku. Pro představu je to např. vlivem průchodu zubu na měřeném feromagnetickém objektu.

Typické použití magnetických senzorů:

- identifikační systémy
- měření polohy
- snímání hladin
- snímání poloh pneumatikálních válců

2.3.1 Jazyčkové kontakty

Jako nejjednodušší příklad magnetického senzoru lze považovat tzv. jazyčkové kontakty. Princip je velice prostý, jedná se totiž o dva kontakty zhotovené z plíšky z magneticky měkkého materiálu. Tyto plíšky jsou spínány polem permanentního magnetu. Hodnoty magnetického pole pro sepnutí stejně jako maximální spínané napětí jsou různé dle výrobce a typu. Provedení je ve skleněné trubičce naplněné inertním plynem. Nejčastěji se setkáme s provedením, kdy jsou kontakty rozpojeny, ale vyrábí se i opačná varianta.

Dle [1] je doba sepnutí je cca. 1ms.

2.3.2 Hallův snímač

Hallův snímač je velmi rozšířený typ senzoru polohy. Tyto snímače využívají fyzikálního principu, tzv. Hallova jevu (obr. 2.10), který byl objeven v roce 1879 E. Hallem.

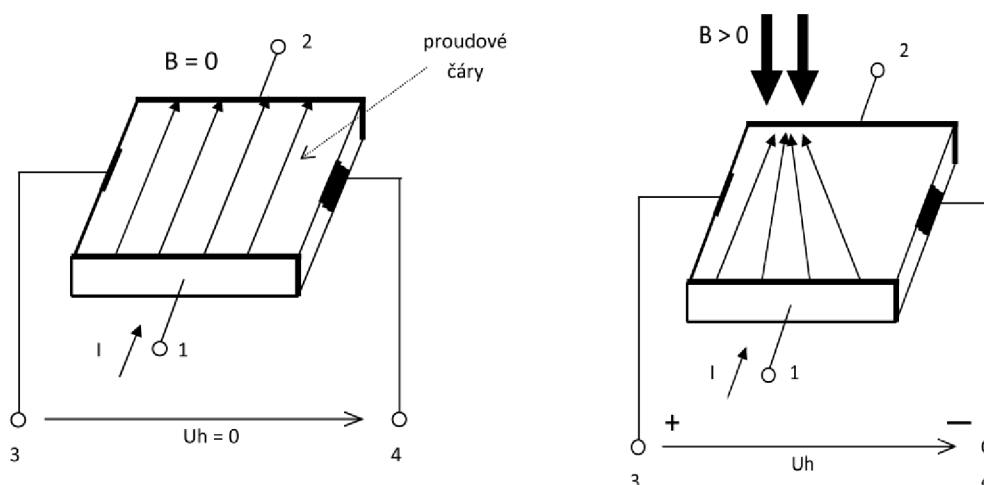
Vodičem tvaru destičky protéká proud:

$$I = b \cdot d \cdot n \cdot e \cdot v \quad (2.2)$$

b , d – šířka a výška Hallovy destičky
 n – koncentrace vodivých elektronů (e)
 e – náboj elektronu
 v – rychlost elektronů

Vektor magnetické indukce B je kolmý k destičce. Tím začne působit napříč proudou intenzita elektrického pole (Lorenova síla) E .

$$E = v \cdot B = U_H / b \quad (2.3)$$

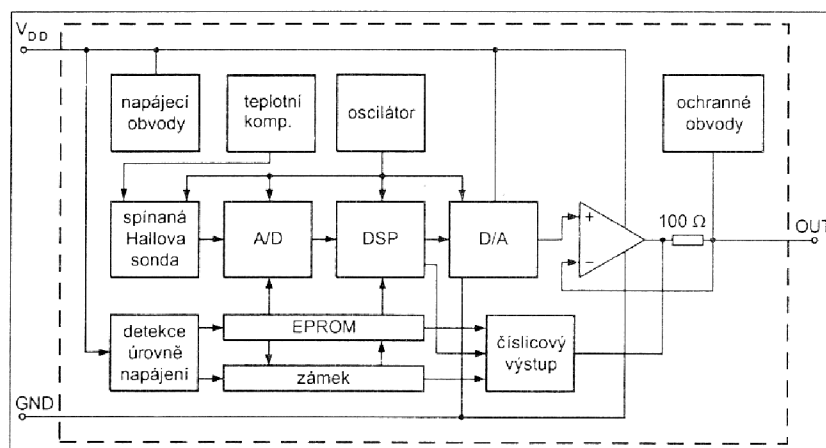


Obr. 2.10 Princip Hallova snímače

Pro výrobu snímačů se nejvíce využívá technologie CMOS. Hallovy snímače mají často jen 3 vývody (napájení, zem a výstup). Samotný Hallův senzor však musí mít 4 vývody.

Hallovy spínače se vyrábějí s různými spínacími charakteristikami (polarita, spínací a rozpínací pole, velikost hystereze) a s různě vymezenou frekvenční oblastí. Používají se i spínače, které v sobě kombinují více Hallových sond, jsou to tzv. diferenční Hallovy spínače. Typické hodnoty spínaných polí jsou 1 mT až 10 mT.

Strukturu inteligentního Hallova senzoru s analogovým výstupem vidíme níže (viz obr. 2.11). Obvod obsahuje spínaný proudový zdroj pro napájení Hallovy destičky, teplotní korekce, A/D převodník a DSP procesor. V základním režimu pracuje s kalibračními konstantami v EEPROM paměti a analogový výstup vytváří D/A převodníkem. Do číslicového režimu se přepne zvýšením napájecího napětí. Pak lze s obvodem v servisním módu obousměrně komunikovat a data v EEPROM paměti měnit. Obvod se vyrábí i v provedení s dvoustavovým výstupem (jako programovatelný polohový spínač). [1]



Obr. 2.11 Struktura inteligentního Hallova senzoru. Převzato z [1].

2.3.3 Magnetorezistivní senzory

Magnetorezistivní senzory nebo taky magnetorezistory jsou v principu rezistory závislé na magnetickém poli. Jsou to polovodičové součástky a dokážou totéž co Hallovy sondy.

Feromagnetické magnetorezistory

Senzory AMR (anizotropní magnetorezistory) a senzory GMR (prvky založené na jevu gigantické magnetorezistence) byly původně vyvinuty pro čtecí hlavy magnetických disků. Zejména AMR magnetorezistory začínají v některých aplikacích nahrazovat Hallovy senzory: mají zhruba desetkrát vyšší citlivost, použitý magnet tedy může být menší nebo může být uplatněna vyšší vzdálenost k senzoru. Na rozdíl od Hallových senzorů jsou AMR magnetorezistory citlivé na pole v rovině čipu. [1]

2.3.4 Indukční senzory

Dle [1] jsou to aktivní senzory, které obsahují indukční cívku s feromagnetickým jádrem. Při změně magnetického pole se na výstupu senzoru objeví napěťový impuls, jehož šířka a tvar závisí na rychlosti změny magnetického toku. Permanentní magnet je součástí senzoru nebo měřeného objektu.

Nevýhodou je použití jen do malé rychlosti změny magnetického toku, proto je jejich použití omezené.

Wiegandův senzor

Je to zvláštní typ indukčního senzoru. Využívá velkého Barkhausenova skoku v jednodoménovém feromagnetickém jádře a díky tomu je tvar výstupního impulsu nezávislý na rychlosti měřeného objektu.

2.4 Optické senzory polohy

Poslední senzory, které si uvedeme, budou z řady optických senzorů, které se přesněji nazývají fotoelektrické či optoelektrické senzory. Tyto senzory jsou dnes stále více používané a nacházejí si místo v řadě aplikací. Jejich rostoucí oblíbenost lze zdůvodnit stále vyšší přesností optické a laserové technologie, díky které jsou dnešní snímače velice přesné.

Dříve se jako vysílací prvek používaly žárovky a jako přijímací prvky fotorezistory. Toto řešení však bylo dostatečné jen pro velmi málo aplikací. S příchodem polovodičových svítivých diod (LED) a laserových diod na vysílací straně, fotodiod a fototranzistorů na straně přijímací došlo k obrovskému rozšíření optických senzorů obecně.

V oblasti odměřování polohy jsou optické senzory velmi vhodnými kandidáty a dokazuje to řada průmyslově vyráběných měřidel. Pokud máme dostatečně citlivý detektor a vhodné optické záření, lze vzájemným posuvem vyvolat snadno detekovatelnou závislost. Pokud tuto závislost převedeme a zpracujeme, můžeme získat velmi přesné měřidlo polohy (posuvu).

Typické použití optických senzorů:

- detekce přítomnosti nebo značek
- hlídání rozměrů na velké vzdálenosti
- inspekční úlohy s rozlišením barvy
- kontrola plnění, polohy, obsahu, velikosti atd.
- odměřování polohy

Obecné výhody:

- odolnost vůči elektromagnetickým polím
- odolnost vůči hluku
- měření na velké vzdálenosti

2.4.1 Fotorezistor

Fotorezistory byly dříve hojně používané optické senzory. Jejich princip je založen na fotoelektrickém jevu – osvětlením fotorezistoru dojde ke změně jeho odporu.

Ve starších konstrukcích se vyráběly fotorezistory ve skleněné baňce nebo v plastovém pouzdře. Dnes se nejčastěji vyrábí napařováním na křemíkovou destičku, na kterou se napařuje vrstva kovu. Vlivem osvětlení se mění vodivost mezi vodivými kovovými vložkami.

Výhodou je snadné použití a cena. Nevýhodou dlouhá doba odezvy, velká teplotní závislost, stárnutí při provozu, velká plocha citlivá na světlo.

2.4.2 Fotodioda

Dalším příkladem jednoduchého optického senzoru je fotodioda. Jedná se o polovodičovou diodu, která je upravena tak, že do PN přechodu proniká světlo. Bez osvětlení má fotodioda voltampérovou charakteristiku shodnou s běžnou diodou.

Princip fotodiody je založen na vnitřním fotoelektrickém jevu. Dle [6] světlo (foton), který dopadá na přechod PN, narazí do elektronu ve valenční vrstvě atomu a předá mu svoji energii. Elektron energii fotonu absorbuje, čímž získá dostatek energie k opuštění valenčního pásu a přeskočí do pásu vodivostního - elektron opustí vlastní atom a pohybuje se prostorem krystalové mřížky, vznikl tím volný elektron, na jeho místě vznikla díra (defektní elektron). Takto vzniklé volné elektrony jsou volné nosiče náboje, které snižují elektrický odpor polovodiče, resp. zvyšují elektrickou vodivost polovodiče. Tento fotoelektrický jev nastává také u fotorezistoru.

Fotodioda reaguje na změny osvětlení velmi rychle, řádově $10^{-6} - 10^{-9}$ s. Fotodiody se používají např. v optických spojích nebo k měření osvětlení.

Zvláštní konstrukce se používá například u fotodiody PIN, která má mezi vrstvou přechodu P a N vloženou vrstvu minimálně dopovaného polovodiče s velkou elektrickou pevností (až 500 V). Proto pracuje s velmi vysokými intenzitami elektrického pole v oblasti přechodu. Tím je dosaženo náběhu již v řádu $10^{-12} - 10^{-15}$ s. [6]

2.4.3 CCD snímač

Snímač CCD (zkratka z anglického Charge-Coupled Device) je další typ z řady optických snímačů. Princip je založen opět na fotoelektrickém jevu.

Můžeme je dělit na lineární a plošné CCD. Lineární jsou vhodné pro snímání jednorozměrného obrazu. Příkladem použití může být např. fax nebo scanner. Plošné CCD jsou využity např. v kamerách, kde snímáme v jednom čase vícerozměrný obraz.

Rozlišení se udává v pixelech a dnešní technologie dosahuje rozlišení řádově desítek milionů pixelů. Stále se však můžeme setkat s CCD, které nedosahují tak vysokých hodnot. Je to zejména kvůli použití v méně náročných aplikacích.

2.4.4 Inkrementální optoelektronické senzory

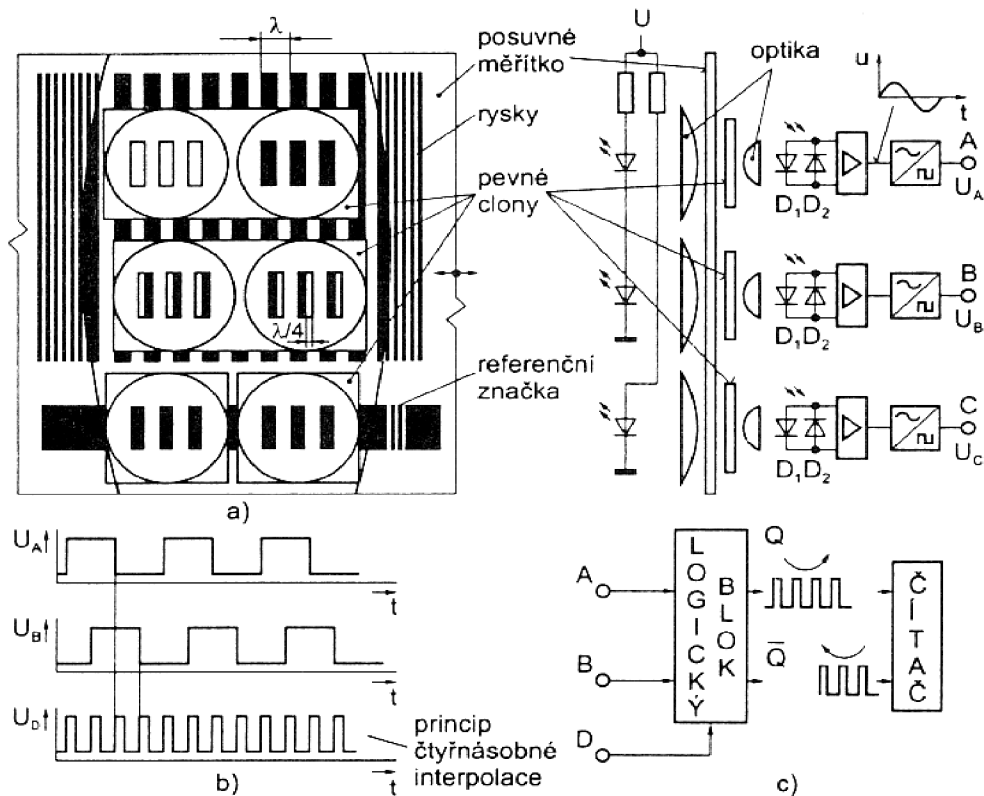
Princip těchto senzorů spočívá v clonění světelného toku mezi zdrojem a fotocitlivými prvky pravitkem (kotoučkem) pravidelně rozděleným na úseky pro světlo propustné a nepropustné (kroky). Posuv pravitka (rotoru) a 1 krok (λ) vyvolá přerušování světelného svazku a výstupní signál fotocitlivého detektoru po úpravě na impuls unifikovaného tvaru inkrementuje obsah čítače. Měřený posuv (plocha) je tedy dán obsahem čítače vynulovaného při referenční poloze.

V typickém uspořádání (viz obr. 2.12) je na skleněném pravitku spojeném s měřeným posuvem fotochemickou cestou vytvořena řada průsvitných a neprůsvitných proužků. Obrazec se stejnou geometrií je také na cloně pevně uchycené měřítkem. Aby bylo možné určit směr pohybu a vynulovat obsah čítače při dosažení referenční polohy (začátku pravitka), má senzor tři soustavy proužků, pevných clon a fotocitlivých elementů, tj. tři kanály (viz obr. 2.12b). Světelný zdroj (LED nebo speciální žárovka s optikou) je společný pro všechny tři kanály (A, B, C). V senzoru se využívá výhod diferenciálního uspořádání, tj. dvě antiparalelně zapojené fotodiody jsou navzájem posunuty o hodnotu $n\lambda + \lambda/2$, takže při posuvu vzniká za zesilovačem střídavý signál blízký sinusovce.

Směr posuvu je odvozen ze sledu signálů v kanálech A, B. Základem je posuv pevné clony v kanálu B o hodnotu $n\lambda + \lambda/4$. Pak signály U_A , U_B . Kanál C slouží k odvození signálu o pozici referenční značky. [1]

Zmenšováním kroku λ je omezeno ohybem světla na přibližně $7 \mu\text{m}$, proto další zvýšení rozlišení až o dva řády je možné zpracováním harmonických signálů U_A , U_B interpolátory. Nejdokonalejší systémy dosahují rozlišení $0,05 \mu\text{m}$ pro posuv a $0,00005^\circ$ pro úhlové posuvy. Jednoduchá inkrementální rotační čidla se používají pro ovládací prvky moderních laboratorních přístrojů. [1]

Jedním z nedostatků těchto senzorů polohy je to, že změna obsahu čítače případnými rušivými impulsy je korigovatelná až po dosažení referenční značky. Tuto nevýhodu však lze při vyšších požadavcích na přesnost eliminovat použitím dokonalejších senzorů s prostorovým kódem.



Obr. 2.12 Inkrementální sensor polohy: a) uspořádání, b) signály z kanálu A, B a po čtyřnásobné interpolaci, c) vyhodnocení směru pohybu. Převzato z [1].

2.4.5 Absolutní optoelektronické senzory s prostorovým kódem

Podstatou je pravítko resp. kotouč s řadou stop, v nichž se střídá průsvitná a neprůsvitná (příp. vodivá a nevodivá, magnetická a nemagnetická) místa (proužky) tak, že vytvářejí obrazec odpovídající složkám vhodného kódu. Kódovací obrazec se z jedné strany prosvětluje a na druhé straně snímá fotocitlivými prvky. Kritickým místem konstrukce je dodržení přesné geometrie snímacích prvků, které musí u senzorů polohy sledovat poloměr. Při zastavení kotouče v mezní poloze může dojít k hazardním stavům (některé fotodetektory čtou sousední hodnoty). Pro kódové kotoučky se proto používají kódy s jednotkovou vzdáleností, nejčastěji se užívá obrazců dle Grayova kódu (viz obr. 2.13). Tento kód se při přechodu do sousední polohy mění pouze v jednom bitu, proto je chyba způsobená hazardem max. 1 LSB.

Vliv rušivých impulzů je strukturou kódu minimalizován, při zjištění změn u více bitů lze použít předchozí čtení a chyba není akumulována až do průchodu referenční značkou, jako je tomu u inkrementálních typů. Jde tedy o absolutní měření pracující jako převodník poloha – číslo. Kódové kotouče mohou mít až 17 stop, tj. $2^{17} = 131\,072$ rozlišitelných poloh. Dalším kódovacím kotoučem připojeným přes převod do pomala lze rozšířit rozsah měření. Mohou však vzniknout přídavné chyby mrtvým chodem a hysterezí (vůlí) převodního mechanismu. Kódové senzory polohy pracují i na magnetickém principu a vyrábí se v provedení do 12 stop. [1]

3. Komunikace a výroba senzorů

3.1 Technologie výroby senzorů

Uvedli jsme si celou řadu typů senzorů pro měření polohy. Vzhledem k tomu, že senzory ať už s dotykovým nebo bezdotykovým provedením bývají poměrně blízko sledované veličině, je na místě uvést jejich technologii výroby. Zdánlivě neškodné prostředí totiž může být pro senzory s určitou technologií výroby likvidační. Znalostí vnitřní struktury při výrobě senzoru můžeme těmto nepříjemnostem snadno předcházet.

Mechanické a elektromechanické senzory se vyrábějí použitím převážně klasických strojírenských technologií. Tyto senzory mají větší rozměry než senzory s použitím mikrotechnologie. Často jsou vyráběny v menších sériích, jejich výroba bývá nákladnější a tím je vyšší i cena. Tyto snímače však mohou být velmi přesné a odolné. U elektromechanických senzorů dochází při výrobě ke kombinaci mikrotechnologií pro elektrickou část a strojírenských technologií pro mechanické provedení.

Tenkovrstvá technologie

- spočívá ve vytváření monokrystalických, polykrystalických i amorfních vrstev křemíku, izolantů a kovů. Vrstvy o tloušťce 1 nm až 1 μm se nanášejí napařováním, elektrolyticky i dalšími technologiemi na základní vrstvu ze skla, oceli, křemíku nebo plastu. Fotolitografií a selektivním leptáním se vytvářejí prvky pasivní sítě obvodu senzoru. Technologie tenkých vrstev zajišťuje u senzorů vysokou přesnost (nastavování laserovým paprskem), stabilitu, malou časovou konstantu, spolehlivost, malé rozměry a hmotnost a lacinou sériovou výrobu s možností integrací s elektronickými a optickými prvky. [1]

Tlustovrstvá technologie

- využívá při výrobě vodičů, rezistorů a kapacitovou pasty nanášené technologií síťotisku na keramickou nebo umělohmotnou podložku. Tlustovrstvou technologií se mohou vytvářet hybridní integrované obvody obsahující polovodičové čipy.

Integrované senzory umožňují podstatné zmenšení rozměrů, a tím dochází kromě minimalizace parazitních impedancí a šumů k nárůstu rychlosti zpracování signálu a snížení výrobních nákladů. [1]

Monolitické senzory

- vyrábějí se postupy používanými při výrobě integrovaných obvodů (nejčastěji na substrátu monokrystalického křemíku). Klasické mikrotechnologie (oxidace povrchu, litografie, epitaxe, iontová implantace, metalizace) bývají doplněny speciálními postupy (např. anizotropní leptání, LIGA, mikroobrábění), které dovolují vytvářet trojrozměrné a pohyblivé struktury. Takové obvody bývají označovány jako MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems). Technologií MEMS jsou vyráběny i akční členy, např. tiskové hlavy pro inkoustové tiskárny, polohovatelná mikrozrcátka pro integrovanou optiku, mikropumpy pro chemické analyzátoři. Pro speciální aplikace (např. bezdotykové měření teplot) se kromě křemíku používají další materiály, např. GaAs, InSb, SiC nebo diamant. Sensorová technika využívá i nanotechnologie a inteligentní materiály. [1]

3.2 Komunikace senzorů

Jak již bylo uvedeno, senzory získávají nejrůznější data z měřeného prostředí. Tyto informace je dále nutno zpracovávat. K tomu slouží analogové nebo digitální zpracování získané veličiny.

Analogový výstup senzoru znamená, že každé měřené hodnotě odpovídá určitá hodnota elektrického proudu, na výstupu senzoru tedy dostaneme spojitý signál. V nejjednodušším případě může být výstup senzoru propojen s přístrojem, který nám přímo zobrazuje získanou veličinu. Těmto jednoduchým principům se ovšem nebudeme zabývat a uvedeme některé ze složitějších a častěji využívaných komunikací.

U digitálního výstupu senzoru získáme dva stavy, tj. 0 a 1. Tyto dva stavy jsou samozřejmě spjaty s určitou časovou závislostí. Výstupem senzoru tak mohou být jednotky až milióny stavů, které jsou poskytnuty v krátkém časovém okamžiku. Takový výstup získáme např. u inkrementálních neboli přírůstkových snímačů. Výstup může být vyveden prostřednictvím jednoho nebo i několika kanálů, které mohou být vzájemně závislé, a tím lze získat vyšší přesnost.

S výstupy senzorů je nutné dále pracovat, proto se v této kapitole seznámíme s obecnými principy a typy přenosu dat v oblasti senzorů.

3.2.1 Proudová smyčka 4 – 20 mA

V oblasti senzorů je již delší dobu známo řešení přenosu dat od naměřených veličin pomocí standardizované tzv. proudové smyčky 4 – 20 mA. Jak již název napovídá, jde o principiálně jednoduché zapojení senzoru do obvodu. Často jsou tak získávány analogové hodnoty, ale i digitální data.

Dobrym příkladem analogového měření může být např. termistor, u kterého známe voltampérovou charakteristiku. Díky její znalosti lze vytvořit zařízení pro přesné měření teploty. Analogová proudová smyčka využívá elektrický proud v rozsahu 4 až 20 mA.

Digitální proudová smyčka je rovněž principiálně jednoduchá. Má definovány dva stavy, tedy pro logickou 0 a logickou 1. Volba rozhodovací úrovně závisí na použité aplikaci a požadované přesnosti. Nejčastěji je logická 0 volena jako 4 mA a logická 1 jako 20 mA, získáme tak dostatečný odstup hodnot a minimalizujeme neurčitý stav.

Výhodou proudové smyčky je velká šumová imunita. Přenos může být realizován řádově ve stovkách metrů. V průmyslu, kde se často vyskytuje přenos na velké vzdálenosti a elektromagnetické rušení je to velká výhoda. Další výhodou je napájení připojených komponent přímo ze smyčky. Proudová smyčka je odolná i proti přerušení. Pokud nastane přerušení smyčky, jednoduše to detekujeme elektrickým proudem, který bude 0 mA.

Provedení proudové smyčky záleží na konkrétním požadavku, ale nejčastěji se využívají dvou vodičové proudové smyčky. Lze se setkat i s vícevodičovým provedením, které vylepšuje některé parametry jako je např. odolnost proti přerušení nebo vliv parazitních odporů na vedení.

Komponenty proudové smyčky:

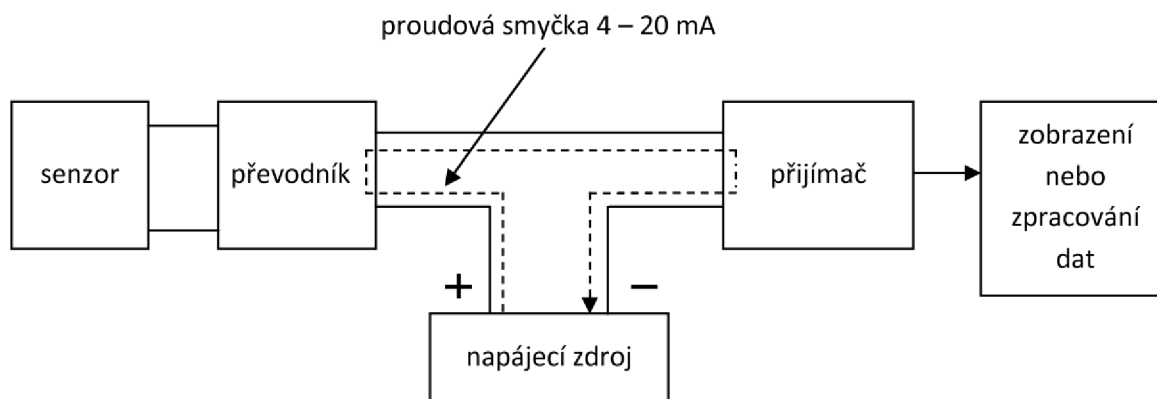
1. Senzor – převod neelektrické veličiny na napěťový signál.
2. Převodník – provádí převod napětí na proud v rozsahu 4 až 20 mA.
3. Napájecí zdroj smyčky – obvykle poskytuje napájení pro převodník a přijímač, popř. další komponenty.
4. Přijímač – provádí zpětný převod proudu na napětí.
5. Vyhodnocení signálu – např. zobrazení na displeji nebo další zpracování.

Základní princip funkce

Základní funkci proudové smyčky vidíme na obrázku (obr. 3.1) a tvoří ji výše uvedené komponenty. Případné další komponenty se vkládají sériově do smyčky a mohou se podílet na změně proudu smyčkou.

Funkce obvodu je dobře patrná. Výstupní napětí senzoru je převedeno na proud. Předpokládané nastavení může odpovídat např. 4 mA pro nulovou hodnotu při měření a 20 mA maximální možné hodnotě.

Přijímač provede převod proudu na napěťový signál, který pak může být libovolně zpracováván.



Obr. 3.1 Proudová smyčka (blokové schéma)

Protokol HART a proudová smyčka 4 – 20 mA

Protokol *HART* (Highway Addressable Remote Transducer) slouží k přenosu různých přidaných řídicích informací mezi převodníkem a přijímačem. Používá přitom dosavadní řešení proudové smyčky a nízkourovňové digitální signály vysílané standardem frekvenčního klíčování (FSK) Bell 202.

Příkazová sada standardu HART se dělí na 3 skupiny:

- **Universální příkazy** - jsou implementovány ve všech zařízeních podporující standard HART. Zařízení různých výrobců jsou vzájemně kompatibilní. Obsahují např. identifikaci zařízení.
- **Obecné příkazy** - nejsou již implementovány ve všech zařízeních HART. Obsahují např. nastavení nul.
- **Specifické příkazy** - speciální příkazy, které jsou odlišné mezi různými zařízeními. Obsahují např. zahájení a ukončení měření, ladění parametrů atd.

Proudová smyčka je stále aktuálním řešením a díky protokolu HART má dříve neznámé možnosti správy různých zařízení. Její spolehlivost stále dostačuje v mnoha

aplikacích a je proto implementována do řady senzorů. Také má podporu v součástkové základně, důkazem je například obvod AD694 od firmy Analog Devices.

Z výše uvedených poznatků vyplývá, že pro naše účely lineárního odměřování je proudová smyčka použitelná, avšak pouze za předpokladu, že by byl senzor umístěn ve velké vzdálenosti od vyhodnocovacího obvodu získaných signálů.

3.2.2 Inkrementální výstup

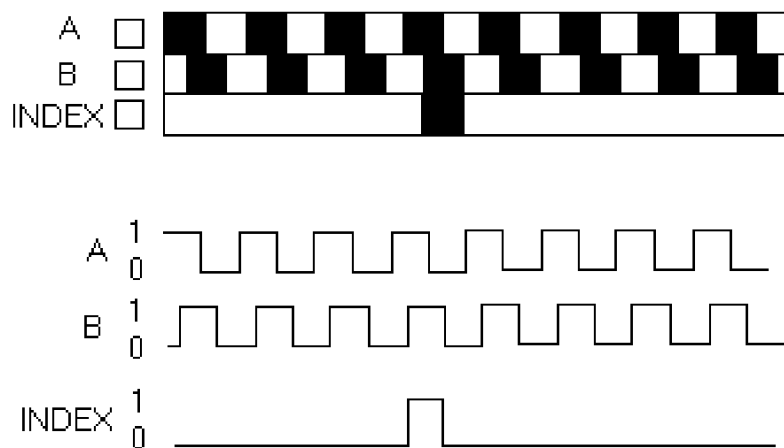
U senzorů polohy se dnes velmi často setkáme s výstupem v podobě inkrementálního neboli přírůstkového signálu.

Výstupem je obdélníkový signál, který nabývá dvou logických stavů, tj. log 0 a log 1. Šířka pulzu není obecně nikdy jednoznačně stanovena, avšak při vícekanálovém výstupu je mezi nimi vždy určitá souvislost. Signály totiž nemají žádný časovací, neboli synchronizační signál. Musíme tedy vytvořit vzájemnou souvislost jiným způsobem. V opačném případě by nemohlo být se signály správně pracováno a nedosáhli bychom maximální přenosovou rychlost takového výstupu.

Vzhledem k maximální rozlišovací schopnosti senzorů bývají inkrementální výstupy nejčastěji dvoukanálové. Označují se jako „výstup A“ a „výstup B“. Přes dva kanály se při dostatečně vysoké frekvenci dá přenést značné množství informací.

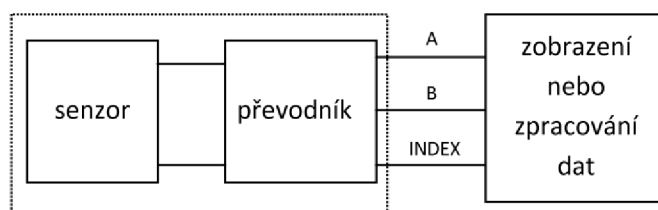
Některé senzory bývají doplněny ještě o řadu dalších výstupů. Tyto výstupy mají spíše informační charakter. V našem případě je výstup označen „Index“. Výstup může poskytovat informaci o dosažení krajní polohy, dosažení libovolně zvolené odměřené vzdálenosti, překročení nebo naopak nedosažení požadovaných provozních podmínek senzoru atd. Obecně nelze stanovit přesné využití, liší totiž u jednotlivých výrobců, tak i u jednotlivých typů vyráběných senzorů.

Jak již bylo výše řečeno, kvůli absenci hodinového signálu musí být vzájemná závislost tvořena jiným způsobem. Inkrementální výstupy ve dvou kanálech mají tento problém vyřešen tak, že jsou od sebe časově posunuty vždy o polovinu předchozího pulzu (obr. 3.2). Díky tomu nedojde k překryvu náběžných či sestupných hran z obou výstupů. Máme tedy zaručeno, že pokud bude na výstupu „A“ přicházet náběžná hrana, bude na výstupu „B“ bezprostředně následovat rovněž nástupná hrana. V případě sestupné hrany je princip totožný.

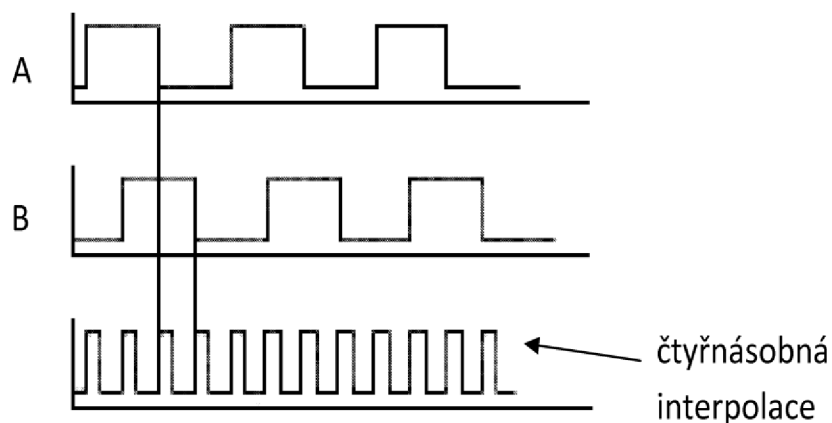


Obr. 3.2 Inkrementální výstup (výstup A, B a INDEX)

Vzhledem k tomu, že máme ošetřeny stavy na výstupech „A“ a „B“, lze se získanou informací pracovat s pomocí čtyřnásobné interpolace (obr. 3.4). Čtyřnásobná interpolace nám totiž „převéde“ informace ze dvou kanálů do jednoho a navíc znásobí počet získaných stavů, než při použití pouze jednoho kanálu. Použití této metody se řeší až ve vyhodnocovacím obvodu, který zpracovává informace ze senzoru.



Obr. 3.3 Inkrementální výstup (blokové schéma)



Obr. 3.4 Čtyřnásobná interpolace z inkrementálních výstupů

Pokud bude senzor a obvod pro zpracování signálů dostatečně blízko u sebe, bude tento typ výstupu velmi vhodným pro naše účely lineárního odměřování polohy. Má totiž dostatečně vysokou úroveň výstupního signálu, není náchylný na rušení a lze z něj poměrně jednoduše získat informace ze senzoru.

3.2.3 Pulzní šířková modulace (PWM)

Některé senzory pro odměřování polohy jsou vybaveny více typy výstupů. Kromě již zmiňovaného inkrementálního výstupu mezi nimi někdy nalezneme i výstup naměřené polohy prostřednictvím pulzní šířkové modulace, zkráceně PWM (z anglického Pulse Width Modulation).

Stejně jako při jiném použití, je i zde hodnota zakódována v šířce pulzu. Tato závislost je pevně dána od výrobce.

3.2.4 Sériový výstup

Sériový výstup dat má velmi široké využití v nejrůznějších aplikacích a jedním z nich je i výstup hodnot ze senzorů polohy.

Současné systémy a zejména senzory absolutní polohy využívají pro komunikaci s řídicím systémem rozhraní SSI. SSI je zkratkou z anglického Serial Synchronous Interface, tedy sériové synchronní rozhraní.

Rozhraní SSI využívá pro svůj chod hodinových pulzů, pomocí nichž jsou vysílány/přijímány a synchronizovány přenášené data. Toto řešení má několik výhod, mezi něž patří malý počet vodičů pro přenos informací, odolnost proti rušení, přenos i na velké vzdálenosti a dostatečná přenosová rychlost.

Toto rozhraní má výhodu i v tom, že mezi bity, které obsahují informace o měřené veličině, může být zařazena i řada bitů, které nepřímo souvisí s měřením. Jedná se zejména o bity poskytující stav senzoru. Můžeme tedy získat informace, zdali senzor pracuje v normálním režimu nebo při nějaké mezní hodnotě. Další informace se mohou týkat smyslu otáčení nebo mohou být přenášeny paritní bity apod.

3.2.5 Sběrnice

V dnešní automatizační technice směřuje trend ke sběrnícím. V důsledku to znamená, že analogový signál se ještě v senzoru převede na digitální a ten komunikuje dle protokolu některé standardní sériové sběrnice. Dle [8] se binární senzory připojují po osmi nebo šestnácti do uzlu, který je prvkem sběrnice. Vzniká tak komunikační spoj, který představuje vyšší úroveň přenosu informace.

Mezi rozšířené sběrnice u senzorů lze zařadit RS-485, která pomocí dvou vodičového spojení v polo-duplexním režimu zajišťuje komunikaci na stovky metrů pro desítky účastníků. Existuje i čtyřvodičová verze.

Jako sběrnice může být využit kterýkoliv vhodný standard pro komunikaci. Důkazem je i řada komerčních výrobků, které jsou primárně určeny k sledování nějaké veličiny. Veličina je snímána senzorem a po nezbytném zpracování získaných dat je výstupem zařízení komunikace prostřednictvím technologie Ethernet známé z počítačových sítí LAN.

Popsané komunikační rozhraní senzorů má návaznost i v oblasti software pro osobní počítače. Důkazem je např. komerční produkt od firmy Zeroplus, která poskytuje program pro sledování řady protokolů, mezi které patří i SSI. Uživatel tak může detailně sledovat průběhy a chování senzoru. Získané poznatky lze využít např. pro lepší zpracování signálů a optimalizaci kódu pro mikrokontroléry.

4. Výběr senzoru pro lineární odměřování

V předchozích kapitolách jsme se seznámili se základními principy a typy senzorů polohy, byly uvedeny jejich vlastnosti a nejdůležitější parametry.

Blok senzoru bude klíčový prvek zařízení. Aby zařízení dosáhlo co možná nejvyšší přesnosti, bude nutné zvolit kvalitní senzor a převodník získaných dat. Chyby způsobené těmito prvky by nebylo možné nijak zpětně opravit. Tyto dva prvky budou mít vliv i na maximální rychlost posuvu.

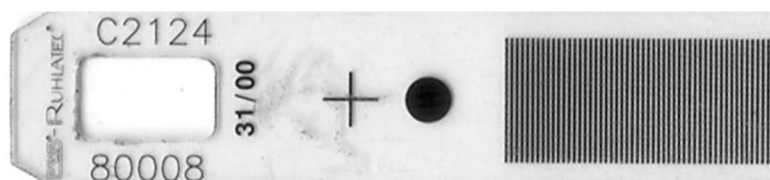
V kapitole č. 2 jsme se seznámili s řadou senzorů, které lze použít v odměřování polohy. Od senzoru očekáváme pokud možno vysokou přesnost při snímání veličiny a od převodníku bezchybný převod získaného signálu do diskretní podoby. Podívejme se nyní na příklady, kde porovnáme řešení s inkurantními prvky a na řešení s průmyslově vyráběným senzorem a měřítkem.

4.1 Optický senzor a inkurantní řešení

Pokud chceme využít inkurantní senzory a měřítka, tak jako první možnost se nabízí libovolná vyřazená inkoustová tiskárna. V těchto tiskárnách se totiž nachází optické odměřování polohy, které slouží pro posunování tiskové hlavy. Za tiskovou hlavou je umístěn plastový pásek – měřítko (obr. 4.1). V našem případě to bude pásek v tiskárně HP DeskJet 640C. Tiskárna využívá inkrementální techniku v odměřování (viz kap. 2.4.4), tj. velmi obecně „počítá počet proužků“, které prošly kolem snímače. Pásek černých a bílých proužků má celkovou délku 360 mm. Na 1 mm připadá 5 černých proužků a 5 bílých proužků, tj. 10 možných stavů. Pokud by byl využit princip 4násobné interpolace ze dvou kanálů (obr. 3.4), pak lze získat na 1 mm celkem 40 stavů.

To by znamenalo, že rozlišení bude $1/40 = 0,025 \text{ mm} = 25 \text{ }\mu\text{m}$.

Vidíme, že k zadané hodnotě $5 \text{ }\mu\text{m}$ jsme se moc nepřiblížili. Museli bychom najít tiskárnu s vyšším rozlišením a „hustším“ páskem proužků. Na další problém narazíme při hledání senzoru. Samotný senzor a převodník je u tiskárny bohužel sestaven jako jeden prvek spolu s posuvem tiskových hlav. To v praxi znamená, že výstup dat ze senzoru je umístěn mezi desítkami dalších vodičů, které však slouží tiskovým hlavám. V praktické části projektu by tedy bylo zapotřebí důkladně prostudovat a otestovat zapojení senzoru a převodníku.



Obr. 4.1 Plastové měřítko pro optické odměřování. Skutečný vzorek z HP 640C.

4.2 Optický senzor a průmyslové řešení

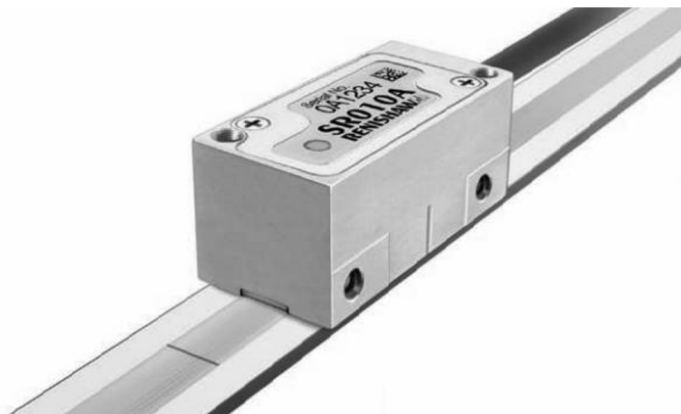
Profesionálních optických senzorů pro odměřování polohy existuje v dnešní době značné množství. Na trhu jsou stovky typů senzorů od různých výrobců. Jednotlivé provedení se liší zejména použitím. Hlavní kategorie jsou senzory pro rotační nebo klasické lineární jednoosé měření.

Pro náš účel potřebujeme výrobky, které měří v jedné ose. Na příkladu z inkoustové tiskárny jsme viděli, že potřebujeme dostatečně přesné měřítko. Toto měřítko a hlavně jeho přesnost je nezbytnou součástí, bez které by nemohl žádný optický senzor pracovat.

Pro názorné vysvětlení byly vybrány optické senzory od firmy Renishaw. Tato firma nabízí celou řadu optických měřidel na profesionální úrovni, o čemž svědčí zejména jejich technické parametry. Pokud se zaměříme na měřítka řady Relm a senzor Tonic, můžeme počítat s následujícími technickými parametry:

- délka měřítka je nabízena v délkách od 80 mm do 1130 mm
- použitelný rozsah pro měření je 60 mm až 1110 mm
- bezkontaktní řešení, tj. vysoká životnost
- rychlost posuvu až 12 m/s
- maximální rozlišení až 5 nm

Měřítka jsou vyrobeny z invaru, což je slitina železa (podíl na objemu 64 %) a niklu (podíl na objemu 36 %) s malou příměsí uhlíku a chromu. Invar je velmi výhodný vzhledem k velmi nízkému koeficientu teplotní délkové roztažnosti. V opačném případě by nemohla být dosažena tak vynikající rozlišovací schopnost.



Obr. 4.2 Průmyslově vyráběný optický senzor a měřítko. Převzato z [12].

Existují i měřítka z ohebného materiálu, který je vhodný pro méně rozměrné přístroje, je levnější a navíc se dá libovolně zkracovat.

Výstupem většiny měřidel výše zmíněné firmy jsou běžné průmyslové standardy, tj. absolutní, přírůstkové, analogové aj. výstupy. Měřidla jsou vyráběna ve více variantách, každá s různou odolností proti okolnímu prostředí (prach a jiné nečistoty, oleje, vlhkost apod.).

4.3 Magnetický senzor a inkurantní řešení

Magnetické senzory jsou vzhledem ke svým výborným parametrům a příznivé ceně stále více oblíbenými senzory. Díky vysokému stupni integrace se podařilo vyvinout velmi přesné a spolehlivé senzory. Avšak i z hlediska inkurantních prvků lze v této oblasti najít řešení. Stačí využít magnetický pásek z audio nebo videokazet apod. Tento magnetický pásek je totiž médium s poměrně vysokým počtem informací na 1 mm. Pokud bychom tedy vytvořili na pásek vhodný záznam, můžeme díky čtecí hlavě získat potřebné informace.

Zaznamenáme-li na magnetickou pásku několik různých stop současně, můžeme s pomocí prostorového kódu (viz kapitola 2.4.5) dosáhnout vysoké přesnosti. Výsledné maximální rozlišení použité pásky by bylo závislé na vlastnostech, jako je šířka, počet stop a hustota záznamu pásky. Magnetické pásky jsou stále vyvíjeným médiem a to převážně pro účely skladování velkého objemu dat. Dokazuje to i novinka z počátku roku 2010, kdy se podařilo dosáhnout dosud nejvyšší hustoty záznamu na čtvereční milimetr. [13]

Velmi důležité je ovšem připomenout řadu nevýhod, které tato metoda skrývá. Čtení z magnetického pásku je kontaktní snímání, které nenávratně poškozuje měřítko, tj. magnetický pásek. Důsledkem poškození by přibýlo velké množství šumu, který by znehodnocoval získávané informace. Další problém by nastal i v mírně agresivním prostředí, kde je vysoká prašnost a nečistoty. Při častém používání by tak přístroj na lineární odměřování polohy jevil známky vysoké chybovosti. Poměrně časté jsou i chemické látky – oleje, hořlaviny apod. Působením těchto látek by došlo téměř okamžitě ke zničení pásku. V takto extrémních podmínkách však neuvažujeme využití. Další překážkou je měnící se rychlost odměřování polohy. Čtecí hlava by musela pracovat ve velkém rozsahu rychlostí a nikoliv pouze s jednou konstantní rychlostí.

4.4 Magnetický senzor a průmyslové řešení

Magnetické senzory jsou obdobně jako profesionální optické senzory pro odměřování polohy značně rozšířeny. Z toho plyne i široká nabídka profesionálních systémů. Opět platí již zmíněné, tj. na trhu jsou stovky typů senzorů od různých výrobců a provedení se liší zejména použitím. Hlavní kategorie jsou senzory pro rotační nebo klasické lineární jednoosé měření.

4.4.1 Magnetický senzor – finální výrobek

Uvedeme si několik příkladů průmyslově vyráběných senzorů. První z nich je senzor s označením LM10 (obr. 4.3) od již zmiňované firmy Renishaw, která poskytuje i senzory založené na magnetickém principu.

Technické parametry senzoru LM10:

- délka měřítka až desítky metrů
- krytí IP68, použití od -20 °C do +85 °C
- bezkontaktní řešení, tj. vysoká životnost
- rychlost posuvu až 25 m/s
- maximální rozlišení až 1 μm



Obr. 4.3 Průmyslově vyráběný magnetický senzor a měřítko. Převzato z [14].

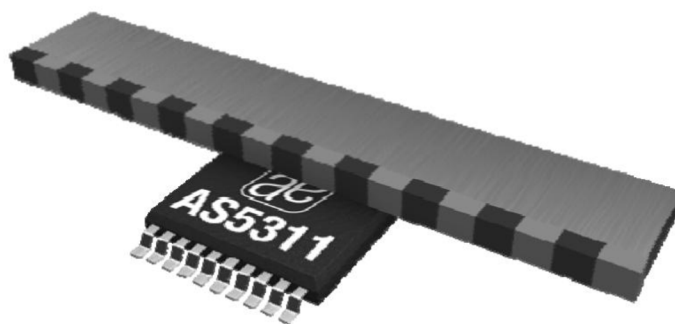
4.4.2 Magnetický senzor – integrovaný obvod

Na druhé straně se nabízí využití speciálního, průmyslově vyráběného integrovaného obvodu, který pracuje na magnetickém principu odměřování polohy.

Při průzkumu trhu s integrovanými obvody pro účel odměřování, byly hlavní požadavky zaměřeny na maximální možné dosažené rozlišení senzoru. Dále byly zohledněny vlastnosti jako datové výstupy, dostupnost a cena.

Výše uvedeným požadavkům nejlépe vyhovovaly obvody od firmy austriamicrosystems (AMS), konkrétně řada AS53xx.

Tato firma nabízí celou řadu integrovaných obvodů pro lineární i rotační odměřování polohy. Specifikace řady AS53xx – jde o samostatné integrované čipy s Hallovy senzory pro měření lineárního nebo rotačního pohybu za použití dvou pólových magnetických proužků nebo kroužků. V jednom čipu se nachází Hallovy sondy, digitální zpracování signálu, analogové rozhraní i digitální výstup. Obvod kombinuje dříve zmíněné výrobní schéma, tj. senzor i převodník v jednom integrovaném obvodu.



Obr. 4.4 Integrovaný obvod AS5311 a měřítko z magnetických dvojpólů. Převzato z [11].

Vývoj řady AS53xx

IO AS5304 – hlavní parametry

- magnetický pásek s dvojicí pólů na délce 4 mm (2 mm severní pól, 2 mm jižní pól)
- maximální rychlost posuvu až 20 m/s
- pouzdro TSSOP20
- použití od -40 °C do +125 °C
- inkrementální výstup A + B + INDEX
- analogový výstup
- 40 pulzů na 1 mm, tj. rozlišení $1/40 = 0,025 \text{ mm} = 25 \text{ }\mu\text{m}$

IO AS5306 – hlavní parametry

- magnetický pásek s dvojicí pólů na délce 2,4 mm (1,2 mm severní pól, 1,2 mm jižní pól)
- maximální rychlost posuvu až 12 m/s
- pouzdro TSSOP20
- použití od -40 °C do +125 °C
- inkrementální výstup A + B + INDEX
- analogový výstup
- rozlišení 15 μm

IO AS5311

Lineární magnetický kodér AS5311 je v této době nejvyšší z produktové řady lineárních kodérů firmy AMS. K dispozici je teprve od roku 2009. Na rozdíl od svých předchůdců poskytuje lepší parametry a více datových výstupů.

- magnetický pásek s dvojicí pólů na délce 2 mm (1 mm severní pól, 1 mm jižní pól)
- maximální rychlost posuvu až 0,65 m/s
- pouzdro TSSOP20
- použití od -40 °C do +125 °C
- inkrementální výstup A + B + INDEX
- sériový výstup v podobě pulzní šířkové modulace (PWM)
- sériový výstup SSI
- výstup informačních hodnot
- rozlišení 1,95 μm při inkrementálním výstupu
- rozlišení 488 nm při využití PWM nebo SSI

4.5 Porovnání a volba senzoru

Seznámili jsme se s průmyslově vyráběnými optickými a magnetickými senzory i jejich náhradami v podobě inkurantních prvků. Srovnáme si všechny důležité parametry a zvolíme nejvhodnější typ pro naši potřebu.

Hlavními požadovanými parametry, kterých potřebujeme docílit je přesnost měření na 5 μm a maximální měřicí rozsah v řádu desítek centimetrů. Všechny principy snímání zmíněné v této kapitole by z technického hlediska vyhověly.

Musíme se tedy zaměřit na jiné parametry, kterými jsou:

- dostupnost technických parametrů a specifikace senzoru
- datové výstupy senzoru a náročnost zpracování dat
- schopnost opakovaného měření bez chyb
- mechanické provedení a implementace, široké spektrum použití
- dostupnost senzoru
- cena

První parametr nejlépe splňují průmyslově vyráběné senzory, u kterých výrobce poskytuje řadu specifikací a nastavení prostřednictvím katalogových listů. Naopak u inkurantních senzorů nemůžeme čekat téměř žádné technické parametry, vše by muselo být odvozeno od původního výrobku, ve kterém sloužily. Problémy by tedy nastaly již s napájecím napětím, rozložením výstupů převodníku apod.

Druhý požadavek na datové výstupy opět nejlépe splňují průmyslově vyráběné senzory. Tato problematika úzce souvisí s prvním parametrem. Průmyslově vyráběné senzory nabízí několik přesně definovaných výstupů, se kterými je dále možné pracovat. Inkurantní senzory a převodníky by bylo nutné předem důkladně proměřit a vyzkoušet. Vzhledem k jejich metodám měření je možné očekávat inkrementální výstup nebo nějaký druh sériové komunikace. Vše záleží na převodníku, který je u nich využit.

Schopnost opakovaného měření bez chyb dokážou splnit oba typy řešení, průmyslové i inkurantní. Avšak u datového magnetického pásu a senzoru v podobě kontaktní čtecí hlavy nelze zaručit počet měřených cyklů. Oproti bezkontaktní magnetické a optické metodě je to velmi malé číslo.

Mechanické provedení se může zdát jako málo významný parametr. Naopak. Je to jeden z rozhodujících faktorů pro bezchybné fungování senzoru. Žádný senzor nelze považovat za řádně pracující, aniž bychom zajistili jeho precizní mechanické uchycení. Mechanická stránka je samozřejmě velmi důležitá i u měřítka, které tvoří spolu se senzorem výslednou přesnost.

Vhodné je vybrat takový senzor, který je stále na trhu a lze u něj očekávat i podporu v budoucnosti. Při případných problémech lze snadno vyměnit kus za kus a nemusí tedy dojít k novému hardwarovému nebo softwarovému návrhu zařízení.

Posledním hlediskem je cena. Pokud začneme u inkurantních prvků, můžeme počítat s náklady v řádech stovek Kč. U průmyslových senzorů, kde je senzor poskytován jako finální výrobek v jednolitém pouzdru a je navržen pro konkrétní měřítka můžeme počítat s cenou v řádech tisíců až desetitisíců Kč. Pro naše parametry bychom mohli počítat spíše s nižší cenou, ale stále se nedostaneme do řádů stovek korun. Zajímavým řešením je ovšem

průmyslově vyráběný integrovaný obvod AS5311, který i s měřítkem v délce 400 mm lze pořídit za cenu kolem 700 Kč.

Porovnáme-li všechny výše uvedené hlediska, dojdeme k závěru, že zařízení pro lineární odměřování polohy není vhodné realizovat z inkurantních prvků. Toto řešení nemá technologickou ani cenovou výhodu oproti běžně dostupným průmyslově vyráběným sensorům.

Z průmyslových sensorů je možné vybrat optické i magnetické senzory. Jejich technické parametry jsou více než dostačující, nezbývá než hodnotit dle ceny. Cenově nejpříjemněji vychází obvod AS5311. Velkou výhodou je i to, že je nabízen jako samostatný integrovaný obvod, který může být využit v různých variantách návrhu zařízení. Návrh bude tedy tvořen s obvodem AS5311.

5. Návrh řídicího obvodu zařízení pro lineární odměřování polohy

V následující části se budeme zabývat koncepcí řídicího obvodu pro zařízení, určené k lineárnímu odměřování polohy. Nejprve si představíme celkové blokové schéma a dále se podrobněji seznámíme s řešením jednotlivých bloků.

5.1 Blokové schéma

Blokové schéma (obr. 5.1) je vytvořeno za účelem snadnějšího pochopení funkce zařízení. Díky rozdělení do několika dílčích bloků si budeme moci představit jednotlivé části a popsat jejich účel a vysvětlit funkci.

Jelikož nebylo blíže specifikováno použití zařízení, budeme předpokládat tzv. nepřenosnou koncepci zařízení. V našem případě to znamená, že řešení nebude sestaveno s maximální možnou miniaturizací a nebude využívat bateriové napájení, které by vyžadovalo i minimální proudový odběr celého zařízení.

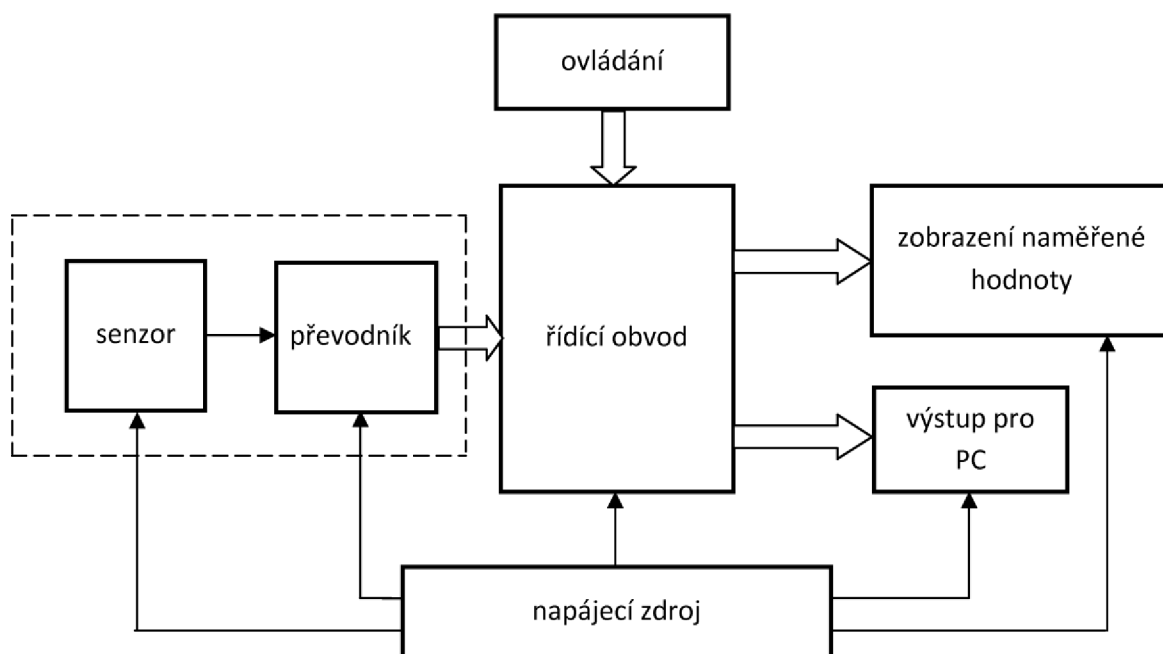
Vzhledem k charakteru zařízení a vybranému typu snímače (AS5311), je celá koncepce založena na jednotlivých univerzálních blocích. Zařízení je tvořeno z více bloků, které budou plnit samostatnou funkci. Univerzální koncepce nám umožní vyvarovat se dosud nezjištěným problémům, které mohou nastat při praktickém testu zařízení. Volbu univerzálního řešení navíc podtrhuje fakt, že řada dnešních průmyslově vyráběných zařízení, nejen pro odměřování, je koncipována jako univerzální systém. Toto řešení v sobě nese velkou výhodu např. v případě, že bude v budoucnu nutné využít jiný typ senzoru, než s kterým bylo původně počítáno. Další výhody lze najít při decentralizovaném využití, kdy nemůžou být jednotlivé bloky poblíž sebe.

Seznámíme se i s návrhem, kde bude zařízení tvořit jeden celek. Návrh, kde bloky tvoří jeden celek je vhodný zejména pro pracoviště s minimálními změnami zapojení, změnami funkčnosti nebo bez potřeby přenosu měřených informací na větší vzdálenost apod.

Zařízení, které bude tvořit jeden celek je označeno jako „TYP A“ a zařízení s využitím více bloků označíme „TYP B“.

Navrhovaná koncepce zařízení (obr. 5.1) se skládá ze sedmi bloků. První blok je *senzor*, který nám zajistí potřebné údaje pro odměření polohy. Tento senzor bude propojen s převodníkem. *Převodník* signálů ze senzoru bude poskytovat údaje řídicímu obvodu. Přerušovaná čára naznačuje, že může dojít k situaci, že převodník bude nedílnou součástí senzoru a tím dojde k sloučení těchto prvků. To je i náš případ, kdy používáme AS5311. Přesnější popis tohoto obvodu nalezneme v kapitole 5.2.

Další nezbytné údaje bude poskytovat blok nazvaný *ovládání*. *Řídicí obvod* bude sloužit ke zpracování získaných údajů a bude poskytovat výstupní hodnoty. Ty budou zobrazeny – *blok zobrazení naměřené hodnoty* nebo můžou být zaslány k dalšímu zpracování pomocí PC – *blok výstup pro PC*. Napájení celého zařízení zajistí *napájecí zdroj*.



Obr. 5.1 Blokové schéma zařízení pro lineární odměřování polohy

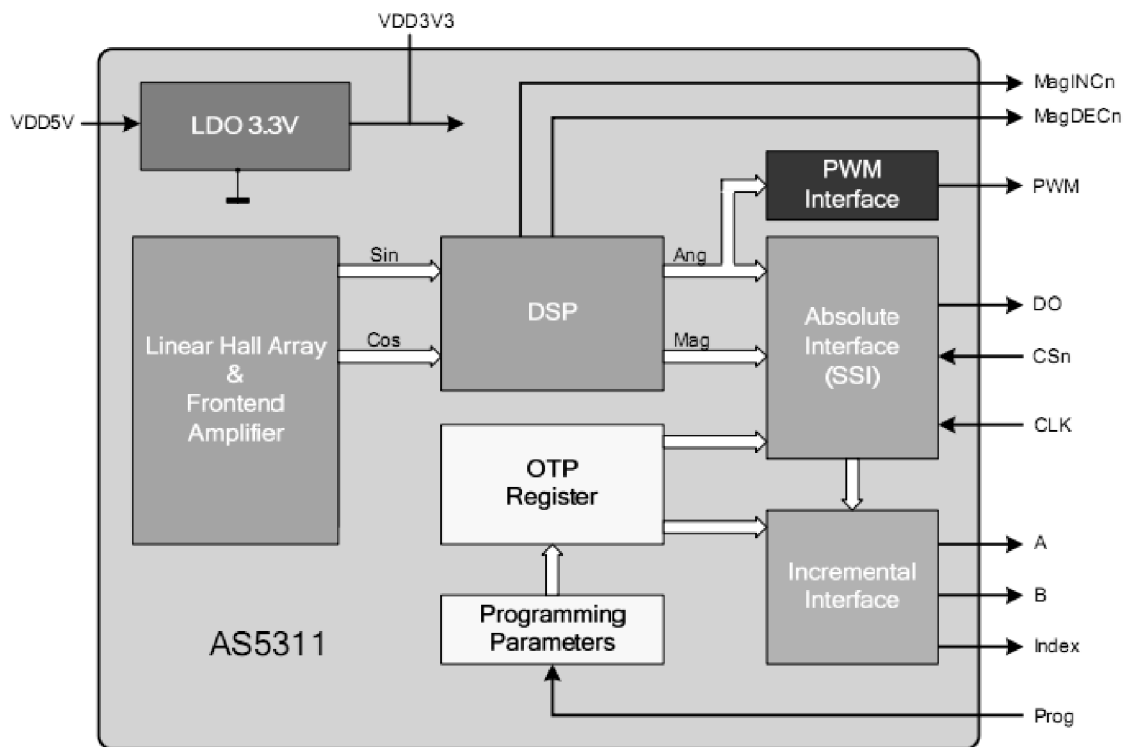
5.2 Senzor a převodník

Jak již bylo dříve zmíněno a zdůvodněno, senzorem polohy pro zařízení bude integrovaný obvod AS5311 od firmy austriamicrosystems (AMS). Výrobce je určen pro robotiku, různé servořízení, jako náhrada optických snímačů a další. Tento IO pracuje na principu Hallova jevu a obsahuje jak senzor, tak i převodník signálů do několika výstupů. Vnitřní struktura je patrná z blokového schéma (obr. 5.2).

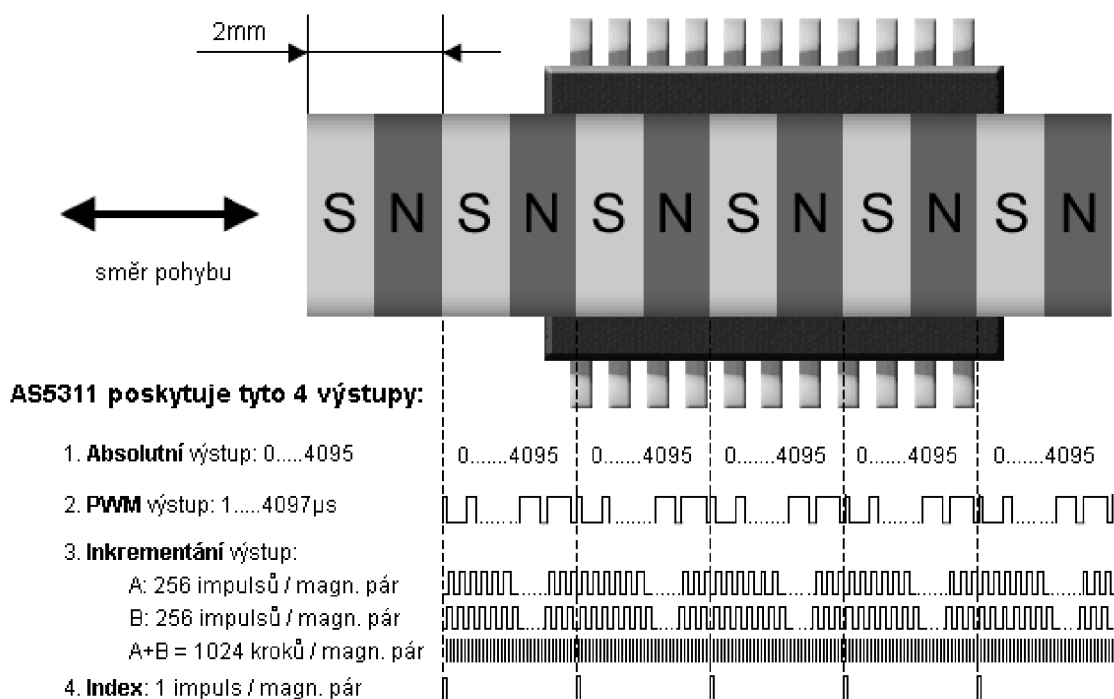
Je velmi přesný, rozlišení dosahuje až $0,488 \mu\text{m}$ při využití výstupu pulzní šířkové modulace či sériového rozhraní nebo $1,95 \mu\text{m}$ při využití inkrementálního výstupu. Oproti optickým systémům jej lze použít v prašném a znečištěném prostředí. Tato výhoda plyne z jeho magnetického principu snímání, avšak i zde platí určitá omezení na provozované prostředí. Jelikož se nepředpokládá využití v extrémních podmínkách, nebudeme tato omezení dále rozebírat.

Napájen může být stejnosměrným napětím 3,3 V (pin 18) nebo 5 V (pin 19). Výrobce připouští kolísání napětí od 4,5 V do 5,5 V (pin 18) nebo 3,0 do 3,6 V (pin 19). Typický odebíraný proud je 21 mA. Provozní teplota je stanovena v rozmezí $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ do $+125 \text{ }^\circ\text{C}$. Vzhledem k ostatním plánovaným blokům budeme využívat napájecí napětí 5 V.

Pro lineární měření se používá multipólový magnetický pásek. Magnetický pár má šířku 2 mm (1 mm severní pól, 1 mm jižní pól). Maximální rychlost posuvu dle katalogového listu výrobce je 650 mm/s. Z obrázku (obr. 5.2, obr. 5.3), které jsou součástí firemního katalogu firmy AMS, je patrné kolik stavů a jaké výstupy obvod poskytuje. S těmito výstupy a stavy se postupně seznámíme. Podrobný popis vlastností všech pinů nalezneme v [11].



Obr. 5.2 Vnitřní zapojení (blokové schéma) obvodu AS5311. Převzato z [11].

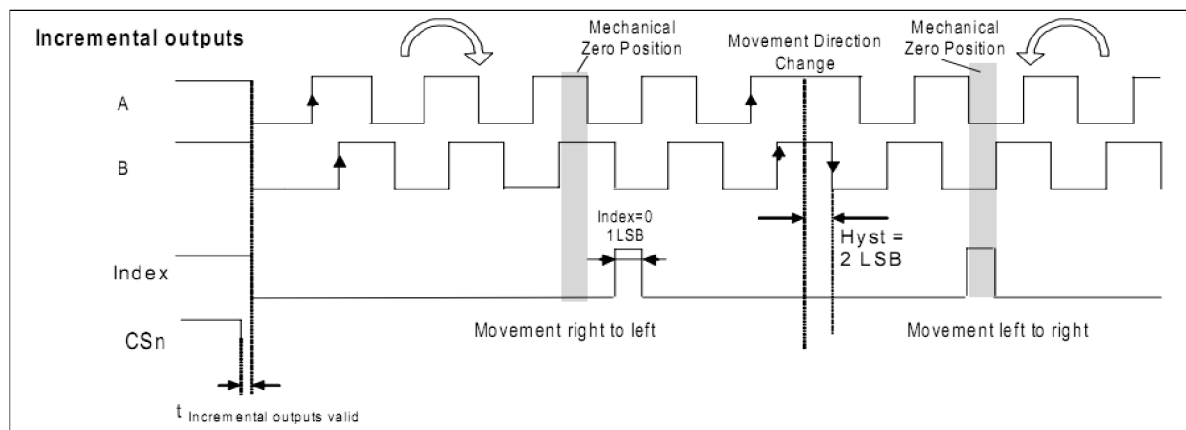


Obr. 5.3 Princip a rozlišení obvodu AS5311. Převzato z [11].

Z vnitřního zapojení (blokového schéma) obvodu AS5311 si nejprve stručně popíšeme inkrementální rozhraní (Incremental Interface). Toto rozhraní popisuje i obrázek (obr. 5.4). Pokud se magnetický pásek pohybuje zprava doleva, výstup A předchází výstup B. Naopak, pokud se pásek pohybuje zleva doprava, tak výstup B předchází výstup A.

Výstup index poskytuje 1 impuls na jeden magnetický pár, je aktivní při přechodu z jednoho magnetického páru na další.

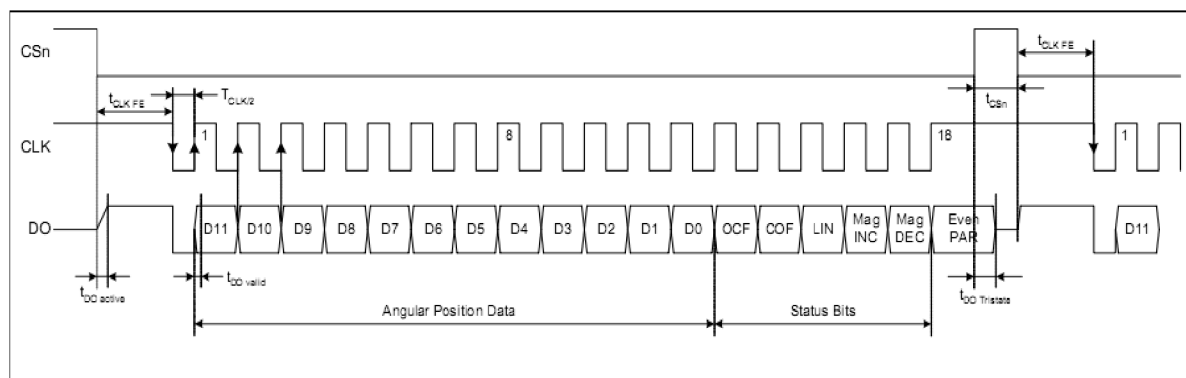
Pin CSn slouží pro aktivaci inkrementálního výstupu, pro aktivaci na něj musí být přiveden impuls s log 0.



Obr. 5.4 Inkrementální výstup obvodu AS5311. Převzato z [11].

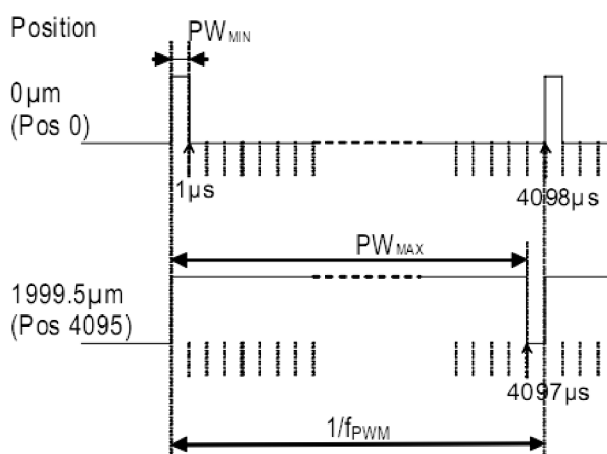
Dalším rozhraním obvodu je sériové rozhraní SSI. Jak je vidět na obrázku (obr. 5.5), hodnota je zakódována prostřednictvím 12 bitů, dalších 5 bitů slouží pro doplňkové informace. Při této komunikaci je nutné pracovat se vstupem hodin (CLK), aby byla dodržena synchronizace.

Opět se zde pracuje s pinem CSn, který řídí režim na výstupu.



Obr. 5.5 Sériový výstup SSI obvodu AS5311. Převzato z [11].

Posledním výstupem odměřené polohy, který IO nabízí je výstup prostřednictvím pulzní šířkové modulace (PWM). Šířka pulzu reprezentuje naměřenou pozici (obr. 5.6).



Obr. 5.6 Výstup PWM obvodu AS5311. Převzato z [11].

Inkrementální výstup a výstup PWM obvodu AS5311 byl prakticky otestován na osciloskopu. Průběhy z měření jsou přiloženy v příloze č. 3. Po proměření vývodů a srovnání vlastností byl zvolen pro další zpracování inkrementální výstup, který díky svému dostatečnému rozlišení a relativní jednoduchosti bude dobře zpracovatelný pomocí mikrokontroléru.

Obvod disponuje vývody, které nesouvisí přímo s měřením polohy, ale poskytují pokročilé informace. Vývody se nazývají MagINC a MagDEC a jsou dostupné i softwarově v SSI výstupu, kde navíc figuruje i třetí informační kanál (LIN).

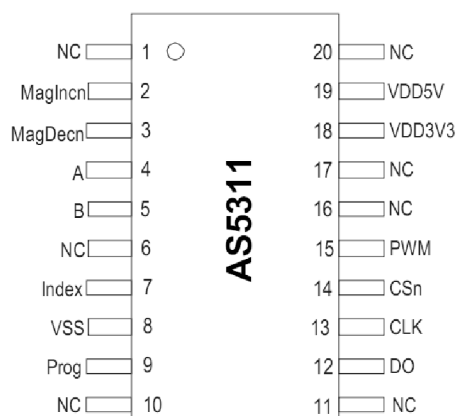
Pro nás jsou důležité první dva, poskytují totiž informace o poloze magnetického pásku. Získané informace lze využít při praktickém nastavování pásku nebo pro detekci mechanické chyby. Mechanickou chybou se rozumí špatně vycentrované měřítko apod.

Tab. 5.1 Význam informací z výstupu MagINC a MagDEC

MagINC	MagDEC	Funkce
0	0	OK! Hodnota magnetického pole je v pořádku.
0	1	Oddáleno měřítko! Tento stav je dynamický a je aktivní pokud se měřítko, tj. magnet pohybuje směrem od čipu.
1	0	Přiblížené měřítko! Tento stav je dynamický a je aktivní pokud se měřítko, tj. magnet pohybuje směrem k čipu.
1	1	POZOR! Úroveň magnetického pole dosáhla krajní meze! Při tomto stavu se nedoporučuje pracovat.

S výstupy MagINC a MagDEC budeme pracovat v programové části. Uživatel bude informován o jejich stavu a může tak lépe sledovat stav měřítka.

Obvod AS5311 je dostupný pouze v pouzdru TSSOP-20. Umístění vývodů je patrné z obrázku (obr. 5.7). S tímto pouzdrém a vývody budeme pracovat při praktickém návrhu.



Obr. 5.7 Popis vývodů obvodu AS5311. Převzato z [11].

5.3 Zobrazení naměřených hodnot

Zařízení pro lineární odměřování polohy musí být schopné předat naměřené údaje o poloze uživatelů. Toho docílíme velmi snadno a to pomocí sedmissegmentového zobrazovače z LED nebo znakovým LCD displejem.

Sedmissegmentový LED zobrazovač má obrovskou výhodu, kterou je vynikající čitelnost. Sedmissegmentové zobrazovače lze pořídit od velikosti řádově několik milimetrů až po desítky centimetrů. Tyto zobrazovače mají velký pozorovací úhel a vysoký kontrast. Pokud použijeme méně rozměrné typy, nemusíme se obávat ani spotřeby, která při napájecím napětí 5 V činí řádově desítky miliampér. Nevýhodou je, že nelze zobrazit všechny znaky abecedy a narůstající složitost řízení, pokud potřebujeme více segmentů.

LCD displeje, založené na principu tekutých krystalů, můžou být v naší aplikaci dalším vhodným typem zobrazovače. Používají se převážně tam, kde potřebujeme zobrazovat znaky, písmena, číslice popř. jednodušší grafiku. Tyto displeje ovšem nemají tak dobrou čitelnost jako sedmissegmentové LED zobrazovače. Nevýhodou je složitě řízení a vyšší cena.

Pro naši konstrukci univerzálního zařízení dobře poslouží monochromatický alfanumerický maticový LCD displej s řadičem. Vyšší cena a složitějšího řízení není až tak nevýhodné, vezmeme-li v potaz lepší komunikaci s obsluhou. Čtení údajů bude prováděno z těsné blízkosti, takže nám nebude vadit ani nižší kontrast. Množství znaků je zvoleno na 1 řádek/16 znaků. Toto množství je dostatečné, jelikož maximální zobrazená hodnota se pohybuje v desítkách centimetrů. Příkladem může být hodnota „999,999 mm“, což je celkem 10 znaků. Zbylé znaky budou využity pro zobrazení doplňkových informací o nastavení měřítka apod.

Pro zařízení byl vybrán typ MC1601A-SBL/H, který je jednořádkový a má 16 znaků. Napájecí napětí je 5 V ($\pm 0,5$ V), maximální odběr i s podsvícením displeje je max. 82 mA.

Tabulka 5.2 popisuje zapojení vývodů LCD displeje. Podle ní budeme navrhovat schéma zapojení a plošný spoj. Ovládání displeje provedeme pomocí 4bitové komunikace, vynecháme tedy vývody 7 až 10.

Tab. 5.2 Popis vývodů LCD displeje

Vývod	Označení	Popis	Vývod	Označení	Popis
1	Vss	GND	7 - 14	DB0 - DB7	Datové linky
2	Vdd	Napájení - logika (+5 V)	15	A	Podsvícení kladný pól
3	V0	Napájení - LCD	16	K	Podsvícení GND
4	R/S	Reset/Set			
5	R/W	Data čtení/zápis			
6	E	Povolení			

5.4 Ovládání

Ovládací blok, jak již název napovídá, bude sloužit k zadávání vstupních hodnot obsluhou. Jedná se spíše o „komfortní“ funkce, které mají sloužit obsluze k rychlejší a pohodlnější práci.

Nutno totiž podotknout, že zařízení pro lineární odměřování polohy lze navrhnout i bez bloku, který bude zajišťovat ovládání. To by ovšem bylo možné pouze v případě, že bychom si zajistili natolik kvalitní senzor a hlavně měřítka, které by dovolovalo získání všech potřebných údajů. Jednalo by se o údaje, které dovolují v libovolném místě měřidla zjistit aktuální polohu – aktuální souřadnice. Takové měřítka lze získat. Z předchozí části víme, že by muselo obsahovat např. princip s Grayovým kódem.

Jelikož chceme mít naše zařízení univerzální, budeme předpokládat použití méně sofistikovaných senzorů a měřitek. Do této kategorie lze zařadit i obvod AS5311. V takovém případě musí ovládání obsahovat tlačítko pro *mulování (reset)*. Zmáčknutím tohoto tlačítka bude zajištěno vynulování měřidla, tj. začneme odměřovat od nuly. Nejčastěji se tak stává ve výchozí poloze měřidla, ale lze to provést v libovolném místě, od kterého chceme začít odměřovat.

Dalším a tentokrát již opravdu komfortním ovladačem může být tlačítko pro *přepínání zobrazovaných hodnot*. Obvykle lze přepínat metrické a imperiální jednotky, od kterých se stále neupustilo.

Posledním ovladačem může být tlačítko, které zajistí tzv. *zamknutí/odemknutí hodnoty*. Pokud tedy „zamkneme“ hodnotu, bude možné po odemknutí začít k původní hodnotě znovu přičítat bez ohledu na předchozí změnu polohy.

Z uvedeného vidíme, že v bloku ovládání nám budou dostačovat 2-3 tlačítka. V našem návrhu to budou 3 tlačítka u zařízení označeném „TYP A“ a 2 tlačítka u zařízení označeném „TYP B“.

5.5 Komunikace s výpočetním systémem

U odměřování polohy bývá někdy nutné předat výsledky měření nejen obsluze, ale i výpočetnímu systému. Naměřená hodnota tak může být automaticky zaznamenána do tabulek, grafů apod. Zařízení by mohlo komunikovat např. s osobním počítačem (PC) přes některý standardní port. Může to být sériové rozhraní RS-232, paralelní port LPT nebo modernější rozhraní USB.

V našem případě se budeme zabývat rozhraním USB. Důvodem je univerzálnost této sběrnice a taky rozsah použití, najdeme ji totiž na každém moderním PC. Od zmíněných rozhraní LPT a RS-232 se v dnešní době již upouští a použití převodníku z těchto rozhraní je často problematické.

Zapojení a deska plošného spoje zařízení pro lineární odměřování polohy bude navržena s ohledem na potřebu komunikace s dalším systémem. Řešení s označením „TYP A“ bude přímo obsahovat komunikační sběrnici s USB, u řešení „TYP B“ to bude volitelný prvek k obvodu. V obou zapojeních použijeme čip od firmy FTDI typ FT232BM. Dle katalogového listu [15] a literatury [16] se můžeme podrobněji seznámit s obvodem. Zapojení obvodu bude poměrně jednoduché, vyžadujeme totiž přenos zpracovaných dat z řídicího mikrokontroléru. U FT232BM bude komunikace probíhat přes piny 24 a 25. Pin 24 RXD - Receive Asynchronous Data Input a pin 25 TXD - Transmit Asynchronous Data Output. Volně přeloženo, jde o asynchronní datový vstup (RXD) a výstup (TXD). Stejně rozhraní nalezneme i u mikrokontroléru. Obvody musí být propojeny podle tohoto principu: mikrokontrolér pin TXD s FT232BM pin RXD, mikrokontrolér pin RXD s FT232BM pin TXD.

Dle [16] je maximální vzdálenost od USB do PC stanovena na 5 m. Samozřejmě může existovat potřeba komunikace na větší vzdálenost. V tom případě by s nadřazeným komunikačním systémem musel přenos dat fungovat na jiném způsobu. Mezi řešení se nabízí využití bezdrátového rozhraní BlueTooth. Na trhu existují výrobky, které jsou řešeny jako samostatný celek a bylo by je možné připojit i k navrhované decentralizované koncepci „TYP B“ místo současného řešení s USB.

Jelikož komunikace s dalším výpočetním systémem nebyla v návrhu projektu požadována, nebudeme se v programové části zabývat řešením přenosu dat. Tento návrh slouží pro širší představu o dalším využití zařízení. Je to rozhodně vítaný a zajímavý prvek, který může pro zařízení odměřování polohy znamenat rozmanitější využití.

5.6 Řídící obvod

Řídící obvod zařízení pro lineární odměřování polohy bude hlavním komponentem. Jeho úkolem, jak již blokové schéma napovídá, bude zpracovávat vstupní data z více zdrojů. Prvním a hlavním zdrojem informací bude senzor s převodníkem a druhým zdrojem budou ovládací prvky zařízení. Dalším úkolem bude tyto informace vyhodnotit a zpracovat je do výstupu pro zobrazovač, popř. nadřazeného výpočetního systému.

Vzhledem k tomu, že budeme mít z převodníku připravena vstupní data v diskrétní podobě, nemusíme dlouho přemýšlet nad výběrem řídicího obvodu. Celkem jednoznačně

padne volba na mikrokontrolér. Mikrokontrolér je totiž velmi univerzální logický obvod, který lze díky programování přizpůsobit konkrétní aplikaci. Dalším argumentem pro výběr je to, že mikrokontrolér ke své činnosti vyžaduje pouze minimum externě připojených součástek. Díky tomu se omezí složitost návrhu zapojení a minimalizujeme i výskyt chyb, které se v případě složitých zapojení mohou vyskytnout. Poslední argument je nízká cena dnešních mikrokontrolérů.

Mezi nejznámější a nejpoužívanější typy mikrokontrolérů lze řadit AVR od firmy Atmel a PIC od firmy Microchip Technology. V našem případě vyhovují oba typy, mají totiž obdobné parametry a funkce. Rozdíl je v instrukční sadě. Záleží spíše jen na programátorovi, kterému výrobcí a typu dá přednost.

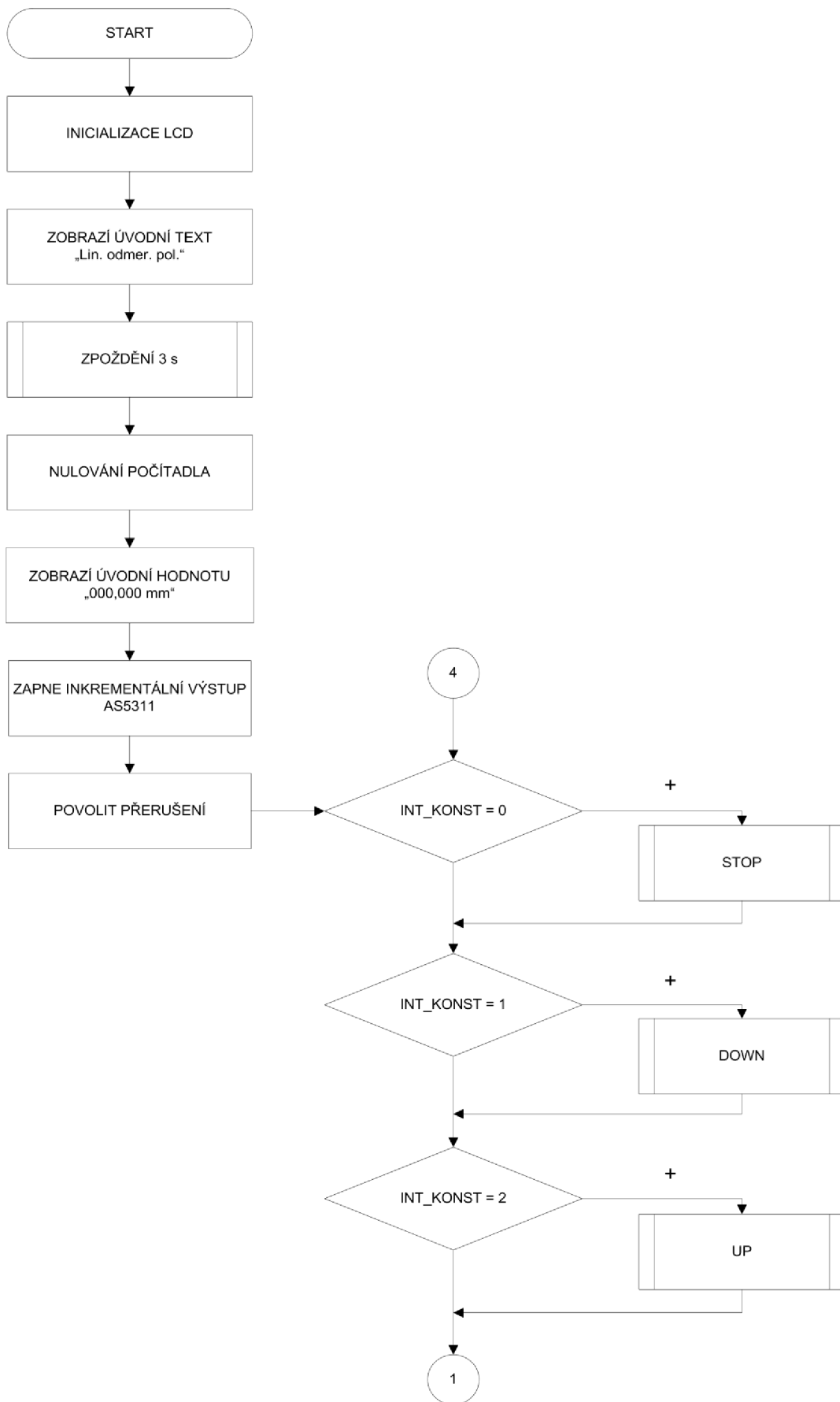
Díky dřívějším zkušenostem s mikrokontroléry AVR jsem se rozhodnul pro jejich použití i v tomto zařízení.

Mikrokontroléry AVR (Advanced Virtual RISC) jsou 8 bitové mikropočítače a mají redukovanou instrukční sadu. Postupem času vzniklo několik řad. Dnes již nepoužívaná řada nese název AT90. Tyto typy již nejsou tak časté zejména kvůli možné náhradě za současně vyráběné řady. Dnes se nejčastěji můžeme setkat s řadou ATmega, které mají více integrovaných rozhraní, větší vnitřní paměť a programovací rozhraní JTAG. Jsou vhodné do náročných aplikací. Další řada s názvem ATtiny je tzv. odlehčenou variantou, zejména kvůli menší paměti a jednoduššímu hardwarovému vybavení. Mají i omezenou instrukční sadu. Výhodou je naopak nižší cena a velikost (8 – 20 pinů). ATtiny je tedy vhodnější do méně náročných aplikací.

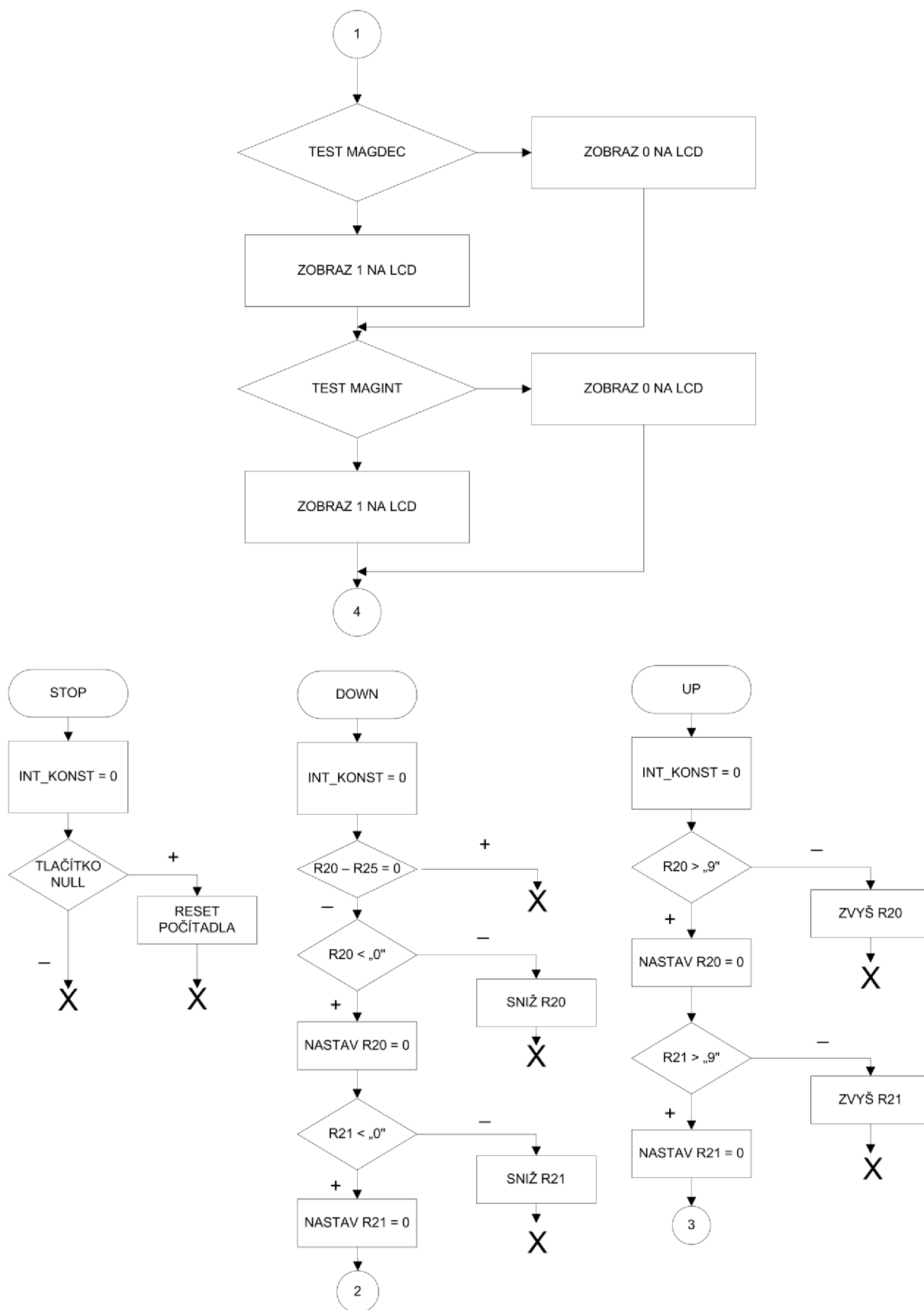
Jelikož chceme vytvořit univerzální zařízení pro lineární odměřování polohy, použijeme řadu ATmega, která nám poskytne více možností. Konkrétní typ byl zvolen ATmega32-16PU, v pouzdru DIL40.

5.7 Program řídicího obvodu

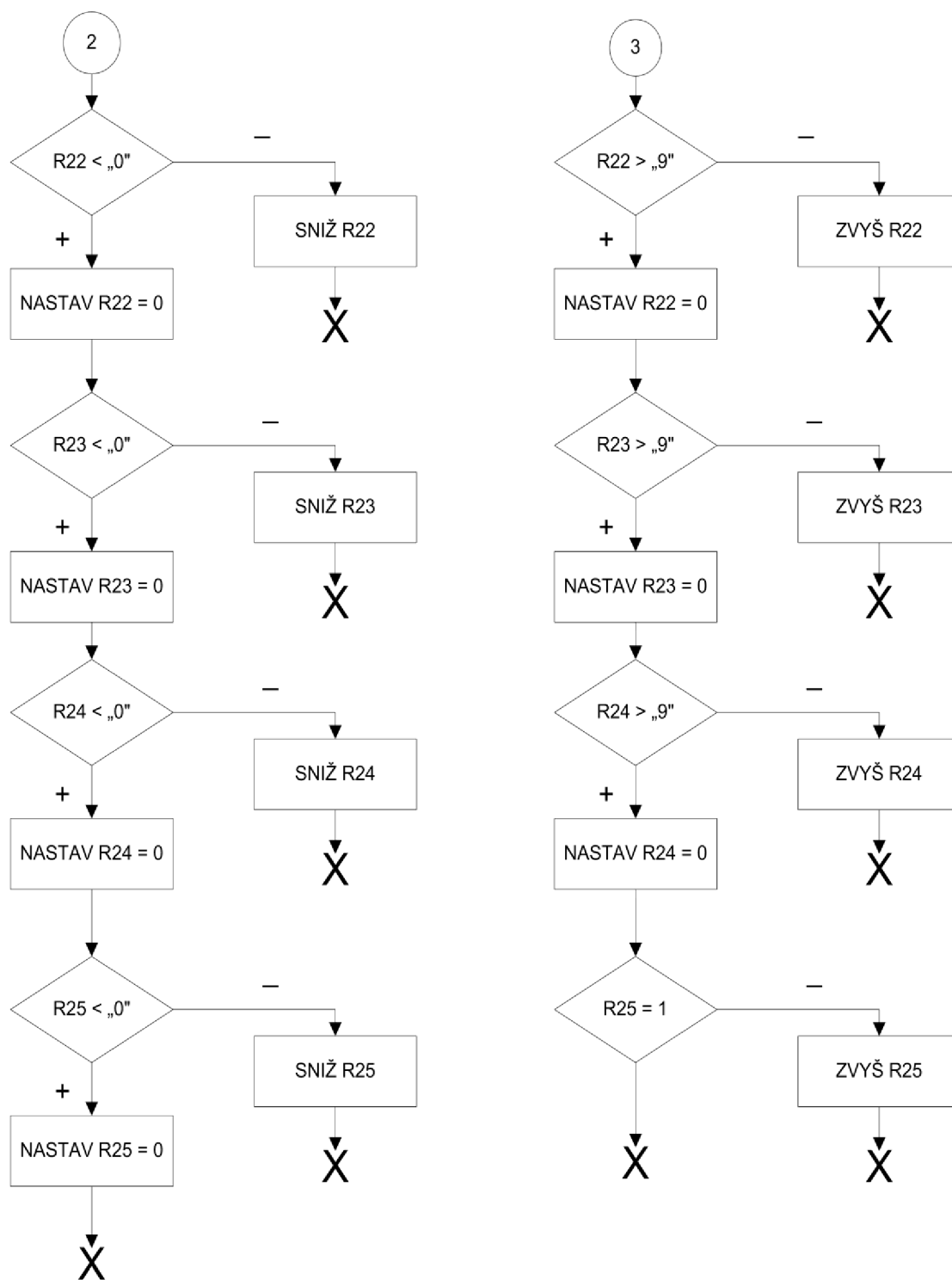
Nedílnou součástí mikrokontroléru je jeho řídicí program. Musíme tedy zvážit všechny možné varianty chování a stanovit si cíl, jak má zařízení fungovat. Pomůže nám v tom zjednodušený vývojový diagram (obr. 5.8, 5.9, 5.10).



Obr. 5.8 Vývojový diagram řídicího programu, část 1/3



Obr. 5.9 Vývojový diagram řídicího programu, část 2/3



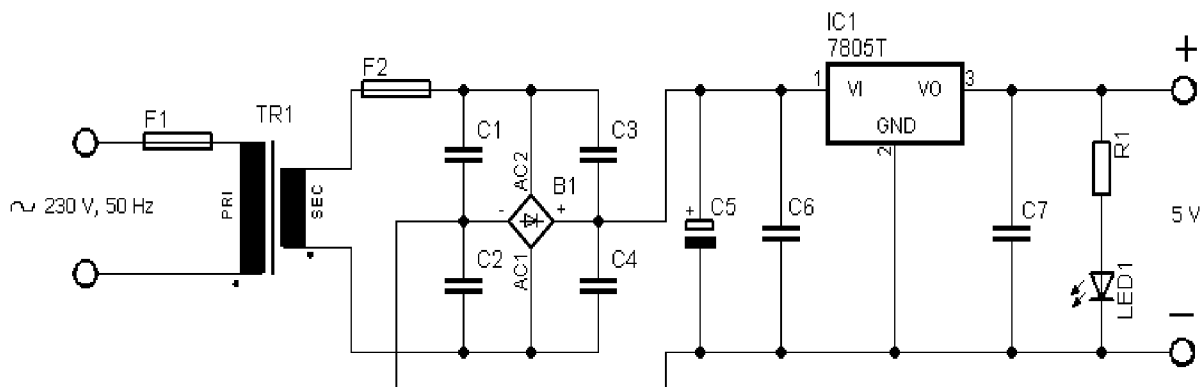
Obr. 5.10 Vývojový diagram řídicího programu, část 3/3

5.8 Napájení

Jak již z blokového schéma (obr. 5.1) a popisu bloků vyplývá, zařízení pro lineární odměřování polohy nebude nijak zásadně náročné na napájení. Nejdůležitější bude zajistit dostatečně stabilizované napětí s minimálním vlivem rušení. Rušení by totiž mohlo negativně ovlivnit řídicí obvod či senzor a tím i výsledky měření.

Pro napájení zařízení bylo sestaveno následující schéma napájecího zdroje (obr. 5.11). Bude zde využitý integrovaný stabilizátor 7805 s max. vstupním napětím 35 V, výstupní napětí činí 5 V, maximální odebíraný proud 1 A.

Vzhledem k tomu, že pro napájení lze využít řadu výrobků na trhu, nebudeme se zabývat návrhem desky plošného spoje ani realizací napájecího zdroje. Použitý zdroj pro napájení lineárního odměřování by však měl plnit požadavky na zmíněné napájecí napětí a výstupní proud. Rovněž by měl zajistit dostatečnou stabilizaci napětí a ochranu před poškozením, která vyplývá z navrženého schéma (obr. 5.11).

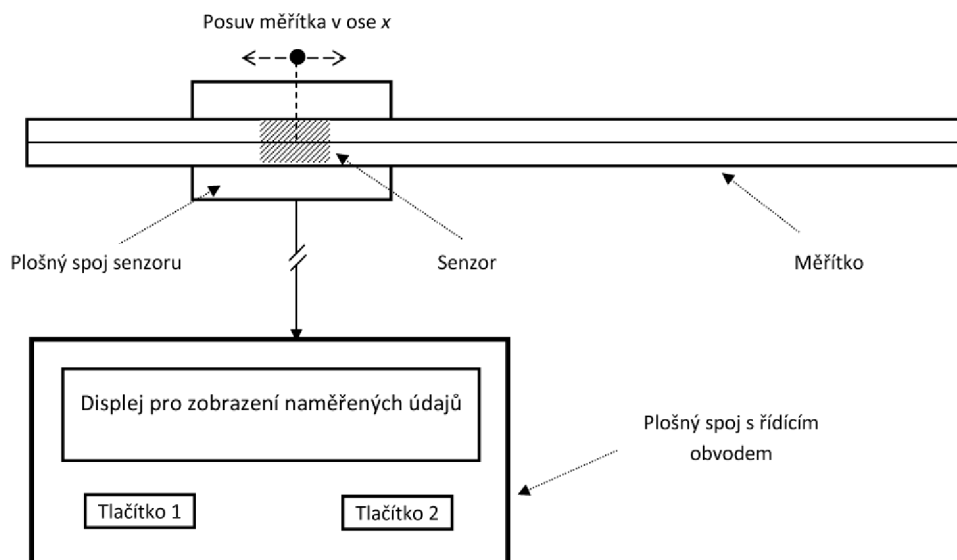


Obr. 5.11 Napájecí zdroj zařízení pro odměřování polohy

6. Návrh mechanické konstrukce

Zařízení pro lineární odměřování polohy „TYP B“, bude vyrobeno jako samostatná část (obr. 6.1), která bude se senzorem propojena kabelem. K zařízení bude připojen ještě napájecí kabel. Zařízení bude vhodné zabudovat do plastové krabičky. Toto řešení nám umožní umístit měřítko a senzor mimo pracovní prostor obsluhy.

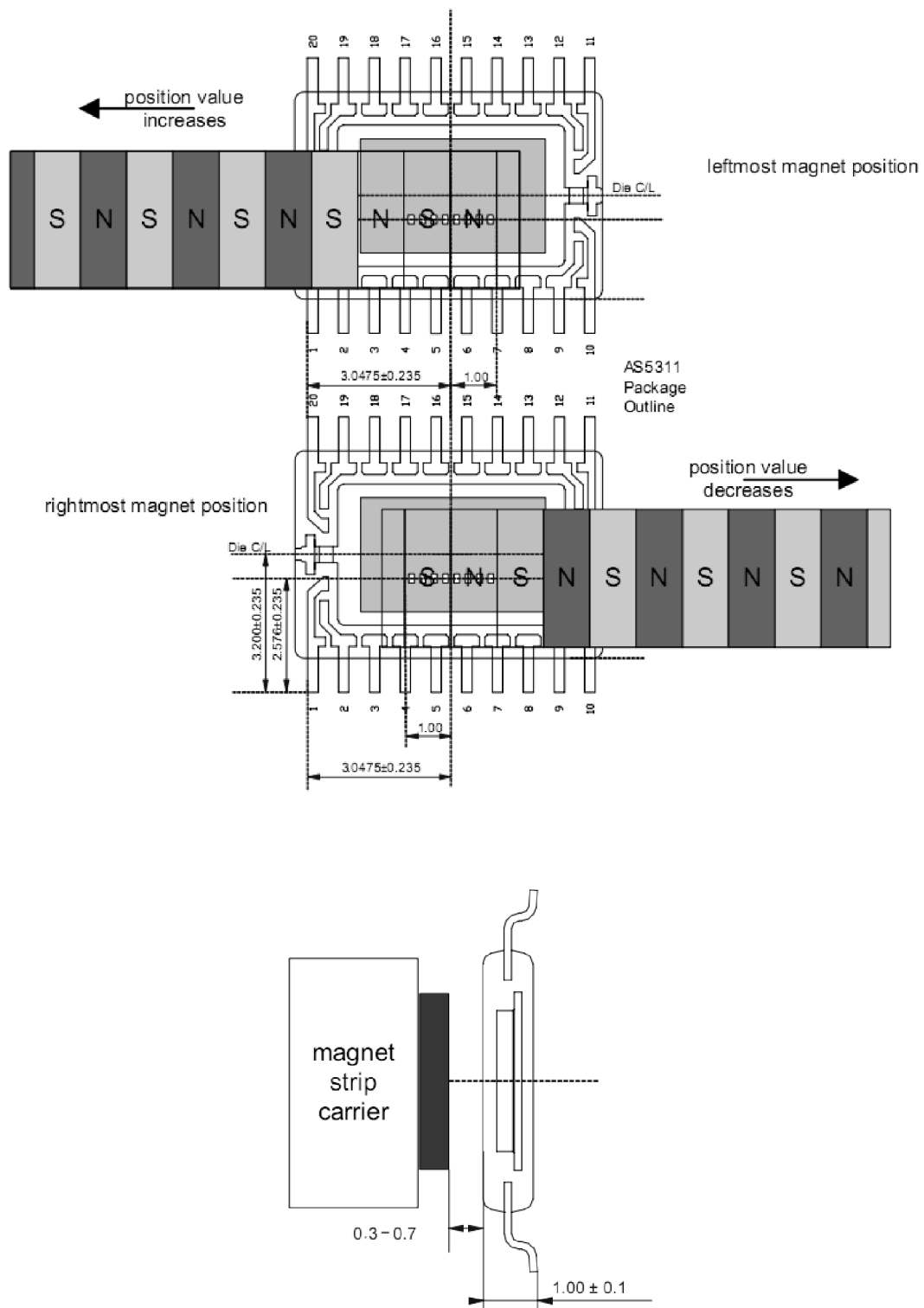
U zařízení „TYP A“ chceme využít koncepci, kde jsou spojeny všechny bloky dohromady. Dojde tedy k propojení plošného spoje řídicího obvodu a plošného spoje senzoru.



Obr. 6.1 Návrh mechanické konstrukce zařízení „TYP B“

Mechanické zpracování vzájemného umístění měřítka a senzoru musí dosáhnout co možná nejvyšší přesnosti! V opačném případě dojde k tomu, že měření nebude dostatečně přesné a bude vykazovat chyby nebo bude zcela znehodnoceno. Uchycení měřítka musí být provedeno z nemagnetického materiálu, nejlépe z některého plastu, který je odolný vůči mechanickému otěru. Měřítko se totiž bude pohybovat a v případě použití měkkého materiálu hrozí deformace uchycení.

V katalogovém listu [11] je detailně popsáno, jak má být měřítko umístěno. Nastavení je patrné z obrázku (obr. 6.2). Bez dodržení těchto rozměrů nebude zařízení správně fungovat a bude vykazovat značné množství chyb.



Obr. 6.2 Nastavení měřítka u obvodu AS5311. Rozměry jsou v mm. Převzato z [11].

7. Praktická realizace a měření zařízení

V předcházejících kapitolách jsme se seznámili s řešením jednotlivých bloků. Stanovili jsme, z jakých částí se budou bloky skládat a jakou mají plnit funkci. Navržená koncepce a všechny teoretické předpoklady budou v této části aplikovány při výrobě vzorku zařízení pro lineární odměřování polohy.

Jak již bylo dříve zmíněno, návrh předpokládá dva typy zařízení:

- TYP A – všechny bloky v jednom celku
- TYP B – bloky jsou rozděleny do samostatných částí

7.1 Realizace zařízení „TYP A“

Zařízení „TYP A“ je realizováno do fáze technické dokumentace, která obsahuje schéma zapojení, osazovací plán součástek, desku plošných spojů a tabulku použitých součástek. Všechny tyto části jsou vyrobeny v software pro tvorbu plošných spojů – EAGLE od firmy CadSoft. V příloze č. 1 nalezneme všechny zmíněné části. Rovněž je přiložena elektronická verze podkladů.

Navržená deska spojů obsahuje senzor pro odměřování polohy, řídicí obvod, USB rozhraní a napájecí část. Displej typu MC1601A-SBL/H je nutné připojit jako samostatný celek ohebným 12 žilovým kabelem nebo vhodnými jednožilovými kabely. Délka kabelu není přesně stanovena, ale nedoporučuje se překročit délku 50 cm. Zapojení displeje vychází z tabulky 5.2. Přesné zapojení dle pinů na desce plošného spoje je uvedeno v tabulce 7.1.

Tab. 7.1 Zapojení pinů LCD displeje k pinům zařízení pro odměřování polohy

Konektor SV2A	Plošný spoj displeje	Konektor SV2B	Plošný spoj displeje
1	1	1	11
2	2	2	12
3	3	3	13
4	4	4	14
5	5	5	15
6	6	6	16

Pro programování řídicího obvodu slouží konektor SV1. Ten je zapojen dle doporučeného zapojení firmy Atmel a je kompatibilní pro připojení programátoru AVR ISP mkII. Pomocí tohoto programátoru mohou být prováděny změny řídicího programu.

Odporový trimr R2 slouží pro nastavení kontrastu displeje. Podsvícení displeje je navrženo pro stálé svícení, nelze jej žádným ovladačem vypnout.

Konektory JP1, JP2 a JP3 jsou navrženy pro připojení tlačítek „komfortních“ funkcí, jako je nulování apod. Více v kapitole 5.4.

Konektor X1 slouží pro připojení nadřazeného výpočetního systému pomocí sběrnice USB. Konektor má standardní zapojení, které je kompatibilní s běžně dostupnými USB kabely. Obvod FT232BM je napájen ze sběrnice USB.

Dioda LED1 slouží jako indikátor přenosu dat přes USB, je funkční pouze při připojení USB a napájecího napětí do konektoru J1.

Konektory SV3A a SV3B nemají stanovenou žádnou funkci, slouží zejména jako výstupní piny pro případné měření obvodu AS5311. Zapojení lze tedy realizovat i bez těchto konektorů.

Prostor kolem senzoru je navržen s dostatečně rozměrnou volnou plochou z důvodů nutnosti vytvořit uchycení pro měřítka. Ze stejného důvodu obsahuje deska 4 body pro navrtání a budoucí uchycení magnetického měřítka.

7.2 Realizace zařízení „TYP B“

Zařízení „TYP B“ bylo prakticky realizováno, byl vytvořen program v assembleru a zařízení bylo proměřeno. Rovněž je dostupná technická dokumentace, která obsahuje schéma zapojení, osazovací plán součástek, desku plošných spojů, tabulku použitých součástek a zdrojové kódy programu. Všechny části týkající se plošného spoje jsou vyrobeny v software pro tvorbu plošných spojů – EAGLE od firmy CadSoft. Software v assembleru byl vytvořen pomocí programu AVR Studio 4. V příloze č. 2 nalezneme všechny části týkající se plošného spoje. Rovněž je přiložena elektronická verze podkladů.

Navržená deska spojů obsahuje řídicí obvod a napájecí část. Ostatní části jako senzor a USB rozhraní jsou vytvořeny na samostatném plošném spoji. Výhody tohoto řešení byly popsány již v kapitole 5.

Displej typu MC1601A-SBL/H je nutné připojit jako samostatný celek dle parametrů stanovených v kapitole 7.1. Zapojení vodičů je totožné s tabulkou 7.1. Funkce odporového trimru R2 a programovacího konektoru SV1 je rovněž totožná se zařízením „TYP A“. Pro připojení tlačítek „komfortní“ funkce (viz kapitola 5.4) je využito konektor JP2 a JP3. Programově je nastaven konektor JP2 jako resetovací tlačítko. Aby se reset aktivoval, musí dojít k propojení pinů na konektoru JP2.

Konektory JP4 a JP5 jsou navrženy pro připojení USB rozhraní, které bylo realizováno do fáze technické dokumentace. Dokumentace je přiložena v příloze č. 2.

Senzor AS5311 je připojen pomocí konektoru SV2 a samostatných vodičů, popř. plochého 12 žilového kabelu. V případě použití plochého kabelu a konektoru typ PFL14 se doporučuje označit vývody plošného spoje, aby nedošlo k záměně. V obou případech se musí zapojení řídit tabulkou 7.2. V praxi bylo zapojení provedeno s 10 cm dlouhými vodiči, avšak vzhledem k použití inkrementálního výstupu lze předpokládat bezchybný přenos i na delší vzdálenost.

V konektoru SV2 máme k dispozici napájení a jsou zde vyvedeny datové vstupy a výstupy mikrokontroléru. Lze tedy v případě potřeby změnit používaný senzor. Musel by se ovšem přizpůsobit řídicí program a navržená deska nového senzoru, popř. změnit zapojení v propojovacím kabelu.

Tab. 7.2 Zapojení pinů konektoru SV2 na straně mikrokontroléru a AS5311

Konektor SV2	Deska s mikrokontrolérem	Deska senzoru AS5311
1	+ 5 V	+ 5 V
2	GND	GND
3	nezapojeno	PWM
4	port PC1	MagINT
5	port PD7	CSn
6	PC0	MagDEC
7	nezapojeno	CLK
8	port PD2 (INT0)	A
9	nezapojeno	DO
10	port PD3 (INT1)	B
11	GND	GND
12	port PB2 (INT2)	INDEX

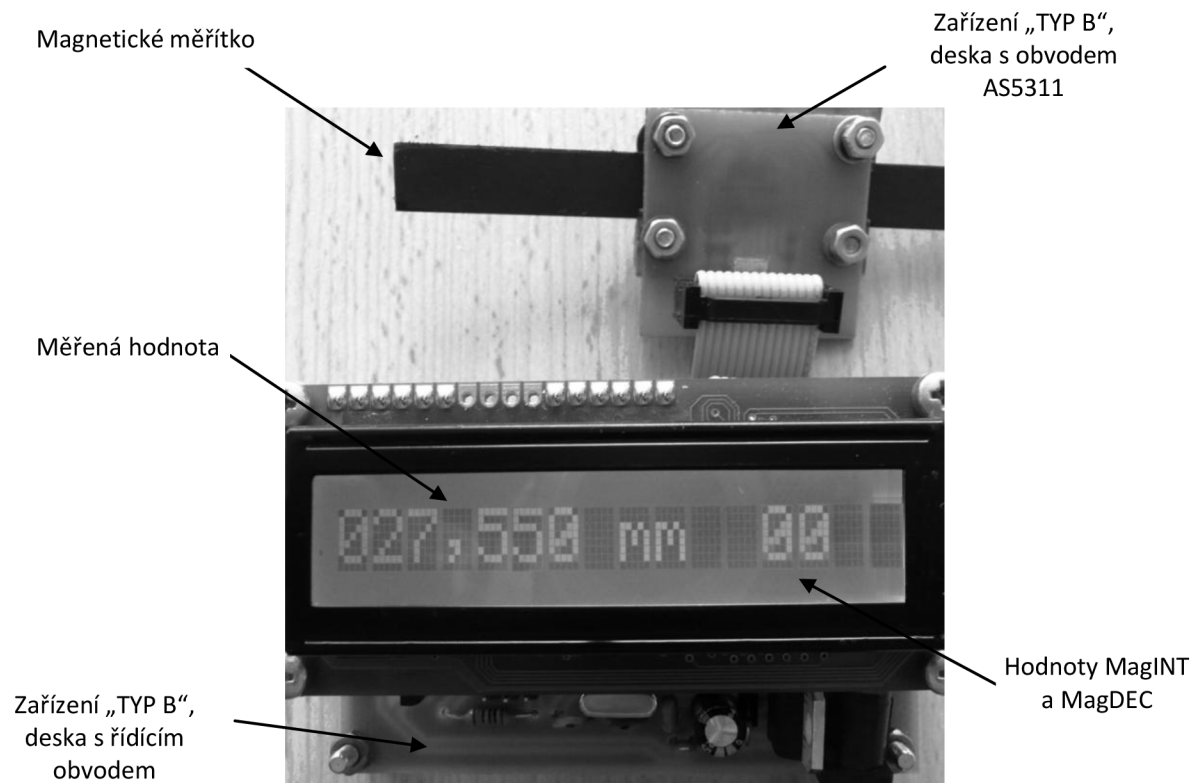
7.3 Měření výstupních hodnot - zařízení „TYP B“

Zařízení s označením „TYP B“ bylo prakticky vyzkoušeno a průběhy výstupních signálů z obvodu AS5311 byly proměřeny na osciloskopu.

Stavy AS5311 po přivedení napájecího napětí:

- Po připojení napájení jsou výstupy A, B a INDEX v log 1 (5 V).
- Pokud dojde k přivedení impulzu log 0 na pin CSn, tak bez přiloženého magnetického pásku výstupy A, B, INDEX nemají přesně definovaný stav (obr. P3.1, bez INDEX).
- Po přiložení a správném nastavení měřítka (dle obr. 6.2), výstupy A, B, INDEX udržují setrvalý stav v log 0 nebo log1.
- Při posuvu měřítka a správném nastavení jeho pozice získáme stavy A a B (obr. P3.2 a P3.3), které jsou dle teoretického předpokladu (obr. 5.4). Uvedené platí i pro výstup INDEX (obr. P3.4).
- Pro případné využití PWM byl proměřen i tento výstup. Jeho stavy a popis jsou patrné z obrázků (obr. P3.5 až obr. P3.8).

Z praktického měření zařízení pro lineární odměřování polohy byly získány důležité poznatky, které ukazují velkou citlivost zařízení na nastavení měřítka. Jakékoliv malé mechanické nepřesnosti v upevnění měřítka měly za následek vnesení chyby do měření.



Obr. 7.1 Realizovaný „TYP B“ při praktickém zkoušení

8. Závěr

Cílem práce byl teoretický rozbor problematiky lineárního odměřování polohy. Byly uvedeny základní typy senzorů pro měření polohy, ukázali jsme si jejich principy a vlastnosti. Prostudovány byly zejména senzory s indukčností, kapacitním, magnetickým a optickým principem snímání veličiny. Ve všech jmenovaných kategoriích lze najít zástupce senzoru, který je vhodný pro lineární odměřování polohy. Seznámili jsme se i s technologií výroby a nejčastěji používanými výstupy senzorů.

Největší pozornost byla věnována sensorům na magnetickém a optickém principu a to zejména díky velmi častému využití těchto principů u průmyslově vyráběných měřidel. Byly srovnány jak inkurantní senzory, tak profesionální výrobky. Na několika typech byly vysvětleny jejich přednosti a nevýhody. Na příkladu optického snímače z vyřazené tiskárny a na průmyslově vyráběných senzorech bylo ukázáno, že pro námi zvolenou přesnost lze bez problémů využít magnetické i optické principy. Stejně tak vyhovují inkurantní i profesionální prvky. Jejich maximální rozlišení je dáno kvalitou zpracování a zvolenou mechanickou konstrukcí. U inkrementálního optického senzoru vybrané tiskárny nebylo dostatečné měřítko, to však na uvedeném závěru nic nemění. Ve výsledku bylo shledáno, že běžně dostupné profesionální senzory předčí inkurantní senzory jak technicky, tak ekonomicky. Senzor AS5311 s magnetickým principem odměřování bezzbytku splnil všechny požadavky. Byl tedy vhodným typem pro následné použití v projektu.

Všechny poznatky byly využity v návrhu koncepce zařízení pro lineární odměřování polohy. Pro snazší pochopení byly jednotlivé prvky rozděleny do několika bloků, které mají jednoznačně danou funkci. Byl navržen „TYP A“ spojující všechny bloky do jednoho celku a „TYP B“, který je sestaven z více samostatných částí. Vyřešeno bylo napájení zařízení, ovládání, typ komunikace se senzorem a hlavní blok řízení celého přístroje. Jako řídicí prvek byl zvolen jednočipový mikrokontrolér od firmy Atmel. Komunikace s uživatelem bude probíhat pomocí LCD displeje. Projekt rovněž obsahuje řešení mechanické konstrukce.

Nad rámec zadání byl navržen princip komunikace s nadřazeným výpočetním systémem přes rozhraní USB. Dále bylo zařízení „TYP B“ podle dokumentace prakticky sestrojeno, vyzkoušeno a byl vytvořen řídicí program pro mikrokontrolér. Pro názornější ukázkou byly výstupy senzoru proměřeny pomocí osciloskopu. Z praktického testování byly učiněny důležité závěry, týkající se mechanické konstrukce. Ukázalo se, že bez precizního zpracování mechanického uchycení senzoru a magnetického měřítka nelze se zařízením bezchybně pracovat. Obvod AS5311 totiž při nesprávném mechanickém nastavení polohy vykazuje na výstupu neurčitý stav, který ovlivňuje měřenou hodnotu. Pro možné využití zařízení by tedy bylo vhodnější nejprve stanovit přesné podmínky, kde bude využíváno. Následně by byla vyřešena mechanická část a v souladu s ní by se přizpůsobila elektronika a řídicí část zařízení.

Zařízení „TYP B“ je zamýšleno jako univerzální, lze tedy k němu v budoucnu připojit jiný typ senzoru nebo změnit některé jeho funkce. Avšak v současně navrženém řešení splňuje všechny zadané požadavky, neboť s použitým senzorem pracuje s přesností 1,95 μm a na délce, která je omezena pouze délkou použitého magnetického měřítka.

Seznam použitých zdrojů

- [1] RIPKA, P.; ĎAĎO, S.; KREIDL, M.; NOVÁK, J. *Senzory a převodníky: skripta*. Česká technika - nakladatelství ČVUT v Praze, 2005. 135 s. ISBN 80-01-03123-3.
- [2] MARTINEK, R. *Senzory v průmyslové praxi*. První vydání. Nakladatelství BEN v Praze, 2004. 192 s. ISBN 80-7300-114-4.
- [3] *Indukční senzory Turck: firemní katalog*. C101015 1102/05.
- [4] *Kapacitní senzory Turck: firemní katalog*. S1016/01.
- [5] BRANČÍK, L. *Elektrotechnika 1: skripta*. VUT v Brně, 2003. 160 s.
- [6] MAŤÁTKO, J. *Elektronika*. Páté vydání. Nakladatelství IDEA Servis, 2000. 327 s. ISBN 80-85970-42-2.
- [7] *Snímače CCD* [online]. 15. 11. 2009. Dostupné na internetu: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/CCD>>.
- [8] VOJÁČEK, A. *Proudová smyčka* [online]. 15. 11. 2009. Dostupné na internetu: <http://automatizace.hw.cz/mereni_regulace/prsmycka04.html>.
- [9] HARROLD, D. *Control Engineering magazine* [online]. 26. 11. 2009. Dostupné na internetu: <http://www.dataforth.com/catalog/bb/133_388652239.pdf>.
- [10] NOVÁK, P. *Mobilní roboty – pohony, senzory, řízení*. První vydání. Nakladatelství BEN v Praze, 2005. 247 s. ISBN 80-7300-141-1.
- [11] *AS5311 High Resolution Magnetic Linear Encoder:katalogový list*. Austriamicrosystems.
- [12] *Katalog optických senzorů Renishaw* [online]. 27. 4. 2010. Dostupné na internetu: <<http://resources.renishaw.com/download/%28a910a32f4b9541bd9b2564e040e7b57b%29?lang=en&inline=true>>
- [13] *Vývoj nové technologie magnetických pásků* [online]. 21. 4. 2010. Dostupné na internetu: <<http://www-03.ibm.com/systems/storage/news/press/20100122.html>>
- [14] *Katalog optických senzorů Renishaw* [online]. 26. 4. 2010. Dostupné na internetu: <<http://www.rls.si/>>
- [15] *FTDI FT232BM: katalogový list*. Future Technology Devices Intl. Ltd.
- [16] MATOUŠEK, D. *USB prakticky s obvody FTDI*. BEN, Praha, 2003. 259 s. ISBN 80-7300-103-9
- [17] MATOUŠEK, D. *Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR*. BEN, Praha, 2006. 376 s. ISBN 80-300-209-4.

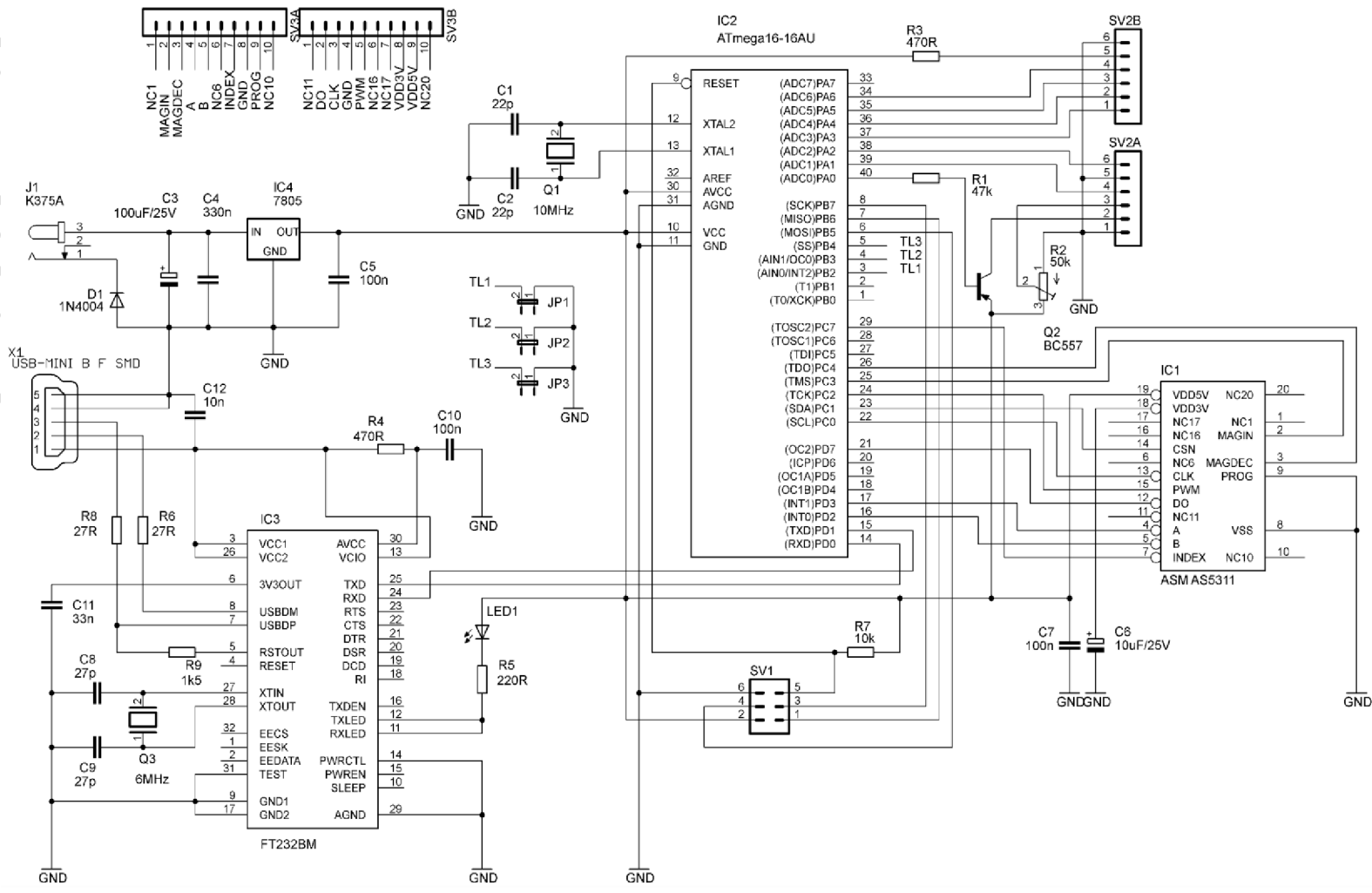
Seznam příloh

Příloha 1: „TYP A“ - schéma, plošný spoj, podklady pro výrobu	I
Obr. P1.1 Schéma zapojení (TYP A)	I
Obr. P1.2 Rozmístění součástek (TYP A).....	II
Obr. P1.3 Předloha plošného spoje (TYP A).....	II
Tab. P1.1 Seznam součástek (TYP A)	III
Příloha 2: „TYP B“ - schéma, plošný spoj, podklady pro výrobu	IV
Obr. P2.1 Schéma zapojení (TYP B)	IV
Obr. P2.2 Rozmístění součástek (TYP B).....	IV
Obr. P2.3 Předloha plošného spoje (TYP B).....	V
Obr. P2.4 Schéma zapojení (TYP B – AS5311).....	VI
Obr. P2.5 Rozmístění součástek (TYP B – AS5311).....	VI
Obr. P2.6 Předloha plošného spoje (TYP B – AS5311)	VII
Obr. P2.7 Schéma zapojení (TYP B – USB).....	VII
Obr. P2.8 Předloha plošného spoje (TYP B – USB).....	VIII
Obr. P2.9 Předloha plošného spoje (TYP B – USB).....	VIII
Tab. P2.1 Seznam součástek (TYP B).....	V
Tab. P2.2 Seznam součástek (TYP B – AS5311)	VII
Tab. P2.3 Seznam součástek (TYP B – USB)	IX
Příloha 3: „TYP B“ - měření vzorku na osciloskopu	X
Obr. P3.1 AS5311, výstup A a B, průběh po zapnutí bez přiloženého měřítka	X
Obr. P3.2 AS5311, výstup A a B, průběh s přiloženým měřítkem, při pomalém posuvu	X
Obr. P3.3 AS5311, výstup A a B, průběh s přiloženým měřítkem, při rychlém posuvu	XI
Obr. P3.4 AS5311, výstup A a INDEX, průběh s přiloženým měřítkem, při posuvu	XI
Obr. P3.5 AS5311, výstup PWM, po zapnutí a bez měřítka	XII
Obr. P3.6 AS5311, výstup PWM, s měřítkem a bez posunu.....	XII
Obr. P3.7 AS5311, výstup PWM, měřítko se pomalu posunuje	XIII
Obr. P3.8 AS5311, výstup PWM, měřítko se rychle posunuje	XIII

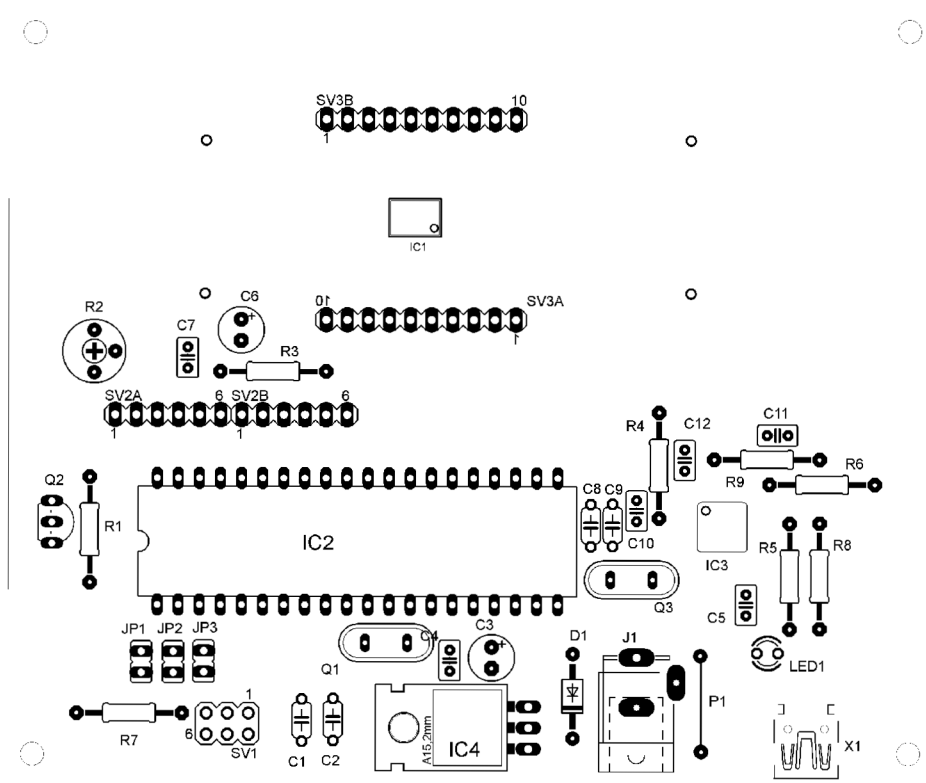
Poznámka!

- Všechny desky plošných spojů jsou pouze informační, tj. neodpovídají skutečné velikosti a jsou provedeny jako jednostranné.
- U desek plošných spojů je použita smíšená montáž, tj. součástky pro povrchovou montáž se osazují ze strany spojů a klasické vývodové součástky se osazují do vyvrtaných otvorů.

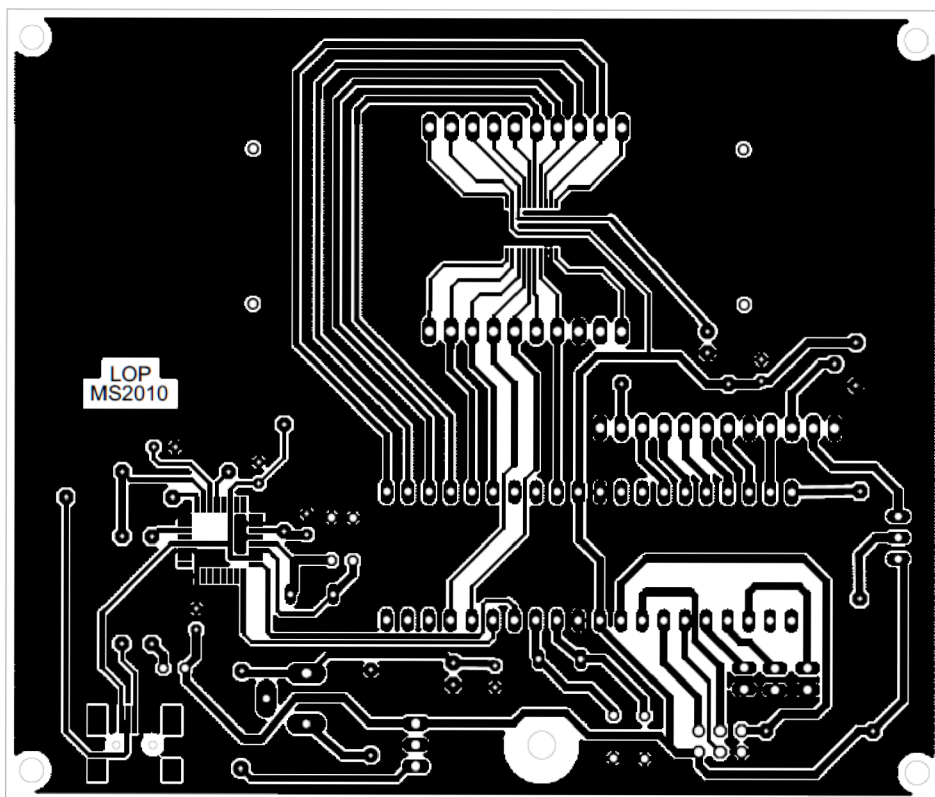
Příloha 1: „TYP A“ - schéma, plošný spoj, podklady pro výrobu



Obr. P1.1 Schéma zapojení (TYP A)



Obr. P1.2 Rozmístění součástek (TYP A)

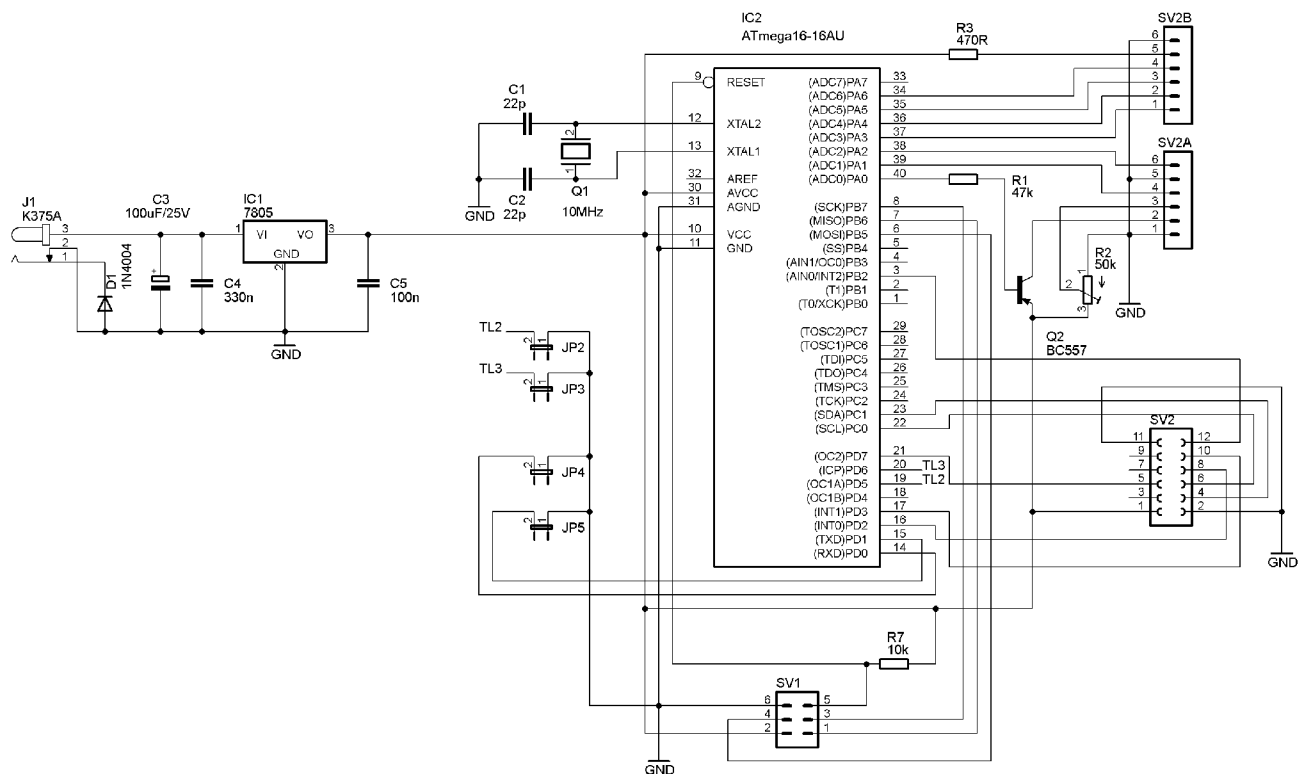


Obr. P1.3 Předloha plošného spoje (TYP A)

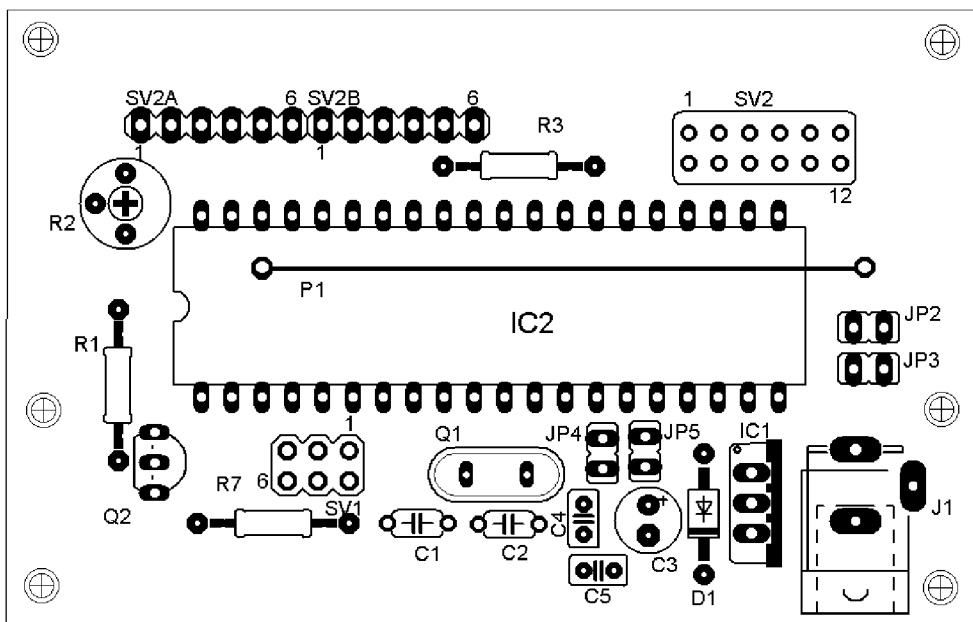
Tab. P1.1 Seznam součástek (TYP A)

Označení	Hodnota	Pouzdro	Typ
C1	22p	C050-024X044	kondenzátor
C2	22p	C050-024X044	kondenzátor
C3	100uF/25V	E2,5-6	kondenzátor
C4	330n	C025-025X050	kondenzátor
C5	100n	C025-025X050	kondenzátor
C6	10uF/25V	E2,5-6	kondenzátor
C7	100n	C025-025X050	kondenzátor
C8	27p	C050-024X044	kondenzátor
C9	27p	C050-024X044	kondenzátor
C10	100n	C025-025X050	kondenzátor
C11	33n	C025-025X050	kondenzátor
C12	10n	C025-025X050	kondenzátor
D1	1N4007	DO41-10	dioda
IC1	ASM AS5311	TSSOP20	senzor
IC2	ATmega16-16AU	DIL40	mikrokontrolér
IC3	FT232BM	QFP-32	USB převodník
IC4	7805	78XXL	stabilizátor napětí
J1	K375A	SPC4077	konektor
JP1		JP1	konektor
JP2		JP1	konektor
JP3		JP1	konektor
LED1		LED3MM	svítivá dioda
Q1	10MHz	QS	krystal
Q2	BC557	TO92-EBC	PNP tranzistor
Q3	6MHz	QS	krystal
P1			drátová propojka
R1	47k	0207/12	rezistor
R2	50k	RTRIM3339P	odporový trimr
R3	470R	0207/12	rezistor
R4	470R	0207/12	rezistor
R5	220R	0207/12	rezistor
R6	27R	0207/12	rezistor
R7	10k	0207/12	rezistor
R8	27R	0207/12	rezistor
R9	1k5	0207/12	rezistor
SV1		MA03-2	konektor
SV2A		MA06-1	konektor
SV2B		MA06-1	konektor
SV3A		MA10-1	konektor
SV3B		MA10-1	konektor
X1	USB-MINIB F SMD	32005-301	konektor USB

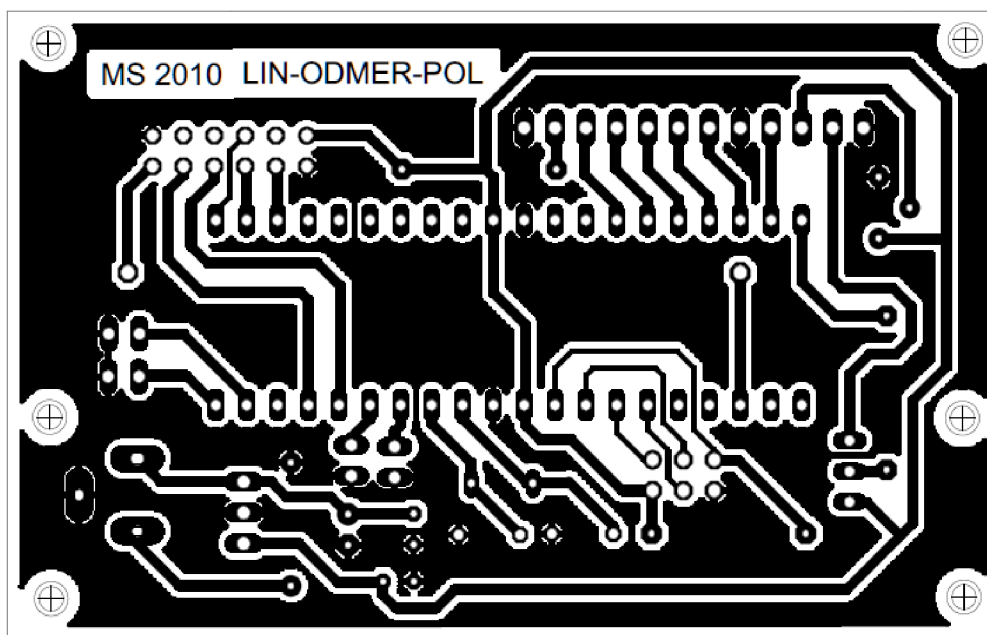
Příloha 2: „TYP B“ - schéma, plošný spoj, podklady pro výrobu



Obr. P2.1 Schéma zapojení (TYP B)



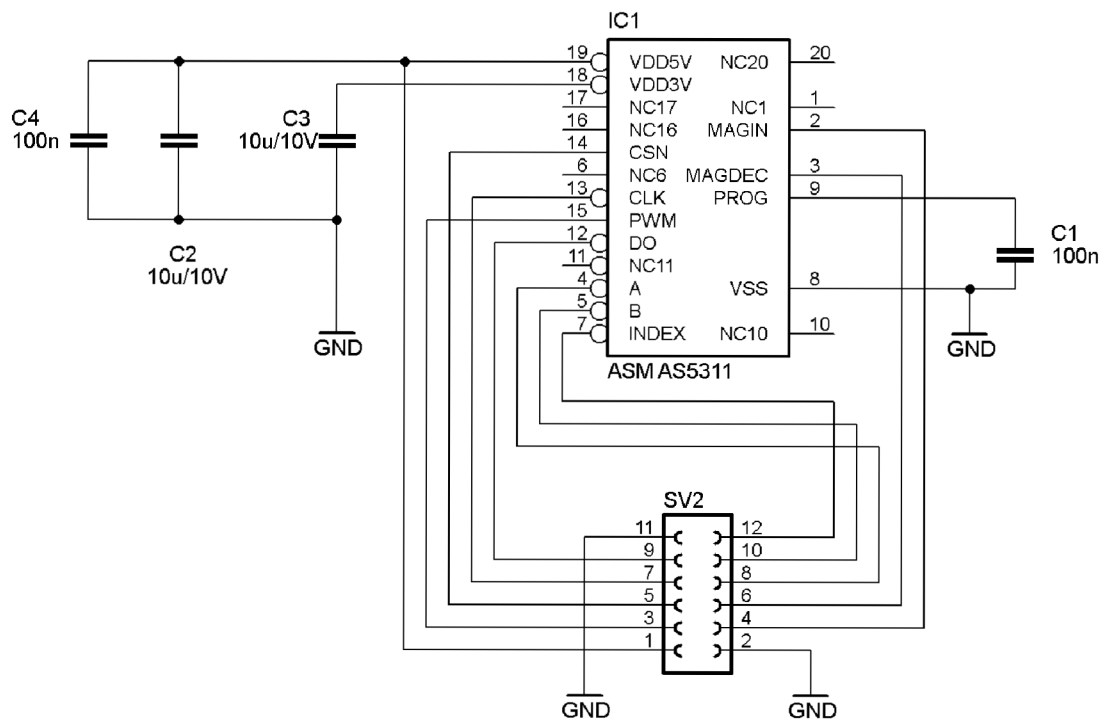
Obr. P2.2 Rozmístění součástek (TYP B)



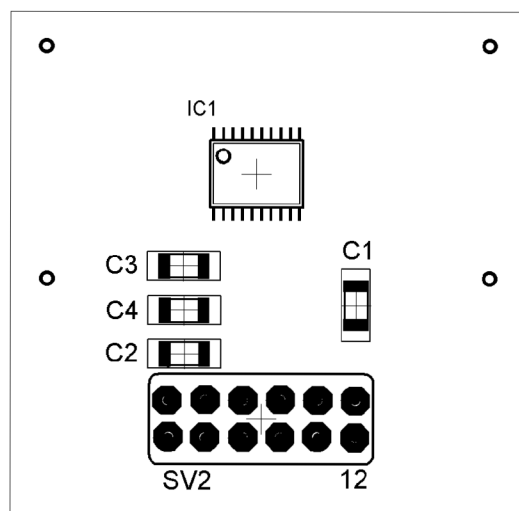
Obr. P2.3 Předloha plošného spoje (TYP B)

Tab. P2.1 Seznam součástek (TYP B)

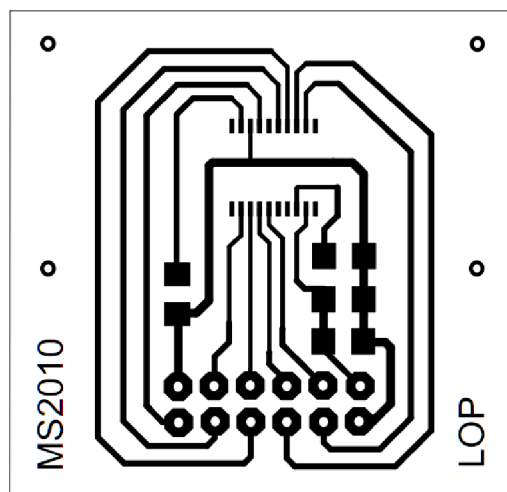
Označení	Hodnota	Pouzdro	Typ
C1	22p	C-EU050-024X044	kondenzátor
C2	22p	C-EU050-024X044	kondenzátor
C3	100uF/25V	CPOL-EUE2.5-6	kondenzátor
C4	330n	C-EU025-025X050	kondenzátor
C5	100n	C-EU025-025X050	kondenzátor
D1	1N4007	DO41-10	dioda
IC1	7805	TO220	stabilizátor napětí
IC2	ATmega16-16AU	DIL40	mikrokontrolér
J1	K375A	SPC4077	konektor
JP1		JP1	konektor
JP2		JP1	konektor
JP3		JP1	konektor
JP4		JP1	konektor
JP5		JP1	konektor
Q1	10MHz	QS	krystal
Q2	BC557	TO92-EBC	PNP tranzistor
P1			drátová propojka
R1	47k	0207/12	rezistor
R2	50k	RTRIM3339P	odporový trimr
R3	470R	0207/12	rezistor
R7	10k	0207/12	rezistor
SV1		MA03-2	konektor
SV2		FE06-2	konektor
SV2A		MA06-1	konektor
SV2B		MA06-1	



Obr. P2.4 Schéma zapojení (TYP B – AS5311)



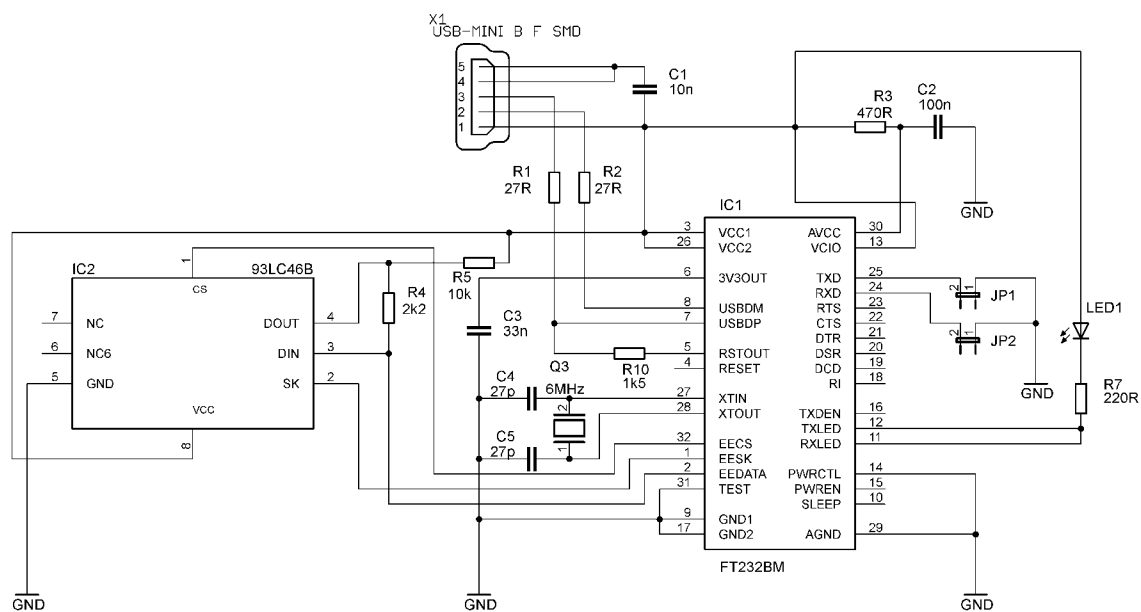
Obr. P2.5 Rozmístění součástek (TYP B – AS5311)



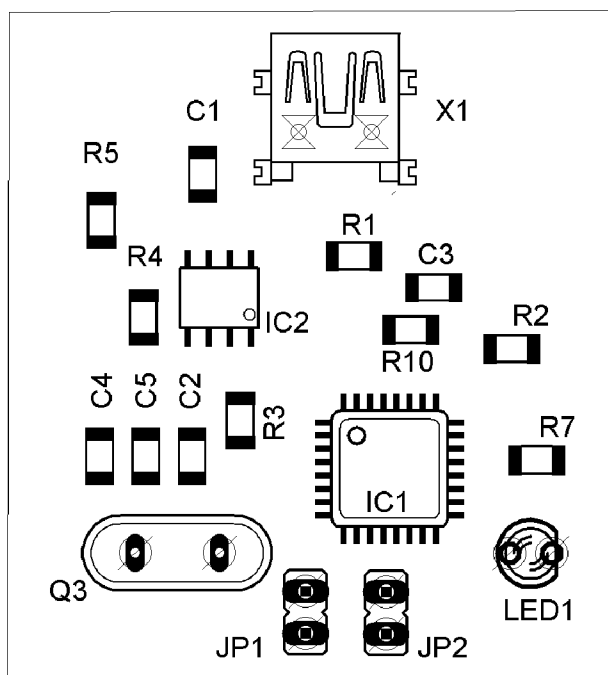
Obr. P2.6 Předloha plošného spoje (TYP B – AS5311)

Tab. P2.2 Seznam součástek (TYP B – AS5311)

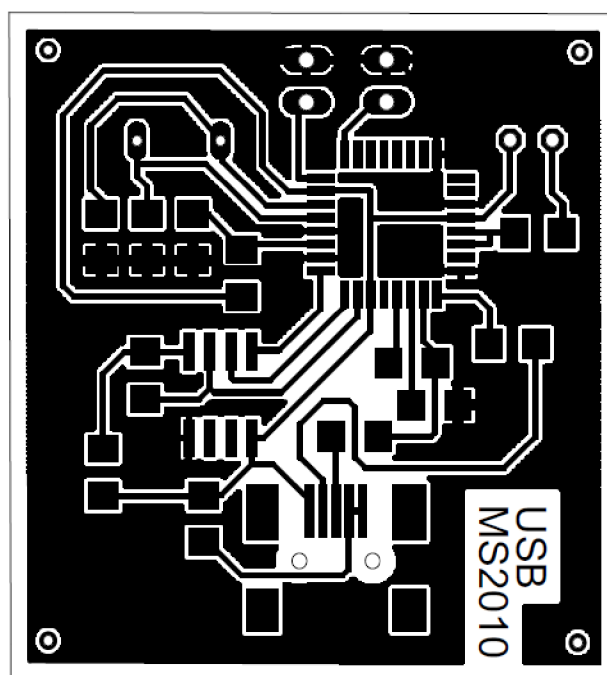
Označení	Hodnota	Pouzdro	Typ
C1	100n	C1206	kondenzátor
C2	10u/10V	C1206	kondenzátor
C3	10u/10V	C1206	kondenzátor
C4	100n	C1206	kondenzátor
IC1	ASM AS5311	TSSOP20	senzor
SV2		FE06-2	konektor



Obr. P2.7 Schéma zapojení (TYP B – USB)



Obr. P2.8 Předloha plošného spoje (TYP B – USB)

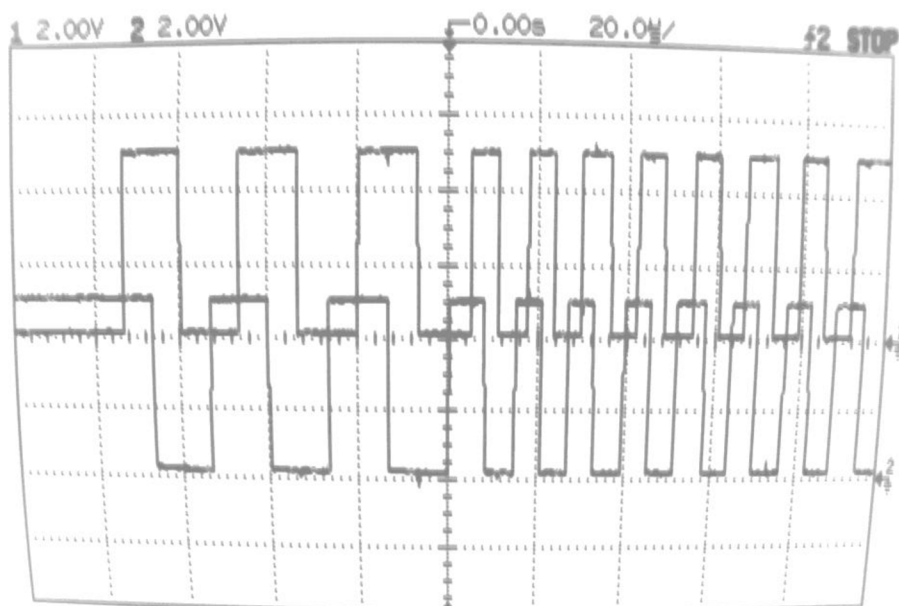


Obr. P2.9 Předloha plošného spoje (TYP B – USB)

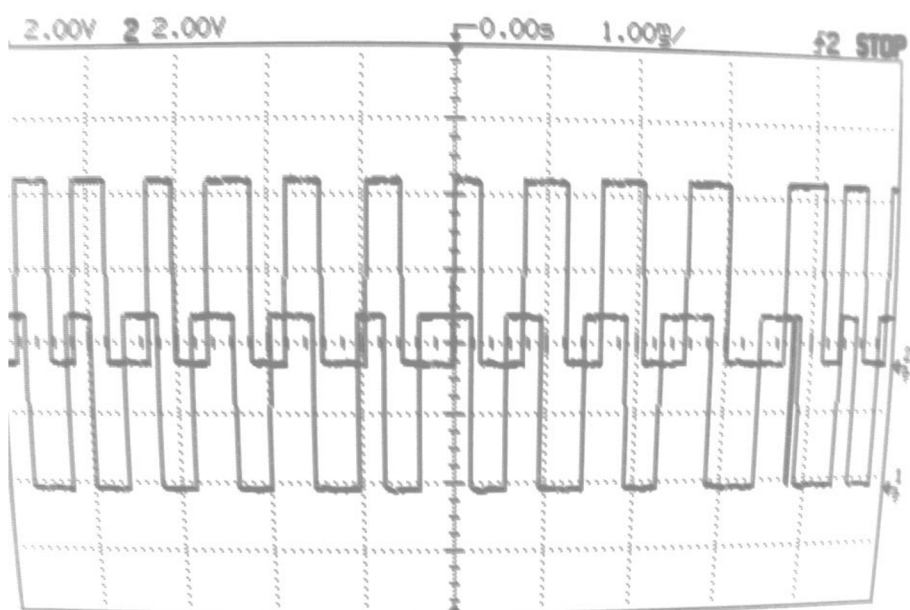
Tab. P2.3 Seznam součástek (TYP B – USB)

Označení	Hodnota	Pouzdro	Typ
C1	10n	C1206	kondenzátor
C2	100n	C1206	kondenzátor
C3	33n	C1206	kondenzátor
C4	27p	C1206	kondenzátor
C5	27p	C1206	kondenzátor
IC1	FT232BM	QFP-32	USB převodník
IC2	93LC46B	SOIC-8	paměť EEPROM
JP1		JP1	konektor
JP2		JP1	konektor
LED1		LED3MM	svítivá dioda
Q3	6MHz	QS	krystal
R1	27R	C1206	rezistor
R2	27R	C1206	rezistor
R3	470R	C1206	rezistor
R4	2k2	C1206	rezistor
R5	10k	C1206	rezistor
R7	220R	C1206	rezistor
R10	1k5	C1206	rezistor
X1	USB-MINIB F SMD	32005-301	konektor USB

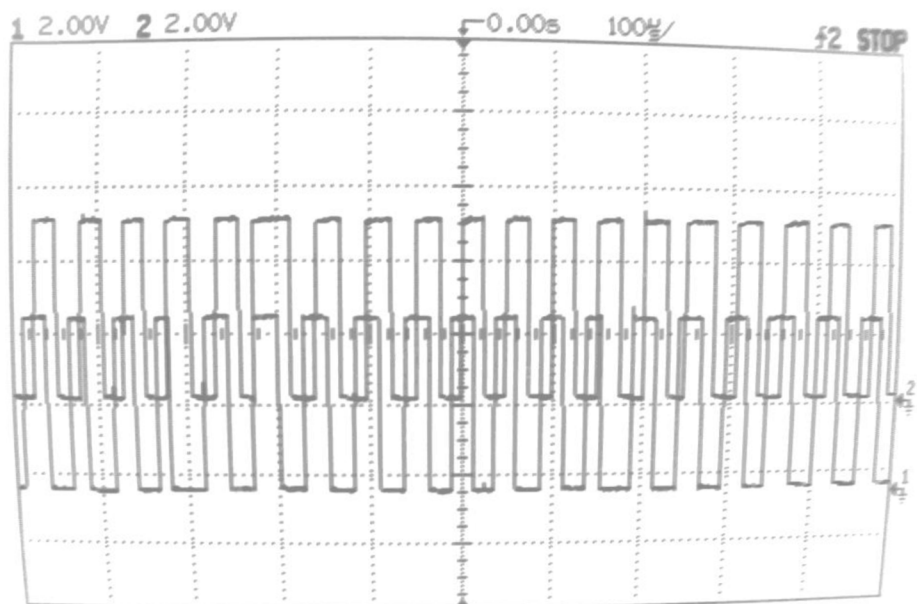
Příloha 3: „TYP B“ - měření vzorku na osciloskopu



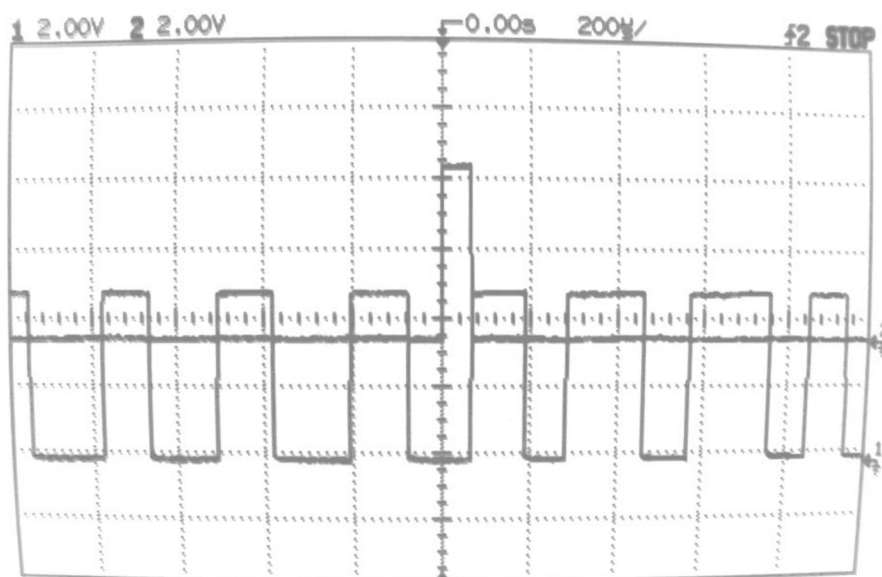
Obr. P3.1 AS5311, výstup A a B, průběh po zapnutí bez přiloženého měřítka



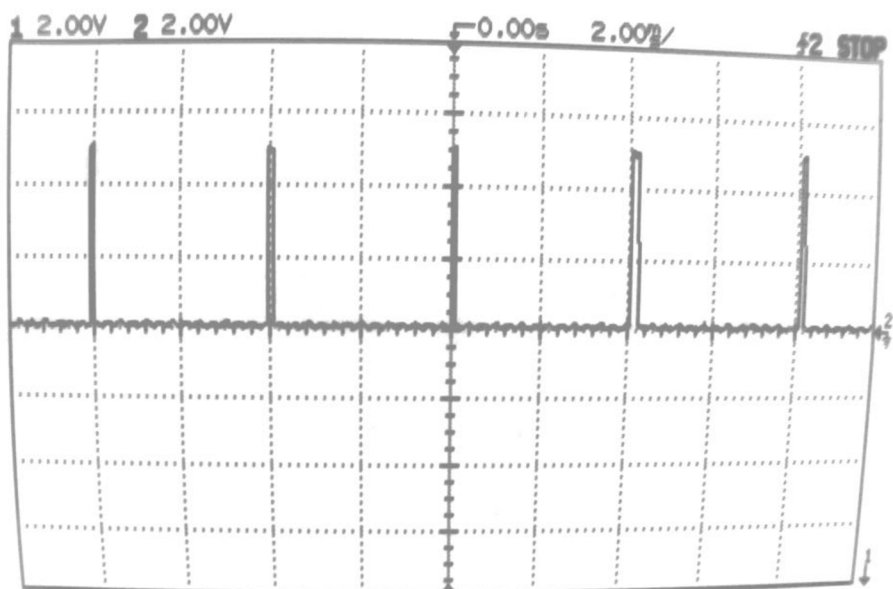
Obr. P3.2 AS5311, výstup A a B, průběh s přiloženým měřítkem, při pomalém posuvu



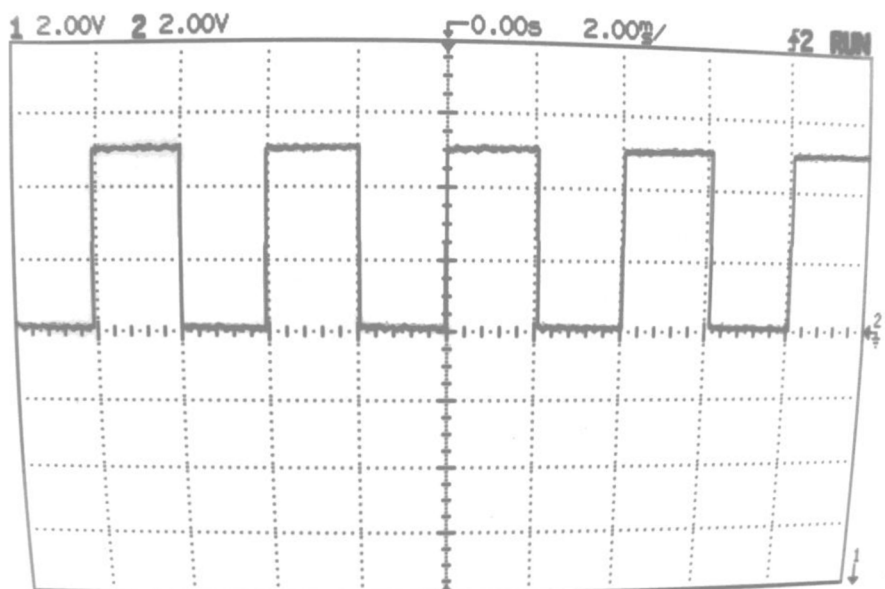
Obr. P3.3 AS5311, výstup A a B, průběh s přiloženým měřítkem, při rychlém posuvu



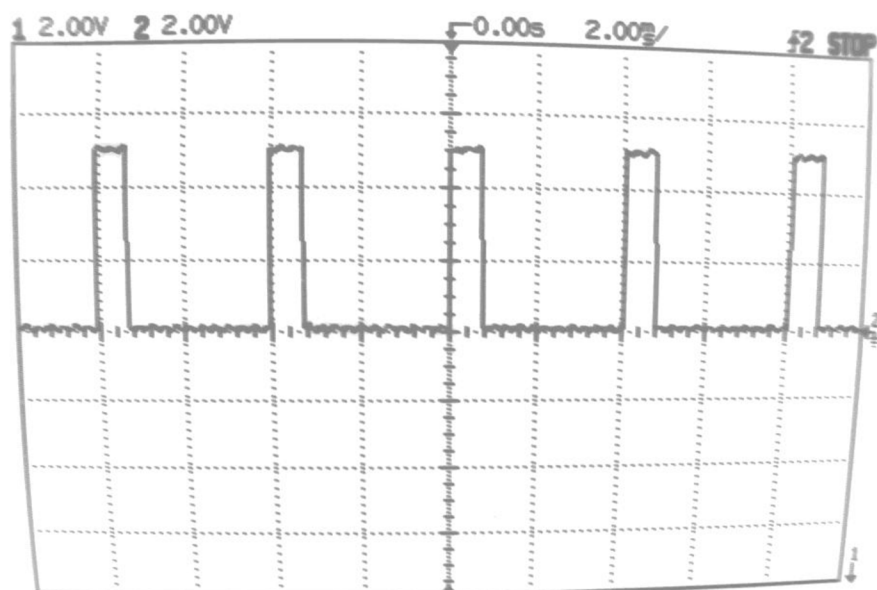
Obr. P3.4 AS5311, výstup A a INDEX, průběh s přiloženým měřítkem, při posuvu



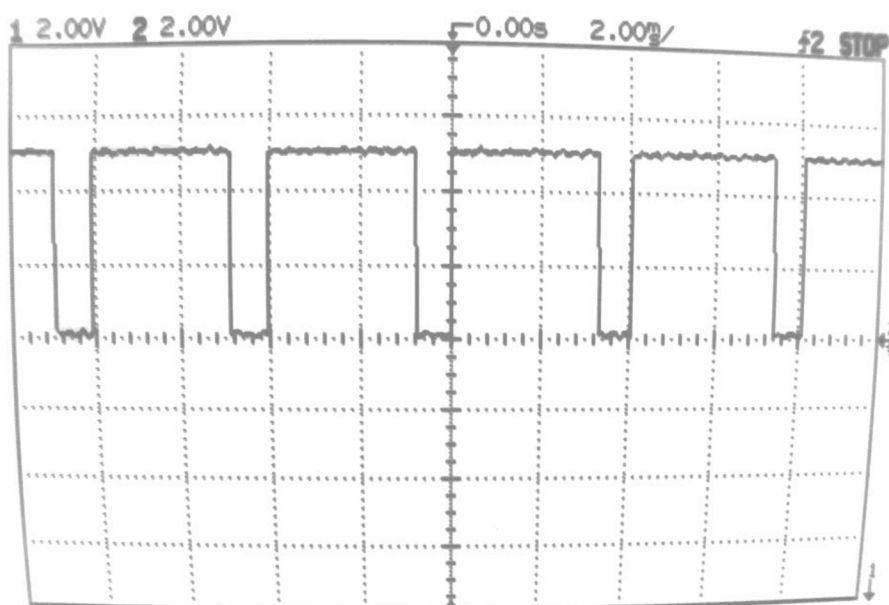
Obr. P3.5 AS5311, výstup PWM, po zapnutí a bez měřítka



Obr. P3.6 AS5311, výstup PWM, s měřítkem a bez posunu



Obr. P3.7 AS5311, výstup PWM, měřítko se pomalu posunuje



Obr. P3.8 AS5311, výstup PWM, měřítko se rychle posunuje