



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

**NOVÁ METODA ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLŮ
ZE SNÍMAČE ABSOLUTNÍ POZICE**

NOVEL METHOD TO EVALUATE SIGNALS FROM ABSOLUTE POSITION ENCODER

ZKRÁCENÁ VERZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

ABRIDGED DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Vojtěch Dvořák

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Lukáš Fojcik, Ph.D.

BRNO 2021

ABSTRAKT

Práce je věnována vývoji a implementaci nové metody výpočtu pozice využívající snímač absolutní pozice Vernierova typu. Nová metoda byla vyvinuta pro zvýšení spolehlivosti určení pozice v aplikacích, kdy se vlastnosti snímače pozice mění vlivem okolního prostředí či stárnutím v průběhu života. V první části textu práce jsou představeny doposud využívané metody výpočtu pozice a identifikovány jejich limity, především vzhledem ke změně charakteristik snímače. Následně je odvozena nová metoda, detailně analyzována z hlediska robustnosti a přesnosti výpočtu pozice a představena referenční implementace do cílového obvodu FPGA. V závěru práce jsou uvedeny testy, které byly provedeny pro ověření funkčnosti a vlastností nové metody ve vzorové aplikaci, kde tato metoda našla své uplatnění.

KLÍČOVÁ SLOVA

Snímače absolutní pozice, Vernierův princip, noniový princip, FPGA

Místo uložení práce

Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,
Ústav mikroelektroniky, Technická 3058/10, 616 00 Brno

Obsah

Úvod	2
1 Snímač absolutní pozice Vernierova typu	4
2 Cíle dizertační práce	7
3 Numerická metoda výpočtu pozice	8
3.1 Model snímače pozice	9
3.2 Vyhodnocení podobnosti mezi snímačem a modelem	11
3.2.1 Součet absolutních hodnot rozdílů	12
3.2.2 Součet čtverců rozdílů	13
3.3 Postup výpočtu pozice numerickou metodou	14
3.4 Tolerance metody ke změně parametrů snímače	17
3.4.1 Robustnost metody v režimu úplného prohledávání	18
3.4.2 Tolerance metody v režimu zrychleného prohledávání	21
3.5 Přesnost výpočtu pozice numerickou metodou	23
4 Implementace numerické metody v FPGA	25
5 Výpočet pozice v reálné aplikaci	28
5.1 Počáteční kalibrace	30
5.2 Testování	32
6 Závěr	34
Seznam použité literatury	36

Úvod

Elektrické motory jsou dnešní době přítomné prakticky ve všech oblastech lidské činnosti. První stejnosměrné motory pochází z počátku 19. století a jejich otáčení bylo zajištěno mechanickou komutací pomocí kartáčů přivádějící napětí na rotor motoru. V druhé polovině 19. století se pak objevily první bezkartáčové stejnosměrné motory, u kterých byla komutace zajištěna elektricky změnou polaritu přiloženého napětí. Dnes existují stejnosměrné motory různých konstrukcí, velikostí a výkonů a své uplatnění nacházejí v rozličných mechanismech, od malých motorů pro ovládání přesných vědeckých přístrojů až po velké a výkonné motory pohánějící tramvaje či lokomotivy.

Díky pokrokům v oblasti integrace elektroniky v 70. a 80. letech 20. století bylo možné v těchto mechanismech využívat stále pokročilejší metody řízení ve snaze dosáhnout lepší přesnosti a účinnosti. Nejlepších výsledků pak bylo dosaženo při použití vektorového řízení. U vektorového řízení jsou kontrolovány fázové proudy tak, aby maximální část proudu tekoucího do motoru byla využita pro vytváření točivého momentu [1]. Díky tomu lze dosáhnout vysoké účinnosti řízení a zároveň hladkého průběhu momentu, a v důsledku i rychlosti otáčení a přesnosti nastavení pozice mechanismu. Nutnou podmínkou pro správnou funkci vektorového řízení motorů je znalost okamžitého úhlu natočení mezi statorem a rotorem v každé regulační periodě. Toho lze nejlépe dosáhnout tak, že na ose otáčení mechanismu je osazen nějaký snímač pozice. V této práci bude představen nový přístup k výpočtu pozice ze signálů jednoho takového snímače. Vývoj nové metody byl motivován specifickými požadavky z průmyslu, především pak potřeby vysoké spolehlivosti v nepříznivých environmentálních podmínkách při dosažení velké přesnosti určení pozice vědeckého instrumentu. Jak bude v práci ukázáno, tato nová metoda zpracování signálů snímače je tolerantní k chybám, které jsou s reálným snímačem pozice neodlučitelně spjaté.

V textu předložené dizertační práce bude čtenář nejprve seznámen se snímačem pozice, pro který byla tato metoda primárně určena a blíže popsány doposud využívané způsoby výpočtu pozice. Dále je stanoven cíl práce, který vychází z limitace známých metod výpočtu při snaze splnit požadavky na vysokou spolehlivost výpočtu pozice. Následně je představena koncepce nové metody, která se od přechozích způsobů liší už v samotném přístupu k řešení problému. Dílčí kroky při výpočtu pozice touto novou

metodou jsou postupně odvozeny a její přesnost i robustnost demonstrována řadou analýz.

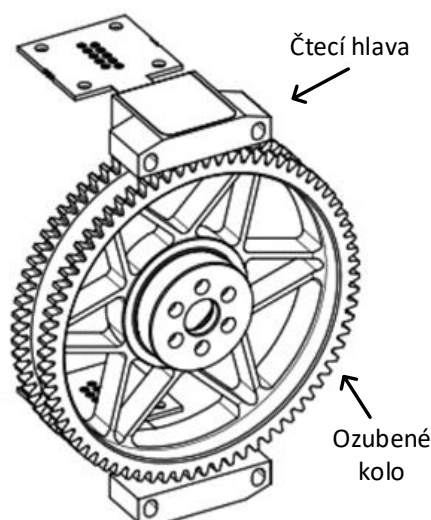
Tato nová metoda byla vyvinuta s ohledem na vhodnost její implementace do obvodu FPGA. V práci jsou uvedeny příklady různých architektur, které umožňují škálování rychlosti a přesnosti výpočtu pozice v závislosti na parametrech cílového systému. Pro vybranou architekturu je též představen postup při odvození dílčích parametrů a proveden odhad potřebných hardwarových zdrojů. V závěru práce je ukázán vzorový systém pro řízení mechanismu, ve kterém tato metoda našla své uplatnění. S tímto systémem byla následně provedena řada testů, jejichž výsledky demonstrují splnění požadavků na nový způsob výpočtu pozice i při praktickém použití.

1 Snímač absolutní pozice Vernierova typu

Snímač absolutní pozice, jak už název napovídá, převádí pozici či úhel natočení na nějakou elektrickou veličinu, která je unikátní pro každou pozici. V nejjednodušším případě je pozice přímo převedena na napětí. S takovým jednoduchým příkladem je však spojen zřejmý problém, neboť rozlišení pozice je přímo úměrné rozlišení výstupního napětí. Maximální rozlišení pozice je pak dáno rozlišením převodníku A/D a zároveň ovlivněno šumem, nelinearitou převodníku a dalšími chybami v elektronice. V praxi je tento problém řešen rozdělením na více signálů, do kterých je informace o pozici zakódována.

Jednou z možných cest, která bude uvažována v této práci, je využít noniový princip, také znám jako Vernierův princip [2]. Jedná se o způsob, jak dosáhnout vyššího rozlišení s využitím dvou drah s různou škálou. První dráha se nazývá hlavní stopa a je rozdělena na N_1 kroků. Druhá dráha, nazývána noniová stopa, je rozdělena na N_2 kroků, přičemž platí že $N_2 = N_1 - 1$.

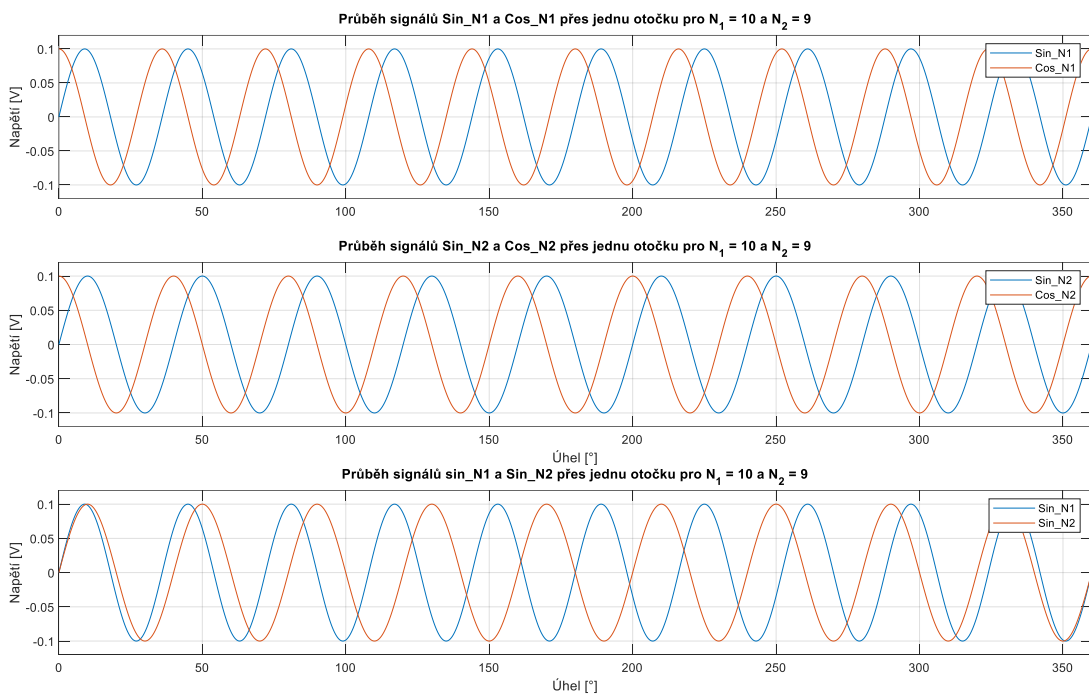
Snímač, který pro tuto práci zvolen, využívá ke své činnosti magnetické pole měnící se v průběhu otáčení. Tento snímač absolutní pozice je složen ze dvou základních částí, kola snímače a čtecí hlavy. Kolo snímače obsahuje dvojici stop o různém počtu zubů N_1 a N_2 je obvykle pevně spojeno s pohyblivou částí mechanismu. Čtecí hlava je osazena na statickou část mechanismu. Při pohybu mechanismu tedy dochází k otáčení kola vzhledem ke čtecí hlavě a výstupem je měnící se napětí v závislosti na úhlu natočení. Ukázka takového snímače pozice je na obr. 1.



Obr. 1: Snímač absolutní pozice Vernierova typu (převzato z [4])

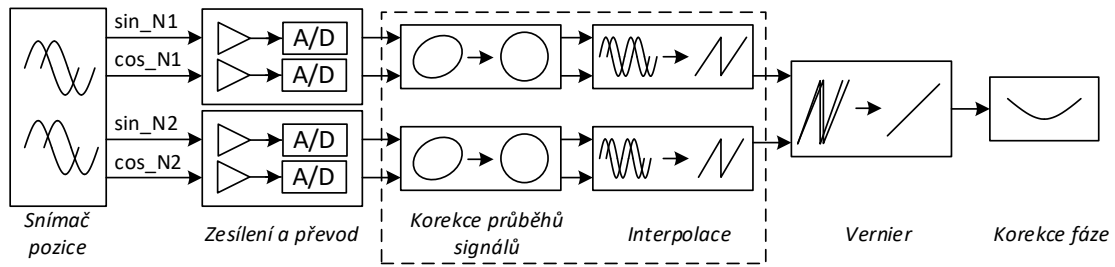
Čtecí hlava snímače obsahuje dva důležité prvky, permanentní magnet vytvářející magnetické pole a prvek, který je citlivý na změnu magnetického pole. Tímto prvkem je magnetorezistivní element [3], jenž v závislosti na intenzitě magnetického pole mění svůj odpor. Princip činnosti takového snímače je následující: Permanentní magnet vytváří magnetické pole, které se uzavírá přes ozubené kolo z feromagnetivního materiálu. Díky přítomnosti zubů se v průběhu otáčení mění vzdálenost permanentního magnetu a feromagnetického materiálu kola, což způsobuje změnu intenzity v prostoru mezi magnetem a kolem, kde je umístěn magnetorezistivní element.

V průběhu otáčení mechanismu tento snímač generuje čtveřici diferenčních napětí, které díky tvarům zubů a charakteru magnetorezistivního prvku vytváří harmonické průběhy jako jsou zobrazeny na obr. 2. Tyto signály budou v dalším textu označovány $\sin_{N1_{sw}}$, $\cos_{N1_{sw}}$, $\sin_{N2_{sw}}$ a $\cos_{N2_{sw}}$.



Obr. 2: Průběhy signálů generovaných snímačem

Snímač představený v této kapitole neposkytuje informaci o pozici přímo, ta je však zakódována do průběhů výstupních signálů kombinací harmonických průběhů a Vernierova principu. Operace určení pozice je pak dekodováním těchto signálů. V literatuře lze nalézt různé způsoby, jak lze toto provést [5]-[10]. Základní schéma známých metod výpočtu je však podobné a lze ho rozdělit do dílčích kroků znázorněných na obr. 3.



Obr. 3: Základní schéma výpočtu pozice

Výpočet pozice je prováděn pomocí digitálního obvodu, obvykle mikrokontroleru, a před samotným zpracováním signálů je třeba je nejdříve *zesílit a převést* pomocí převodníku A/D do číslicové domény. Parametry této části řetězce v literatuře nejsou mnohdy ani zmíněny a závisí na cílové aplikaci a parametrech zvoleného snímače.

Korekce průběhů signálů jednotlivých signálů zajišťuje jejich normalizaci, tedy odstranění chyby amplitudy, střední hodnoty a fázového posunu mezi signály jedné stopy. Implementace těchto korekcí je možná různými způsoby v závislosti na způsobu interpolace a také podle chyb, které jsou v signálech snímače dominantní. Korekce signálů pro správnou funkci nejprve vyžaduje informaci o velikosti jednotlivých chyb. Toto je obvykle řešeno pomocí korekčních koeficientů, které jsou určeny při počáteční kalibraci a v případě potřeby je systém výpočtu pozice také doplněn průběžnou aktualizací těchto koeficientů odhadovaných z naměřených dat.

Na opravených signálech snímače je následně provedena *interpolace*. Během této operace je z průběhů signálů určen úhel v aktuální periodě. Výsledkem je dvojice úhlů natočení vztažená k aktuální periodě $\varphi_{sw,N1}$ a $\varphi_{sw,N2}$. Jednotlivé metody výpočtu pozice se liší především v této části, kdy výpočet úhlu v periodě lze provést například pomocí goniometrických funkcí či fázového závěsu.

Z vypočtených hodnot úhlu v periodě $\varphi_{sw,N1}$ a $\varphi_{sw,N2}$ je aplikací *Vernierova principu* podle (1) vypočten úhel natočení snímače. Takto vypočtená pozice však stále může obsahovat chybu a v posledním kroku je třeba provést i *korekci fázové chyby*, kterou lze realizovat například s pomocí náhledové tabulky (LUT_{FC}), která v závislosti na vypočtené pozici udává naměřenou odchylku od správné hodnoty podle (2).

$$\varphi_{sw,t} = (\varphi_{sw,N1} - \varphi_{sw,N2}) \bmod 360^\circ \quad (1)$$

$$\varphi_{sw} = \varphi_{sw,t} + LUT_{FC}(\varphi_{sw,t}) \quad (2)$$

2 Cíle dizertační práce

Metody popsané v předchozí kapitole jsou dnes běžně používány pro vyhodnocení signálů snímače absolutní pozice založeném na Vernierově principu, který byl představen na začátku předchozí kapitoly. Pro potřeby konkrétní aplikace je třeba tyto metody vždy upravit či doplnit další korekcí chyb vyskytujících se v průbězích snímače absolutní pozice. Velká část příspěvků věnující se této problematice představuje právě různé modifikace těchto obecných metod s cílem odstranit chyby snímače specifické pro danou aplikaci za účelem dosažení co nejvyšší přesnosti vypočtené pozice. Autoři těchto příspěvků však mnohdy zanedbávají hlavní výhodu tohoto typu snímače, a to velkou odolnost vůči enviromentálním vlivům. Důsledkem pak je, že tyto metody obvykle nejsou analyzovány z hlediska robustnosti vůči změnám parametrů snímače či nepřesnostem kompenzace takových chyb. Jak bylo v předchozích kapitolách ukázáno, změna parametrů snímače však může mít na chybu vypočtené pozice dominantní vliv.

Je možné uvažovat scénář, kdy taková citlivost výše uvedených metod bude mít zásadní vliv na správnou funkci mechanismu. V případě, že je nutné mechanismus osazený tímto snímačem pozice držet ve stabilní poloze, přičemž se mění parametry okolního prostředí (např. teplota), nelze provádět korekci signálů s aktuálními parametry, neboť jejich aktualizace není možné bez otáčení mechanismu. Důsledkem tak je, že se mění vypočtená pozice i když poloha mechanismu zůstává stejná. Na takovou změnu pozice pak reaguje regulační soustava a nastaví mechanismus na chybnou pozici.

Hlavním cílem této práce je navrhnout nový přístup k výpočtu pozice který netrpí stejnou citlivostí na změnu charakteristik snímače a zajistí spolehlivost systému vzhledem ke vnější vlivům. Takový přístup by měl zároveň dosahovat alespoň podobné přesnosti jako předchozí metody v případě, že by byly aplikovány pro výpočet pozice se stejným snímačem pozice.

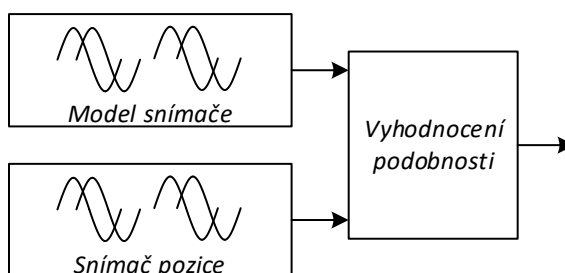
Dalším cílem předkládané práce je návrh vhodné architektury pro implementaci nové metody do obvodů FPGA. Tato platforma se sebou přináší jistá specifika a omezení. Při návrhu struktury výpočtu pro čipy FPGA je žádoucí eliminovat množství složitých matematických operací (výpočet goniometrických funkcí, operace dělení a podobně.), neboť tyto vedou k velkým obvodovým strukturám. Naopak je přínosné využití většího počtu opakujících se elementárních operací (sčítání, násobení), neboť takové výpočty mohou probíhat prakticky neustále bez toho, aby omezovaly další funkce obvodu.

3 Numerická metoda výpočtu pozice

Při bližším pohledu na signály ze snímače pozice je možné si povšimnout jedné důležité vlastnosti – kromě faktu, že průběhy splňují noniový princip, je zároveň možné konstatovat, že každý úhel natočení snímače je reprezentován jedinečnou kombinací výstupních signálů (což je ostatně definice snímače absolutní pozice). A naopak, každá platná a jedinečná kombinace signálů odpovídá jedinečnému úhlu natočení snímače.

Jedním přístupem k výpočtu pozice je pokusit se vytvořit nějakou inverzní funkci, která dokáže přímo mapovat aktuální hodnoty snímače na úhel natočení. Toto je společná vlastnost doposud využívaných metod, které jsou založeny především na platnosti Vernierova principu. Opačným přístupem k řešení tohoto problému je zaměřit se především na důsledek Vernierova principu, tedy jedinečnou kombinaci signálů pro každou pozici snímače. U tohoto přístupu pak není přímo využit Vernierův princip ani vytvořena funkce mapující průběhy snímače na jeho pozici. Právě naopak, cílem je vytvořit jakýsi „seznam“ všech možných výstupních kombinací snímače společně s pozicí, které odpovídají. Samotný výpočet pozice je pak možné převést na úkol nalezení správné kombinace hodnot v takovém „seznamu“. Tento přístup se tedy oproti předchozím metodám liší v absenci mapovací funkce a pracuje přímo s numerickými hodnotami signálů, jak jsou generovány snímačem pozice přes celou otočku. Jedná se tedy o *numerické řešení* spíše než analytické řešení.

Základní myšlenka numerického řešení je tedy jednoduchá: je třeba navrhnout *model snímače*, který na každé pozici generuje jedinečnou kombinaci hodnot odpovídající průběhům snímače pozice. Následně je třeba zvolit vhodnou metodu pro *vyhodnocení podobnosti* mezi sadou dat naměřenou na aktuálním úhlu natočení snímače pozice a modelem snímače pozice. Pozice v modelu, na které je podobnost mezi jeho hodnotami a hodnotami snímače největší, je pak skutečný úhel natočení snímače.



Obr. 4: Koncept numerické metody zpracování signálů ze snímače absolutní pozice

3.1 Model snímače pozice

Pro volbu vhodného modelu senzoru je třeba zohlednit různé protichůdné požadavky a jevy, které provázejí snímač pozice a měřicí elektroniku v průběhu jejich života. Na jedné straně stojí požadavek na co nejlepší podobnost modelu a průběhu signálů snímače, na druhé straně pak výpočetní a paměťová náročnost či možnost průběžné aktualizace jeho hodnot v průběhu života v případě, kdy je třeba kompenzovat změny teploty či stárnutí snímače a elektroniky.

Pro praktické použití je třeba zvážit zjednodušení modelu, a to i za cenu jeho horší podobnosti vzhledem ke skutečným průběhům signálů snímače. Při odvození zjednodušeného modelu je možné vycházet z úplného modelu a redukovat počet koeficientů popisující model na akceptovatelnou hodnotu. Při nižším počtu koeficientů je celá otočka snímače rozdělena na dílčí úseky, přičemž každý z nich je popsán sadou koeficientů amplitudy, střední hodnoty a fáze. Volba délky a rozložení těchto úseků pak přímo ovlivňuje přesnost zjednodušeného modelu.

V rámci této práce není možné postihnout všechny možnosti volby úseků a bude zde přestaven jen jeden způsob, který se jeví jako přirozený. Kolo snímače pozice obsahuje N_1 a N_2 zubů a signály ze snímače tedy mají N_1 a N_2 period harmonického signálu přes celou otočku. Je tedy logické využít tohoto přirozeného rozdělení a zvolit jednotlivé úseky tak, aby odpovídali počtu zubů na kole snímače. Jednotlivé úseky tedy odpovídají délce $360^\circ/N_1$ pro signály $\sin_{N1_{sw}}$ a $\cos_{N1_{sw}}$ a délce $360^\circ/N_2$ pro signály $\sin_{N2_{sw}}$ a $\cos_{N2_{sw}}$.

$$\begin{aligned}
 \sin_{N1_{vw}}(\varphi_{vw}) &= g_{vw,\sin_{N1}}(P_{\sin_{N1}}) * \sin(N_1 * \varphi_{vw} + p_{vw,\sin_{N1}}(P_{\sin_{N1}})) + o_{vw,\sin_{N1}}(P_{\sin_{N1}}) \\
 &\quad + \sum_h g_{vw,\sin_{N1}}(P_{\sin_{N1}})[h] * \sin(h * N_1 * \varphi_{vw} + p_{vw,\sin_{N1}}(P_{\sin_{N1}})[h]) \\
 \cos_{N1_{vw}}(\varphi_{vw}) &= g_{vw,\cos_{N1}}(P_{\cos_{N1}}) * \sin(N_1 * \varphi_{vw} + p_{vw,\cos_{N1}}(P_{\cos_{N1}}) + \frac{\pi}{2}) + o_{vw,\cos_{N1}}(P_{\cos_{N1}}) \\
 &\quad + \sum_h g_{vw,\cos_{N1}}(P_{\cos_{N1}})[h] * \sin(h * N_1 * \varphi_{vw} + p_{vw,\cos_{N1}}(P_{\cos_{N1}})[h]) \\
 \sin_{N2_{vw}}(\varphi_{vw}) &= g_{vw,\sin_{N2}}(P_{\sin_{N2}}) * \sin(N_2 * \varphi_{vw} + p_{vw,\sin_{N2}}(P_{\sin_{N2}})) + o_{vw,\sin_{N2}}(P_{\sin_{N2}}) \\
 &\quad + \sum_h g_{vw,\sin_{N2}}(P_{\sin_{N2}})[h] * \sin(h * N_2 * \varphi_{vw} + p_{vw,\sin_{N2}}(P_{\sin_{N2}})[h]) \\
 \cos_{N2_{vw}}(\varphi_{vw}) &= g_{vw,\cos_{N2}}(P_{\cos_{N2}}) * \sin(N_2 * \varphi_{vw} + p_{vw,\cos_{N2}}(P_{\cos_{N2}}) + \frac{\pi}{2}) + o_{vw,\cos_{N2}}(P_{\cos_{N2}}) \\
 &\quad + \sum_h g_{vw,\cos_{N2}}(P_{\cos_{N2}})[h] * \sin(h * N_2 * \varphi_{vw} + p_{vw,\cos_{N2}}(P_{\cos_{N2}})[h])
 \end{aligned} \tag{3}$$

Kde:

φ_{vw} je úhel natočení virtuálního kola v intervalu $\langle 0^\circ, 360^\circ \rangle$ nebo $\langle 0 \text{ rad}, 2\pi \text{ rad} \rangle$

N_1 a N_2 je počet period/zubů na jednu celou otočku

P_{\sin_N1} , P_{\cos_N1} , P_{\sin_N2} a P_{\cos_N2} jsou čísla aktuální periody modelu snímače pro jednotlivé průběhy vypočteny dle předpisu (4)

$\sin_N1_{vw}(\varphi_{vw})$, $\cos_N1_{vw}(\varphi_{vw})$, $\sin_N2_{vw}(\varphi_{vw})$, $\cos_N2_{vw}(\varphi_{vw})$ jsou hodnoty modelu snímače na pozici φ

$\sin(\)$ je goniometrická funkce sinus

$g_{vw,\sin_N1}(P_{N1})$, $g_{vw,\cos_N1}(P_{N1})$, $g_{vw,\sin_N2}(P_{N2})$, $g_{vw,\cos_N2}(P_{N2})$ jsou amplitudy jednotlivých signálů, přičemž amplituda je konstantní v dané periodě

$p_{vw,\sin_N1}(P_{N1})$, $p_{vw,\cos_N1}(P_{N1})$, $p_{vw,\sin_N2}(P_{N2})$, $p_{vw,\cos_N2}(P_{N2})$ jsou fázové charakteristiky jednotlivých signálů v dané periodě

$o_{vw,\sin_N1}(P_{N1})$, $o_{vw,\cos_N1}(P_{N1})$, $o_{vw,\sin_N2}(P_{N2})$, $o_{vw,\cos_N2}(P_{N2})$ jsou střední hodnoty jednotlivých signálů, přičemž střední hodnota je konstantní v dané periodě

h je index vyšší harmonické; $h > 1$

$g_{vw,\sin_N1}(P_{N1})[h]$, $g_{vw,\cos_N1}(P_{N1})[h]$, $g_{vw,\sin_N2}(P_{N2})[h]$, $g_{vw,\cos_N2}(P_{N2})[h]$ jsou amplitudy jednotlivých vyšších harmonických vztaženy k periodě

$p_{vw,\sin_N1}(P_{N1})[h]$, $p_{vw,\cos_N1}(P_{N1})[h]$, $p_{vw,\sin_N2}(P_{N2})[h]$, $p_{vw,\cos_N2}(P_{N2})[h]$ jsou fázové posuny jednotlivých vyšších harmonických vztaženy k začátku periody

$$\begin{aligned}
 P_{\sin_N1} &= \left\lfloor \frac{\varphi_{vw}[\text{rad}]}{2\pi} * N_1 \right\rfloor \text{ mod } N_1 \\
 P_{\cos_N1} &= \left\lfloor \frac{\varphi_{vw}[\text{rad}]}{2\pi} * N_1 + \frac{1}{4} \right\rfloor \text{ mod } N_1 \\
 P_{\sin_N2} &= \left\lfloor \frac{\varphi_{vw}[\text{rad}]}{2\pi} * N_2 \right\rfloor \text{ mod } N_2 \\
 P_{\cos_N2} &= \left\lfloor \frac{\varphi_{vw}[\text{rad}]}{2\pi} * N_2 + \frac{1}{4} \right\rfloor \text{ mod } N_2
 \end{aligned} \tag{4}$$

Na zjednodušený model snímače lze také pohlížet jako na aproximaci skutečného průběhu pomocí řady period sinusoidy s různou amplitudou, střední hodnotou a fází. Taková aproximace však nebude přesně kopírovat skutečný průběh signálů snímače, neboť jeho parametry se mění spojitě zatímco parametry modelu snímače skokově. Přesnost zjednodušeného modelu bude tedy limitována především mírou změny parametrů snímače v průběhu celé otočky. V případě, kdy se parametry snímače mění jen nepatrně, pak i koeficienty v sousedních úsecích budou přibližně stejné. V opačném případě, kdy je změna parametrů snímače značná, je pro přesnost modelu limitující počet koeficientů, kterými je průběh aproximován. Podle definice zjednodušeného modelu v předchozím odstavci pak lze konstatovat, že chyba modelu je závislá na počtu úseků, a tedy počtu zubů na kole snímače.

3.2 Vyhodnocení podobnosti mezi snímačem a modelem

Vyhodnocení podobnosti je po volbě modelu snímače další důležitou částí numerické metody. Tato úloha bude rozdělena na dvě dílčí operace, *výpočet podobnosti* a *určení největší podobnosti*. Výpočet podobnosti je operace, jejímž výsledkem je hodnota reprezentující podobnost snímače na pozici φ_{sw} a modelu snímače na pozici φ_{vw} . Určení největší podobnosti je pak samotné vyhodnocení výsledků vypočtené podobnosti. Už na první pohled je zřejmé, že podobnost je inverzní vlastností k rozdílnosti a úlohu výpočtu podobnosti lze převést na výpočet rozdílnosti. Největší podobnost mezi snímačem a modelem je tedy tam, kde je nalezena nejmenší rozdílnost. Ve zbytku této kapitoly bude používán termín *největší podobnost*, kterou může čtenář chápat též jako *nejmenší rozdílnost*.

Při výpočtu podobnosti lze očekávat, že rozdíl mezi průběhy modelu a aktuální hodnotou snímače bude křivka, kterou lze popsat nějakou funkcí. Tato funkce bude dále nazývána *rozdílová funkce* a označena $\delta(\varphi_{sw}, \varphi_{vw})$. Její obecný tvar je definován předpisem (5).

$$\delta(\varphi_{sw}, \varphi_{vw}) = f(sw(\varphi_{sw}), (vw(\varphi_{vw}))) \quad (5)$$

Prvním krokem při návrhu rozdílové funkce je stanovení výpočtu rozdílů, na které následně bude aplikována nějaká funkce. V případě jednoho signálu je výpočet rozdílů triviální, stačí odečíst jednu hodnotu od druhé a výsledkem je rozdíl jako jedna hodnota. V případě pozičního senzoru je však třeba vzít v potaz čtyři různé signály snímače a těm odpovídající signály modelu. Výsledkem je čtveřice rozdílů, které budou dále nazývány *parciální rozdíly* a jsou počítány dle předpisu (6).

$$\begin{aligned} \Delta_{sin_N1}(\varphi_{sw}) &= sin_N1_{sw}(\varphi_{sw}) - sin_N1_{vw} \\ \Delta_{cos_N1}(\varphi_{sw}) &= cos_N1_{sw}(\varphi_{sw}) - cos_N1_{vw} \\ \Delta_{sin_N2}(\varphi_{sw}) &= sin_N2_{sw}(\varphi_{sw}) - sin_N2_{vw} \\ \Delta_{cos_N2}(\varphi_{sw}) &= cos_N2_{sw}(\varphi_{sw}) - cos_N2_{vw} \end{aligned} \quad (6)$$

Kde:

$\Delta_{sin_N1}(\varphi_{sw})$, $\Delta_{cos_N1}(\varphi_{sw})$, $\Delta_{sin_N2}(\varphi_{sw})$, $\Delta_{cos_N2}(\varphi_{sw})$ jsou jednotlivé parciální rozdíly na pozici φ_{sw} přes celou otočku modelu snímače

$sin_N1_{sw}(\varphi_{sw})$, $cos_N1_{sw}(\varphi_{sw})$, $sin_N2_{sw}(\varphi_{sw})$, $cos_N2_{sw}(\varphi_{sw})$ jsou hodnoty snímače absolutní pozice na pozici φ_{sw}

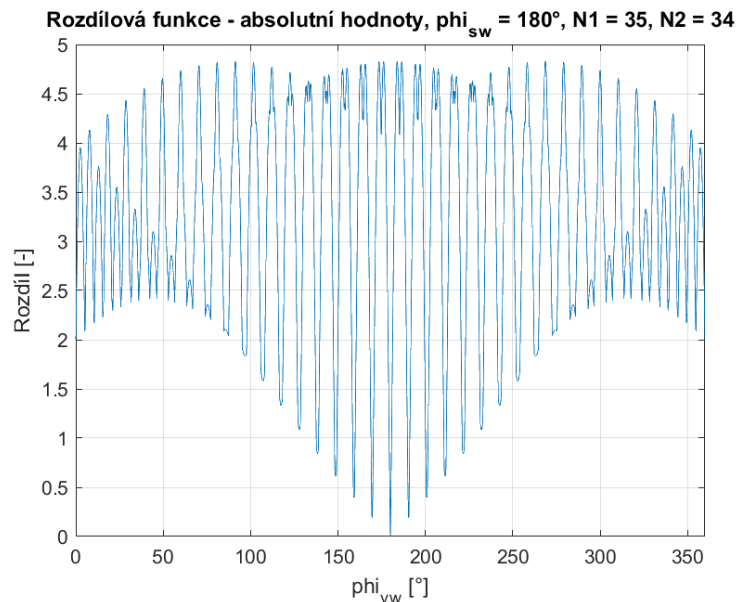
sin_N1_{vw} , cos_N1_{vw} , sin_N2_{vw} , cos_N2_{vw} jsou průběhy modelu snímače přes celou otočku

3.2.1 Součet absolutních hodnot rozdílů

Na začátku předchozí kapitoly byla úloha hledání největší podobnosti představena jako ekvivalent hledání nejmenší rozdílnosti a následně byly stanoveny požadavky na rozdílovou funkci. V této kapitole bude na tuto úlohu pohlíženo z jiného úhlu. Hledání nejmenšího rozdílu mezi snímačem a modelem je možné chápat také jako hledání nejmenší vzdálenosti mezi hodnotami signálů snímače a hodnotami modelu snímače. Vzdálenost mezi dvěma hodnotami je obecně definována jako absolutní hodnota rozdílu. Pokud je toto použito na parciální rozdíly, pak lze sestavit předpis rozdílové funkce $\delta_{sw,vw,abs}(\varphi_{sw})$ jako součet vzdáleností, jak je uvedeno v (7).

$$\delta_{sw,vw,abs}(\varphi_{sw}) = |\Delta_{sin_N1}(\varphi_{sw})| + |\Delta_{cos_N1}(\varphi_{sw})| + |\Delta_{sin_N2}(\varphi_{sw})| + |\Delta_{cos_N2}(\varphi_{sw})| \quad (7)$$

Nyní je třeba vyšetřit, zda taková funkce splňuje hlavní požadavek na diferenční funkci, tedy existenci jednoho globálního minima na pozici $\varphi_{vw} = \varphi_{sw}$. Na obr. 5 je ukázka diferenční funkce pro jednu pozici (v tomto případě pro pozici 180°), na které je patrné, že globální minimum je skutečně na správné pozici. Z jednoho průběhu však není možné vyvodit platnost tohoto tvrzení i pro všechny další úhly natočení.



Obr. 5: Průběh rozdílové funkce (součet absolutních rozdílů) na jedné pozici

Důkaz existence globálního minima na pozici $\varphi_{sw} = \varphi_{vw}$ je v tomto případě triviální. Nejprve je třeba stanovit, zda na dané pozici $\varphi_{sw} = \varphi_{vw}$ existuje minimum rozdílové funkce. Pokud je uvažován ideální snímač i ideální model, pak jsou hodnoty snímače na pozici φ_{sw} identické s hodnotami modelu na pozici $\varphi_{vw} = \varphi_{sw}$. Hodnota každého

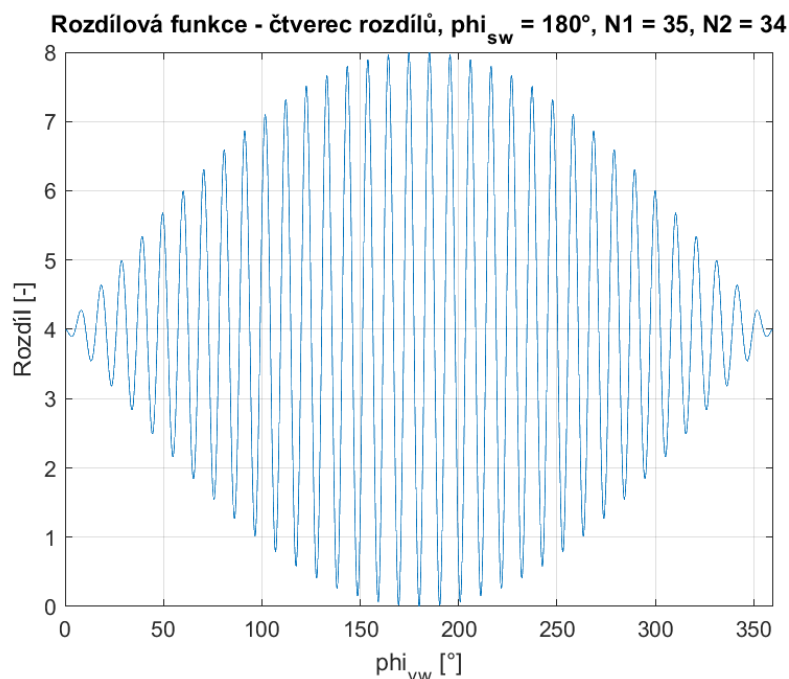
parciálního rozdílu na této pozici je tedy nula a stejně tak i jejich součet. Protože jednotlivé parciální rozdíly jsou díky použití absolutní hodnoty vždy větší nebo rovny nule, neexistuje součet kladných hodnot, který by byl menší než nula. Na této pozici se tedy nachází minimum rozdílové funkce. Tato úvaha však sama o sobě nedokazuje, že se jedná o globální minimum, jinými slovy, že na jiné pozici neexistuje součet parciálních rozdílu, který by byl taktéž nulový. Pro druhou část důkazu je možné se odkázat na kapitolu 1, kde byl absolutní snímač pozice definován tak, že na každé pozici poskytuje jedinečnou kombinaci hodnot. Z toho plyne, že není možné, aby stejná kombinace hodnot, které vedla k nulovému rozdílu, byla i na jiné pozici, neboť by se pak nejednalo o snímač absolutní pozice.

3.2.2 Součet čtverců rozdílů

První způsob výpočtu podobnosti byl realizován jako měření délek mezi odpovídajícími si průběhy snímače pozice a jeho modelu. Toto lze interpretovat též jako součet čtyř vzdáleností v jednorozměrném prostoru, neboť hodnoty jednotlivých průběhů jsou na sobě nezávislé. Další možností je pak uvažovat o průbězích snímače i modelu jako o dvojici bodů ve čtyřrozměrném prostoru, přičemž rozdíl mezi hodnotami v jednotlivých směrech je reprezentován parciálními rozdíly. Vzdálenost mezi dvěma body ve vícerozměrném prostoru je odmocnina ze součtu čtverců vzdáleností v jednotlivých rozměrech. Tento poznatek je základní pilíř pro druhý způsob výpočtu podobnosti. Výpočtu podobnosti pak probíhá podle předpisu (8) a výsledný průběh rozdílové funkce je možné nalézt na obr. 6.

$$\delta_{sw,vw,sqr}(\varphi_{sw}) = (\Delta_{sin_N1}(\varphi_{sw}))^2 + (\Delta_{cos_N1}(\varphi_{sw}))^2 + (\Delta_{sin_N2}(\varphi_{sw}))^2 + (\Delta_{cos_N2}(\varphi_{sw}))^2 \quad (8)$$

Nyní je třeba vyšetřit, zda i tato funkce splňuje hlavní požadavek na rozdílovou funkci, tedy existenci globálního minima na pozici $\varphi_{vw} = \varphi_{sw}$. Při porovnání předpisu (7) pro výpočet podobnosti pomocí součtu absolutních hodnot s předpisem (8) je zřejmá jistá podobnost a na výpočet podobnosti jako čtverce rozdílů lze pohlížet jako na rozšíření předchozí funkce. Stejně jako absolutní hodnota čísla, tak i druhá mocnina čísla zajišťuje existenci pouze kladných hodnot v rozdílové funkci, a tudíž platí stejný argument pro existenci globálního minima na pozici $\varphi_{vw} = \varphi_{sw}$ jako v kapitole 3.2.1.

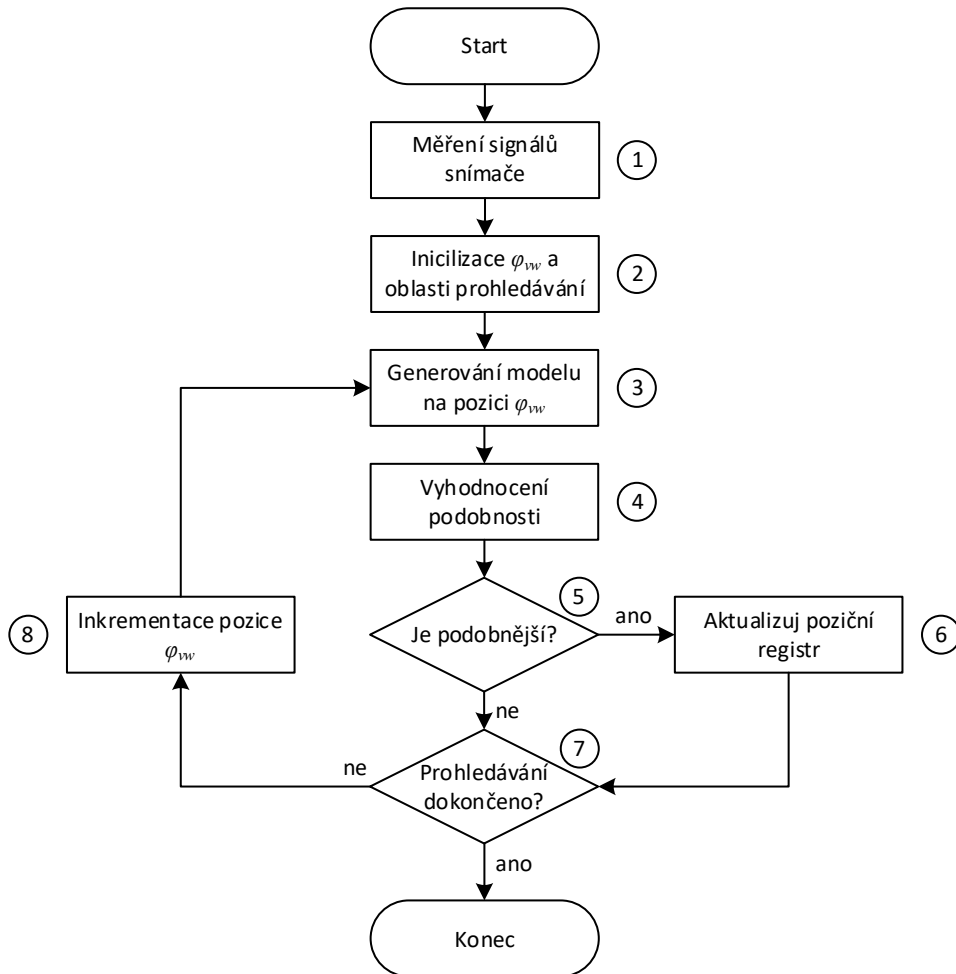


Obr. 6: Průběh rozdílové funkce (součet čtverců rozdílů) na jedné pozici

3.3 Postup výpočtu pozice numerickou metodou

Na začátku kapitoly 3 byla nastíněna základní myšlenka numerické metody výpočtu pozice a identifikovány základní funkce, které tato metoda vyžaduje. V následujících dvou podkapitolách byly tyto abstraktní funkce představeny a analyzovány některé jejich důležité vlastnosti. V těchto kapitolách se s těmito dílčími funkcemi pracovalo jako s celkem – při rozboru modelu snímače byl vždy vytvořen kompletní model přes celou otočku a stejně tak výpočet podobnosti byl proveden s kompletním modelem a výsledná rozdílová funkce popisovala rozdílnost přes celou otočku. Zatímco pro účely analýzy jednotlivých funkcí je tento přístup nutný, pro praktické použití této metody je nevhodný. Pokud by byl výpočet pozice realizován stejným způsobem jako simulace a analýzy v předchozích dvou kapitolách, pak by bylo třeba nejprve vygenerovat celý model, ten následně použít pro výpočet podobnosti přes celou otočku a následně nalézt minimum výsledné rozdílové funkce (největší podobnost). V takovém případě každý výpočet vyžaduje značné množství paměti pro vytvoření modelu a uložení vypočtené rozdílové funkce a zároveň velké množství dílčích operací. Určení každé nové pozice by takto trvalo nepřiměřeně dlouho a taková metoda by byla v praxi nepoužitelná. Postup při výpočtu pozice je tedy třeba optimalizovat jak z hlediska paměťové náročnosti, tak i výpočetní náročnosti.

Paměťově efektivní přístup při výpočtu numerické metody vyžaduje proložení jednotlivých dílčích funkcí a zahrnuje postupné generování modelu pro daný úhel natočení, výpočet podobnosti na tomto vzorku a následné porovnání podobnosti s předchozí nejlepší hodnotou. Potom, co jsou všechny výpočty na daném úhlu natočení modelu φ_{vw} provedeny, je možné pokročit k výpočtu na dalším úhlu natočení modelu. Paměťově efektivní postup při výpočet pozice numerickou metodou lze také definovat pomocí algoritmu vyobrazeném na vývojovém diagramu na obr. 7.

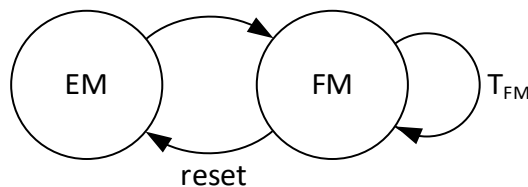


Obr. 7: Sekvence výpočtu pozice numerickou metodou

Druhým praktickým omezením je velká výpočetní náročnost, kterou lze vyjádřit jako počet elementárních operací nutných k výpočtu nové pozice. Nejlepší možností je snížení celkového počtu kroků výpočtu. Jak už bylo uvedeno výše, “krok výpočtu“ odpovídá jednomu úhlu natočení modelu snímače. Cílem tohoto přístupu je tedy snaha snížit množství úhlů φ_{vw} , pro které je výpočet proveden. Tohoto lze dosáhnout dvěma způsoby – zvýšením granularity modelu (to znamená generovat méně vzorků modelu na otočku) či snížením velikosti prohledávané oblasti. První uvedený přístup,

tedy zvýšení granularity modelu, zároveň znamená snížení úhlového rozlišení a v důsledku i snížení rozlišení vypočtené pozice. V některých aplikacích, kde je požadováno vysoké rozlišení, může být tento přístup nežádoucí. Druhý zmíněný přístup, tedy zmenšení prohledávané oblasti, pak neovlivňuje rozlišení vypočtené pozice, ale zároveň nezajišťuje, že bude nalezeno globální minimum rozdílové funkce, pokud se toto minimum nevyskytuje v prohledávané oblasti. Při zmenšení prohledávané oblasti je tedy nutné zajistit, aby byla nová pozice aktualizována dostatečně často tak, aby se mechanismus nikdy nemohl za dobu mezi dvěma po sobě jdoucími výpočty pozice otočit mimo oblast prohledávání.

Při prvním výpočtu pozice však neexistuje informace o předchozí pozici, a v takovém případě není možné omezit oblast prohledávání. V praxi bude tedy numerická metoda vyžadovat dva funkční režimy, a to *režim úplného prohledávání* a *režim zrychleného prohledávání*, které je pak třeba vhodně přepínat jak je naznačeno na obr. 8.



Obr. 8: Přepínání režimů numerické metody

Výpočet pozice v *režimu úplného prohledávání* (označován zkratkou EM z anglického Exhaustive mode) vyžaduje prohledání celého modelu snímače. Přestože je takový výpočet časově náročný, je třeba ho provést jen jednou, a každé další určení pozice je prováděno v režimu zrychleného prohledávání. V tomto režimu lze sáhnout i ke snížení granularity modelu v případě, pokud je následně proveden přesný výpočet pozice v režimu zrychleného prohledávání.

Výpočet pozice v *režimu zrychleného prohledávání* (označován zkratkou FM z anglického Fast Mode) probíhá jen na omezené oblasti modelu snímače. Doba výpočtu nové pozice je v tomto režimu výrazně kratší a závisí na velikosti prohledávané oblasti a úhlovém rozlišení modelu snímače. Jak už bylo zmíněno výše, výpočet v tomto režimu by měl probíhat periodicky tak, aby mechanismus při maximální rychlosti otáčení neopustil oblast prohledávání. Vztah mezi periodou výpočtu, maximální rychlostí a velikostí prohledávané oblasti je dán vztahem (9).

$$\varphi_{sw,FM_area} > \frac{\omega_{max}}{T_{FM}} \quad (9)$$

3.4 Tolerance metody ke změně parametrů snímače

Jedním z požadavků na novou metodu výpočtu pozice byla jeho tolerance proti změně parametrů senzoru. Nejprve však bude nutné definovat pojem *tolerance* v kontextu numerické metody. Obecně lze očekávat, že změna parametrů snímače bude mít vliv na přesnost vypočtené pozice. V následujícím textu budou používány dva termíny vyjadřující toleranci metody, a to

- *robustnost* metody, která znamená, že vypočtená pozice je dostatečně přesná pro zajištění *správné funkce systému*
- a *přesnost* metody, která určuje chybu pozice vzhledem k požadavkům na *přesnost systému*.

Pro lepší pochopení významu *robustnosti* metody je třeba uvažovat typický scénář jejího použití, který byl naznačen už v předchozí kapitole. Nejprve (např. po spuštění) je proveden výpočet v režimu úplného prohledávání k nalezení počáteční pozice a následně je tato pozice použita pro první běh výpočtu v režimu zrychleného prohledávání, který je nadále používán během otáčení mechanismu. Pro správnou funkčnost takového systému musí být vypočtená pozice dostatečně blízká skutečné pozici, aby byla zajištěna správná funkce zbytku systému. Příklad takového systému bude představen v kapitole 5, kdy dostatečně přesná pozice zajišťuje správnou funkci procesu automatické aktualizace koeficientů a vektorového řízení motoru. Na tomto místě nebude diskutováno, jak přesná pozice musí být (toto bude zřejmé až po seznámení se s vzorovým systémem v kapitole 5), zde bude pouze konstatováno, že metoda je dostatečně robustní, pokud je při změně parametrů snímače vypočtena pozice ve správné periodě snímače pozice.

Analýza tolerance metody ke změně parametrů bude provedena zvláště pro oba režimy prohledávání. Nejprve bude rozebrána tolerance v režimu úplného prohledávání. V tomto režimu je důležitá především *robustnost*, neboť při typickém použití metody je při přepínání režimů z obr. 8 tento režim vždy následován režimem zrychleného prohledávání a vypočtená pozice je záhy aktualizována. Toleranci metody v režimu zrychleného prohledávání je pak třeba vyhodnotit z hlediska robustnosti i přesnosti.

3.4.1 Robustnost metody v režimu úplného prohledávání

V kapitole 3.2 bylo hledání pozice představeno jako úkol určení minima diferenční funkce v prohledávané oblasti, přičemž prohledávaná oblast se liší v závislosti na režimu prohledávání. V případě režimu úplného prohledávání se jedná o globální minimum. Při změně parametrů signálů snímače dochází ke změně tvaru rozdílové funkce a je tak možné, že globální minimum této funkce neodpovídá skutečné pozici.

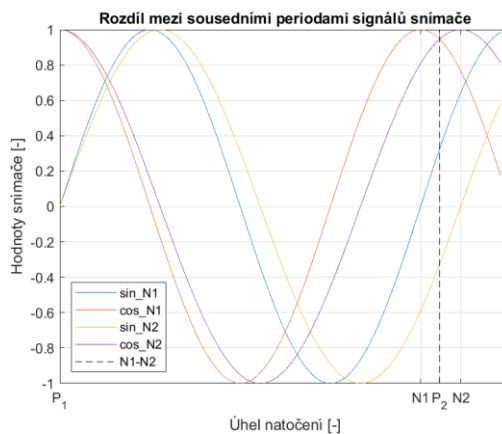
Rozdílová funkce se může měnit dvěma způsoby, mohou se změnit hodnoty všech lokálních minim a zároveň se může měnit úhel, na kterém se lokální minima nacházejí. V prvním případě, kdy se mění hodnoty lokálních minim, může nastat situace, kdy hodnota minima na správné pozici stoupne natolik, že je vyšší než některé jiné lokální minimum. Je tedy vhodné hovořit spíše o rozdílu hodnot sousedních lokálních minim, které se zmenšuje. Z průběhů na obr. 5 je patrné, že globální minimum je vždy doplněno postranními lokálními minimy, levým minimem a pravým minimem. Vzdálenost mezi globálním minimem a sousedním lokálním minimem je vždy stejná a odpovídá střední hodnotě délky periody. Pokud pozici globálního minima označíme P_1 a pozici sousedního lokálního minima P_2 , pak je vzdálenost dána dle předpisu (10). V případě takové změny rozdílové funkce bude vypočtená pozice chybná o násobky střední délky periody $|P_1 - P_2|$ a pozice bude vypočtena v nesprávné periodě.

$$|P_1 - P_2| = \frac{360^\circ}{\frac{N_1 + N_2}{2}} \quad (10)$$

Druhým případem je změna úhlu, na kterém se lokální minima vyskytují. Toto zřejmě povede k chybně vypočtené pozici, která však, pokud hodnota lokálního minima na správné pozici nepřesáhne hodnotu žádného jiného lokálního minima (bude se tedy vždy jednat o globální minimum nezávisle na změně parametrů snímače), bude vždy ve správné periodě signálu. Tento případ má dopad pouze na přesnost metody, nikoliv však na její robustnost.

Z numerických simulací lze odhadnout, při jaké velikosti chyby dochází k přeskočení do chybné periody. Takový přístup je však časově náročný a náchylný k chybám, neboť je třeba pro každý snímač identifikovat nejhorší případ a následně studovat průběh globálního minima a postranních lokálních minim rozdílové funkce. Existuje však odlišný způsob, jak stanovit maximální změnu parametrů snímače při zachování robustnosti metody. Je totiž možné k problematice přistoupit z opačné strany, a to z rozboru signálů samotného snímače pozice. Z předchozích úvah plyne,

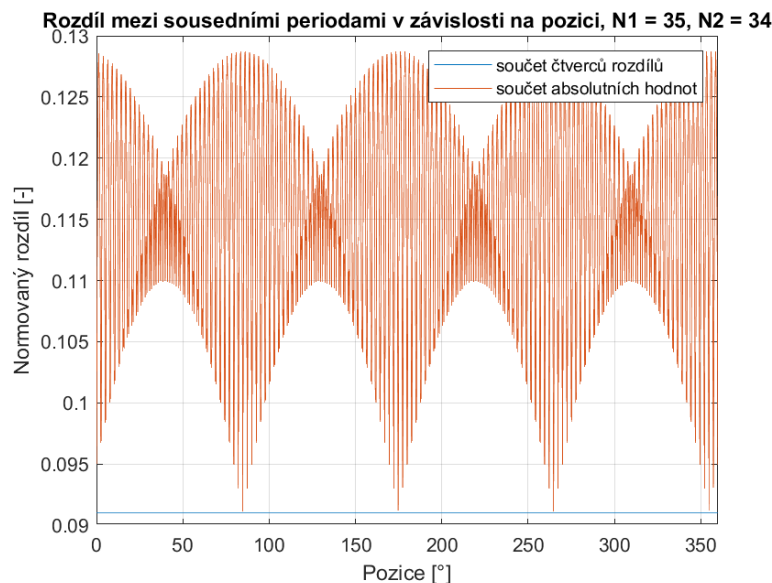
že tolerance metody je dána rozdílem mezi globálním minimem rozdílové funkce a postranními lokálními minimy, jejichž vzdálenost je závislá na počtu zubů snímače a odpovídá střední délce periody podle (10). Jedná se tedy o rozdíl mezi hodnotou podobnosti modelu a snímače na pozicích $\{\varphi_{sw,P1}, \varphi_{vw,P1}\}$ a $\{\varphi_{sw,P1}, \varphi_{vw,P2}\}$. V případě ideálního snímače je však tento rozdíl ekvivalentní k rozdílu mezi podobnostmi na pozicích $\{\varphi_{sw,P1}, \varphi_{vw,P1}\}$ a $\{\varphi_{sw,P2}, \varphi_{vw,P1}\}$, protože v případě záměny úhlů dojde pouze k prohození jednotlivých hodnot, ale jejich vzdálenost se nezmění. V předchozích hodnotách podobnosti na různých úhlech lze zaměnit hodnoty snímače pozice a modelu snímače, aniž by se změnil výsledek výpočtu. Z tohoto lze tedy odvodit jeden důležitý poznatek, robustnost metody je dána jen rozdílem mezi hodnotami snímače na pozicích $\{\varphi_{sw,P1}, \varphi_{sw,P2}\}$.



Obr. 9: Robustnost jako rozdíl mezi sousedními periodami

Z průběhů ideálního snímače pak lze určit hodnoty jednotlivých signálů na dvou různých úhlech $\varphi_{sw,P1}$ a $\varphi_{sw,P2}$ vzdálených přesně o střední délku periody (obr. 9) a následně určit jejich podobnost. K tomu je možné vzít si na pomoc metody z kapitol 3.2.1 a 3.2.2 a modifikovat je tak, že namísto výpočtu podobnosti mezi modelem snímače a snímačem pozice počítají podobnost mezi dvěma hodnotami snímače pozice na různých úhlech. Takto vypočtené podobnosti však ještě přímo neudávají hodnotu tolerance, neboť jejich hodnoty záleží na rozkmitu signálu. V případě výpočtu podobnosti metodou součtu čtverců rozdílů je pak hodnota podobnosti druhou mocninou vzdálenosti a výsledek je tedy v jiných jednotkách než při výpočtu podobnosti jako součtu absolutních hodnot rozdílů. Před samotným výpočtem tolerance je třeba provést normování, aby hodnoty rozdílnosti nebyly ovlivněny vlastnostmi signálů snímače a metody vyhodnocení.

Nyní je možné určit hodnoty rozdílnosti průběhů snímače v sousedních periodách. Toto lze nejnázorněji provést numerickou simulací, ve které jsou vypočteny hodnoty rozdílnosti mezi hodnotami signálů snímače ve vzdálenosti $|P_1 - P_2|$ pro všechny jeho pozice. Výsledek simulace pro obě metody vyhodnocení podobnosti je na obr. 10.

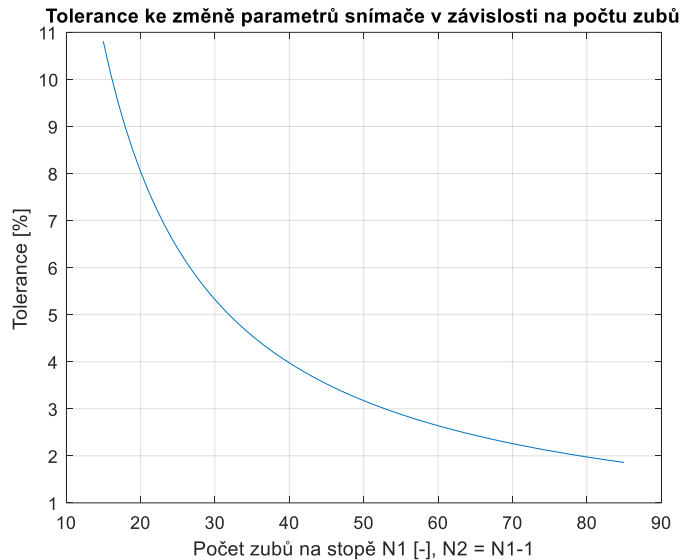


Obr. 10: Rozdíl mezi sousedními periodami v závislosti na pozici

Na první pohled by se mohlo zdát, že tolerance metody při použití součtu absolutních hodnot rozdílů je lepší v porovnání s metodou součtu čtverců rozdílů, neboť takto vypočtená rozdílnost je vyšší s výjimkou několika málo hodnot. Toto však není pravda, neboť chování rozdílové funkce při změně parametrů snímače záleží na pozici. A právě onen nejhorší případ z hlediska tolerance metody se projevuje na pozicích, kde je hodnota rozdílnosti mezi sousedními periodami nejmenší. Na základě předchozích poznatků je konečně možné stanovit hodnotu tolerance numerické metody při změně koeficientů. Tolerance numerické metody je dána polovina hodnoty rozdílnosti mezi sousedními periodami. Ona polovina se v tomto vztahu vyskytuje proto, že se jedná o vzdálenost globálního minima k postranním maximům. Za těmito hodnotami pak vypočtená pozice „sklouzne“ do postranního lokálního minima a pozice je vypočtena ve špatné periodě.

Z předcházející analýzy lze odvodit jeden poznatek, tolerance metody v režimu úplného prohledávání nezáleží na zvolené metodě vyhodnocení podobnosti či na dalších vlastnostech numerické metody, naopak je dána jen jediným parametrem snímače, a to počtem zubů N_1 a N_2 na kole snímače. S využitím vztahů uvedených v této kapitole lze tedy vytvořit závislost tolerance na chybě snímače pro různé velikosti kole snímače

a její průběh je vykreslen na obr. 11. Z tohoto průběhu lze odvodit jeden zajímavý poznatek, a to že tolerance klesá s velikostí kola snímače. Pro dosažení co nejlepší tolerance by tedy bylo vhodné použít snímač s malým počtem zubů.



Obr. 11: Tolerance metody ke změně parametrů snímače v závislosti na počtu zubů

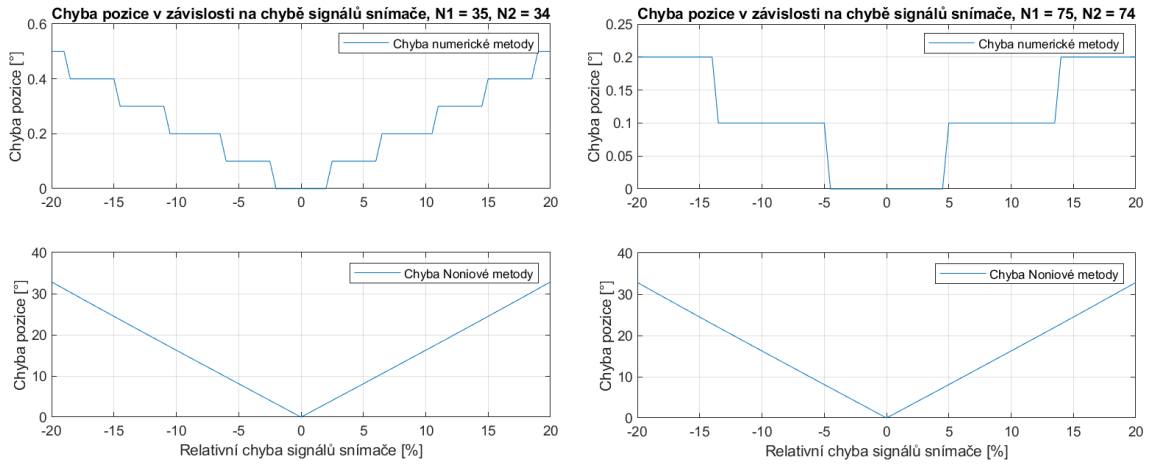
3.4.2 Tolerance metody v režimu zrychleného prohledávání

Tolerance metody v režimu zrychleného prohledávání bude analyzována jak z hlediska její robustnosti, tak i přesnosti. V předchozí kapitole se numerická metoda ukázala být robustní v případě, že nedošlo k přeskoku na nesprávné lokální minimum vzdálené přesně o $|P_1 - P_2|$. Při bližším pohledu na průběhy rozdílové funkce na obr. 5 a obr. 6 je patrné, že přibližně do vzdálenosti $\frac{|P_1 - P_2|}{2}$ od globálního minima rozdílová funkce spojitě narůstá. Pokud je pak oblast prohledávání ve zrychleném režimu nastavena dostatečně malá, v takové oblasti se bude nacházet pouze jedno lokální minimum a při postupném prohledávání modelu bude hodnota detekovaného minima k lokálnímu minimu v aktuální periodě přirozeně klouzat. Numerická metoda je v režimu zrychleného prohledávání robustní už ze své povahy, pokud je dodržen předpis (11).

$$\varphi_{sw,FM_area} < \frac{|P_1 - P_2|}{2} \quad (11)$$

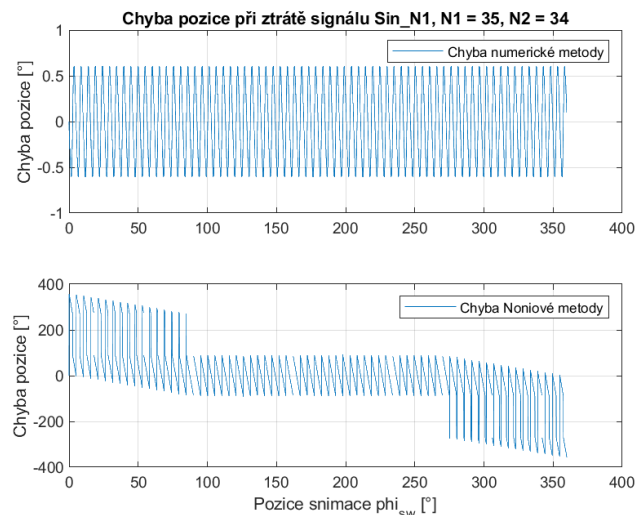
Druhou analyzovanou vlastností je *presnost* numerické metody. Zdá se, že zde bohužel neexistuje žádný způsob, jak tuto vlastnost analyzovat jiným způsobem než numerickou simulací na velkém vzorku dat. Vzhledem k velkému množství výsledků daný počtem všech kombinací jsou zde uvedeny pouze souhrnné výsledky. Na obr. 12 je uvedena

maximální chyba vypočtené pozice, která byla při dané velikosti chyby koeficientů snímače na pozicích přes celou otočku nalezena.



Obr. 12: Maximální chyba výpočtu pozice v závislosti na chybě signálů snímače

Přesnost a zároveň i robustnost výpočtu pozice numerickou metodou v režimu zrychleného prohledávání lze také demonstrovat na extrémním případě, kterým je ztráta jednoho ze signálů snímače. V takovém případě se v průběhu otáčení jeden signál nemění a drží konstantní hodnotu po celou otočku. Jak je možné vidět na obr. 13, i v takovém případě však dokáže tato metoda nalézt přibližně správnou pozici především při porovnání s referenčním výpočtem pozice, jejíž chyba je v rozsahu $\pm 360^\circ$, a to i přes to, že se jedná o poruchu a obecně nelze očekávat, že určení pozice bude fungovat správně.



Obr. 13: Chyba výpočtu pozice při ztrátě jednoho signálu snímače

3.5 Přesnost výpočtu pozice numerickou metodou

Jako hlavní zdroje možných nepřesností při výpočtu pozice byly při odvození numerické metody identifikovány

- nepřesnost zjednodušeného modelu vzhledem k reálným průběhům snímače,
- konečné rozlišení vstupních dat a zároveň konečné rozlišení hodnot modelu snímače a
- konečné úhlové rozlišení modelu snímače.

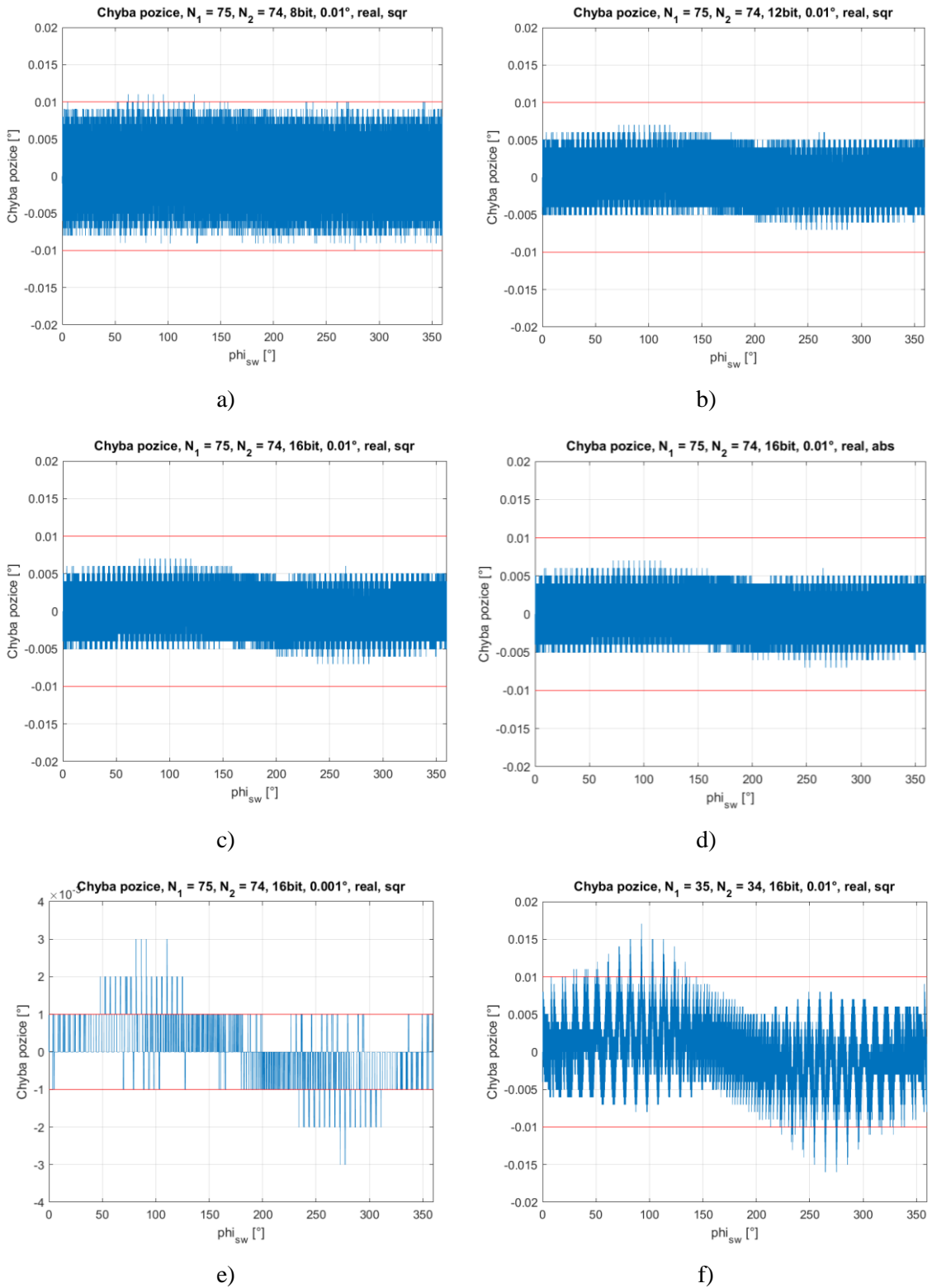
Přestože jednotlivé dílčí chyby byly v předchozích úlohách také kvantifikovány, výslednou chybu vypočtené pozici nelze získat pouhým součtem jednotlivých chyb a je třeba provést simulace s rozmítáním jednotlivých parametrů. Při rozmítání všech parametrů je výsledkem velké množství výsledků dané počtem kombinací parametrů. V této kapitole jsou ukázány jen výsledky vybraných simulací (obr. 14), z kterých lze vyvodit důležité závěry a potvrdit či vyvrátit poznatky z předchozích kapitol.

Chyba určení pozice s výpočtem podobnosti jako součtem čtverců rozdílů (obr. 14 c)) a součtem absolutních hodnot rozdílů (obr. 14 d)) je v obou případech prakticky stejná. Zdá se, že volba způsobu výpočtu podobnosti má na přesnost pozice zanedbatelný vliv.

Další závěr, který lze na základě naměřených dat učinit, je nižší přesnost vypočtené pozice v případě snímače s nižším počtem zubů (obr. 14 f)). Toto je v souladu s tvrzením výrobce snímače [3] a zároveň je tím potvrzena přesnost metody, kdy výrobce uvádí, že se snímačem s parametry jako na obr. 14 d) lze dosáhnout přesnosti pozice odpovídající 16-bitovému úhlovému rozlišení, což je přibližně $0,005^\circ$. Na tomto místě je pak možné uvažovat nad jiným důvodem pro horší přesnost vypočtené pozice v případě snímače s menším počtem zubů. Počet zubů přímo ovlivňuje délku úseků v modelu snímače, které v tomto případě mohou být příliš dlouhé pro přesnou aproximaci měnící se charakteristiky amplitudy a fáze.

Poslední poznatkem, který lze z výsledků vyvodit, je limit přesnosti vypočtené pozice kvůli konečnému úhlovému rozlišení modelu snímače. Chyba vypočtené pozice na obr. 14 d) je jen nepatrně vyšší než $0,005^\circ$, což je limit přesnosti při úhlovém rozlišení $0,01^\circ$. Je tedy možné konstatovat, že chyby modelu při dostatečně přesné aproximaci jsou při výpočtu pozice zanedbatelné. Toto je nejvíce patrné při ještě jemnějším rozlišení $0,001^\circ$ modelu snímače jako na obr. 14 e), kde chyba vypočtené

pozice kopíruje charakteristiku parametrů modelu a je tedy dominantně způsobena chybou modelu snímače.



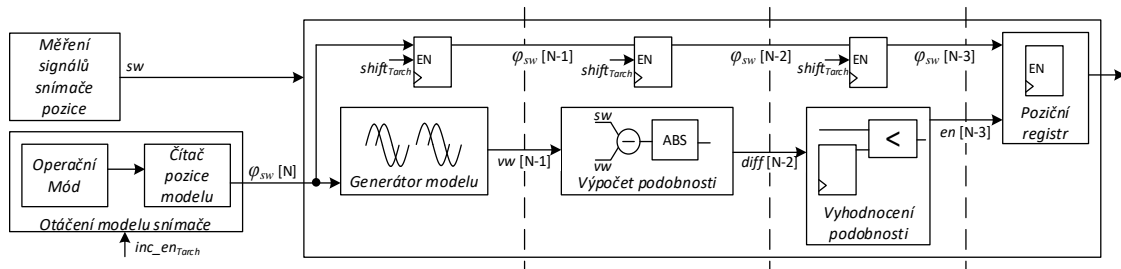
Obr. 14: Chyba výpočtu pozice pro vybrané parametry

4 Implementace numerické metody v FPGA

Jedním z požadavků při vymezení cíle dizertační práce bylo zohlednit při návrhu metody její vhodnost pro implementaci do obvodu FPGA. V této kapitole budou představeny různé architektury lišící se svými vlastnostmi, především pak dobou výpočtu jedné pozice a využitím zdrojů v obvodu. Je třeba zdůraznit, že se nejedná o úplný výčet všech možností a zcela jistě lze nalézt jiný způsob, jak provést implementaci. Vybrané architektury, které budou v této kapitole představeny, budou porovnány z hlediska očekávané doby výpočtu při vyhodnocení jednoho úhlu modelu snímače a množství zdrojů v obvodu FPGA potřebných pro jejich implementaci. Množství zdrojů bude odhadováno na základě počtu registrů, které jsou třeba pro ukládání dat.

Nejjednodušší architektura výpočtu pozice vychází přímo z algoritmu na obr. 7. Jedná se o *sekvenční výpočet*, při kterém je při výpočtu postupováno následujícím způsobem: Nejdříve jsou vytvořeny hodnoty modelu, v následujícím kroku je vypočtena hodnota podobnosti a v posledním kroku provedeno vyhodnocení podobnosti. Potom se výpočet přesune na další úhel a probíhá znovu. Taková implementace je nejefektivnější z hlediska využití zdrojů. Pro práci s daty totiž stačí nejmenší množství registrů a veškeré aritmetické operace lze provádět na aritmetické jednotce sdílené mezi všemi funkčními bloky. Taková architektura však bude mít nejhorší výpočetní výkon, protože výpočet je prakticky identický se způsobem, jak by byl prováděn v mikrokontroléru a nejsou zde využity žádné výhody, které přináší použití obvodu FPGA.

Architektura založená na periodickém otáčení modelu bude nazývána *jednoduché zřetězení výpočtu* a její struktura je na obr. 15. Funkční bloky jsou v tomto případě doplněny posuvným registrem, který nese informaci o úhlu natočení v každém stupni zřetězení. K posunu hodnoty úhlu v registru dochází periodicky se stejnou periodou jako inkrementace čítače pozice modelu. Množství potřebných zdrojů je oproti sekvenční architektuře vyšší, neboť hodnoty vypočtené každým blokem musí být uloženy v registrech k tomu určených a tyto datové registry nelze mezi jednotlivými bloky sdílet. Navíc je součástí této architektury posuvný registr, který dále zvyšuje počet požadovaných registrů.



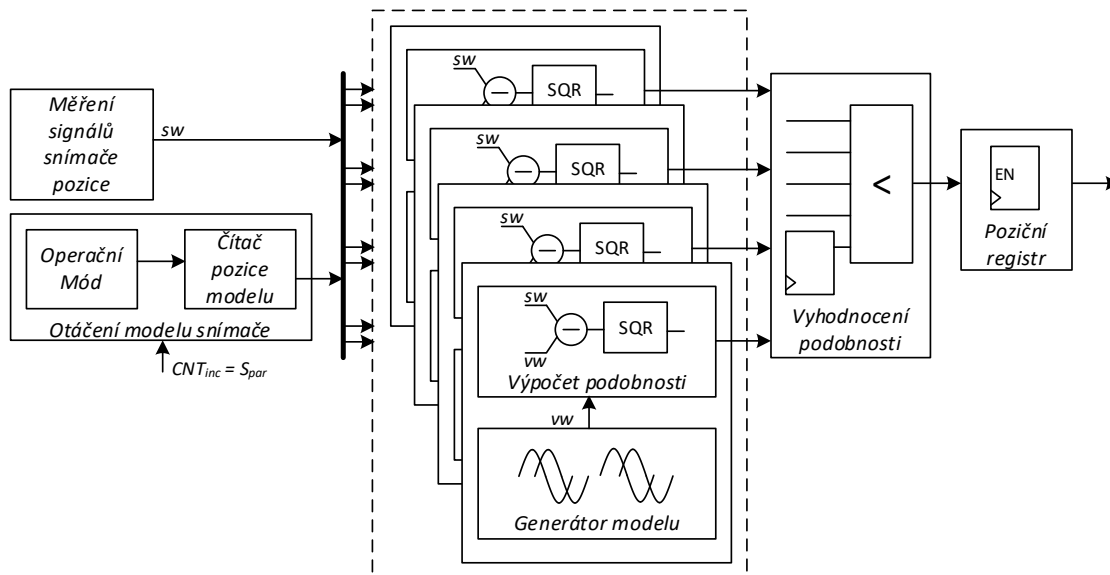
Obr. 15: Architektura jednoduchého zřetězení výpočtu pozice

Architekturu s jednoduchým zřetězením lze ještě dále optimalizovat z hlediska doby výpočtu jednoho vzorku podobnosti. architektura bude nazývána *úplné zřetězení výpočtu* a umožňuje vypočítat hodnotu podobnosti v každém hodinovém taktu. Její struktura je pak podobná té na obr. 15, přičemž délka posuvného registru bude odpovídat celkovému počtu stupňů zřetězení a inkrementace čítače pozice probíhá v každém hodinovém cyklu. Doba výpočtu jedné pozice je přesně perioda hodinového signálu a je to nejlepší hodnota kterou lze díky zřetězení výpočtu dosáhnout. Využití zdrojů však bude v porovnání s předchozími architekturami největší, neboť je třeba v průběhu výpočtu ukládat všechna data mezi jednotlivými stupni.

Předtím, než bude diskutováno další možné zrychlení výpočtu pozice, bude představena ještě jedna architektura odvozená z úplného zřetězení výpočtu. Generátor modelu i výpočet podobnosti pracují se čtveřicí dat (tedy počtem signálů, které jsou generovány snímačem pozice během otáčení). V předchozím případě model snímače generoval v každém hodinovém cyklu čtveřici nových hodnot a výpočet podobnosti je následně vyhodnocoval. Přestože výpočet uvnitř jednotlivých bloků byl označen jako zřetězený, tyto bloky ve skutečnosti obsahovaly jistou paralelizaci výpočtů. Pro další úsporu potřebných zdrojů v obvodu FPGA je možné datovou cestu sdílet pro všechny čtyři stopy. Architektura založená na tomto přístupu bude nazývána *úplné zřetězení výpočtu se zřetězením datové cesty*. Za předpokladu, že oba zřetězené bloky obsahují nejvíce logiky, pak je možné tímto způsobem snížit spotřebu zdrojů téměř na čtvrtinu oproti předchozí architektuře plného zřetězení výpočtu za cenu prodloužení doby výpočtu na čtyřnásobek. Tato architektura představuje kompromisem mezi rychlostí výpočtu a spotřebou zdrojů v obvodu FPGA.

Pokud by bylo třeba ještě nadále zvýšit výpočetní výkon reprezentován jako počet vyhodnocených úhlů modelu snímače za danou dobu, je možné zvážit další techniku optimalizace výpočtu z hlediska jeho doby, a to paralelizaci. Příklad *paralelní architektury výpočtu pozice* je na obr. 16, kde je paralelizace výpočtu realizována

pomocí více bloků plně zřetěženého generátoru modelu a výpočtu podobnosti. Čítač pozice modelu je v každém hodinovém taktu inkrementován o stupeň paralelizace S_{par} a každá z paralelních cesta počítá podobnost na jiném úhlu natočení modelu. Vyhodnocení podobnosti je prováděno zároveň na hodnotách podobnosti vypočtených každou datovou cestou.



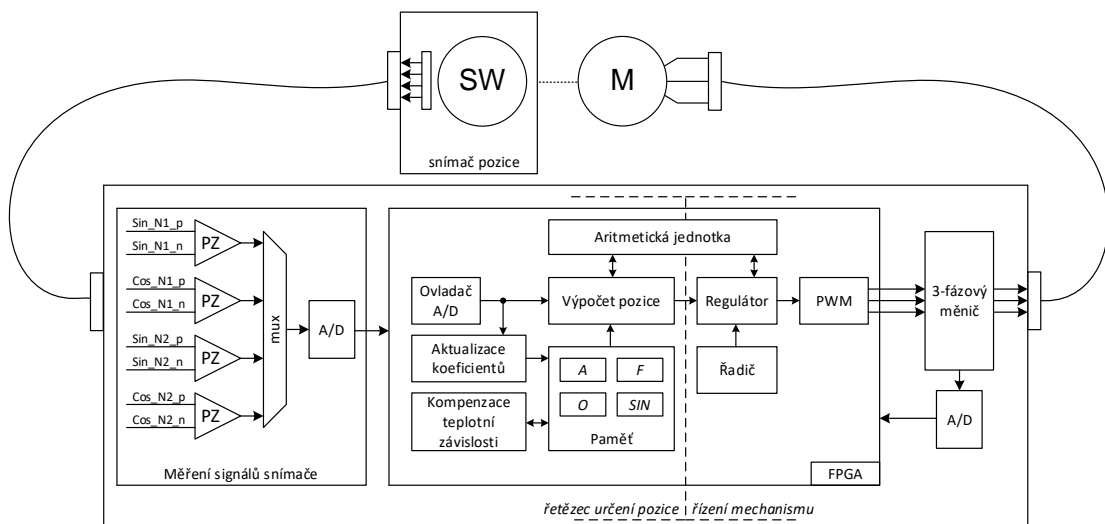
Obr. 16: Příklad paralelní architektury výpočtu pozice pro $S_{par} = 4$

5 Výpočet pozice v reálné aplikace

Metoda představená v této práci byla vyvinuta pro systém určený k řízení synchronního motoru v uzavřené smyčce využívající vektorové řízení pro dosažení maximální efektivity a přesnosti řízení motoru. Na celý systém se vztahuje sada požadavků, z nichž jsou pro výpočet pozice důležité následující:

- nominální úhlová rychlost otáčení mechanismu 12 otoček za minutu (RPM), maximální rychlost o 20% vyšší
- přesnost vypočtené pozice lepší než $0,015^\circ$,
- rozsah provozních teplot od -20° po $+40^\circ$,
- maximální autonomie s minimální nutností zásahu operátora
- a s tím spojená vysoká spolehlivost do celou dobu života systému stanovaná na minimálně sedm let.

Samotný systém lze rozdělit na dvě klíčové části, řetězec určení pozice a část pro řízení motoru (obr. 17). Řetězec určení pozice zahrnuje snímač absolutní pozice a diskrétní obvody pro zesílení a převod spojitého signálu na signál digitální, a v obvodu FPGA se nachází samotný výpočet pozice numerickou metodou a dva podpůrné bloky: modul pro automatickou aktualizaci koeficientů a modul pro kompenzaci teplotní závislosti čtecí hlavy snímače.



Obr. 17: Zjednodušená struktura systému pro testování výpočtu pozice

Snímač pozice je snímač absolutní pozice Vernierova typu se čtecí hlavou s magnetorezistivním elementem. Jedná se o stejný typ snímače, který byl blíže představen v kapitole 1. V této aplikaci byl pak zvolen snímač s následujícími parametry:

- počet zubů na první stopě 75 ($N_1 = 75$),
- počet zubů na druhé stopě 74 ($N_2 = 74$),
- diferenční výstupní signály,
- amplituda výstupního napětí maximálně 100mV.

Prvním funkčním blokem v celém výpočetním řetězci je *měření signálů snímače* zajišťující převod rozdílového výstupního napětí snímače na souhlasné napětí, jeho zesílení, filtraci a převod do digitální domény pomocí převodníku A/D. Vstupní část obvodu, zajišťující převod diferenčního napětí, jeho zesílení a filtraci, je realizována pomocí přístrojového zesilovače s integrovaným filtrem dolní propusti. Tento typ zesilovače byl zvolen především kvůli vysoké vstupní impedanci, díky níž nejsou výstupní signály snímače pozice zatíženy a nedochází k zanesení další chyby. Zesílené signály snímače jsou následně přivedeny na vstup 12-bitového převodníku A/D s osmivstupým analogovým multiplexerem. Převodník je ovládán z obvodu FPGA dedikovaným blokem, který generuje časování řídicích signálů a zajišťuje přepínání jednotlivých vstupů.

Modul *výpočtu pozice* implementuje samotný výpočtu pozice. Jedná se o modul implementující architekturu *úplného zřetězení výpočtu se zřetězením datové cesty*. Výpočet pozice v režimu zrychleného prohledávání je prováděn s periodou přibližně 85 μ s a prohledávaní oblast je byla stanovena na 0,15° při kmitočtu hodinového signálu 50 MHz.

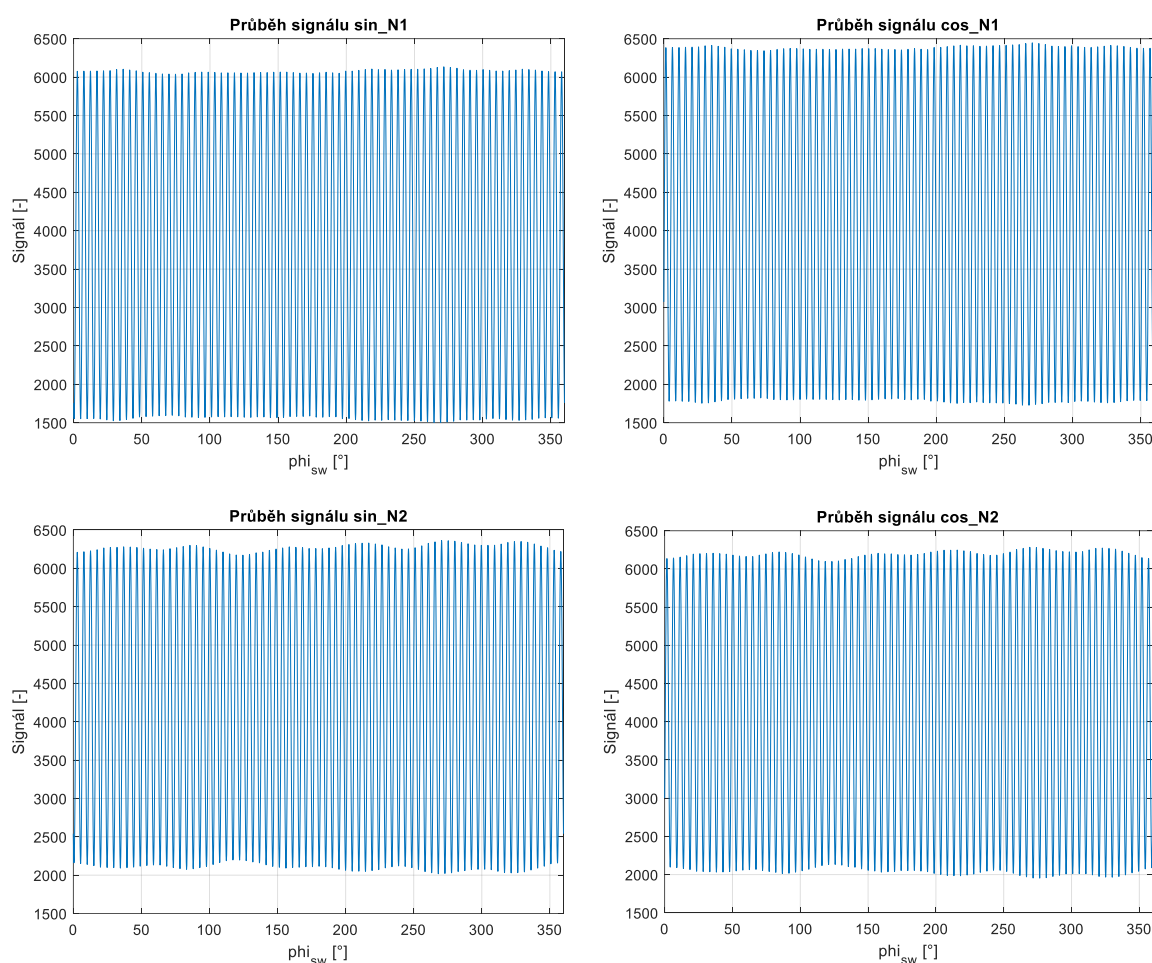
Automatická *aktualizace koeficientů* snímače probíhá vždy, nezávisle na tom, zda se mechanismus otáčí. Postup výpočtu nových koeficientů je stejný pro všechny čtyři průběhy.

Kompensace teplotní závislosti magnetorezistivního elementu snímače pozice je doplňková funkce, jejíž úkolem je minimalizovat rozdíl mezi modelem snímače, jehož charakteristiky byly vypočteny pro určitou teplotu, a průběhem snímače při odlišné teplotě. Zmenšení chyby modelu je dosaženo opravou jeho koeficientů, především pak amplitudy, která se s teplotou mění nejvíce. Úkolem tohoto modulu není

vytvořit co nejpřesnější model snímače, ale snížit rozdíl mezi koeficienty tak, aby byla zachována robustnost metody v režimu úplného prohledávání, tedy aby rozdíl mezi modelem a snímačem nebyl větší než 2 %.

5.1 Počáteční kalibrace

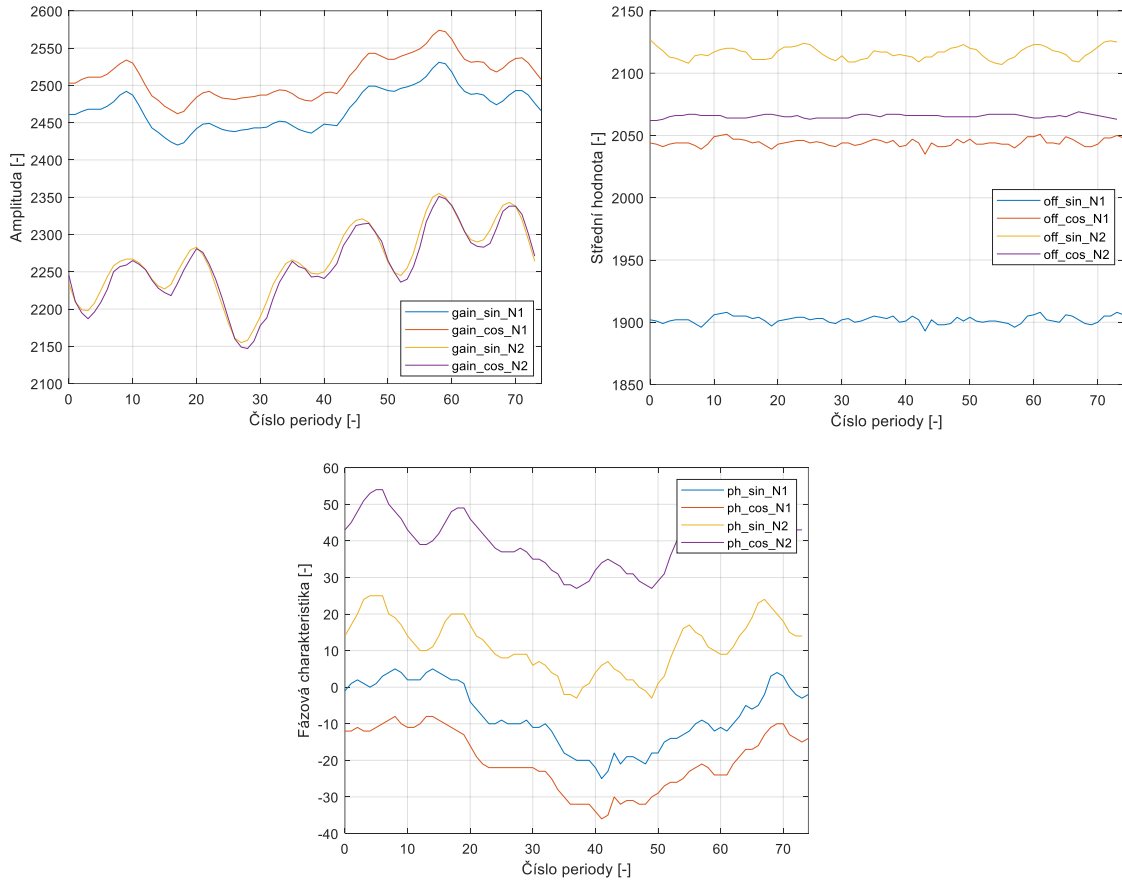
Prvním krokem, který je nutné provést při použití numerické metody, je sestavení modelu snímače, aby odpovídal průběhům skutečného snímače pozice osazeném na mechanismu. Pro sestavení modelu je třeba určit koeficienty snímače přes celou otočku. Toto je možné provést jen měřením všech signálů a následným výpočtem koeficientů.



Obr. 18: Ukázka průběhů signálů snímače

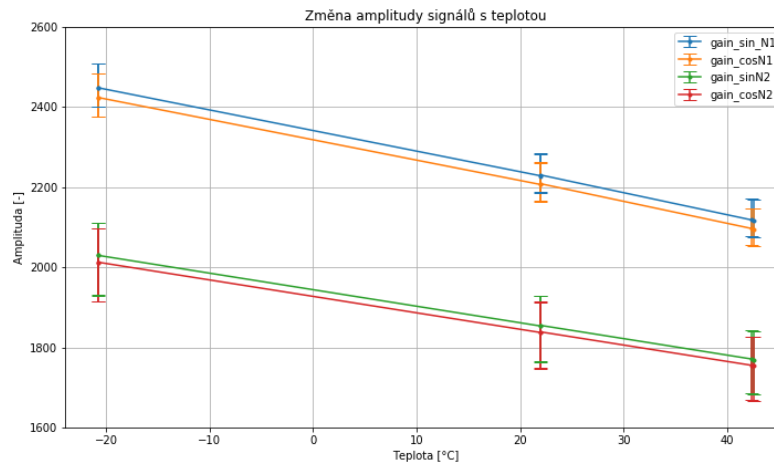
Ukázka průběhů signálů snímače naměřené na jednom z mechanismů lze nalézt na obr. 18 a vypočtené charakteristiky modelu snímače odpovídající těmto průběhům na obr. 19.

NOVÁ METODA ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLŮ ZE SNÍMAČE ABSOLUTNÍ POZICE



Obr. 19: Průběhy charakteristik modelu snímače

Poledním parametrem, který je třeba určit před samotným testováním je teplotní gradient amplitudy jednotlivých signálů snímače ∇_g . Pro výpočet gradientu je třeba zjistit hodnoty amplitudy pro různé teploty. Je tedy nutné umístit mechanismus do teplotní komory a krokovat teplotu pro získání dostatku dat na vytvoření teplotní charakteristiky. Výsledná teplotní charakteristika, ze které lze odečíst teplotní gradient amplitudy ∇_g je na obr. 20.

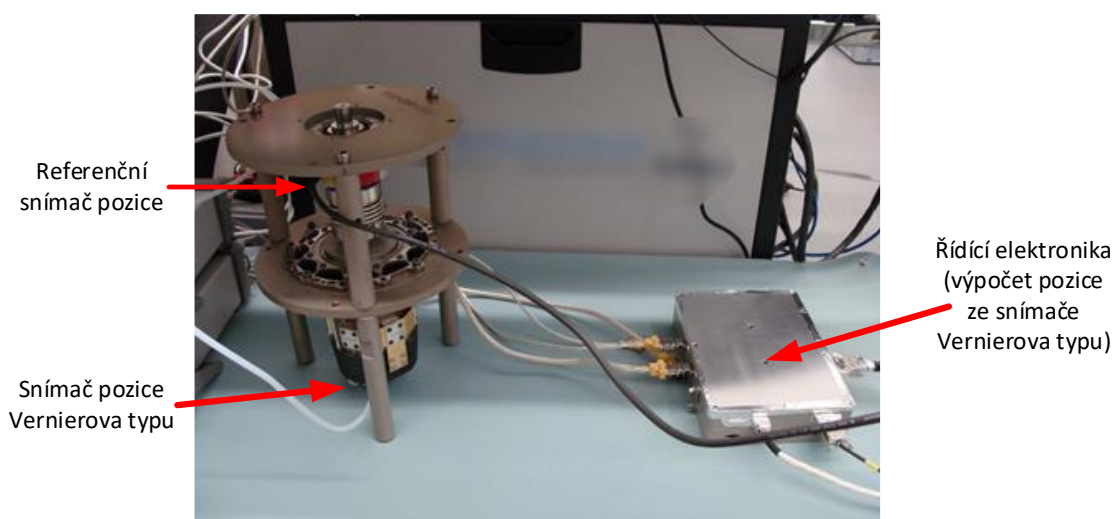


Obr. 20: Teplotní charakteristika snímače pozice

5.2 Testování

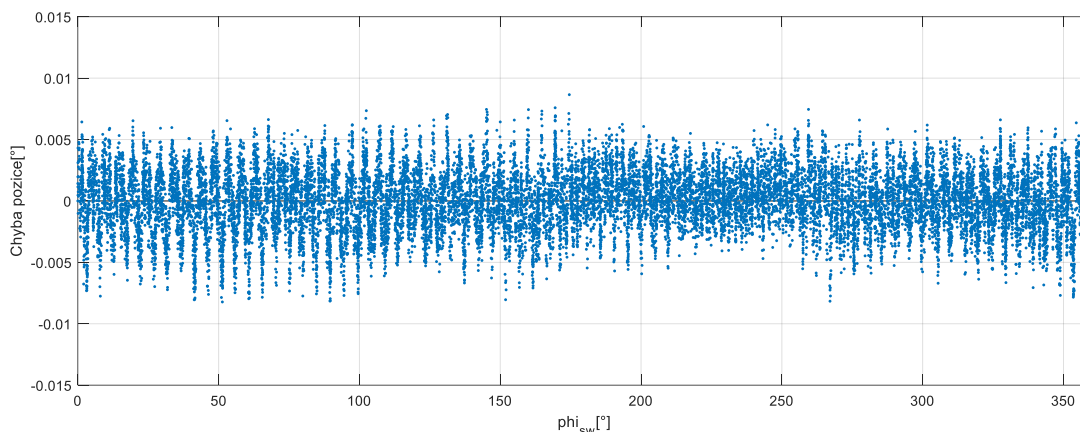
System složený z mechanismu a řídicí elektroniky byl podroben velkému množství testů, počínaje testy funkcionality dílčích částí a následně i celku, a konče řadou environmentálních testů. V této kapitole budou představeny pouze testy, které se nějakým způsobem týkají výpočtu pozice. Jedná se o sadu testů, při které je ověřena přesnost výpočtu pozice vzhledem k referenčnímu enkodéru a následně i spolehlivost výpočtu pozice (nebo také robustnost metody) přes celý teplotní rozsah.

Prvním testem, který byl s mechanismem proveden, bylo ověření přesnosti výpočtu pozice vzhledem k referenčnímu senzoru pozice. Jako referenční senzor pozice byl použit optický snímač typ RCN 2580 od společnosti Heidenhain s úhlovým rozlišením pozice až $\pm 2,5''$ který byl pevně spojen s mechanismem osazeným snímačem pozice Vernierova typu, jak lze vidět na obr. 21.



Obr. 21: Mechanismus s připojeným referenčním snímačem pozice

Během tohoto testu byl mechanismus postupně otáčen, přičemž v průběhu otáčení byla neustále počítána nová pozice pomocí numerické metody i referenčního senzoru. V průběhu testování se ukázalo, že není možné dostatečně přesně synchronizovat výpočet pozice pomocí numerické metody v FPGA a elektroniky zpracovávající data z referenčního snímače pozice a výsledek byl zatížen chybou. Aby byl potlačen vliv zpoždění, mechanismus byl postupně otáčen a zastaven na různých pozicích, na nichž byla následně určena pozice pomocí obou snímačů. Chyba vypočtené pozice změřena tímto způsobem je vynesena na obr. 22.



Obr. 22: Chyba pozice vzhledem k referenčnímu snímači pozice

Maximální chyba výpočtu pozice numerickou metodou byla v tomto testu určena jako $0,0087^\circ$ a požadavek na přesnost výpočtu pozice stanovený na začátku této kapitoly byl tedy splněn. Zároveň je možné si povšimnout, že chyba určení pozice na většině z testovaných úhlů je v intervalu $\pm 0,0055^\circ$, což odpovídá 16-bitovému rozlišení, s kterým je pozice počítána.

Dalším testem, kterému byl mechanismus podroben, je test v TVAC komoře, přičemž jedním ze sledovaných parametrů je spolehlivost vypočtené pozice v režimu úplného prohledávání. Výpočet pozice v režimu úplného prohledávání s kompenzací teplotní charakteristiky byl testován při teplotě 40°C a -20°C . Vzhledem k tomu, že je prakticky nemožné ověřit všechny možné pozice, bylo otestováno jen několik desítek náhodných pozic. V průběhu těchto testů byly také naměřeny hodnoty snímače pozice přes několik otoček a pro ověření spolehlivosti výpočtu pozice na všech dalších úhlech natočení byla následně provedena simulace s bitově přesným modelem algoritmu. Výsledky simulací bez teplotní kompenzace a s teplotní kompenzací jsou shrnuty v tab. 1. V simulaci modelu bez teplotní kompenzace byly použity koeficienty získané při počáteční kalibraci modelu snímače při teplotě přibližně 20°C a pro simulace s teplotní kompenzací byly počáteční koeficienty korigovány s pomocí modelu *kompenzace teplotní závislosti*.

Tab. 1: Spolehlivost výpočtu pozice přes teplotní rozsah

T_{coef}	T_{TVAC}	Počet úhlů			Chyba určení pozice	
		Celkem	Chybně	Správně		
20°C	40°C	165 468	526	164 942	0,32 %	bez kompenzace
20°C	-20°C	197 214	4 171	193 043	2,12 %	bez kompenzace
40°C	40°C	165 468	0	165 468	0 %	s kompenzací
-20°C	20°C	193 611	0	193 611	0 %	s kompenzací

6 Závěr

Předložená dizertační práce se věnovala vývoji nové metody výpočtu pozice ze signálů snímače absolutní pozice využívají Vernierova principu. Jako každé zařízení, ani takový snímač pozice není v reálném světě ideální a vyskytují se v něm přirozeně chyby ovlivňující průběhy výstupních signálů, které v důsledku mohou vést k horší přesnosti vypočtené pozice. Tradiční přístupy ke zpracování signálů tohoto snímače byly představeny v úvodu této práce. Hlavním znakem těchto metod je snaha o korekci chyb snímače předtím, než je ze signálů snímače dekodována informace o pozici. Toto je však také největším nedostatkem těchto metod, neboť pokud kompenzace není dokonalá a korigované signály se tedy liší od průběhů ideálního snímače pozice, chyba vypočtené pozice je přímo úměrná zbytkové chybě.

Oproti doposud běžně využívaným způsobům výpočtu se nová metoda liší už v základním konceptu přístupu k řešení této problematiky. Na chyby snímače nahlíží spíše jako na jeho vlastnosti, neboť i průběhy neideálního snímače stále nesou úplnou informaci o skutečném úhlu natočení. Namísto korekce signálů jsou vlastnosti snímače modelovány a v takovém modelu je hledána největší podobnost k hodnotám signálů skutečného snímače pozice na libovolném úhlu natočení. Vzhledem k absenci jednoznačného matematického předpisu pro převod hodnot signálů na úhel natočení tato metoda spíše reprezentuje numerické řešení problému.

Takto navržená metoda je však náročná z hlediska potřebného výpočetního výkonu pro určení každé nové pozice. V práci byly diskutovány některé možnosti, jak samotný výpočet pozice optimalizovat z hlediska doby výpočtu. Největší vliv na zkrácení doby výpočtu mělo omezení oblasti prohledávání modelu. Jak se posléze ukázalo, taková optimalizace má vedlejší efekt a takto implementovaný výpočet zajišťuje, že numerická metoda je velmi tolerantní k chybám snímače, či lépe řečeno ke změně vlastností snímače v průběhu života. Tato vlastnost byla demonstrována i na extrémním případě, jakým ztráta jednoho ze signálů snímače jistě je. Zatímco dosavadní způsoby výpočtu pozice v takovém případě zcela selhaly, numerická metoda dokázala stále dostatečně přesně určit skutečnou pozici. První cíl práce, kterým bylo vyvinout metodu robustní vůči chybám snímače, byl tedy splněn.

Další část práce se zabývala návrhem hardwarové struktury pro implementaci v obvodě FPGA. Výpočet pozice touto novou metodou se podařilo pro tyto účely upravit tak,

že vyžaduje pouze elementární operace, které je navíc možné zřetěžit a případně i paralelizovat. Na základě toho byly odvozeny různé architektury vhodné pro obvody FPGA, jež se liší dobou výpočtu a množstvím potřebným hardwarových zdrojů. Prakticky libovolně krátké doby výpočtu nové pozice pak lze dosáhnout volbou vhodné architektury s velkou mírou paralelizace. Cenou za to ovšem může být značný nárůst množství potřebných zdrojů a volba architektury by měla být kompromisem vycházejícím z požadavků kladených na cílovou aplikaci. V této části práce byla detailně představena implementace jedné konkrétní architektury, která dosahuje optimálního poměru doby výpočtu k množství potřebných hardwarových zdrojů. Díky možnosti snadno modifikovat architekturu výpočtu pro různé systémy lišícími se požadavky na parametry výpočtu pozice lze i zde konstatovat, že druhý cíl práce byl splněn.

V poslední části práce byla představena aplikace, ve které je tato nová metoda použita, a uvedeny testy vztahující se k výpočtu pozice, kterým byl takový systém podroben. Prvním testem bylo ověření přesnosti výpočtu pozice vzhledem k referenčnímu enkodéru s vysokým úhlovým rozlišením. Maximální chyba výpočtu pozice byla určena jako $0,0087^\circ$, přičemž chyba pozice na většině testovaných úhlech byla v intervalu $\pm 0,0055^\circ$. Taková chyba odpovídá bitovému rozlišení pozice 16 bitů a což je rozlišení, kterého je dle informací od výrobce možné dosáhnout s tímto typem snímače.

Dalším testem, kterému byl systém určení pozice byl také podroben, bylo ověření spolehlivosti výpočtu pozice při změně parametrů snímače vlivem teploty. Po prvních testech se ukázalo, že model snímače je třeba doplnit teplotní charakteristikou magnetorezistivního elementu pro spolehlivé určení počáteční pozice. Pokud však počáteční pozice byla určena správně, další úhly natočení snímače v průběhu otáčení byly vždy vypočteny správně nezávisle na teplotě okolí. Tímto testem tak bylo prokázáno, že tato nová metoda je dostatečně robustní i při použití v reálném systému.

Seznam použité literatury

- [1] GABRIEL, Rupprecht, Werner LEONHARD a Craig J. NORDBY. Field-Oriented Control of a Standard AC Motor Using Microprocessors. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* [online]. 1980, 2021, s. 186-192 [cit. 2021-10-30]. ISSN 0093-9994. Dostupné z: doi:10.1109/TIA.1980.4503770
- [2] KWAN, Alistair. Vernier scales and other early devices for precise measurement. In: *American Journal of Physics* [online]. 2011, s. 368-373 [cit. 2021-6-30]. ISSN 0002-9505. Dostupné z: doi:10.1119/1.3533717
- [3] GIEBELER, C., D. J. ADELERHOF, A. E. T. KUIPER, J. B. A. VAN ZON, D. OELGESCHLÄGER a G. SCHULZ. Robust GMR sensors for angle detection and rotation speed sensing. In: *Sensors and Actuators* [online]. 2001, s. 16-20 [cit. 2021-6-30].
- [4] ABSOLUTE ENCODER for AEROSPACE and Hi-Rel APPLICATIONS [online]. Mnichov: Maccon, 2019 [cit. 2021-6-30]. Dostupné z: https://www.maccon.de/fileadmin/redaktion/downloads/Produkte/Weltraum/MR_Sensor_Datasheet_G.pdf
- [5] ZHANG, Zijian, Yangyang DONG, Fenglei NI, Minghe JIN a Hong LIU. A Method for Measurement of Absolute Angular Position and Application in a Novel Electromagnetic Encoder System. In: *Journal of Sensors* [online]. 2015, s. 1-10 [cit. 2021-6-30]. ISSN 1687-725X. Dostupné z: doi:10.1155/2015/503852
- [6] NGUYEN, Ton Hoang, Ha Xuan NGUYEN, Thuong Ngoc-Cong TRAN, Jae Wan PARK, Kien Minh LE, Vinh Quang NGUYEN a Jae Wook JEON. An Effective Method to Improve the Accuracy of a Vernier-Type Absolute Magnetic Encoder. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. 2021, s. 7330-7340 [cit. 2021-6-30]. ISSN 0278-0046. Dostupné z: doi:10.1109/TIE.2020.3000087
- [7] STRITZKE, B., Ch. BRODE a M. DANOWSKI. Highly flexible absolute integrated encoder system on GMR-basis. In: *Proceedings SENSOR 2013* [online]. AMA Service GmbH, Von-Münchhausen-Str. 49, 31515 Wunstorf, Germany, 2013, 2013, s. 132-137 [cit. 2021-6-30]. ISSN 0002-9505. Dostupné z: doi:10.5162/sensor2013/A6.2

- [8] HUNG VAN HOANG, B., Ch. HIEU TUE LE a M. JAE WOOK JEON. A new approach based-on advanced adaptive digital PLL for improving the resolution and accuracy of magnetic encoders. In: *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* [online]. IEEE, 2008, 2008, s. 3318-3323 [cit. 2021-6-30]. ISBN 978-1-4244-2057-5. ISSN 0002-9505. Dostupné z: doi:10.1109/IROS.2008.4651111
- [9] ZHANG, Zijian, Fenglei NI, Yangyang DONG, Chuangqiang GUO, Minghe JIN a Hong LIU. A Novel Absolute Magnetic Rotary Sensor. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. IEEE, 2015, 2008, s. 4408-4419 [cit. 2021-6-30]. ISBN 978-1-4244-2057-5. ISSN 0278-0046. Dostupné z: doi:10.1109/TIE.2014.2387794
- [10] EMURA, T. a LEI WANG. A high-resolution interpolator for incremental encoders based on the quadrature PLL method. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. **47**(1), 84-90 [cit. 2021-9-8]. ISSN 02780046. Dostupné z: doi:10.1109/41.824129