

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA ŘÍDICÍ TECHNIKY



## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Odhad stavů lineárního motoru



Praha, 2006

Miloslav Krajl

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady ( literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
podpis

## Poděkování

V úvodu této práce bych velmi rád poděkoval své vedoucí bakalářské práce **Doc. Ing. Kateřině Hyniové, CSc** za cenné rady a podporu, dále je mou milou povinností poděkovat lidem, kteří mě v průběhu studia podporovali, zejména své rodině. Tato práce by takto graficky nevypadala nebýt prostředí  $\text{\LaTeX}$

# Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je seznámit čtenáře s funkcí a základními vlastnostmi lineárního motoru, standardními způsoby snímání veličin - polohy, rychlosti a zrychlení. Oproti klasické metodě měření polohy, využívající optických senzorů, která je velmi drahá, má tato práce za úkol nalézt alternativní řešení v podobě magnetického měření při zachování požadované přesnosti.

Principem navržené metody je přímé měření polohy pomocí magnetických senzorů – Hallových sond a zrychlení pomocí akcelerometru. Z těchto veličin může být poté odhadována rychlost. Důraz je zde kladen na návrh optimálního počtu Hallových sond z pohledu přesnosti odhadu.

# Abstract

The aim of my bachelor thesis is to apprise public with the design of Linear Motor State Estimation, with standard methods scanning of position, velocity and acceleration. In comparison with the classical method of position measurement which is very expensive because of the use of the optical rulers, this writing is supposed to find an alternative resolution of magnetical measurement in maintenance of required accuracy.

Direct position measurement with the help of the magnetical sensors is the principle of designed method - Hall sensors and acceleration with the help of accelerometer. From these values the velocity can be estimated. A lot of emphasis is to put down on the optimal quantity of Hall sensors proposal in the accuracy view.

Katedra řídicí techniky

Školní rok:2005/2006

## Zadání bakalářské práce

Student: Miloslav K r a j l  
Obor: Kybernetika a měření  
Název tématu: Odhad stavů lineárního motoru

### Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s funkcí a vlastnostmi lineárního motoru a standardními způsoby snímání polohy, rychlosti a zrychlení motoru.
2. Navrhněte metodu odhadu polohy, rychlosti a zrychlení motoru využívající data z Hallových sond a akcelerometru.
3. Pozornost věnujte návrhu optimálního počtu Hallových sond.

*Seznam odborné literatury:* Dodá vedoucí práce

**Vedoucí bakalářské práce:** Doc. Ing. Kateřina Hyniová, CSc.

**Datum zadání bakalářské práce:** zimní semestr 2005/06

**Termín odevzdání bakalářské práce:** 30. 6. 2006

Prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.  
vedoucí katedry



Prof. Ing. Zbyněk Škvor, CSc.  
děkan

V Praze, dne 1. 2. 2006

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Lineární motor</b>	<b>3</b>
2.1	Konstrukční uspořádání . . . . .	3
2.2	Silová charakteristika . . . . .	4
2.3	Základní vlastnosti . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Řízení lineárního motoru</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Použité senzory</b>	<b>8</b>
4.1	Hallův senzor . . . . .	8
4.2	Akcelerometr . . . . .	9
<b>5</b>	<b>Odhad stavů lineárního motoru</b>	<b>12</b>
5.1	Metoda odhadu stavů lineárního motoru . . . . .	12
5.2	Fyzikální definice odhadovaných veličin . . . . .	13
5.2.1	Definice dráhy . . . . .	13
5.2.2	Definice rychlosti . . . . .	14
5.2.3	Definice zrychlení . . . . .	15
5.3	Měření polohy . . . . .	16
5.3.1	Návrh optimálního počtu Hallových sond . . . . .	18
5.3.2	Metoda zesílit a oříznout . . . . .	21
5.4	Měření zrychlení . . . . .	26
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>29</b>

Literatura 30

A Obsah přiloženého CD I



# Seznam obrázků

2.1	Lineární motor . . . . .	4
2.2	Silová charakteristika . . . . .	5
3.1	Příklad kaskádní regulace . . . . .	6
4.1	Hallův senzor . . . . .	9
4.2	Amplitudová charakteristika . . . . .	10
4.3	Fázová charakteristika . . . . .	11
4.4	Příklad mikroelektromechanického akcelerometru - MEMS . . . . .	11
5.1	Dvoustupňové fázové schéma . . . . .	13
5.2	Popis dráhy . . . . .	14
5.3	Popis rychlosti . . . . .	15
5.4	Popis zrychlení . . . . .	16
5.5	Měření polohy . . . . .	17
5.6	Saturace . . . . .	19
5.7	Metoda zesílit a oříznout . . . . .	21
5.8	Chyba linearizace . . . . .	23
5.9	Polární souřadnice . . . . .	24
5.10	Akcelerometr - klidový stav . . . . .	27
5.11	Akcelerometr - vliv zrychlení . . . . .	27
5.12	Schéma zapojení akcelerometru ADXL05 . . . . .	28

# Kapitola 1

## Úvod

Při výběru bakalářské práce jsem chtěl zvolit téma, na kterém bych mohl pracovat a rozvíjet jej dále v podobě diplomové práce. Díky vstřícnosti Doc. Ing. Kateřiny Hyniové, CSc, jsem se rozhodl pro práci “Odhad stavů lineárního motoru”, která byla vypsána jako diplomová práce s tím závazkem, že v ní budu pokračovat dále v inženýrské etapě.

Lineární motor bývá obvykle řízen pomocí hierarchického zpětnovazebního systému regulačních smyček. Dané smyčky regulují na základě vstupních veličin, jako jsou proud vinutím odpovídající síle resp. momentu síly motoru, rychlost pohybu a polohu rotoru. Pro řízení lineárního motoru je tedy nezbytné získat co nejpřesnější hodnoty těchto veličin. Tato práce se zabývá odhadem polohy, rychlosti a zrychlení.

Standardním způsobem snímání polohy u lineárního motoru je použití optoelektronického senzoru polohy (tzv. optické pravítka). Jelikož je tento způsob cenově velmi nákladný lze využít alternativního lineárního senzoru polohy - Hallovy sondy. V kombinaci se senzorem zrychlení (akcelerometr) lze potom velmi přesně odhadnout rychlost.

Metoda odhadu stavu lineárního motoru je založena na přímém měření dráhy a zrychlení a nepřímém měření (odhadu) rychlosti. Důraz je kladen na návrh optimálního počtu Hallovy sond z hlediska požadované přesnosti odhadu.

Práce je členěna do kapitol, v níž druhá kapitola seznamuje čtenáře s principem

a základními vlastnostmi lineárního motoru.

Třetí kapitola přibližuje čtenáři standardní způsob řízení lineárního motoru.

Čtvrtá kapitola popisuje základní vlastnosti a parametry použitých senzorů.

Ve páté kapitole je vysvětlen princip navržené metody, základní vlastnosti a parametry měření, dále jsou definovány fyzikální veličiny a je zde nastíněn způsob měření polohy a zrychlení.

V závěru jsou shrnuty výsledky a vlastnosti metody.

# Kapitola 2

## Lineární motor

### 2.1 Konstrukční uspořádání

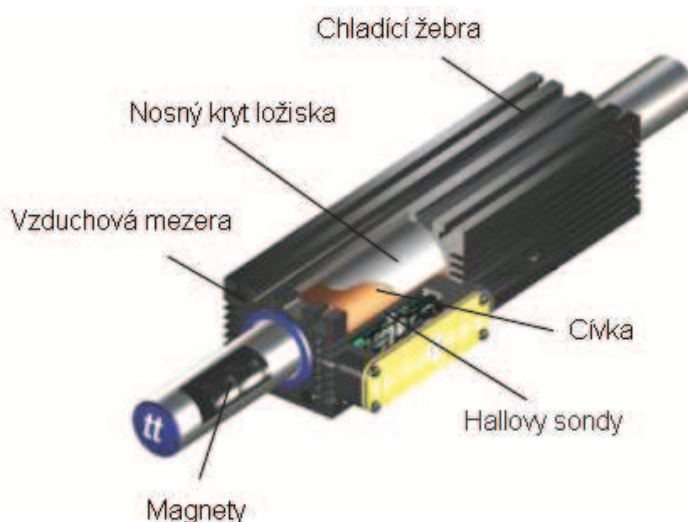
V posledních deseti letech došlo k významnému rozvoji výroby střídavých lineárních elektrických motorů. Jedním z nejvýznamnějších důvodů rozvoje tohoto elektrického stroje je rychlá dynamika, širší rozsah regulace, jednoduché řízení, stavitelná magnetická dráha, vyšší dosahované rychlosti a zrychlení a vyšší přesnost polohování. Stejně jako točivé střídavé elektrické motory se vyrábějí v provedení synchronním a asynchronním. Účelem tohoto stroje je přeměna elektrické energie na mechanickou práci a naopak.

Střídavý elektrický lineární motor si můžeme představit jako klasický rotační motor rozvinutý do roviny, který umožňuje přímočarý pohyb. Statorem je u lineárních motorů označován primární díl a rotorem sekundární díl, který je konstrukčně uspořádán proti primárnímu dílu.

- Primární díl – tvořen stejně jako u klasických strojů feromagnetickým svazkem složeným z elektrotechnických plechů a z trojfázového vinutí uloženého v jeho drážkách.
- Sekundární díl – v synchronním provedení tvořen *permanentními magnety* (*Nd-Fe-B*) připevněnými na ocelové podložce resp. *klecí na krátko* uloženou buď do drážek feromagnetického svazku, nebo připevněném k ocelové podložce pro asynchronní provedení lineárního motoru.

Je-li do primární části motoru přiveden řídicí proud, vznikne elektromagnetické pole mezi oběma částmi a tím dojde k pohybu jezdce. Velikost proudu můžeme ovládat rychlost pohybu. Téměř výhradně se pro řízení používají číslicové regulátory s kaskádovým uspořádáním tří zpětných vazeb, vnitřní proudové, střední rychlostní a vnější polohové. Někdy bývá do obvodu zařazena smyčka regulace zrychlení.

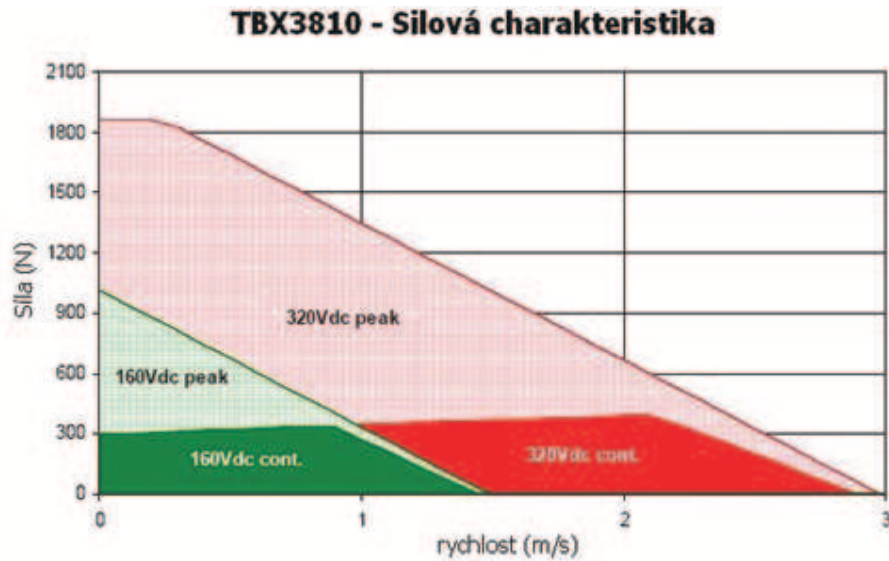
Sekundární díl tvoří ve většině uspořádání delší část stroje - magnetická dráha, kterou lze podle přání zákazníka sestavovat do určitých délek. O části, která se má pohybovat, rozhoduje konstrukční uspořádání. V naprosté většině konstrukcí se pohybuje primární část - jezdec - po dráze tvořené libovolným počtem sekundárních dílů.



Obrázek 2.1: Lineární motor

## 2.2 Silová charakteristika

Lineární motor je určen převážně pro dynamické procesy se širokým intervalem rychlosti posunu, proměnnou zátěží oproti statickým podmínkám jako je trvalé zatížení tj. konstantní zátěž a konstantní rychlost. Z toho plyne, že může být zatížen podstatně vyššími silami resp. proudy než jsou hodnoty jmenovité a to za předpokladu, že jejich střední efektivní hodnota nepřekročí jmenovité hodnoty pro trvalou zátěž. Silová charakteristika vyjadřuje závislost mezi rychlostí a silou. Tato charakteristika pro konkrétní lineární motor je znázorněna na následujícím obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Silová charakteristika

## 2.3 Základní vlastnosti

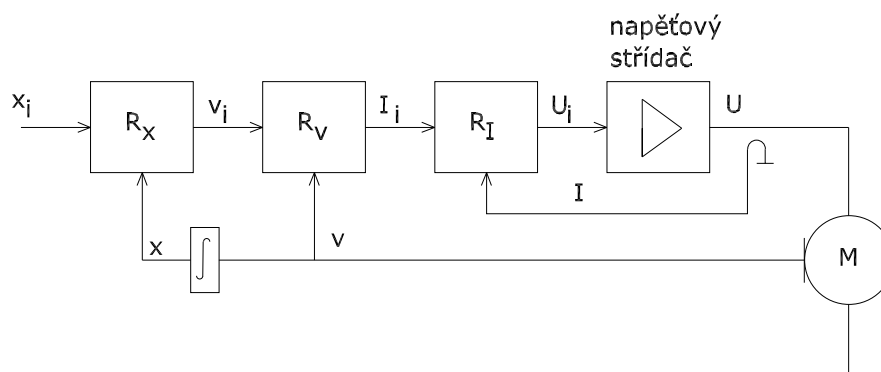
Za základní vlastnosti každého lineárního motoru jsou považovány kromě typu a velikosti ještě špičková síla udávaná pro časový interval 1s, špičkový proud taktéž pro časový interval 1s, trvalá síla, trvalé napětí, trvalý výkon a délka segmentu

Klasické elektrické motory umožňují pouze rotační pohyb, který je v případě potřeby možno např. pomocí kuličkového šroubu převádět na lineární pohyb. Tento šroub sebou ale přináší určitá mechanická omezení, a to jak v délce pohybu, tak i ve tření v maximálních otáčkách. Lineární motor toto omezení nemá. Ovšem i lineární motor má svoje nevýhody. Kuličkový šroub je sám o sobě převodem do pomalu. Vyšší otáčky motoru o malém momentu se transformují na vyšší tažnou sílu matice kuličkového šroubu s malou rychlostí posuvu. Požadovaná síla lineárního motoru nemůže být převodem řešena a samotný motor musí být pro požadovanou sílu konstrukčně dimenzován. Z toho důvodu je lineární motor nasazován v aplikacích, kde jsou požadovány menší síly motoru, ale velmi vysoké rychlosti. Nejčastěji se využívají lineární motory v obráběcích strojích pro vysokorychlostní opracovávání, laserové obrábění, svařování, v manipulační technice, atd.

# Kapitola 3

## Řízení lineárního motoru

K řízení lineárního motoru se typicky využívá *zpětnovazební regulace s kaskádovým uspořádáním tří zpětnovazebních smyček* (vnitřní proudové, střední rychlostní a vnější polohové). Na obrázku 3.1 je znázorněn příklad blokového schématu polohového řízení lineárního motoru.



Obrázek 3.1: Příklad kaskádní regulace

Vnitřní smyčka reguluje proud ve vinutí, který odpovídá momentu/síle motoru, střední smyčka reguluje rychlost pohybu jezdce a vnější polohu jezdce. Skutečnou hodnotou proudu  $I$  je možno měřit například Hallovým senzorem. Regulace probíhá tak, že regulátor  $R_I$  provede regulační zásah  $U_i$  na základě porovnání s žádanou hodnotou  $I_i$ . Regulační zásah je pomocí napěťového střídače převeden na napětí  $U$

na svorkách motoru. Zpětná vazba tak eliminuje vliv parazitních parametrů vinutí a vliv indukovaného napětí motoru  $U_e$ . Síla motoru je tak nezávislá na rychlosti pohybu. Nadřazená regulační smyčka porovnává žádanou a skutečnou rychlost a regulátor  $R_v$  nastaví požadovaný proud.

Rychlost nemusí být měřena přímo, ale může být vypočítávána (odhadována). Nabízí se dvě metody odhadu rychlosti:

- časová derivace *dráhy* získané z Hallových senzorů. Tento postup je velmi citlivý na šum.
- časová integrace *zrychlení* získaného z akcelerometrického senzoru.

Vnější smyčka uzavírá polohovou zpětnou vazbu a regulátor  $R_x$  vypočítá žádanou rychlost  $v_i$  podle rozdílu žádané  $X_i$  a skutečné polohy  $X$ . Poloha je získána z Hallových sond.



# Kapitola 4

## Použité senzory

### 4.1 Hallův senzor

Hallův senzor patří k nejrozšířenějšímu typu senzorů polohy. Jeho princip je jednoduchý a zřejmý. Jedná se o elektronický spínač využívající Hallova jevu a je ovládán Halloovým napětím:

$$U_H = K_H BI \quad (4.1)$$

**Definice (Hallův jev):** působí-li na destičku z polovodičového materiálu magnetické pole s indukcí  $B$  a protéká-li touto destičkou proud  $i$ , působí na pohybující se nosiče náboje síla a jejich dráhy se vychylují ve směru kolmém k vektoru magnetické indukce a pohybu těchto nábojů – tím vzniká na protilehlých stranách destiček *Hallovo napětí*. ▶

V senzoru je dále umístěn zesilovač Hallova napětí, který s obvody spínače tvoří na ploše asi  $1,5 \text{ mm}^2$  integrovaný obvod. Pro výrobu tohoto obvodu je nejvíce používána technologie CMOS.<sup>1</sup> Hallovy senzory často mívají pouze tři vývody – (*napájení, zem a výstup*), senzory se vyrábějí s různými spínacími charakteristikami i s různě vymezenou frekvenční oblastí tzv. dynamickým typem, který je střídavě vázán. Taktéž se využívají senzory v diferenčním provedení, které obsahují dvě popř.

---

<sup>1</sup>CMOS – Complementary Metal Oxide Semiconductor, technologie výroby polovodičových integrovaných obvodů

větší množství sond. Typické hodnoty spínacích polí jsou 1 mT – 10 mT. Výhodou je především malý rozměr. Sondu lze použít pro měření střídavých magnetických polí při nízkých frekvencích.



Obrázek 4.1: Hallův senzor

## 4.2 Akcelerometr

Akcelerometr – akcelerometrický senzor patří do skupiny senzorů mechanického kmitavého pohybu (vibrací). Kmitavým pohybem rozumíme časovou změnu polohy vybraného bodu na objektu vzhledem ke vztažnému (referenčnímu) bodu soustavy.

Tyto senzory dělíme na:

- Relativní – senzor polohy vztažený ke konkrétnímu bodu
- Absolutní – relativní senzor polohy vztažený ke konkrétnímu bodu uvnitř soustavy

Je zřejmé, že použití relativního měření kmitavého pohybu nelze realizovat u pohybujících se objektů a dále u kmitavých objektů, v jejichž okolí nelze určit pevný vztažný bod. Proto se převážně používají absolutní senzory kmitavého pohybu.

Princip absolutního senzoru kmitavého pohybu:

Vycházíme z pohybové rovnice:

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + b \cdot \frac{dx}{dt} + kx = 0 \quad (4.2)$$

kde členy diferenciální rovnice představují:

$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2}$  ... setrvačnou sílu,

$b \cdot \frac{dx}{dt}$  ... tlumící sílu,

$kx$  ... direktivní sílu

za předpokladu, že je soustava v klidu. Je-li v pohybu, pak soustava vyvozuje direktivní sílu v protipohybu a můžeme psát:

$$m \cdot \frac{d^2z}{dt^2} + b \cdot \frac{dx}{dt} + kx = -m \cdot \frac{d^2y}{dt^2} \quad (4.3)$$

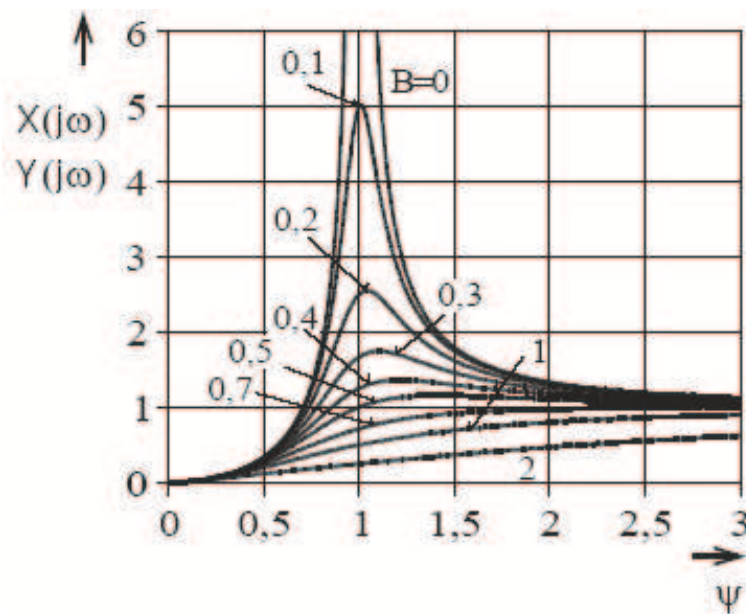
Vycházíme-li z předpokladu:

$$y(t) = Y(j\omega)e^{j\omega t} \quad (4.4)$$

kdy řešením je:

$$x(t) = X(j\omega)e^{j(\omega t - \varphi)} \quad (4.5)$$

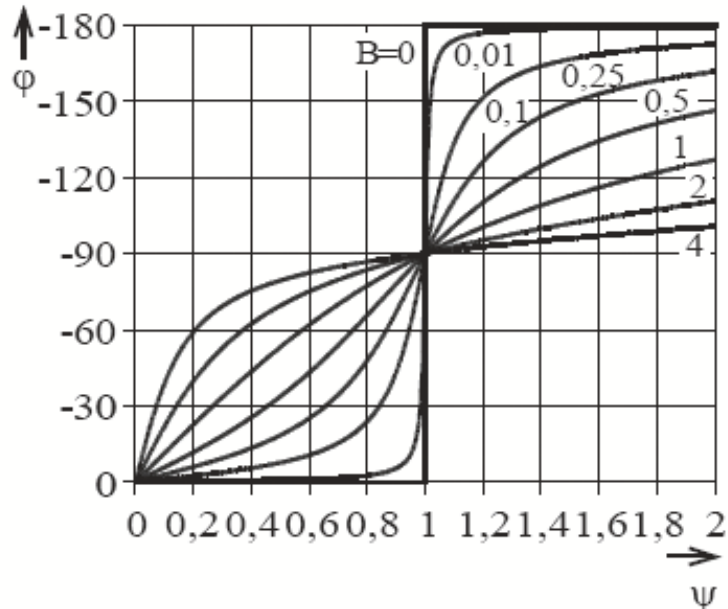
Vyjádříme amplitudovou charakteristiku ve tvaru:



Obrázek 4.2: Amplitudová charakteristika

$$\left| \frac{X(j\omega)}{Y(j\omega)} \right| = \frac{\Psi^2}{\sqrt{(1 - \Psi^2)^2 + (2B\Psi)^2}} \quad (4.6)$$

Vyjádříme fázovou charakteristiku ve tvaru:



Obrázek 4.3: Fázová charakteristika

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{-2B\Psi}{1 - \Psi^2} \quad (4.7)$$

kde  $\Psi$ ... normovaná frekvence a  $B$ ... poměrné tlumení.

Je-li  $\Psi \ll 1$  a  $B < 1$ , pak je amplituda rovna 2. derivaci  $y(t)$ ,

$$\left| \frac{X(j\omega)}{Y(j\omega)} \right| = \Psi^2 \quad (4.8)$$

odpovídající režimu zrychlení.



Obrázek 4.4: Příklad mikroelektromechanického akcelerometru - MEMS

# Kapitola 5

## Odhad stavů lineárního motoru

### 5.1 Metoda odhadu stavů lineárního motoru

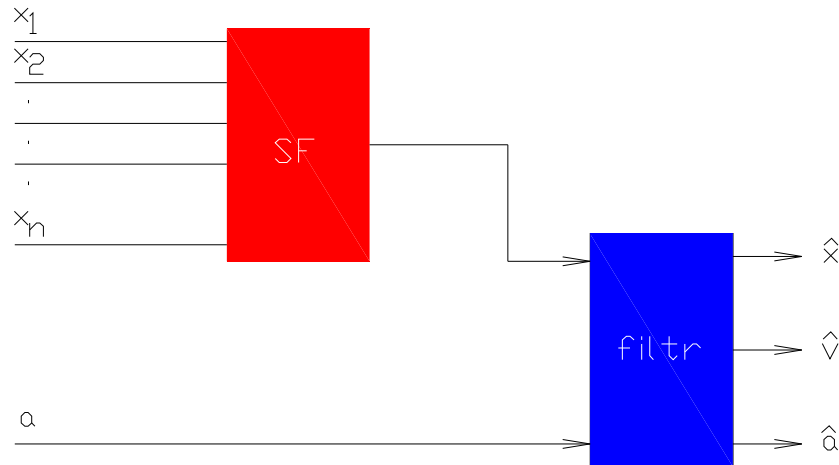
Pro plynulé řízení lineárního motoru nepostačuje pouze přesné měření popř. odhad polohy, ale je rovněž nezbytné přesné měření popř. odhad rychlosti. Navržená metoda odhadu stavu lineárního motoru je založena na principu *funkční interakce* - tj. na nedílných vlastnostech materiálu – elektromagnetického pole a na principu *senzorové fúze* - tzn. využití více levnějších senzorů namísto jednoho drahého.

Lineární motory jsou typicky využívány v aplikacích vyžadujících vysoké rychlosti, velké síly a vysokou přesnost akčního zásahu. Vysoké přesnosti polohy může být dosaženo pouze za předpokladu, že máme k dispozici přesné výsledky měření veličin – dráha, rychlost, popř. zrychlení.

Rozhodujícím faktorem při výběru polohového senzoru u lineárního motoru je požadovaná rozlišovací schopnost, abychom získali dostatečně přesný odhad rychlosti, nikoliv přesnost, která je rozhodující pro polohovou zpětnou vazbu. Pro tyto účely se často používá *optického pravítka*, které je ovšem velmi drahé. Hledáme tedy levnější alternativu.

Vycházíme z principu, že přesnost odhadu polohy při řízení může být snížena. Kvalita odhadu rychlosti ovšem nesmí poklesnout. Jako vhodná se jeví kombinace principů *funkční interakce* a *senzorové fúze*. Tím získáme přesnější odhad polohy s

využitím nedílných vlastností materiálu než by dosáhl jeden senzor. Dále je možné spojit toto měření s měřením zrychlení, abychom získali odhad rychlosti. Všechny tyto kombinace jsou realizovány na úrovni signálů<sup>1</sup>. Princip metody odhadu stavů je patrný z následujícího obrázku 5.1:



Obrázek 5.1: Dvoustupňové fázové schéma

## 5.2 Fyzikální definice odhadovaných veličin

Dříve než přistoupíme k vysvětlení metody “Odhadu stavů lineárního motoru”, zopakujeme si význam základních fyzikálních veličin.

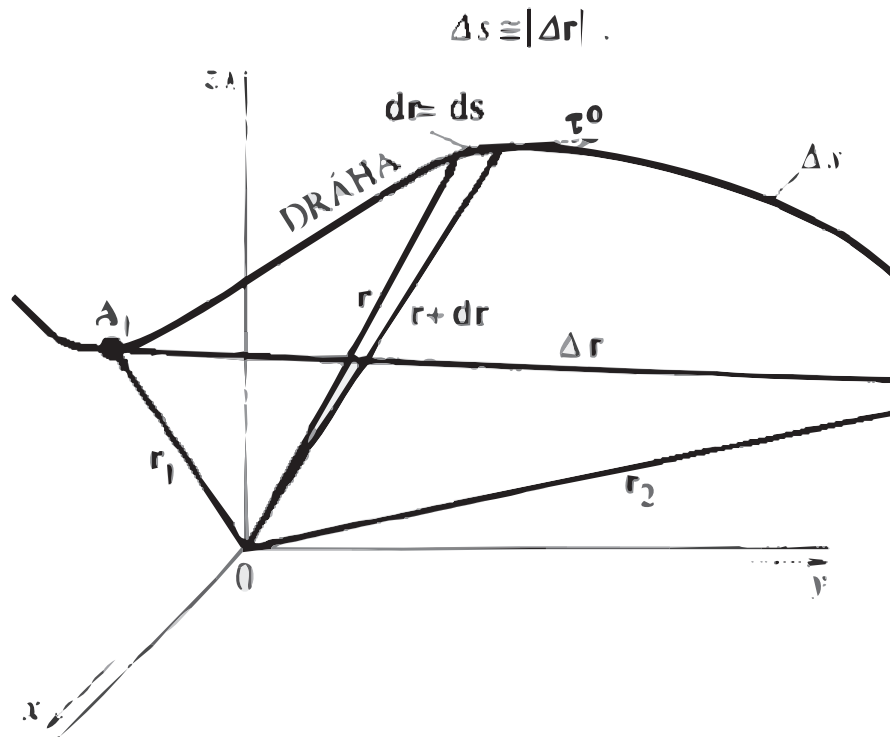
### 5.2.1 Definice dráhy

**Definice (Dráha pohybu  $s$ ):** trajektorie je definována jako množina všech poloh, jimiž hmotný bod během pohybu prochází. Dráha je tedy spojitá křivka. ►

Délku dráhy mezi body  $A_1, A_2$  pak vyjádříme jako integrál elementu dráhy

$$\Delta s = \int_{r_1}^{r_2} ds = \int_{r_1}^{r_2} |dr| \quad (5.1)$$

<sup>1</sup>SIGNAL LEVEL SENSOR FUSION



Obrázek 5.2: Popis dráhy

### 5.2.2 Definice rychlosti

**Definice (Rychlost pohybu  $s$ ):** je definována jako derivace polohového vektoru  $d\mathbf{r}$  podle času  $dt$ , vzhledem k definici derivace lze rychlost vyjádřit: ►

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (5.2)$$

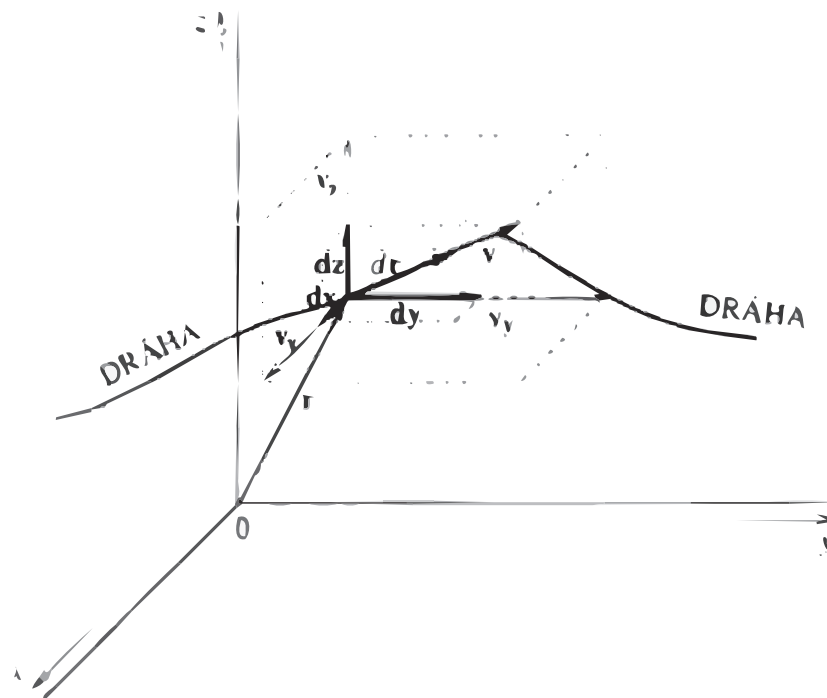
Vzhledem k faktu, že vektor elementu dráhy (elementární přírůstek pohybového vektoru) má směr tečny ke dráze, platí:

$$d\mathbf{r} = ds\boldsymbol{\tau}_0 \quad (5.3)$$

Poté lze zapsat výsledný vztah ve tvaru:

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (5.4)$$

Rychlost je vektorová veličina, jejíž směr je dán směrem vektoru elementu dráhy  $dr$ , tedy tečný ke dráze.



Obrázek 5.3: Popis rychlosti

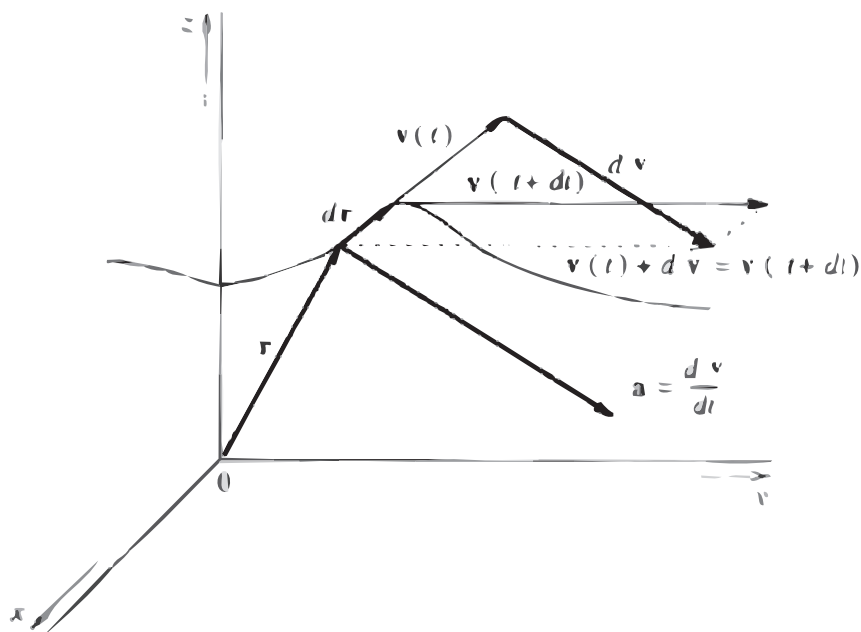
### 5.2.3 Definice zrychlení

**Definice (Zrychlení pohybu  $s$ ):** je definováno jako časová změna rychlosti co do velikosti i směru. Urazí-li hmotný bod elementární dráhu  $dr$ , změní se jeho rychlost o elementární přírůstek  $dv$ , který zjistíme posunutím vektoru do společného počátku. ►

Zrychlení pohybu je vektorová veličina definovaná derivací rychlosti podle času

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} \quad (5.5)$$



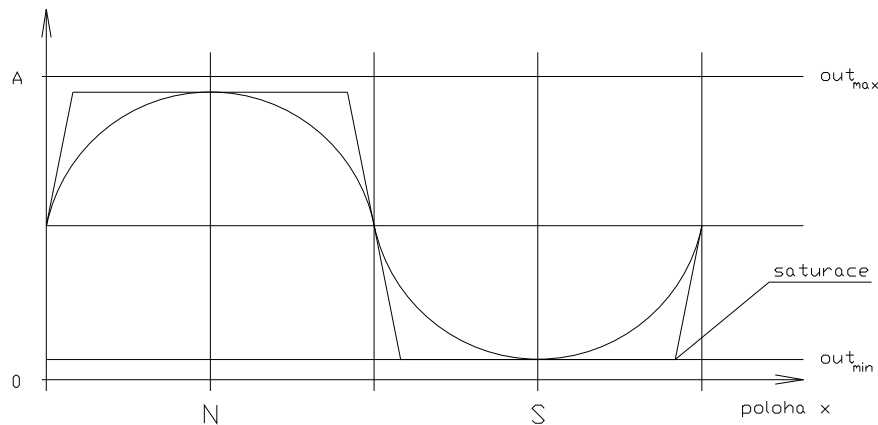


Obrázek 5.4: Popis zrychlení

### 5.3 Měření polohy

Pro měření polohy využijeme Hallové sondy. Použijeme-li k měření magnetických polí permanentních magnetů pouze jednu Hallovu sondu, může pak být prostorová citlivost v jistých oblastech příliš malá, a proto je výhodné použít více těchto senzorů.

Prostorová citlivost Hallových sond měřících úplný rozsah magnetického pole může být příliš malá na to, abychom získali požadovanou přesnost měření (odhadu) polohy. Prostorová citlivost je dána jako derivace výstupu Hallové sondy vztahovaná ke konkrétní poloze. Výstup z jedné Hallové sondy jako funkce polohy je znázorněn na následujícím obrázku 5.5.



Obrázek 5.5: Měření polohy

Na obrázku 5.5 je znázorněna poloha dvou magnetů. Prostorová citlivost je nulová na vrcholu kladné půlvlny a ve spodu záporné půlvlny sinusoidy, protože  $tg \angle$  je zde roven nule. Použijeme-li ke čtení tohoto výstupu *AD převodníku*, pak rozsah polohy odpovídající této digitální hodnotě bude velký ve srovnání s ostatními polohami.

Posuneme-li Hallové sondy blíže k magnetům, docílíme saturace výstupu. Na obr. 5.5 je patrné, že není-li výstup saturován pak se jeho prostorová citlivost zvýší. Jestliže použijeme více Hallových sond, které jsou po většinu času saturované a které jsou umístěny tak, že právě jedna sonda je vždy mimo saturovanou oblast, pak jsme schopni zvýšit tuto citlivost podle našich požadavků.

Při použití více sond je prostorová citlivost téměř stejná v celém rozsahu. V následujícím odstavci se budeme zabývat otázkou kolik Hallových sond je třeba použít pro danou přesnost, abychom získali odhad polohy založený na síle magnetického pole. Je třeba znát závislost (funkci) síly magnetického pole na poloze. Jsou-li magnety stejné a jejich vzájemná poloha je taktéž stejná, může být poloha vypočítána ze síly magnetického pole a počtu magnetů nad kterými sondy prošly.

### 5.3.1 Návrh optimálního počtu Hallových sond

Měření polohy (odhad)  $\hat{x}$  je výsledkem kombinace výstupů z Hallových sond. Jsou-li Hallové sondy umístěny blízko magnetů, jsou po většinu času v saturaci (viz obr. 5.6), ale nejsou-li saturované, pak je jejich polohová citlivost vysoká. Čím více jsou sondy umístěny blíže k magnetům, tím více se tato citlivost zvyšuje a zkracuje se čas, kdy jsou mimo saturační oblast.

Pokusíme se vypočítat optimální počet Hallových sond, podle požadované rozlišovací schopnosti. Necht' je požadovaná rozlišovací schopnost  $5 \mu m$ . Počet sond závisí na šumu a počtu bitů AD převodníku. V ideálním případě, kdy není na výstupu sond přítomen žádný šum, může být dosaženo libovolné rozlišovací schopnosti, za předpokladu, že je pro konverzi použit dostatečný počet bitů AD převodníku. Z praktického hlediska bohužel šum přítomný je a neměl by zavádět chybu větší než povolených  $5 \mu m$  pro libovolnou polohu jezdce.

#### *Optimální počet Hallových sond:*

Výstup Hallové sondy můžeme obecně zapsat ve tvaru:

$$y = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) + \epsilon, \quad (5.6)$$

kde  $p$  je rozteč magnetů (vzdálenost pólů N-N resp. S-S),  $\epsilon$  je šum,  $x$  poloha motoru a  $A$  amplituda výstupu Hallové sondy.

Jak již bylo řečeno nejhorší prostorová citlivost je pro  $\text{tg } \angle = 0$ , tedy přímo nad póly magnetů.

Posun  $\Delta x = \frac{\pi}{2}$  doprava pro nejhorší případ ( $\frac{\pi}{2}$  - vrchol sinusovky) způsobí změnu výstupu Hallové sondy:

$$\Delta y = A - A \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot x}{p} + \frac{\pi}{2}\right) \quad (5.7)$$

Změnu výstupu  $\Delta y$  způsobí povolená chyba polohy  $\Delta x = \frac{\pi}{2}$ . Musíme uvažovat velikost směrodatné odchylky způsobené šumem. Je-li tato odchylka  $\sigma_a \gg \Delta y$ , pak odchylka způsobená šumem v oblasti  $\frac{\pi}{2}$  má za následek velkou chybu měření polohy.

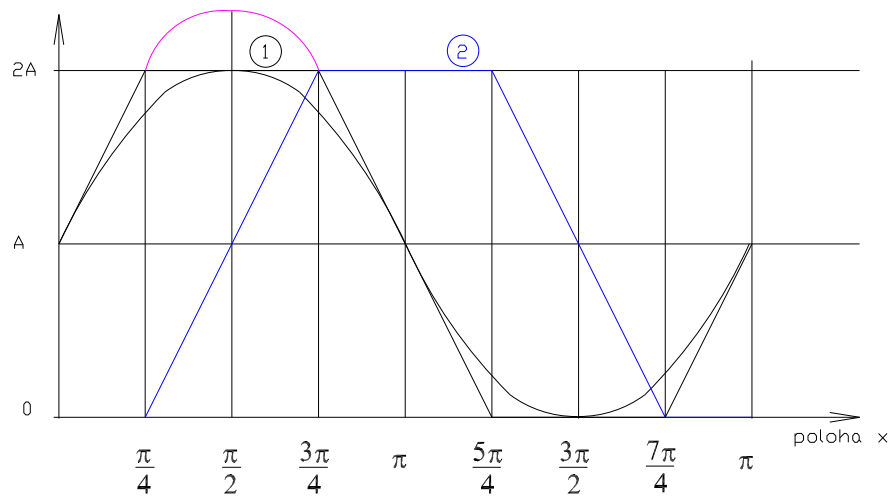
Šum na výstupu je větší než námi požadována citlivost. Nechť je stále požadovaná rozlišovací schopnost  $5 \mu m$ . Jsou-li použity dvě Hallovy sondy, jenž jsou postupně mimo saturaci, můžeme výstup zapsat jako:

$$y_1 = A \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) [V] \quad \dots \quad \text{pro } |y_1| \leq 2,5 \quad (5.8)$$

$$y_1 = A \cdot \text{sign} \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) [V] \quad \dots \quad \text{pro } |y_1| \geq 2,5 \quad (5.9)$$

$$y_2 = A \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\frac{2\pi x}{p} + \frac{\pi}{2}\right) [V] \quad \dots \quad \text{pro } |y_1| \leq 2,5 \quad (5.10)$$

$$y_1 = A \cdot \text{sign} \sin\left(\frac{2\pi x}{p} + \frac{\pi}{2}\right) [V] \quad \dots \quad \text{pro } |y_1| \geq 2,5 \quad (5.11)$$



Obrázek 5.6: Saturace

Nachází-li se výstup jedné sondy v oblasti saturace, pak přebírá funkci sonda druhá a obráceně. Sondy jsou tedy posunuty o  $\frac{\pi}{2}$ . Saturace 1. sondy  $\in \left(\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}\right)$ , sinusoida má nyní stejnou frekvenci  $\omega = \frac{2\pi}{p}$ , ale jinou amplitudu.

Pro  $\frac{\pi}{4} = 45^\circ$  dosahuje nová amplituda  $A^*$  velikosti:

$$A^* = \sqrt{2}A \quad (5.12)$$

Odtud:

$$y_1 = A \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \quad (5.13)$$

Nová amplituda  $A^*$  dosahuje v oblasti  $(\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4})$  kladných hodnot a v rozmezí  $(\frac{5\pi}{4}, \frac{7\pi}{4})$  záporných hodnot.

Největší necitlivost nastává, když se jedna ze sond právě dostává do saturace nebo naopak v okamžiku, kdy opouští oblast saturace. Dosadíme-li do rovnice za  $A^*$ , pak odchylka rovna  $\frac{x}{2}$  vede na změnu výstupu:

$$\Delta y_1 = A - A\sqrt{2} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot x}{p} + \frac{3\pi}{4}\right) \quad (5.14)$$

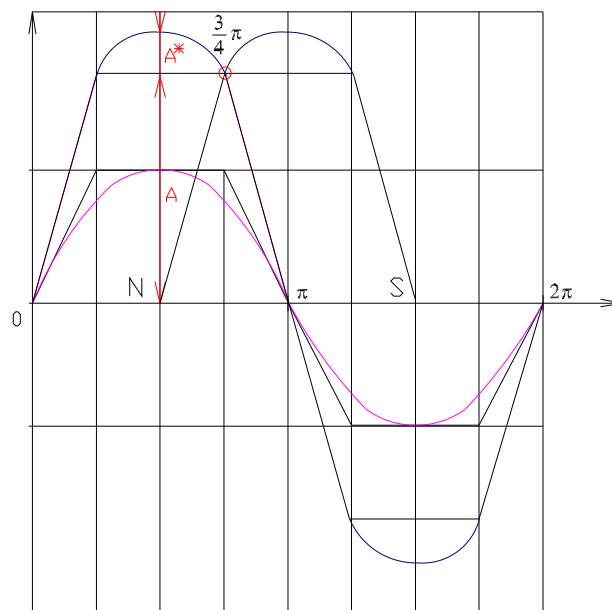
V nejhorším případě polohy motoru při použití dvou Hallových sond by změně polohy o  $\frac{x}{2}$  měla odpovídat vyšší hodnota změny výstupu  $\Delta x$  než v předešlém případě (5.7). Tudíž je nepravděpodobné, že šum sondy vnese do měření větší chybu, než je dosažitelná rozlišitelnost.

Průběh sinusoidy s amplitudou  $A^* = \sqrt{2}A$  má v oblasti  $(0 \div \frac{\pi}{4})$  resp.  $(\frac{3\pi}{4}; \pi)$  v porovnání se sinusoidou o amplitudě  $A$  lineárnější charakter. Linearita “slábne” v okolí saturace, kde má sinusoida průběh nejméně strmý. V samotné oblasti saturace přebírá funkci 2. sonda, takže oblast saturace je z hlediska chyby nezajímavá. Největší necitlivost nastává v oblasti nejmenší strmosti sinusovky, tedy v místě před saturací (před vstupem do saturace) a po výstupu ze saturace ( $\Delta y$ ). AD převodník by měl být schopen detekovat změny  $\frac{x}{2}$  a může mít tedy kvantizační krok odpovídající změně výstupu vypočteného podle (5.7) v rozsahu *dvojnásobku amplitudy*. Je nutné vybrat AD převodník splňující tuto podmínku.

### 5.3.2 Metoda zesílit a oříznout

V této části práce se zabýváme variantou nesaturovat, ale libovolně zesílit amplitudu sinusoidy na hodnotu  $A^*$  a pak jí “oříznout” v efektivní hodnotě. Tento efekt má stejný výsledek jako umístit sondy tak, aby byly saturevané a zároveň aby na sebe jednotlivé oblasti saturace těsně navazovaly. Takovéto přesné umístění sond by mohlo být velmi problematické vzhledem k citlivosti sondy.

Nevýhodou je jen to, že se zesilují i parazitní šумы. Otázkou zůstává, zda-li to bude na závadu či nikoliv. Princip metody naznačíme na následujícím obrázku 5.7



Obrázek 5.7: Metoda zesílit a oříznout

Na obrázku 5.7 máme zobrazeny funkce výstupu napětí. Původní saturevané a nové s amplitudou  $A^*$ . Je patrné, že ať je amplituda jakákoliv, počátek saturačního pásma začíná v  $\frac{\pi}{4}$  a končí v  $\frac{3\pi}{4}$ , tudíž pásmo saturace má šířku  $\frac{\pi}{2}$ . Vypočteme-li  $\sin\frac{\pi}{4} = \frac{\sqrt{2}}{2}$  dostáváme, že saturace má počátek  $\frac{\sqrt{2}}{2}A^*$  čili na *efektivní hodnotě sinusoidy*. Konec saturevané oblasti je symetrický tudíž  $\sin\frac{3\pi}{4} = \frac{\sqrt{2}}{2}$ .

Jelikož cílem metody je zesílení amplitudy výstupního napětí a oříznutí v její efektivní hodnotě, pak je vhodné vypočítat si bod posunutí, který nám udává počátek pásma saturace následující amplitudy výstupního napětí Hallovy sondy. Jedná se o bod ve kterém je nutné tuto amplitudu oříznout.

Pro výpočet vyjádříme první křivku ve tvaru:

$$A^* \cdot \sin\left(\frac{2\pi x\varphi}{p}\right) \quad (5.15)$$

a druhou (posunutou) křivku ve tvaru:

$$A^* \cdot \cos\left(\frac{2\pi x\varphi}{p}\right) \quad (5.16)$$

Chceme určit bod posunutí:

$$A^* \cdot \sin\varphi = -A^* \cos\varphi \quad (5.17)$$

$$\frac{A^*}{A^*} \cdot \operatorname{tg}\varphi = -1 \quad (5.18)$$

A výsledná hodnota bodu posunutí:

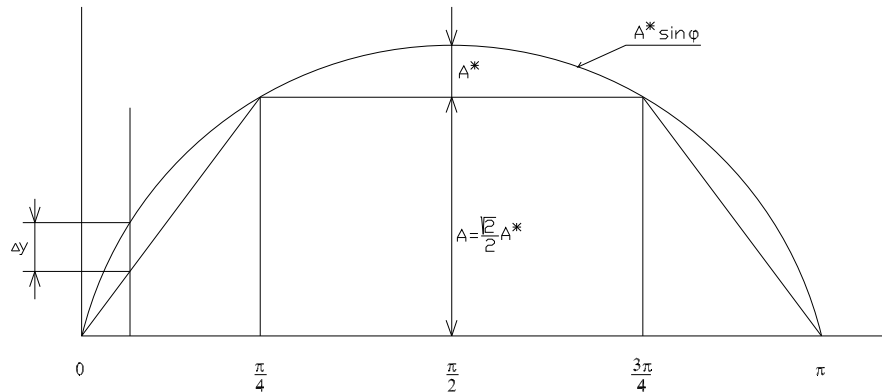
$$\varphi = \frac{3\pi}{4} \quad (5.19)$$

Vypočtená hodnota rovna  $\frac{3\pi}{4}$  odpovídá konci pásma saturace první sondy a koresponduje s počátkem pásma saturace druhé sondy.

*Amplitudu zesílíme libovolně na hodnotu  $A^*$  a ořízneme ji v  $\frac{\sqrt{2}}{2}A^*$ , tedy v efektivní hodnotě. Bohužel se zesiluje i šum.*

*Chyba linearizace:*

V následujícím odstavci provedeme linearizaci a pokusíme se vypočítat chybu linearizace resp. maximální odchylku.



Obrázek 5.8: Chyba linearizace

Křivku z obrázku 5.8 můžeme zapsat ve tvaru:

$$A^* \cdot \sin\varphi \quad (5.20)$$

Velikost “oříznuté” amplitudy označíme  $A$

$$A = \frac{\sqrt{2}}{2} A^* \quad (5.21)$$

$$y = [A^* \cdot \sin\varphi]_0^{\pi/4} \quad (5.22)$$

A provedeme linearizaci:

$$y_{lin} = \frac{A^* \cdot 2\sqrt{2}}{\pi} \varphi \quad (5.23)$$

tato rovnice vlastně odpovídá rovnici přímky  $y = kx + q$

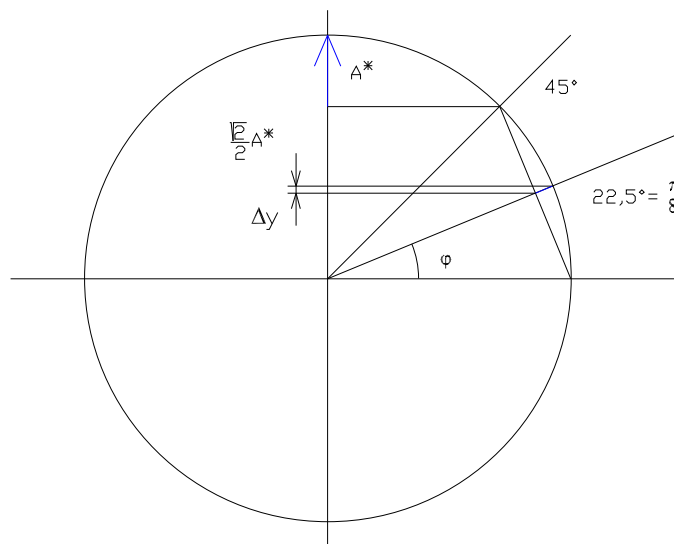
$$\frac{\pi}{4} \approx \frac{\sqrt{2} \cdot A^*}{2} \quad (5.24)$$



úpravou získáváme velikost směrnice:

$$\frac{\sqrt{2} \cdot A^*}{2} = k \frac{\pi}{4} \Rightarrow k = \frac{4 \cdot \sqrt{2}}{2\pi} \quad (5.25)$$

Maximální odchylka nastává v oblasti  $\frac{\pi}{8}$ , pro bližší představu převedeme do *polárních souřadnic*.



Obrázek 5.9: Polární souřadnice

**Normální souřadnice:**

$$y = A^* \cdot \sin \frac{\pi}{8}, \quad (5.26)$$

$$y_{lin} = A^* \cdot \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{\pi}{8} = A^* \cdot \frac{\sqrt{2}}{4}, \quad (5.27)$$

$$\Delta y = A^* \cdot \left( \sin \frac{\pi}{8} - \frac{\sqrt{2}}{4} \right) = 0,029 A \quad (5.28)$$

Polární souřadnice:

$$y_1 = A^* \cdot \sin \frac{\pi}{8}, \quad (5.29)$$

$$y_{lin} = A^* \cdot \frac{\sqrt{2}}{4}, \quad (5.30)$$

$$\Delta y = A^* = 0,029 A \quad (5.31)$$

*Zvyšuje se rozlišovací schopnost, ale chyba nelinearity zůstává stejná (cca 3%A\*).*

## 5.4 Měření zrychlení

Při měření zrychlení je důležitá volba vhodného akcelerometru. Jako velmi vhodný výběr se jeví mikroelektromechanický akcelerometr (MEMS). Prakticky veškerý mechanický pohyb, který lze fyzikálně vztáhnout ke gravitaci, lze tímto senzorem měřit s dostatečně velkou přesností a hlavně vysokou rychlostí odezvy na změny. V našem případě budeme měřit zrychlení pouze v jedné ose. Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole, obecně lze říci, že se jedná o senzory měřící dynamické zrychlení (akceleraci), resp. sílu vzniklou změnou rychlosti pohybujícího se předmětu resp. senzoru, nebo statické zrychlení, resp. sílu vzniklou působením gravitace (přitažlivostí) Země. Mezi měření dynamického zrychlení patří i detekce vibrací.

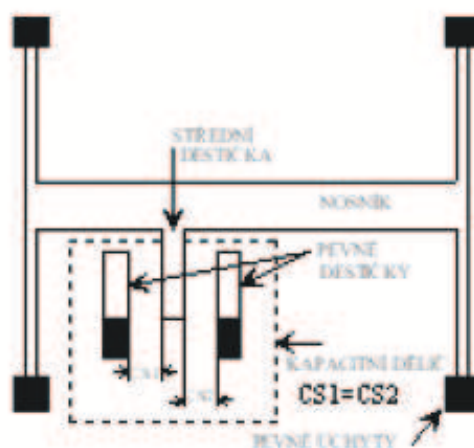
Statické zrychlení je již ze svého principu neustále přítomné a je tedy ho nutné při měření dynamického zrychlení ve výsledcích odstranit filtrací.

Dnešní vyspělé integrované senzory obvykle poskytují obě možnosti měření v rámci jednoho integrovaného obvodu obsahující snímací prvek (senzor) a vyhodnocovací obvody.

### Princip činnosti akcelerometru MEMS ADXL05

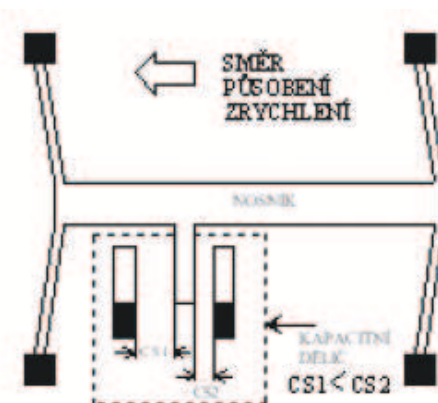
Celý senzor se skládá ze společného nosníku a ze 42 diferenčních kapacitních snímačů, které mají dvě pevné destičky, mezi nimiž je jedna pohyblivá – plovoucí spojená s nosníkem. Plovoucí destička se vychyluje v závislosti na působícím zrychlení. Jde tedy o kapacitní dělič, tvořený dvěma kondenzátory zapojenými v sérii.

Pevné kapacitní destičky senzoru jsou buzeny obdélníkovými signály 1 MHz vzájemně posunutými o 180°. V klidovém stavu (obr. 5.10) jsou kapacity obou kondenzátorů stejné, a proto je napětí v jejich elektrickém středu (tj. na střední destičce) nulové.



Obrázek 5.10: Akcelerometr - klidový stav

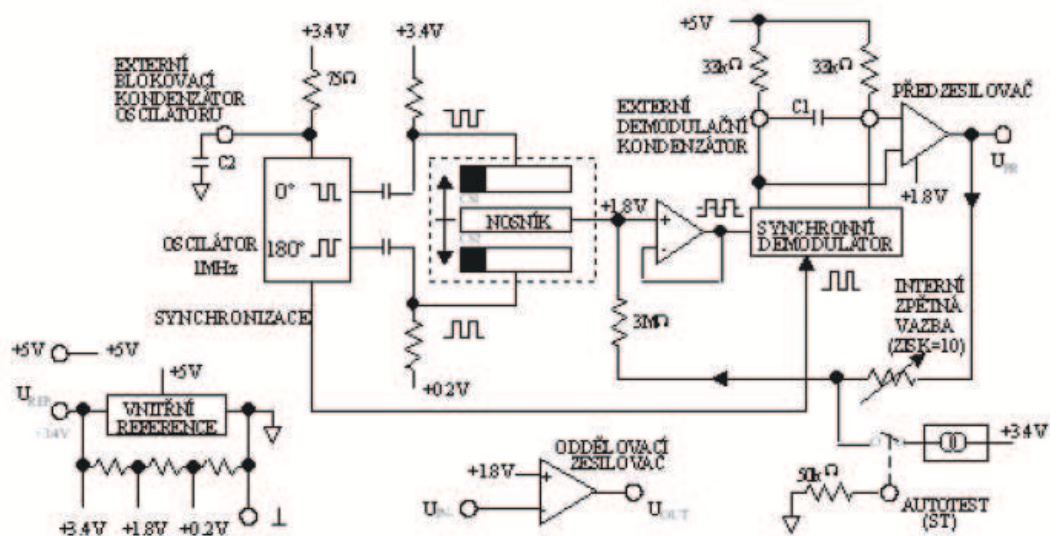
Na následujícím obrázku 5.11 je ukázáno, jak se vlivem zrychlení změří poloha nosníku senzoru.



Obrázek 5.11: Akcelerometr - vliv zrychlení

Působí-li zrychlení ve směru vyznačeném šipkou v obrázku, pak se střední destička přiblíží k jedné z pevných destiček a zároveň se oddálí od druhé. Kapacity kondenzátorů budou tudíž rozdílné a na střední destičce se objeví obdélníkový signál, jehož amplituda je úměrná hodnotě zrychlení a fáze nesoucí informaci o směru pohybu nosníku. Fáze se vyhodnocuje pomocí synchronního demodulátoru.

Na následujícím obrázku<sup>2</sup> je principiální schéma akcelerometru. Výstupní signál z nosníku senzoru je přiveden na vstup synchronního demodulátoru, do něhož je také přiveden hodinový signál z krystalového oscilátoru. Synchronní demodulátor potlačuje signály (šumy), které nejsou synchronní s hodinovým signálem. Pokud je signál ze senzoru ve fázi s hodinovým signálem, bude na výstupu demodulátoru kladné napětí, pokud bude posunutý o 180°, bude výstup záporný. Všechny další signály budou potlačeny.



Obrázek 5.12: Schéma zapojení akcelerometru ADXL05

<sup>2</sup>Zjednodušené schéma zapojení pro akcelerometr ADXL05 společnosti Analog Devices

# Kapitola 6

## Závěr

Cílem celé práce bylo navrhnout metodu odhadu polohy, rychlosti a zrychlení s ohledem na požadovanou přesnost.

### Odhad polohy:

Odhad  $\hat{x}$  je výsledkem kombinace výstupů z Hallových sond. Výpočtem optimálního počtu Hallových sond bylo stanoveno, že podle námi požadované rozlišovací schopnosti počet sond závisí na šumu a počtu bitů AD převodníku.

Při použití jedné Hallovy změnu výstupu  $\Delta y$  způsobí povolená chyba polohy  $\Delta x = \frac{x}{2}$ . Musíme uvažovat velikost směrodatné odchylky způsobené šumem. Je-li tato odchylka  $\sigma_a \gg \Delta y$ , pak z toho vyplývá, že odchylka způsobená šumem v oblasti  $\frac{\pi}{2}$  má za následek velikou chybu měření polohy. Šum výstupu je větší, než je požadována citlivost. Použití jedné Hallovy sondy je tudíž nevhodné.

Při použití dvou Hallových sond bereme v úvahu nejhorší případ, kdy jedna ze sond vstupuje nebo vystupuje ze saturace. Změně polohy o  $\frac{x}{2}$  měla odpovídat vyšší hodnota změny výstupu  $\Delta x$  než v předešlém případě (5.7). Tudíž je nepravděpodobné, že šum sondy vnese do měření větší chybu, než je dosažitelná rozlišitelnost.

AD převodník by měl být schopen detekovat změny  $\frac{x}{2}$  a může mít tedy kvantizační krok odpovídající změně výstupu vypočteného podle (5.7) v rozsahu *dvojnásobku amplitudy*. Je nutné vybrat AD převodník splňující tuto podmínku.

Další variantou byla metoda *Zesílit a oříznout*: efekt má stejný výsledek jako umístění sond tak, aby byly satureované a zároveň na sebe navazovaly. Takové přesné

umístění sond by mohlo být velmi problematické vzhledem k citlivosti sondy. Principem je zesílení amplitudy na libovolnou hodnotu  $A^*$  a oříznutí v efektivní hodnotě. Tímto bohužel zesílujeme i šum. Jsme sice schopni zvýšit rozlišovací schopnost, ale chyba nelinearity zůstává stejná (cca  $3\%A^*$ ).

#### **Odhad zrychlení:**

Zrychlení je měřeno přímo pomocí akcelerometru. Za vhodný typ lze považovat mikroelektromechanický akcelerometr (MEMS). Prakticky veškerý pohyb, který lze fyzikálně vztáhnout ke gravitaci, lze tímto senzorem měřit s dostatečně velkou přesností a hlavně vysokou rychlostí odezvy na změny. Nesmí být opomenuto statické zrychlení, které je již ze svého principu neustále přítomné, a je tedy nutné jej při měření dynamického zrychlení ve výsledcích odstranit filtrací.

#### **Odhad rychlosti:**

Rychlost zde není měřena přímo, ale je vypočítávána. Jelikož veličiny dráha, rychlost a zrychlení jsou navzájem svázané veličiny (rychlost je derivací dráhy a zrychlení je derivací rychlosti, resp. druhou derivací dráhy), nabízí se dvě metody odhadu rychlosti a to časovou derivací *dráhy* získané z Hallových senzorů. Tento postup je velmi citlivý na šum. Nebo časová integrace *zrychlení* získaného z akcelerometrického senzoru, která je menším zatížením šumem vhodnější.

Při odhadu stavů by bylo nejvhodnější použít prediktivní filtraci s využitím Kalmanova adaptivního filtru. Ten slouží k modelování stavů diskrétního dynamického systému, jehož výhodou je rekurzivní struktura. Filtrace slouží k odhadu stavu regulované soustavy při současném působení parazitního šumu na vstupu i výstupu. Návrhem tohoto filtru bych se rád zabýval v následné diplomové práci, která by navázala na práci bakalářskou.

# Literatura

- [1] BAS J. DE LRUIF A KOL. (2002). *Sensor fusion for linear motors*. Proc. Of Mechatronics 2002, University of Twente.
- [2] RIPKA, P., ĎAD'Ů, S., KREIDL, M., NOVÁK, J. (2005). *Senzory a převodníky*. Vydavatelství ČVUT, Praha.
- [3] RIPKA, P. (2005). *Senzory a převodníky - přednáškové slide*. ČVUT, Praha.
- [4] HAASZ, V. , SEDLÁČEK, M. (2003). *Elektrická měření, přístroje a metody*. Vydavatelství ČVUT, Praha.
- [5] KUBEŠ, P. , KYNCL, Z. (2003). *Fyzika I - skriptum*. Vydavatelství ČVUT, Praha.
- [6] ZNAMENÁČEK, K. (2004). *Lineární motor jako akční člen aktivního tlumiče - Diplomová práce*. ČVUT, Praha.
- [7] HUSIN LINEAR TECHNOLOGY. [www.hiwin.cz](http://www.hiwin.cz).
- [8] COMPLEYMOTION. [www.copleymotion.com](http://www.copleymotion.com).
- [9] HW - VŠE Z OBORU ELEKTRONIKY A AUTOMATIZACE. [www.hw.cz](http://www.hw.cz) - Akcelerometry, integrované snímače od AD.



# Příloha A

## Obsah přiloženého CD

K této práci je přiloženo CD, na kterém je uložen dokument obsahující tuto *bakalářskou práci* ve formátu *PDF*