



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

TESTOVÁNÍ DLOUHODOBÉ PŘESNOSTI A OPAKOVATELNOSTI LINEÁRNÍCH POLOHOVACÍCH ZAŘÍZENÍ

LONG-TERM ACCURACY AND REPEATABILITY TESTING OF LINEAR POSITIONING DEVICES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Mikuláš Konečný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Houška, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Bc. Mikuláš Konečný
Studijní program:	Mechatronika
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. Pavel Houška, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Testování dlouhodobé přesnosti a opakovatelnosti lineárních polohovacích zařízení

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Testování a ověřování dlouhodobé přesnosti a opakovatelnosti lineárních os a obecně řízených polohovacích zařízení je jediný způsob, jak získat a ověřit skutečné vlastnosti těchto mechanismů. Tato práce se zaměří na bezvúlové pohybové matice poháněné krokovým motorem pro levnější zařízení. Problematika přesnosti a opakovatelnosti je částečně zpracována v normách ČSN ISO 230–1 a 230–2. Hlavním cílem je provést dostatečné množství experimentů a tyto experimenty správně vyhodnotit.

Cíle diplomové práce:

1. Seznamte se s problematikou testování přesnosti a opakovatelnosti;
2. Navrhněte postup testování, řešte klíčové parametry testu;
3. Navrhněte a realizujte software pro testování zvolené lineární osy;
4. Proveďte dlouhodobé testování zvolené lineární osy s různými typy bezvúlových matic;
5. Výsledky testů analyzujte a vyhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ČSN ISO 230-1. Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek. 2014
- [2] ČSN ISO 230-2. Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 2: Určení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách. 2016
- [3] Koláčný, Josef, 2009, Elektrické mikropohony, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně (VUT)

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Měření skutečných vlastností lineárních polohovacích mechanismů je důležitou součástí jejich návrhu. Umožňuje důkladně porozumět klíčovým prvkům, které mohou být zdrojem nepřesného polohování. Tato práce má za úkol ve spolupráci s firmou Thermo Fisher Scientific Brno s.r.o. připravit a otestovat jedno z jejich zařízení. Jedná se o jednoosý manipulátor, který pohybuje s různými detektory v komoře skenovacího elektronového mikroskopu. Test se týká zejména vlastností anti-backlash matic a jejich vlivu na přesnost a opakovatelnost.

Klíčová slova

Přesnost, opakovatelnost, backlash, anti-backlash matice, pohybový šroub, krokový motor, retract.

Abstract

Measuring the real performance of a linear motion actuators plays an important role in their design. It enables a thorough understanding of key elements of its design, which might cause unprecise actuation. This paper in cooperation with Thermo Fisher Scientific Brno s.r.o. aims to test one of its devices. The device is a single axis linear actuator that moves several different detectors inside a scanning electron microscope chamber. The main goal of experimental measurements is to evaluate the performance of anti-backlash nuts and their impact on precision and repeatability.

Key words

Precision, repeatability, backlash, anti-backlash nut, lead screw, stepper motor, retract.

Bibliografická citace

KONEČNÝ, Mikuláš. Testování dlouhodobé přesnosti a opakovatelnosti lineárních polohovacích zařízení. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/153502>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Pavel Houška.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Testování dlouhodobé přesnosti a opakovatelnosti lineárních polohovacích zařízení** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

24.5.2023

Datum

Mikuláš Konečný

Jméno a příjmení

Poděkování

Děkuji tímto panu Ing. Pavlu Houškovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

Obsah

Úvod.....	12
1 Rešerše všech důležitých částí mechanismu a použitelných měřících prvků.....	14
1.1 Popis testovaného mechanismu.....	14
1.1.1 Motor pohánějící mechanismus.....	15
1.1.2 Anti-backlash matice.....	15
1.2 Krokové motory – mikrokrokování.....	16
1.3 Backlash.....	19
1.3.1 Kompenzace.....	19
1.3.2 Matice použitelné na retrahovacím mechanismu.....	20
1.4 Normy pro testování.....	22
1.4.1 Aplikovatelné zásady.....	23
1.5 Měření polohy.....	24
1.5.1 Snímače přítomnosti.....	24
1.5.2 Snímače vzdálenosti/polohy.....	25
1.5.3 Lineární enkodéry.....	25
1.6 Měření teploty.....	27
2 Praktické řešení.....	30
2.1 Kontrolér compactRIO.....	30
2.2 Enkodér TONiC.....	31
2.2.1 Umístění enkodéru.....	31
2.3 Koncový spínač.....	33
2.4 Měření teploty.....	34
2.5 Řízení krokového motoru.....	35
2.5.1 Software pro řízení motoru.....	36
2.6 Připojení senzorů a ukládání dat.....	38
2.6.1 Program řídící polohu retractu.....	39
2.6.2 Program pro testování.....	40
2.6.3 Typy testů.....	40
2.7 Zpracování dat.....	41
2.8 Výsledky měření.....	43
2.8.1 Měření různých typů matic.....	43
2.8.2 Měření různých úrovní předepnutí matice typu NTB.....	48
2.8.3 Srovnání matice NTB před a po cyklování.....	54
2.8.4 Vliv teploty na chybu polohování.....	56
Diskuse.....	58
Závěr.....	60
Seznam použitých zdrojů.....	62

Seznam obrázků.....	65
Seznam tabulek.....	66

Úvod

Klíčovou vlastností lineárních os a polohovacích zařízení je přesnost a opakovatelnost polohování. Požadavky na přesnost a opakovatelnost se liší podle konkrétní aplikace a v rámci životnosti zařízení se mění. Proto je vhodné během vývoje zařízení, která budou vyráběná sériově, testovat dosahované parametry a následně vyhodnocovat, zda je mechanismus správně navržen a zda je schopen plnit svou funkci po celou dobu své životnosti. U komerčních produktů však není podstatné jen zajištění funkce, ale je nutné tyto zařízení vyvíjet tak, aby byly na trhu konkurenceschopné. Podrobné měření a analýza mechanismu je možnost, jak odhalit špatně navržené části zařízení.

Tato závěrečná práce je řešena ve spolupráci s firmou Thermo Fisher Scientific Brno s.r.o., především s divizí vyrábějící elektronové mikroskopy, jež se zabývá právě úpravou jednoho z doplňkových mechanismů zajišťujícího polohování přídavných detektorů a měřením závislosti kvality polohování na teplotě a na vykonaných cyklech. Jednou z hlavních motivací tohoto testování je zjištění vlastností bezvůlové (*anti-backlash*) matice, která by měla zajistit bezvůlový chod celého mechanismu. Informace, které poskytují výrobci matic, jsou nedostatečné a úplně chybí informace o vlivu opotřebení na přesnost, jež jsou klíčové pro vývoj polohovacích zařízení.

V oblasti elektronové mikroskopie je vysoká přesnost polohování velmi důležitá a je požadována téměř na všech komponentách elektronového mikroskopu. Proto je testování fyzických prototypů nedílnou součástí vývoje a naměřená data jsou cenná nejen pro Thermo Fisher, ale mohou sloužit jako pomoc při návrhu podobných zařízení komukoliv, kdo používá stejné nebo podobné polohovací zařízení.

Práce je rozdělena do dvou hlavních kapitol. První se zabývá popisem řešeného mechanismu a rešerší všech jeho důležitých prvků, které mohou mít vliv na výsledek měření. Jedná se zejména o krokový motor a jeho řízení, použitou matici zajišťující minimální vůli a její potenciální náhrady. Dále se první kapitola věnuje způsobům měření na mechanismech stejného typu a analyzuje použitelnost a funkci měřících prvků. V neposlední řadě jsou zde také shrnuty normy, které obsahují doporučené postupy pro testování a vyhodnocování dat a definují pojmy, jako je přesnost a opakovatelnost.

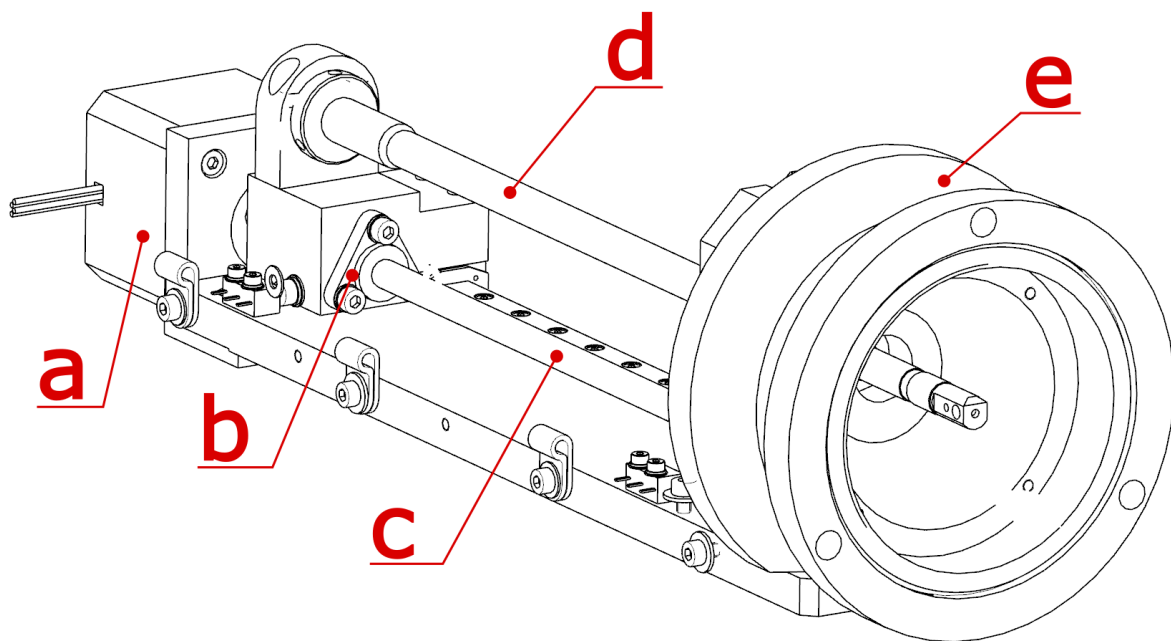
První část druhé kapitoly čerpá z poznatků z kapitoly první a věnuje se již popisu řešení zadaného problému. Jedná se o vhodný výběr měřících prvků a úpravu mechanismu pro jejich upnutí zajišťující správnou funkci, zapojení všech měřících prvků spolu s řízením

motoru a vytvořením aplikace pro sběr dat a cyklování. Druhá část kapitoly je věnována vyhodnocení dat pro jednotlivé závislosti, porovnání anti-backlashových matic a vlivu jejich předepnutí a vyvození závěru z celkového testování.

1 Rešerše všech důležitých částí mechanismu a použitelných měřicích prvků

1.1 Popis testovaného mechanismu

Testovaným zařízením je lineární manipulátor firmy Thermo Fisher Scientific Brno s.r.o., který slouží pro manipulaci s některými detektory v komoře elektronového mikroskopu. Jeho cílem je odstranění momentálně nepoužívaných detektorů z pracovního prostoru při zkoumání velkých vzorků a jejich vrácení zpět do přesně definovaných pozic zajišťujících ideální funkci.



Obrázek 1.1: Ilustrace testovaného mechanismu

Na obrázku 1.1 jsou vidět klíčové části retractu. Pozice: a) krokový motor, b) anti-backlash matice zajišťující minimální vůli při polohování, c) pohybový šroub, d) vodící tyč nesoucí detektor, e) příruba, kterou je mechanismus připojen ke komoře mikroskopu, jež zároveň slouží k separování vakua od okolní atmosféry. Toho je dosaženo pomocí těsnících X-kroužků, jejichž vzájemné tření s vodící tyčí tvoří hlavní zátěž motoru.

1.1.1 Motor pohánějící mechanismus

Jako pohon je použit hybridní krokový motor s 200 celými kroky na otáčku. Krokový motor je řízen v otevřené smyčce s mikrokrokováním na 1/256 kroku. Celkového rozlišení je pak 51200 mikrokroků na otáčku. Takové rozlišení a relativně jemné stoupání pohybového šroubu (které je 0.096 in = 2.4384 mm a teoreticky tedy umožňuje polohování po 47.6 nm (1.1)) by měly zajistit dostatečnou přesnost a opakovatelnost celého mechanismu i při řízení jen pomocí mikrokroků.

$$\frac{p}{s} = \frac{2.4384}{51200} = 47.6 \text{ nm} \quad (1.1)$$

Aby bylo možné při testování kontrolovat co nejvíce faktorů, byla zvolena varianta vlastní silové části i programu pro řízení krokového motoru, jelikož originální deska, která se prodává spolu s mechanismem, obsahuje vše na FPGA čipu a není možné parametry řízení snadno nastavovat.

1.1.2 Anti-backlash matice

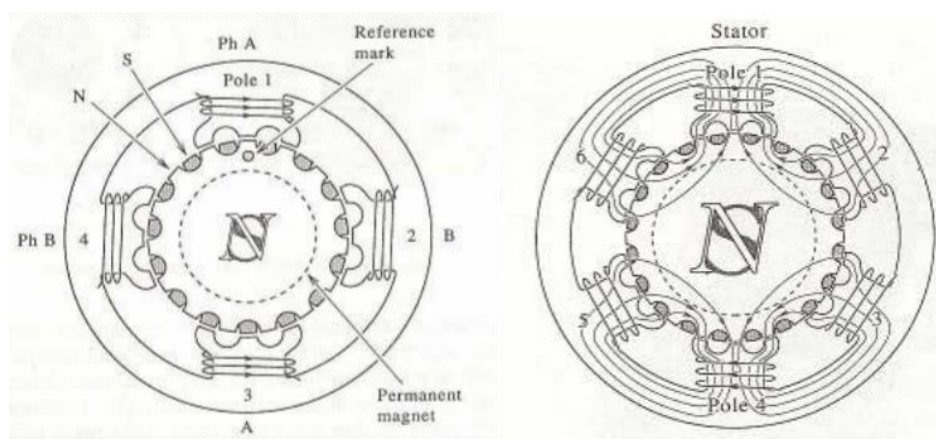
Anti-backlash matice, tedy matice, která má za cíl zajistit co nejmenší vůli mezi maticí a pohybovým šroubem, je použita, aby bylo možné řídit polohování bez zpětné vazby s dostatečnou přesností. Na mechanismu je použita matice od firmy Ametek, Inc. (obr. 1.2), která funguje na principu torzní pružiny, jež by měla udržovat stejnou sílu předeprnutí po celou dobu funkce stroje i při opotřebování matice.



Obrázek 1.2: Matice typ NTB použitá na retractu [1]

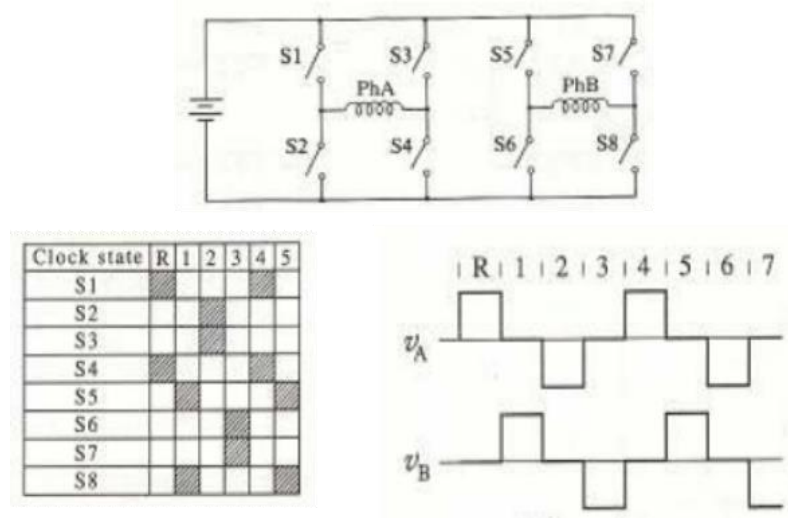
1.2 Krokové motory – mikrokrokování

Krokových motorů existuje několik různých variant, nicméně nejpoužívanějším pro aplikace vyžadující velké rozlišení je hybridní krokový motor kombinující princip VR (*variable reluctance*) a PM (*permanent magnet*) motorů. Díky tomu je možné dosáhnout velkého počtu kroků na otáčku i vysokého momentu při malých rozměrech motoru. Dále se pak hybridní krokové motory dělí dle počtu fází, kterými jsou řízeny (obr. 1.3), mezi nimiž je nejrozšířenější dvoufázové řešení. Jak je již zmíněno výše, na zkoumaném mechanismu je použit právě dvoufázový motor, a proto se bude následná analýza metod krokování týkat jen této varianty.

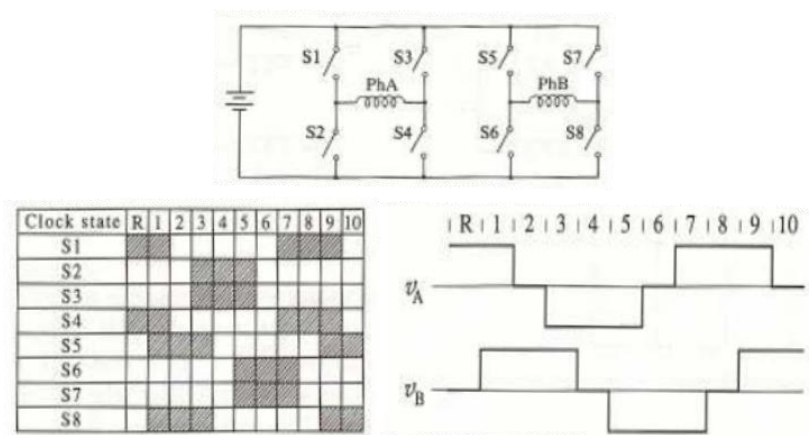


Obrázek 1.3: Srovnání v řezu dvoufázového (vlevo) a třífázového (vpravo) krokového motoru [2]

Jednoduchým spínáním fází jako na obrázku 1.4 je možné dosáhnout dvojnásobného počtu kroků, než je počet zubů na rotoru. Rotor tak přechází mezi jednotlivými stabilními polohami. Pokud se budou fáze spínat tak, že bude docházet k vzájemnému „překryvu“ sepnutých fází, lze rotor udržet mezi stabilními polohami a zvýšit tak počet kroků na otáčku. Na obrázku 1.5 je vidět spínání fází, které počet kroků zdvojnásobí. Takovému řízení se v praxi říká *half-step*.



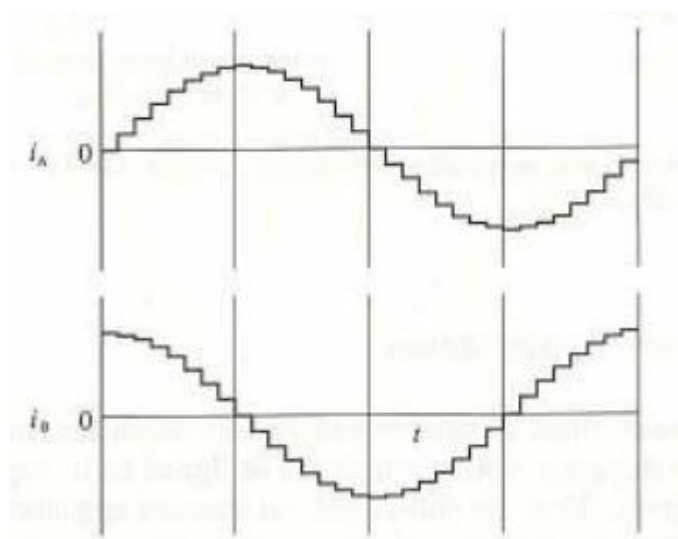
Obrázek 1.4: Spínání fází motoru při řízení po celých krocích [2]



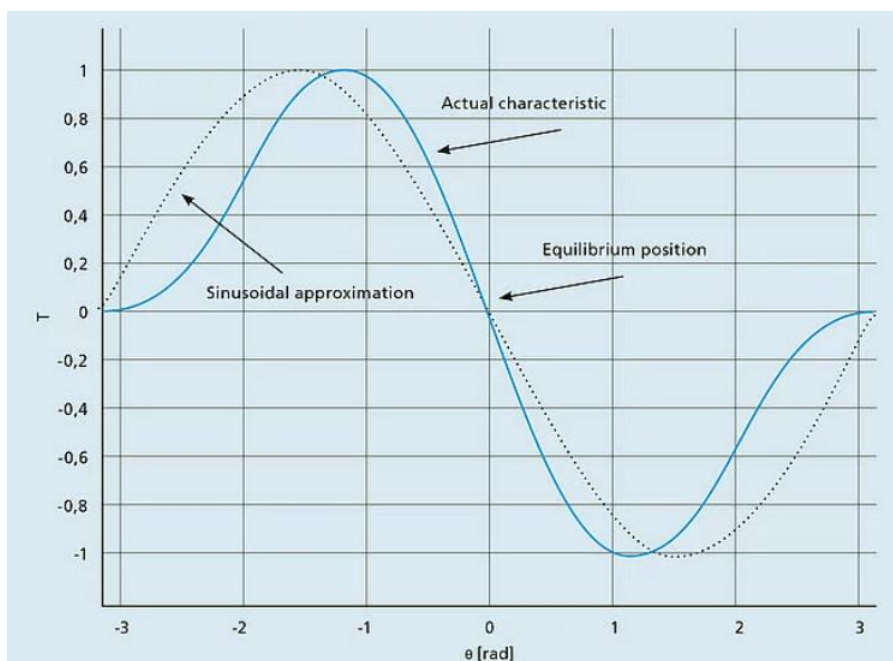
Obrázek 1.5: Spínání fází motoru při řízení metodou half-step [2]

Dalším dělením je pak možné dosáhnout několikanásobně vyššího rozlišení motoru. Tímto zmenšováním kroků se však výrazně zmenšuje moment [3], který rotor udržuje v původně nastavené poloze. Proto se v praxi dělí jeden krok (platí pro motory s 200 celými kroky na otáčku) maximálně na 256 mikrokroků, což je ve výsledku 51200 mikrokroků na otáčku.

U takto řízených motorů je snaha dosáhnout sinusového průběhu proudu ve fázích (obr. 1.6). To však nemusí zcela odpovídat charakteristice motoru, jak je znázorněno na obrázku 1.7, což může způsobit odchylky při polohování a nerovnoměrný chod [4].



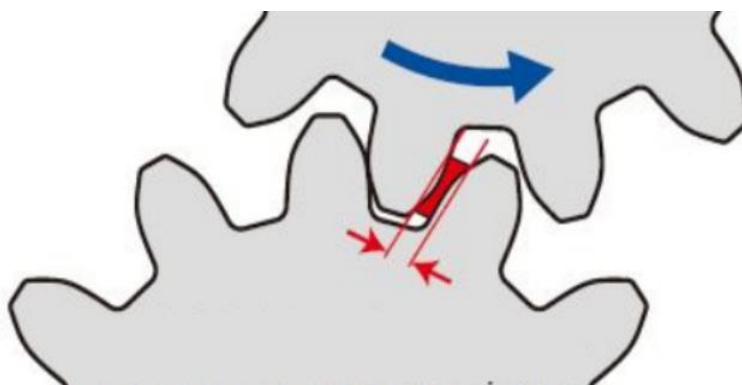
Obrázek 1.6: Průběh proudů ve fázích motoru při mikrokrokování [2]



Obrázek 1.7: Rozdíl mezi aproximovanou, sinusovou charakteristikou motoru (tečkovaně) proti skutečné charakteristice (modře) [4]

1.3 Backlash

Backlash neboli vůle způsobuje hysterezi na polohovacích zařízeních a strojích zajišťující pohyb. Vzniká při změně chodu stroje a projevuje se odchylkou od požadované polohy při řízení stroje. Můžeme se s ním setkat zejména v převodovkách s ozubenými koly nebo u sestav obsahující pohybový šroub a matici. V obou případech dochází k vymezení vůle mezi kontaktními součástmi vlivem změny otáčení (obr. 1.8). Velikost této vůle a následné hystereze je dána výrobní tolerancí dílů.

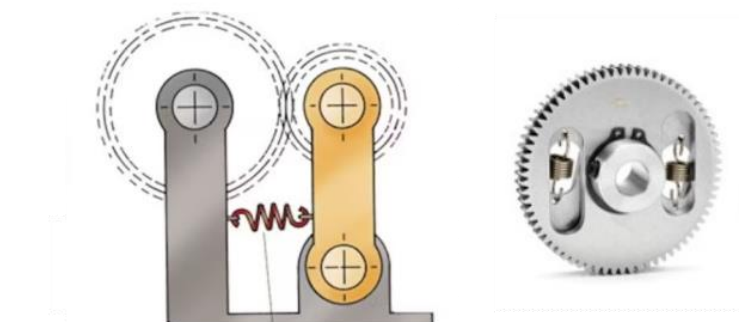


Obrázek 1.8: Backlash (vyznačený červeně) mezi spoluzabírajícím ozubením [5]

1.3.1 Kompenzace

Ke snížení vlivu hysterezního chování u převodovek a pohybových šroubů je možné přistupovat dvěma způsoby. K dispozici je softwarové a mechanické řešení. V systémech schopných odečítat moment působící na ozubení nebo závitovou tyč lze linearizací tohoto systému implementovat kompenzaci přímo do kontroléru [6]. Kompenzace pomocí softwaru není ve zkoumaném mechanismu použita, proto nebude více dopodrobna rozebírána.

Druhou možností je mechanické omezení vůle. Toho je možné dosáhnout přesnou výrobou s velmi jemnými tolerancemi (závisí na aplikaci, avšak pro velmi přesné polohování by musely být tolerance tak malé, že se to kvůli vysokým nákladům nevyplatí), nebo je možné mechanismus nějakým způsobem předepnout (obr. 1.9 a 1.10), aby k vymezení vůle vůbec nedocházelo.



Obrázek 1.9: Možnosti předeptnutí ozubených kol [7], [8]



Obrázek 1.10: „Klasické“ provedení anti-backlash matice [9]

1.3.2 Matice použitelné na retrahovacím mechanismu

Anti-backlashová matice použitá na retractu je vyráběna firmou Ametek. Tato firma dodává kompletní sestavy motorů se závitovou tyčí a maticí. Toto řešení, ač jednoduché na implementaci s sebou přináší komplikaci v podobě nekompatibility s maticemi ostatních výrobců. To je způsobeno hlavně tím, že je sestava nakupována v palcových rozměrech a s velmi specifickým stoupáním 0.096 palce. Z toho důvodu je výběr matic vhodných k otestování zúžen jen na nabídku firmy Ametek.

Typy matic připadající v úvahu pro testování jsou typ: ZBX, ZBA, NTB a BFW, při čemž matice typu BFW nemá backlash kompenzaci a může být využita jako referenční. Ostatní matice se v přístupu k vymezení vůle liší, což může mít velký vliv na jejich životnost

a s tím spojený výsledek testu přesnosti a opakovatelnosti po vykonání požadovaného počtu cyklů.

Matice typu ZBX a ZBA jsou v jedné své části rozděleny na třetiny a pomocí stahovacího mechanismu obepínají pohybový šroub. To zajišťuje v podstatě bezvůlové spojení matice se závitnicí, ale hrozí zde v závislosti na předepnutí matice velký odpor proti pohybu a následná ztráta funkce vlivem opotřebení závitu v matici. Typ ZBX je předepínán pružinou, která by měla tento nedostatek vyřešit tak, že vytvoření vůle zabraní dalším přitlačení pružných částí matice (obr. 1.11). Velkým nedostatkem však je nemožnost nastavení velikosti přitlačné síly. To je naopak velkou výsadou matice typu ZBA, která umožňuje snadné nastavení předepnutí pomocí posuvného kroužku (obr. 1.12), avšak po opotřebení je nutné ji znovu „dotáhnout“, což je nežádoucí vzhledem k požadavku na bezúdržbovost testovaného zařízení. Typ NTB se skládá ze dvou matic v jednom pouzdře předepnutých proti sobě torzní pružinou (obr. 1.2 NTB matice). Síla předepnutí je v určitém rozsahu po daných inkrementech nastavitelná. Tento systém je schopen vymezovat vůli v sestavě matice–šroub i při překročení síly předepnutí [10] na rozdíl od volně uložených matic pouze spojených pružinou (obr. 1.10 klasická anti-backlash matice s pružinou). Nedochozí zde také k problému s opotřebením matice, protože stejně jako u typu ZBX je vznikající vůle neustále kompenzována pružinou.

Retrahovací mechanismus se momentálně prodává s maticí typu NTB, ale protože se jedná o nejdražší z výše popsaných variant a při návrhu se přepokládalo, že splní veškeré požadavky, je žádoucí otestovat i ostatní možnosti, zda nebudou také vyhovující.



Obrázek 1.11 Matice typu ZBX [11]



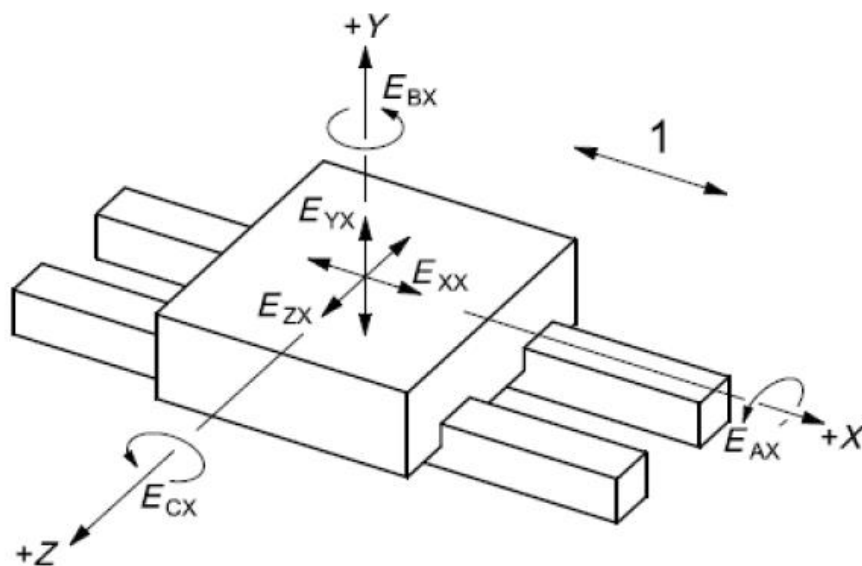
Obrázek 1.12 Matice typu ZBA [12]

1.4 Normy pro testování

Testováním přesnosti a opakovatelnosti se zabývají normy ČSN ISO 230-1 a 230-2. Obě se týkají správných zásad při testování obráběcích strojů. Ty mají často testované osy o rozměrech od stovek centimetrů až do několika metrů. Přesto jsou však pravidla v nich uvedená aplikovatelná i na zařízení testované v této diplomové práci, které má rozsah osy 165 mm.

První část normy 230 definuje souřadný systém a možné úchytky ve všech směrech [13]. Pro testovaný mechanismus je nejdůležitější chyba pohybu lineárního polohování osy x při řízení této osy (na obrázku 1.13 označena jako E_{xx}). Chyby v ostatních směrech jsou pro retract testovaný v této práci méně důležité a nejsou předmětem zkoumání. Dále jsou v normě popsány vhodné typy měřících přístrojů a testovacích procedur pro testování vlastností strojů jako jsou: zkoušky statické shody a hystereze, zkoušky geometrické přesnosti os, zkoušky víceosých pohybů apod. [13].

Zkoušce nejvhodnější pro retrahovací mechanismus se věnuje druhá část normy 230-2. Ta dopodrobna popisuje určení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy.



Obrázek 1.13: Označení chyb v jednotlivých osách polohovacího stroje [13]

1.4.1 Aplikovatelné zásady

I přesto, že výše zmíněné normy uvádí v příkladech řádově menší rozměry os, než jsou rozměry os retractu, obsahují několik zásad, jež by měly být pro dosažení validnosti výsledků měření dodrženy.

Mezi ty nejzákladnější patří testování za normálních podmínek a zahřátí stroje na provozní teplotu. Tu je v našem případě dost problematické určit, protože používání detektorů se může u každého zákazníka diametrálně lišit (někdy jej používá již po jednom přejezdu, jindy opakovaně po desítkách až stovkách přejezdů). Z tohoto důvodu je po celou dobu měření snímána teplota na klíčových místech mechanismu, aby mohla být identifikována, nebo vyloučena jako zdroj chyby. Dále norma doporučuje minimální počet přejezdů do testovaných poloh a minimální vzdálenosti mezi nimi. Norma definuje alespoň 5 poloh pro osy do 2000 mm a předepisuje do každé z nich najet v obou směrech pětkrát [14]. Jsou zde vymezeny všechny potřebné pojmy a vztahy pro průměrné obousměrné i jednosměrné úchyly v poloze, necitlivost v poloze a v ose a odhady opakovatelnosti osy nastavení polohy v poloze. Závěrem norma předkládá příklad prezentace výsledků. Tyto vztahy budou spolu s doporučenou vizualizací využívány při analýze naměřených dat.

1.5 Měření polohy

K získání přesné polohy pohybujících se částí strojů je možné použít široké spektrum měřících zařízení, každé se svými výhodami a omezeními. V závislosti na požadovaném výstupu je nutné zvolit metodu, která je schopná měřit v adekvátním rozlišení.

1.5.1 Snímače přítomnosti

Sensory s „nejmenším“ rozlišením jsou schopny detekovat jen přítomnost těles v jedné fixní poloze předem danou polohou snímače. Ty mohou být kontaktní nebo bezkontaktní.

Nejjednodušší a nejlevnější variantou vyžadující mechanický kontakt snímače se snímaným tělesem jsou mikrospínače (na obrázku 1.14 vlevo), které jsou často používány jako koncové spínače například u 3D tiskáren (slouží k získání *home* pozice nebo jako bezpečnostní pojistka) nebo jako polotovary pro sofistikovanější sensory. Nákladnější, ale přesnější jsou pak například varianty s rubínovou kuličkou, která přesně definuje kontaktní plochu (na obrázku 1.14 vpravo).



Obrázek 1.14: varianty kontaktních spínačů [15], [16]

Bezkontaktní snímače umožňují detekci i bez mechanického kontaktu, jsou však zpravidla řádově nákladnější. Nejrozšířenější jsou senzory kapacitní a indukční. V závislosti na aplikaci jsou pak použitelné i ty detekující změnu magnetického pole nebo ultrazvukové snímače.

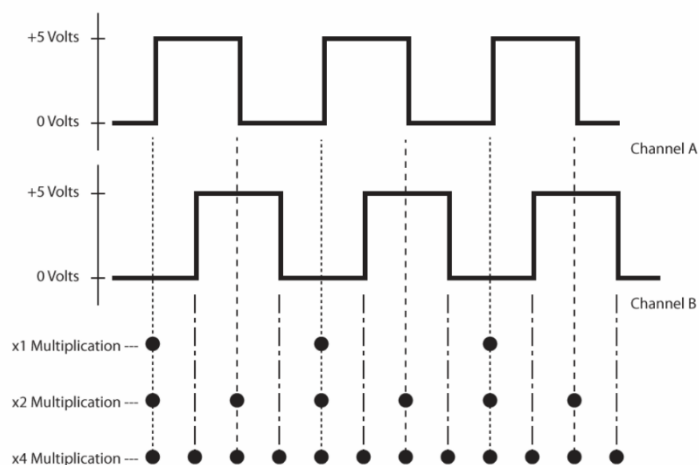
1.5.2 Snímače vzdálenosti/polohy

Vzdálenost lze v malém rozsahu měřit i některými bezkontaktními senzory, ale pro určení polohy pro vzdálenosti v řádech desítek milimetrů a více je již nutné použít speciální měřicí přístroje pro tuto aplikaci. Zařízení poskytující maximální rozlišení jsou optické interferometry, které jsou schopné měřit s přesností na jednotky pikometrů [17]. Jejich hlavní nevýhodou je obrovská citlivost na okolní vlivy při měření a jejich integrace do systému je poměrně komplikovaná. To z nich dělá přístroje vhodné především do laboratoří a jednorázové testování. Existují samozřejmě i průmyslovější interferometry, které mohou být pevnou součástí strojů a měřit po celou dobu jejich životnosti – jejich rozlišení je pak ale podstatně nižší.

Druhou velkou skupinou zařízení schopných poskytovat informaci o poloze jsou enkodéry. Ty se vyrábí jako lineární, nebo rotační. Vzhledem k tomu, že chceme měřit přesnou polohu lineárního manipulátoru, je rotační enkodér pro tuto aplikaci nevhodný. Pozice by musela být přepočítána přes stoupání šroubu, ale právě nepřesnost v závitě nebo backlash by se v měření neprojevily. Kombinace krokového motoru s enkodérem je užitečná jen pro získání informace, zda nedošlo ke ztrátě kroku. Z důvodů popsaných níže v kapitole 2.1 zde bude věnována pozornost především lineárním enkodérům, zejména značky Renishaw.

1.5.3 Lineární enkodéry

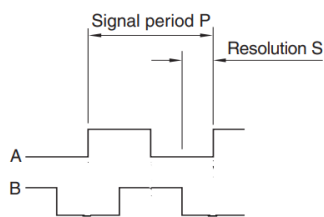
Jak je již zmíněno výše, lineární enkodér umožňuje snímat polohu po libovolné délce. Jeho rozlišení je dáno hustotou značek, které je čtecí hlava schopna snímat. Chytrým zpracováním signálu lze rozlišení enkodéru zlepšit. Pokud jsou značky na pravítku diskrétní a jsou k dispozici signály z kanálů A a B posunuté vzájemně o 90 elektrických stupňů (takto vyvedené kanály jsou schopny dát informaci o směru pohybu), je pak možné navýšit přesnost enkodéru až 4x (obr. 1.15) [18]. Při této manipulaci se signálem je však nutné počítat s vyššími nároky na zbytek měřicího hardwaru, který musí být schopen 4násobné čtecí rychlosti.



Obrázek 1.15: možnosti násobení výstupního signálu z inkrementálního enkodéru [18]

Pokud je výstup z čtecí hlavy spojitý (signály A a B jsou ve formě funkcí sinus, respektive cosinus), je možné interpolací signálu dosáhnout se stejným enkodérem požadovaného rozlišení v závislosti na aplikaci a dostupném měřicím hardwaru. Lineární enkodér TONiC firmy Renishaw (použitý pro měření v této práci) je schopen interpolací dosáhnout rozlišení od 5 μm do 1 nm (obr. 1.16) [19].

Incremental* 2 channels A and B in quadrature (90° phase shifted)



Model	P (μm)	S (μm)
Ti0004	20	5
Ti0020	4	1
Ti0040	2	0.5
Ti0100	0.8	0.2
Ti0200	0.4	0.1
Ti0400	0.2	0.05
Ti1000	0.08	0.02
Ti2000	0.04	0.01
Ti4000	0.02	0.005
Ti10KD	0.008	0.002
Ti20KD	0.004	0.001

Obrázek 1.16: Zobrazení výsledných signálů po interpolaci (vlevo) a možnosti rozlišení (tabulka vpravo) [19]

O interpolaci se v případě enkodérů Renishaw stará jejich *interface* (na obrázku 1.17), který dává diferenční signál kanálům A a B (jak je vidět na obrázku 1.16 vlevo). Ten se prodává ve variantách s různým vnitřním hodinovým cyklem a spolu s mírou interpolace udávají limit pro maximální rychlosti posuvů měřených těles [19].

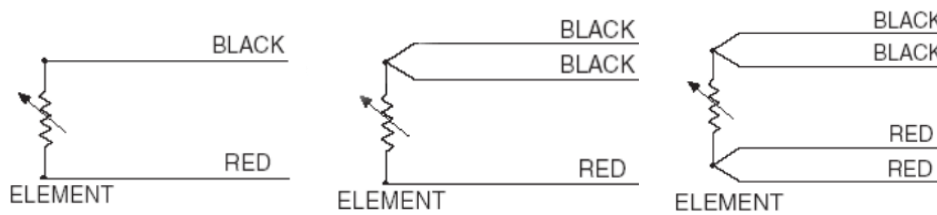


Obrázek 1.17: Interface s interpolátorem pro enkodér TONiC [20]

1.6 Měření teploty

Změny teploty v průběhu operace strojů mohou mít značný vliv na jejich přesnost, životnost a celkovou funkčnost. Při návrhu je nutné s příčinami změny teplot počítat a dimenzovat stroje tak, aby fungovaly i při jiných než ideálních podmínkách. Další možností je ideální podmínky zaručit či striktně vyžadovat. Při měření vlastností stroje je informace o teplotě okolí a důležitých částí stroje velmi důležitá. Proto je pro validitu výsledků nutné snímat teplotu, a to nejlépe v průběhu měření. V našem případě je také na místě zjistit, zda měřicí přístroje (enkodérová čtecí hlava) neovlivňují svým topným výkonem části zařízení.

K měření teploty je možné využít snímače odporové, nebo termočlánky. Odporové snímače teploty pracují na základě lineární změny odporu při změně teploty. Jsou jednodušší na použití, jelikož nevyžadují teplotní kompenzaci (na rozdíl od termočlánků) a poměrně jednoduchou modifikací lze kompenzovat odpor vedení k senzoru (obr. 1.18 Zapojení odporu). Nejrozšířenější jsou varianty vyráběny z platinového drátku dobře známé pod označením Pt-100 nebo Pt-1000, při čemž číslo za značkou materiálu udává odpor při 0 °C. Pro vyšší citlivost a rychlejší odezvu jsou vhodné niklové odporové teploměry.



Obrázek 1.18: Zapojení odporového snímače teploty dle požadované kompenzace

Druhá varianta, použití termočlánu, vyžaduje kompenzaci studeného konce, tedy místa připojení (zpravidla svorkovnice nebo nejlépe měřicí karta). Kompenzace je nutná, protože termočlánek je spojením dvou různých materiálů schopen převést rozdíl teplot v místě spojení a studeného konce na napětí. Měří tedy relativně a bez znalosti teploty studeného konce nejsme schopni určit skutečnou teplotu. V závislosti na kombinaci materiálů v termočlánu mají různé vlastnosti v oblasti rychlosti odezvy a zejména v rozsahu teplot, ve němž jsou schopny měřit. Normalizované páry s označením dle ANSI a IEC jsou uvedeny v tabulce 1.1. Je také nutné dávat pozor na prodlužování drátů vedoucích k termočlánu, protože spojením nevhodnými kabely (z materiálů s odlišnými termoelektrickými vlastnostmi) vznikne další termočlánek, což zcela znehodnotí naměřená data [21].

Tabulka 1.1: Normalizované páry termočlánků [21]

ANSI Code	ANSI MC 96.1 Color Coding		Alloy Combination		Comments Environment Bare Wire	Maximum T/C Grade Temp Range	EMF (mV) Over Max Temp Range	IEC 584-3 Color Coding		IEC Code
	Thermocouple Grade	Extension Grade	+ Lead	- Lead				Thermocouple Grade	Intrinsically Safe	
J			IRON Fe (magnetic)	CONSTANTAN COPPER-NICKEL Cu-Ni	Reducing, Vacuum, Inert. Limited Use in Oxidizing at High Temperatures. Not Recommended for Low Temperatures.	-210 to 1200°C -346 to 2193°F	-8.095 to 69.553			J
K			CHROMEGA® NICKEL-CHROMIUM Ni-Cr	ALOMEGA® NICKEL-ALUMINUM Ni-Al (magnetic)	Clean Oxidizing and Inert. Limited Use in Vacuum or Reducing. Wide Temperature Range. Most Popular Calibration	-270 to 1372°C -454 to 2501°F	-6.458 to 54.886			K
T			COPPER Cu	CONSTANTAN COPPER-NICKEL Cu-Ni	Mild Oxidizing. Reducing Vacuum or Inert. Good Where Moisture is Present. Low Temperature & Cryogenic Applications	-270 to 400°C -454 to 752°F	-6.258 to 20.872			T
E			CHROMEGA® NICKEL-CHROMIUM Ni-Cr	CONSTANTAN COPPER-NICKEL Cu-Ni	Oxidizing or Inert. Limited Use in Vacuum or Reducing. Highest EMF Change Per Degree	-270 to 1000°C -454 to 1832°F	-9.835 to 76.373			E
N			OMEGA-P® NICHROSIL Ni-Cr-Si	OMEGA-N® NISIL Ni-Si-Mg	Alternative to Type K. More Stable at High Temps	-270 to 1300°C -450 to 2372°F	-4.345 to 47.513			N
R	NONE ESTABLISHED		PLATINUM-13% RHODIUM Pt-13% Rh	PLATINUM Pt	Oxidizing or Inert. Do Not Insert in Metal Tubes. Beware of Contamination. High Temperature	-50 to 1768°C -58 to 3214°F	-0.226 to 21.101			R
S	NONE ESTABLISHED		PLATINUM-10% RHODIUM Pt-10% Rh	PLATINUM Pt	Oxidizing or Inert. Do Not Insert in Metal Tubes. Beware of Contamination. High Temperature	-50 to 1768°C -58 to 3214°F	-0.236 to 18.693			S
U	NONE ESTABLISHED		COPPER Cu	COPPER-LOW NICKEL Cu-Ni	Extension Grade Connecting Wire for R & S Thermocouples. Also Known as RX & SX Extension Wire.					U
B	NONE ESTABLISHED		PLATINUM-30% RHODIUM Pt-30% Rh	PLATINUM-6% RHODIUM Pt-6% Rh	Oxidizing or Inert. Do Not Insert in Metal Tubes. Beware of Contamination. High Temp. Common Use in Glass Industry	0 to 1820°C 32 to 3308°F	0 to 13.820			B

2 Praktické řešení

Samotné praktické řešení čerpá z informací získaných při rešerši a snahou bylo také volit řešení v souladu s poznatky popsány v předchozí kapitole. Jelikož se však jedná o praktickou úlohu s omezeným rozpočtem, bylo nutné při návrhu řešení zadaných úkolů postupovat s ohledem na dostupnost měřících prvků a jejich cenu, popřípadě bylo v jistých situacích vhodné použití již hotových modulů. Dále bylo také nutné zatěžovat změnami zkoumaný mechanismus co nejméně a snažit se podmínky provozu přiblížit co nejvíce těm skutečným, aby byly naměřené hodnoty přenositelné i na neupravený retract určený k prodeji.

V následujících podkapitolách se nachází detailní popis a zdůvodnění výběru všech měřících prvků, z nichž pramení nutné mechanické úpravy. Jsou zde popsány praktické implementace řízení motoru, zapojení všech senzorů, zvolený hardware a software pro akvizici a zpracování dat.

2.1 Kontrolér compactRIO

O zpracování dat a řízení motoru se stará průmyslový kontrolér CompactRIO od společnosti National Instruments (dále jen NI). Disponuje procesorem s *real-time* operačním systémem a FPGA modulem. Je snadno rozšiřitelný pomocí zásuvných karet s požadovanou funkcionalitou. V našem případě jsou použity dva digitální moduly umožňující fungování jako vstup i jako výstup (jeden pro čtení dat z enkodéru, jeden pro řízení krokového motoru) a jedna měřící karta pro termočlánky.

FPGA čip je schopen zpracovávat data přímo z měřících karet, a to s dostatečnou rychlostí, aby nedocházelo ke ztrátě dat. Je to také vhodný hardware pro řízení motoru mikrokrokováním, jelikož prodávaná verze retractů je také řízena z FPGA. Jedinou nevýhodou je až několik desítek minut trvající kompilace kódu pro hradlové pole nutná při každé úpravě programu, což značně prodlužuje *debuggování* a celkovou práci s tímto čipem.

Vzhledem k tomu, že se jedná o kontrolér firmy NI, je do jisté míry vyžadována práce s LabVIEW. Jedná se o prostředí pro grafické programování vyvinuté právě společností NI pro práci s jejich hardwarem. Pomocí LabVIEW jsou pak psány aplikace pro řízení motoru, zpracování dat a cyklování.

2.2 Enkodér TONiC

Pro měření skutečné polohy byl zvolen lineární optický enkodér. Nabídka těchto enkodérů je velmi široká. Hlavní parametr, dle kterého byl enkodér vybírán, bylo rozlišení. Vzhledem k tomu, že byla při návrhu polohovacího mechanismu detektorů snaha o dosažení přesnosti v řádech jednotek mikrometrů, bylo nutné zvolit enkodér, který je schopen alespoň v řádech stovek nanometrů.

Dalším parametrem, který je potřeba brát v úvahu, je dostupnost a *lead-time* pro daný enkodér. Vhodným kandidátem jsou tak měřící zařízení firmy Renishaw, která s firmou Thermo Fisher Scientific často spolupracuje a má jednu ze svých poboček ve stejném průmyslovém areálu v Brně jako Thermo Fisher. To umožňuje rychlou komunikaci při řešení problémů a také bezproblémovou možnost osobního setkání s představiteli firmy Renishaw.

Díky interním zkušenostem s těmito enkodéry a po domluvě s obchodním zástupcem Renishaw, byl zvolen enkodér typu TONiC, který je díky interpolaci signálu (jak je popsáno v kapitole 1.5.1) schopen dosáhnout rozlišení 5 nm.

Z technické dokumentace k enkodéru je pak možné vyčíst, jak má být čtecí hlava umístěna, aby bylo dosaženo deklarovaného rozlišení a nedocházelo ke zhoršování kvality signálu při pohybu mechanismu. Dále je také nutné umístit pod čtecí hlavu pravítko (kovový pásek, jehož značky je enkodér schopen detekovat). Ke zvolené čtecí hlavě bylo nutné koupit zlaté pravítko s označením RGSZ20-S.

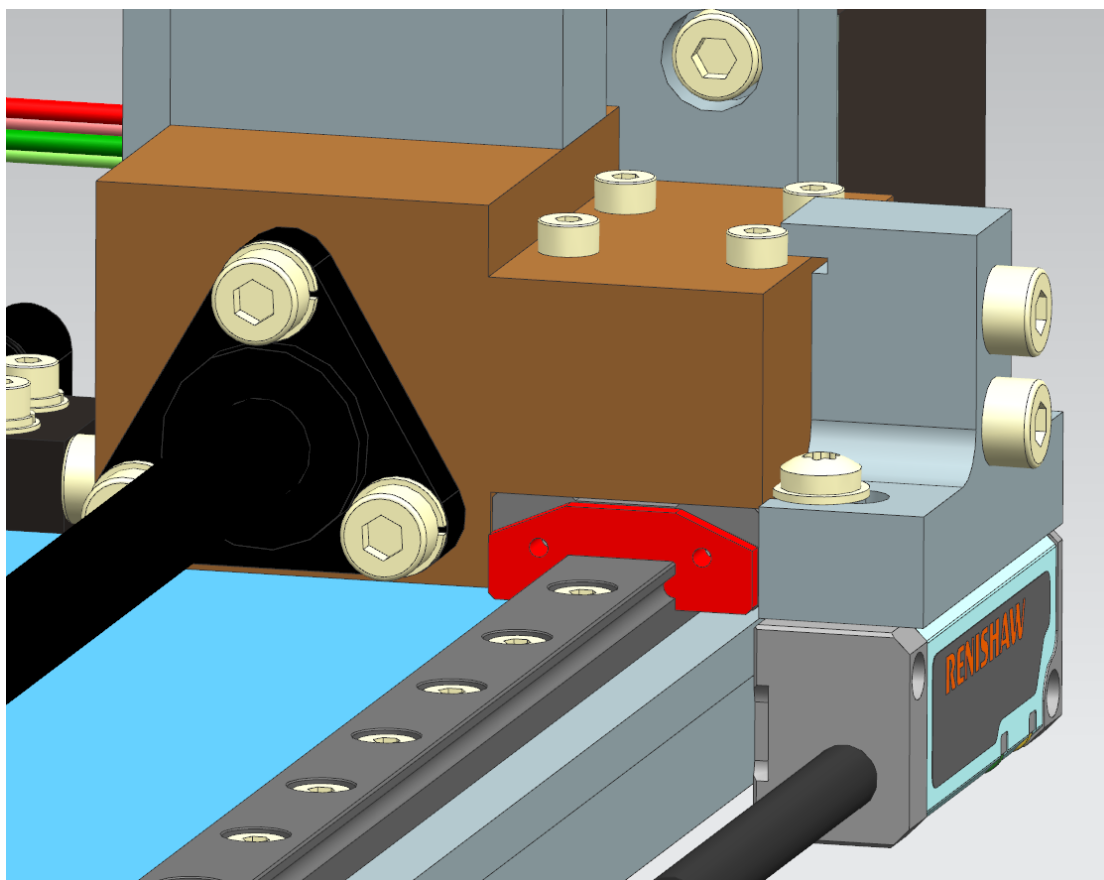
Výstupem z enkodéru je po interpolaci diferenční signál. Protože byl k řízení motoru a čtení dat zvolen průmyslový kontrolér CompactRIO (popsán v předchozí podkapitole), jehož digitální měřící karty pracují s logikou TTL, je nutné diferenční signál převést na odpovídající hladiny napětí. To zajišťuje trojice transceiverů (převodníků) typu MAX 3468 CSA, dva pro signály A a B (jak je zobrazeno a popsáno na obrázku 1.16 v kapitole 1.5.3) a poslední pro signál Z používaný pro referenční značky na pravítku.

2.2.1 Umístění enkodéru

Jako nositel enkodérové čtecí hlavy byl zvolen tak zvaný „voziček“, který je pevně spojen jak s lineárním ložiskem a maticí, tak i s přes tyč procházející přírubou s detektory. Proto pozice „vozičku“ přímo odpovídá pozici detektorů. Výrobce enkodéru zaručuje správnou funkci jen při dodržení specifikovaných vzdáleností a vzájemných úhlových natočení čtecí

hlavy a pravítka. Všechny tyto instalační pokyny jsou podrobně popsány v datasheetu [19]. Je tedy nutné enkodér upnout tak, aby bylo možné jeho přesné nastavení do specifických tolerancí daných výrobcem.

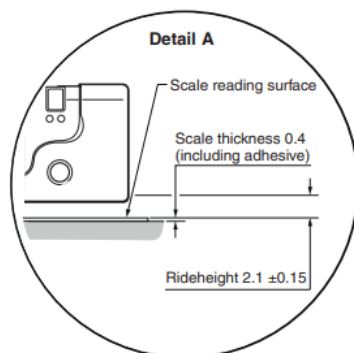
Díl nesoucí čtecí hlavu byl tedy navržen tak, že je dvěma šrouby pevně spojen s „vozíčkem“ a pomocí předsunuté plochy se s ním vyrovná, aby s ním byla plocha pro uchycení enkodéru rovnoběžná (obr 2.1). Možnost nastavení vzdálenosti čtecí hlavy od pravítka je možná díky drážkám, jež umožňují nastavit i vzájemný úhel.



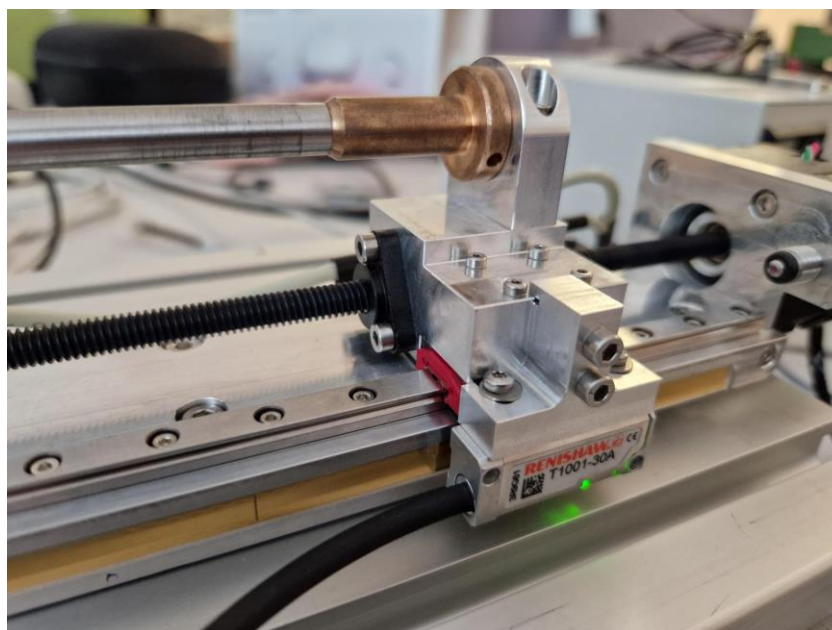
Obrázek 2.1: Zobrazení dílu pro uchycení enkodérové hlavy

Vzhledem ke specifikované vzdálenosti enkodéru od pravítka (obr. 2.2) nebylo možné nalepovací pravítko umístit přímo na desku nesoucí celý retract, ale muselo být podloženo o cca 4 mm. Kvůli omezeným možnostem přichycení podložky (přichycení je umožněno jen po stranách), může při délce přes 200 mm dojít k nedokonalému dolehnutí mezi šrouby. Proto byla podložka vyrobena z desky, která byla vyžihána pro odstranění vnitřního pnutí, aby při obrábění nedošlo k deformaci a podložka zůstala v požadované toleranci rovinnosti

a přesně dosedla na stranu retractu. Uchycení enkodéru i s nalepeným zlatým pravítkem je zobrazeno na obrázku 2.3.



Obrázek 2.2: Doporučená vzdálenost čtecí hlavy enkodéru od pravítka [19]



Obrázek 2.3: Uchycení enkodéru a pravítka na skutečném zařízení v laboratoři

2.3 Koncový spínač

Retrahovací mechanismus je osazen dvěma mikrospínači. Jeden v poloze *retracted* je využíván k získání pozice *home*, od níž je mikrokrokováním řízena vzdálenost, o kterou se má retract, respektive detektor posunout. Druhý mikrospínač je kontrola maximálního vysunutí, aby nedošlo k nárazu.

Originální mikrospínače jsou v podstatě nejlevnější možná řešení, negarantují však velkou přesnost ani tepelnou stabilitu. Proto nebyly při testování vůbec využívány. Aby byly výsledky všech provedených měření porovnatelné, byl *home* spínač nahrazen přesnější variantou dotykového spínače s rubínovou kuličkou typu MY-COM H75/S35 od firmy Baumer (obr. 2.4).



Obrázek 2.4: Koncový spínač MY-COM H75/S35 použitý pro získání home pozice při měření [15]

Uchycení tohoto spínače bylo vyřešeno úpravou dílu držícího motor, který byl rozšířen a opatřen dírou s jemným závitem M8x0.5. Spínač pro kontrolu maximálního vysunutí nebyl nahrazen ničím, protože testování probíhalo v laboratorních podmínkách za časté kontroly stavu mechanismu a jeho funkce.

2.4 Měření teploty

Teplota byla měřena za účelem zjištění vlivu její změny na backlash, přesnost a opakovatelnost mechanismu a případné odhalení kritických zdrojů tepla.

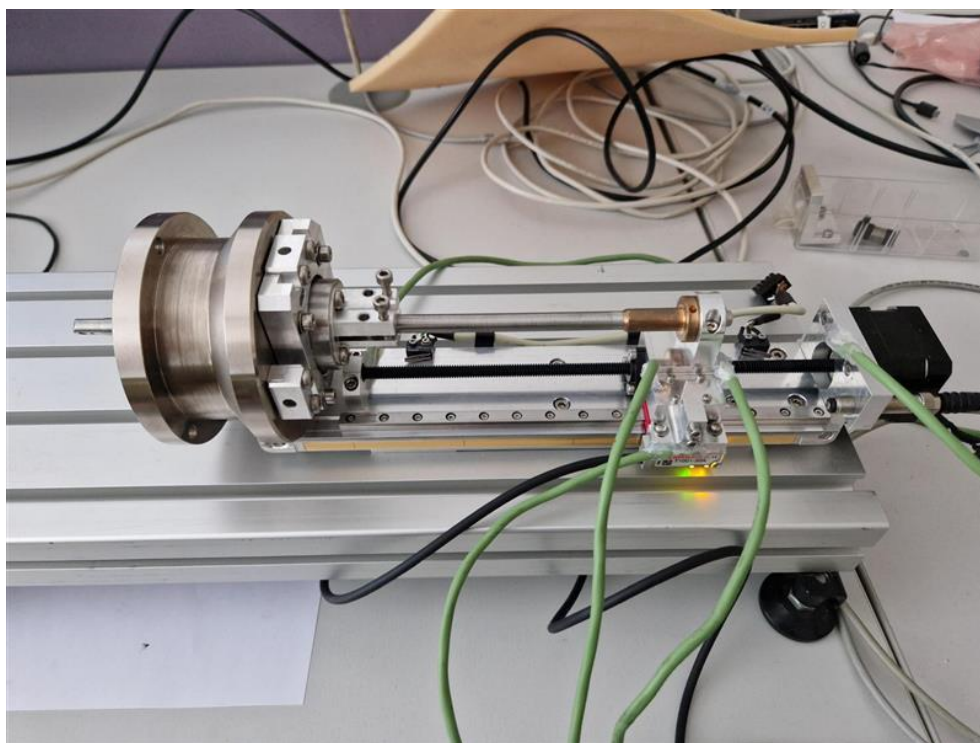
Na zařízení byly identifikovány celkem čtyři potenciální zdroje tepla, do jejichž bezprostřední blízkosti byly umístěny termočlánky. Jedná se o:

1. Motor – termočlánek umístění na držáku motoru.
2. Anti-backlashová matice – dva termočlánky umístěny na „voziček“, k němuž je matice přišroubována. Vzhledem k tomu, že je matice plastová, nebyl očekáván velký přenos tepla, proto byly osazeny dva senzory, aby bylo možné sledovat rozdíl teplot u příruby matice a na opačném konci a identifikovat, zda je zdrojem tepla matice.
3. Čtecí hlava enkodéru – termočlánek umístěn na držáku čtecí hlavy.

4. Domeček s o-kroužkem držící volný konec pohybového šroubu – termočlánek umístěn přímo na domečku.

Mechanismus osazený termočládky je vyobrazen na obrázku 2.5. K mechanismu byl přidán ještě šestý termočládek pro získání referenční teploty okolí, který byl navařen na kus hliníkové destičky.

Termočládky byly zvoleny oproti původně zamýšleným odporovým snímačům proto, že nemusejí být k dílům nalepovány – vrstva lepidla vytváří tepelný odpor a měření teploty je tak méně přesné. Termočládky naopak mohou být pomocí termočládkové svářečky navařeny přímo na hliníkové díly zkoumaného mechanismu.



Obrázek 2.5: Retract kompletně osazený měřícími prvky. Zelené kabely jsou termočládky T1-T5

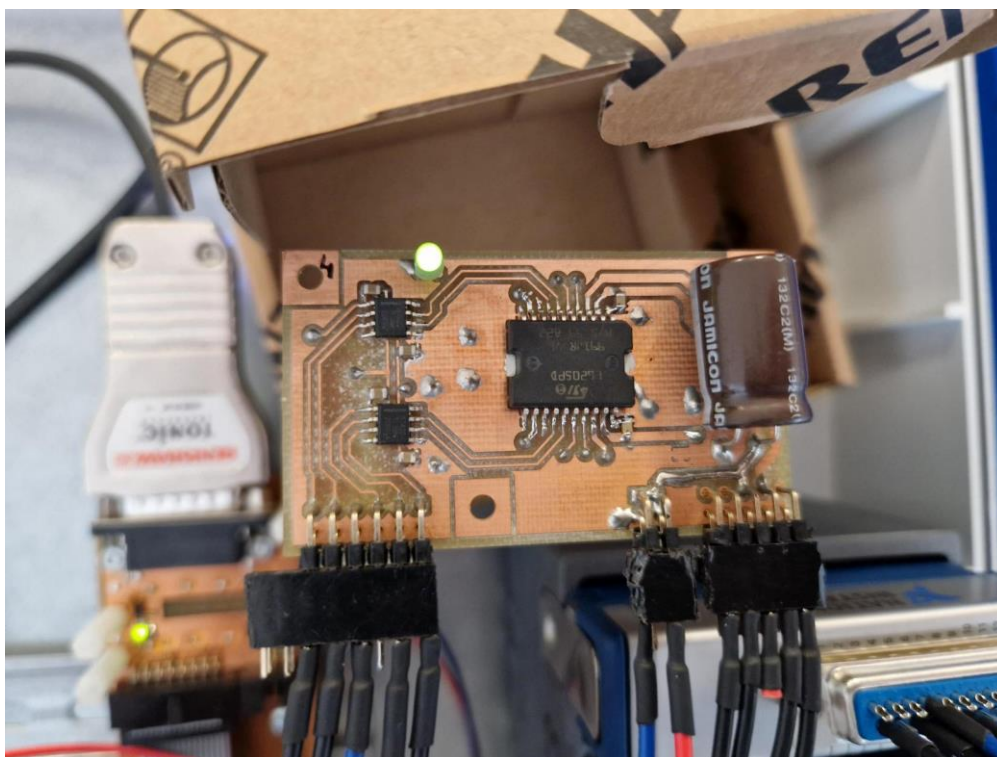
Data z termočládků byla sbírána pomocí měřící karty pro termočládky a kontroléru compatRIO a následně zpracována a logována pomocí LabVIEW skriptu.

2.5 Řízení krokového motoru

Jak je již popsáno v kapitolách výše, mechanismus je poháněn hybridním krokovým motorem s 200 celými kroky na otáčku. Na zařízení určeném k prodeji je řízen pomocí

SAMC (*single axis motion controller*) s FPGA čipem. Celé kroky jsou rozděleny na 51200 mikrokroků a celý mechanismus je řízen v otevřené smyčce. Aby bylo dosaženo co nejvíce shodných podmínek i v testování, jako při řízení v provozu, byl zvolen také kontrolér s FPGA čipem (compactRIO) a řízení po 51200 mikrokrocích.

S praktickou implementací tohoto řízení velmi pomohla diplomová práce s názvem „Návrh zařízení pro měření smáčivosti povrchů“ [22], která se řízením hybridních krokových motorů pomocí mikrokrokování zabývala. Bylo možné použít stejnou silovou desku (obr. 2.6), protože se jednalo o stejnou velikost motoru. Dále bylo také možné s úpravami využít LabVIEW skript pro generování pulzů.



Obrázek 2.6: Silová deska pro napájení krokového motoru

2.5.1 Software pro řízení motoru

Jak je uvedeno v kapitole 1.2, celé kroky motoru je možné rozdělit na menší části připojováním cívek motoru k různým hladinám napětí takovým způsobem, že magnetické pole způsobené protékajícím proudem je schopné udržet rotor i v mezipolohách. Protože je motor napájen z konstantního napětí, je různých hladin dosaženo pomocí PWM (*pulse width modulation*). Aby bylo řízení plynulé a mikrokroky rovnoměrné, musí se napětí na fázích

harmonicky měnit. Toho je v praktické implementaci dosaženo tak, že skript pro řízení motoru obsahuje dvě *lookup* tabulky. Vždy pro jednu periodu funkce sinus, respektive cosinus. Z těch je pak při generování pulzů odečítána potřebná hodnota střídý pro PWM.

Jak je již zmíněno v kapitole 1.2, na obrázku 1.7 není použití funkcí *sin*, resp. *cos* nejideálnějším řešením, ale protože je stejným způsobem řízen i retract určený k prodeji, je to pro měření jeho vlastností nejlepší varianta.

Rychlost otáčení motoru je dána tím, jak často se odečítají nové hodnoty střídý z předem definovaných harmonických funkcí. To je v softwaru řešeno počtem cyklů, které se na FPGA čipu vykonají, než dojde k načtení nových hodnot pro každou fázi. Počet cyklů je dán diskrétně předdefinovanou funkcí také v podobě *lookup* tabulky. Změnou hodnot funkce je možné měnit rychlost, zejména *rampup* při rozjezdu.

Zadávání polohy, respektive počtu otáček, které má motor vykonat, je vyřešeno zadáním požadované polohy v počtech pulzů. Počet potřebných pulzů je možné získat ze stoupání pohybového šroubu a úhlového natočení motoru při jednom mikrokroku (viz rovnice 1.1). Skript loguje v počtech pulzů i svou aktuální pozici a rozdíl pozice aktuální a požadované je pak počet, kolikrát dojde k načtení nové hodnoty střídý. Pro úplný popis všech částí programu viz diplomová práce „Návrh zařízení pro měření smáčivosti povrchů“ [22].

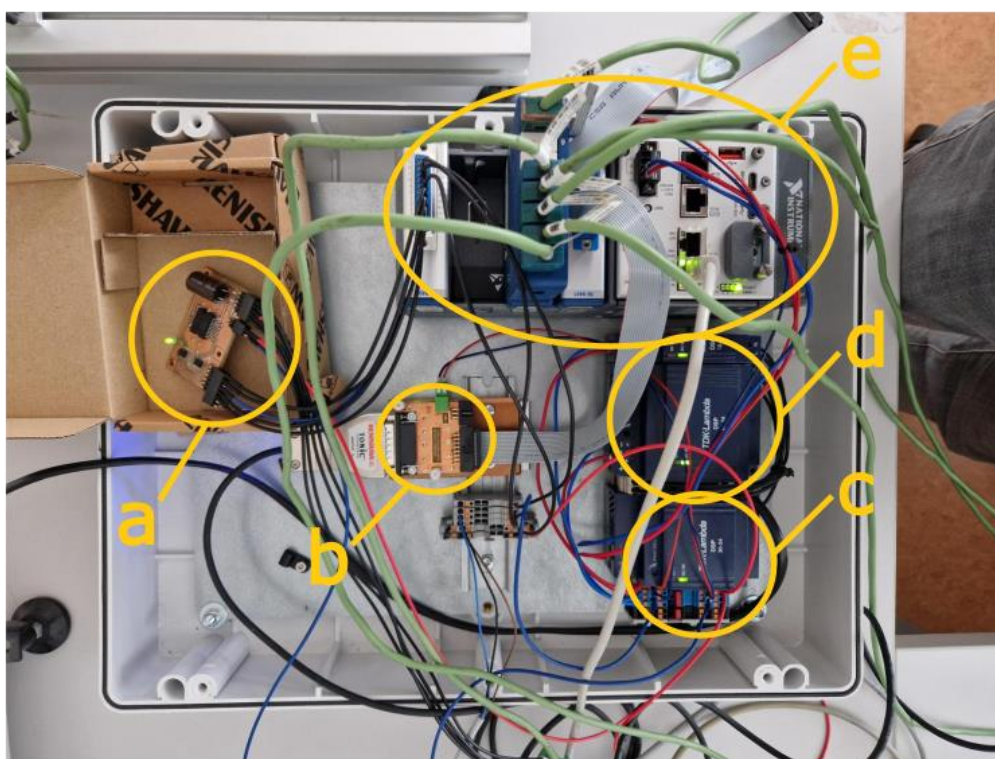
Na mikroskopech jsou retracty připojovány k 24 V zdroji. Ke stejnému napětí byl tedy připojen i motor na mechanismu určeném k testování. Jelikož je však výrobcem specifikováno napětí pouze 12 V, bylo nutné jej pomocí PWM snížit tak, aby hodnoty proudu tekoucí jednotlivými fázemi nepřesáhli 0.3 mA. Hodnota střídý byla získána experimentálně. Připojením motoru ke zdroji schopnému omezovat proud, byl nastaven limit 0.3 mA, aby nedošlo ke zničení vinutí. Následně se iteračně měnila střída a zvyšovalo se napětí na zdroji, až bylo při napětí 24 V dosaženo odběru proudu právě 0.3 mA.

Výsledný, harmonicky se měnící signál PWM ovládající digitální *piny*, ke kterým je připojena silová deska pro motor, je tedy ještě na konec modulován s konstantní hodnotou střídý.

2.6 Připojení senzorů a ukládání dat

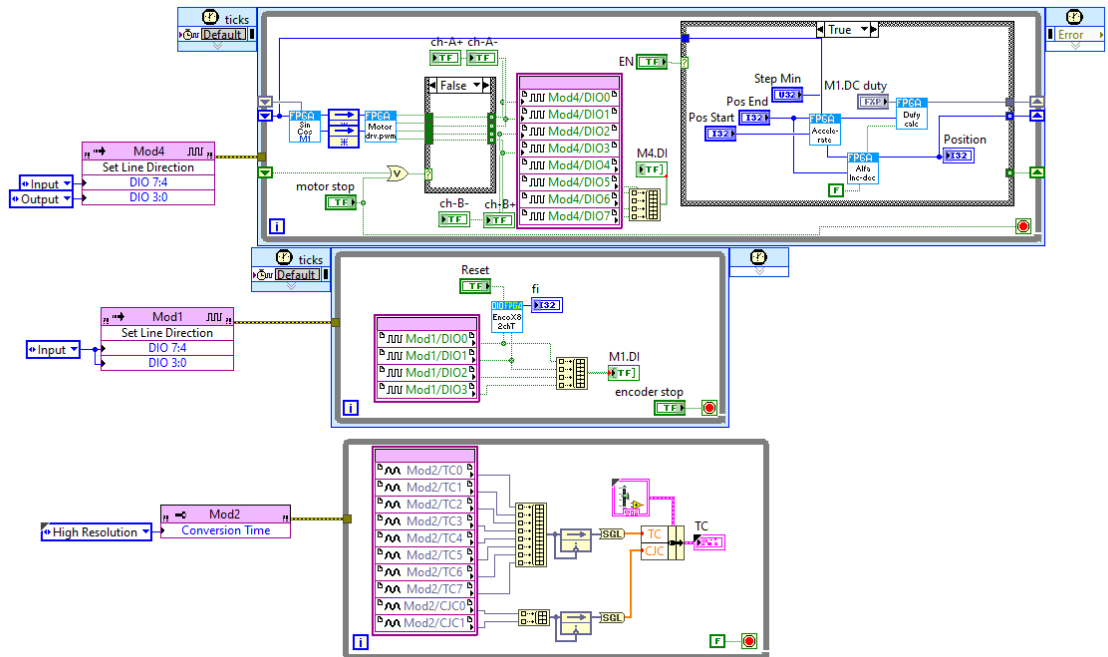
Vybrané senzory popsané v kapitolách výše byly připojeny k cRIO přes příslušné měřicí karty. Enkodér a koncový snímač ke kartě s digitálními vstupy a termočlánky k dedikované kartě pro termočlánky.

Kompletní zapojení celé měřicí soustavy je vyobrazeno na obrázku 2.7, kde jednotlivé části jsou: a) silová deska krokového motoru, b) převodník diferenciálního signálu z enkodéru na signál TTL, c) 24 V zdroj pro cRIO, d) 24 V zdroj pro krokový motor, e) cRIO se dvěma digitálními kartami a jednou měřicí kartou pro termočlánky.



Obrázek 2.7: Zapojení měřicí soustavy

Všechny snímače jsou vzorkovány a zpracovány na FPGA modulu, přepočítání fyzikálních veličin je realizováno v *real-time* kontroléru po vyčtení z FPGA. Poloha enkodéru a koncový snímač jsou vzorkovány na 40 MHz (obr. 2.8 [upravený kód pana Dr. Houšky]). Analogové hodnoty napětí z termočlánku jsou vzorkovány na cca. 2 Hz. Hlavní výhodou zpracování na FPGA je, že procesor *real-time* kontroléru není zbytečně zaměstnáván neustálým vzorkováním digitálních vstupů a zároveň je dosaženo vysoké časové stability vzorkování.

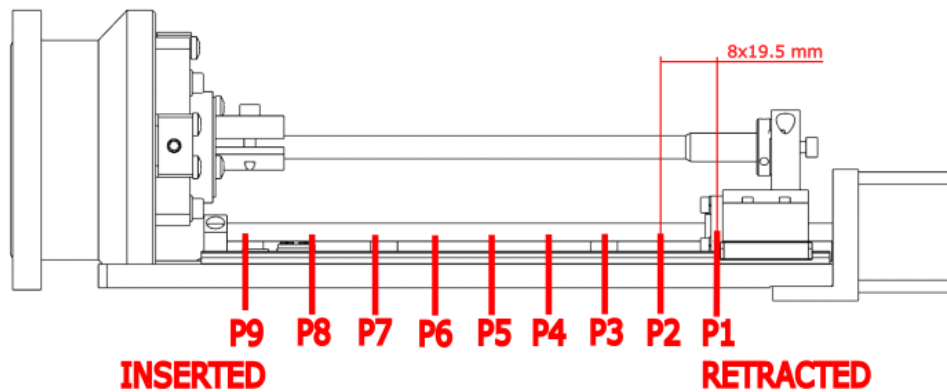


Obrázek 2.8: LabVIEW kód běžící na FPGA čipu

Přístup k datům uloženým v příslušných proměnných je vyřešen pomocí tzv. *Network Published Variables* (dále jen NPV, ekvivalent globální proměnné), které LabVIEW umožňuje vytvořit a ke kterým lze přistupovat i z jiných skriptů. Díky nim bylo možné vytvořit skripty i mimo FPGA čip a mít stále přístup jeho proměnným.

2.6.1 Program řídící polohu retractu

Na *real-time* targetu, který je součástí kontroléru compactRIO, byl vytvořen stavový automat obsahující stavy, které odpovídají předem definovaným pozicím retractu pro testování. Tyto pozice byly zvoleny v souladu s normou ISO 230-2, jak je popsáno v kapitole 1.4.1. Celkem se jedná o 9 poloh po 19.5 mm (obr. 2.9). Přepínáním stavů je možné polohovat mechanismem, a protože jsou uloženy jako NPV je možné je měnit i z jiných skriptů, čehož je využíváno při spuštění jednotlivých testů.



Obrázek 2.9: Označení poloh na retractu, do kterých bylo při měření najížděno

Součástí tohoto stavového automatu je i vypnutí motoru při najetí na koncový spínač a získání *home* pozice nastavením aktuální pozice, kterou si počítá skript pro mikrokrokování na nulu.

V každém stavu je uložen počet pulzů, jež se musí od nulové pozice vykonat pro dojetí do požadované polohy. Tyto hodnoty jsou pak zapisovány do řídicí proměnné v krokovacím skriptu.

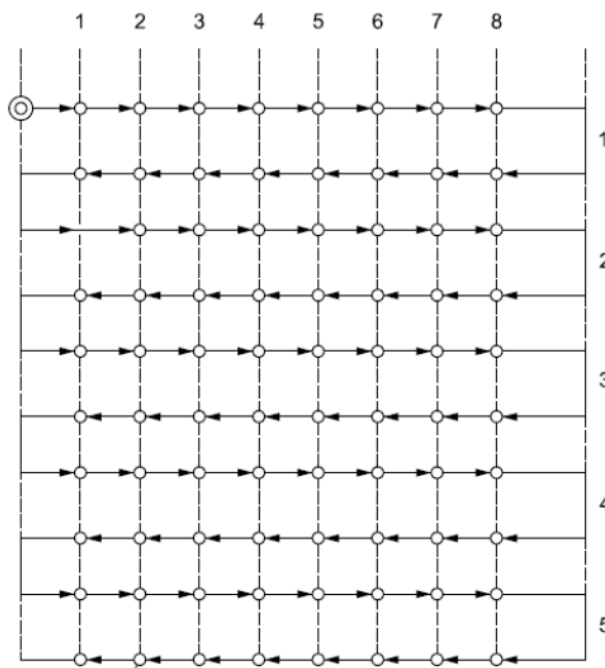
2.6.2 Program pro testování

Skript pro řízení testů už neběží na kontroléru, ale na připojeném počítači. Je to opět program v podobě stavového automatu, který pomocí NPV zapisuje požadované stavy dle typu testu do proměnných ve skriptu popsáném výše. Zároveň se zde zapisují naměřená data jak z enkodéru, tak z termočlánků do matice, která je po ukončení programu uložena na disk počítače v podobě textového souboru.

2.6.3 Typy testů

Protože byly objednané matice jiného typu, než se kterými se retract prodává, a měly hodně dlouhý *lead-time*, zbýval čas pouze na dva typy testů. První byl test přesnosti a opakovatelnosti, ze kterého je možné vhodným zpracováním dat dostat výsledky jak pro obousměrnou, tak i pro jednosměrnou opakovatelnost. Tímto testem prošly všechny typy anti-backlash matic. Matice typu NTB byla takto otestována několikrát pro různá předpětí a také před a po vykonání požadovaného počtu cyklů.

Struktura testu byla následující. Byl zvolen počet 9 pozic, na obrázku 2.9 označené jako P1 – P9, to by mělo být dostatečné množství bodů, potřebných k ucelené informaci o přesnosti a opakovatelnosti po celé délce pojezdu. Pozice od sebe byly rovnoměrně odděleny o 19.5 mm, což odpovídalo 41 995 mikrokrokům. Dle normy ISO 230-2 bylo do každé pozice najeto z každé strany 5x (obr. 2.10).



Obrázek 2.10: Průběh testu přesnosti a opakovatelnosti dle normy ISO 230-2 [14]

Druhý test, byl navržen tak, aby sloužil jako cyklovací test a jako ukázka vlivu změny teploty. Protože byl požadovaný počet cyklů v řádech desítek tisíc (nakonec bylo nacyklováno 40 tisíc cyklů), byl počet pozic omezen pouze na pozice P1 a P9. I s tímto omezením jsou však data velmi cenná, protože pozice P9, tedy poloha *inserted*, je klíčová poloha a pro funkci detektorů umístěných na retractu je jedna z nejdůležitějších.

2.7 Zpracování dat

Zpracování dat proběhlo mimo prostředí LabVIEW pomocí matlab skriptů. Matlab poskytuje ideální nástroje pro práci s naměřenými daty a pro jejich zobrazení dle doporučení norem. Pro každý test přesnosti a opakovatelnosti byly spočítány příslušné hodnoty dané normou.

Průměrná jednosměrná úchylka v poloze:

$$\bar{x}_i \uparrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \uparrow \quad (1.2)$$

Průměrná obousměrná úchylka v poloze:

$$\bar{x}_i = \frac{\bar{x}_i \uparrow + \bar{x}_i \downarrow}{2} \quad (1.3)$$

Necitlivost v poloze:

$$B_i = \bar{x}_i \uparrow - \bar{x}_i \downarrow \quad (1.4)$$

Necitlivost v ose:

$$B = \max (|B_i|) \quad (1.5)$$

Odhad jednosměrné opakovatelnosti osy nastavení polohy v poloze:

$$s_i \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \uparrow - \bar{x}_i \uparrow)^2} \quad (1.6)$$

Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v poloze:

$$R_i \uparrow = 4s_i \uparrow \quad (1.7)$$

Obousměrná opakovatelnost nastavení polohy v poloze:

$$R_i = \max (2s_i \uparrow + 2s_i \downarrow + |B_i|; R_i \uparrow; R_i \downarrow) \quad (1.8)$$

Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose:

$$R \uparrow = \max (R_i \uparrow) \quad (1.9)$$

Obousměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose:

$$R = \max (R_i) \quad (1.10)$$

Při čemž i je index polohy, a j je počet najetí do dané polohy. Šipky znázorňují směr, kterým bylo do polohy najeto.

2.8 Výsledky měření

V následujících podkapitolách budou odprezentovány výsledky jednotlivých měření a stručná diskuze.

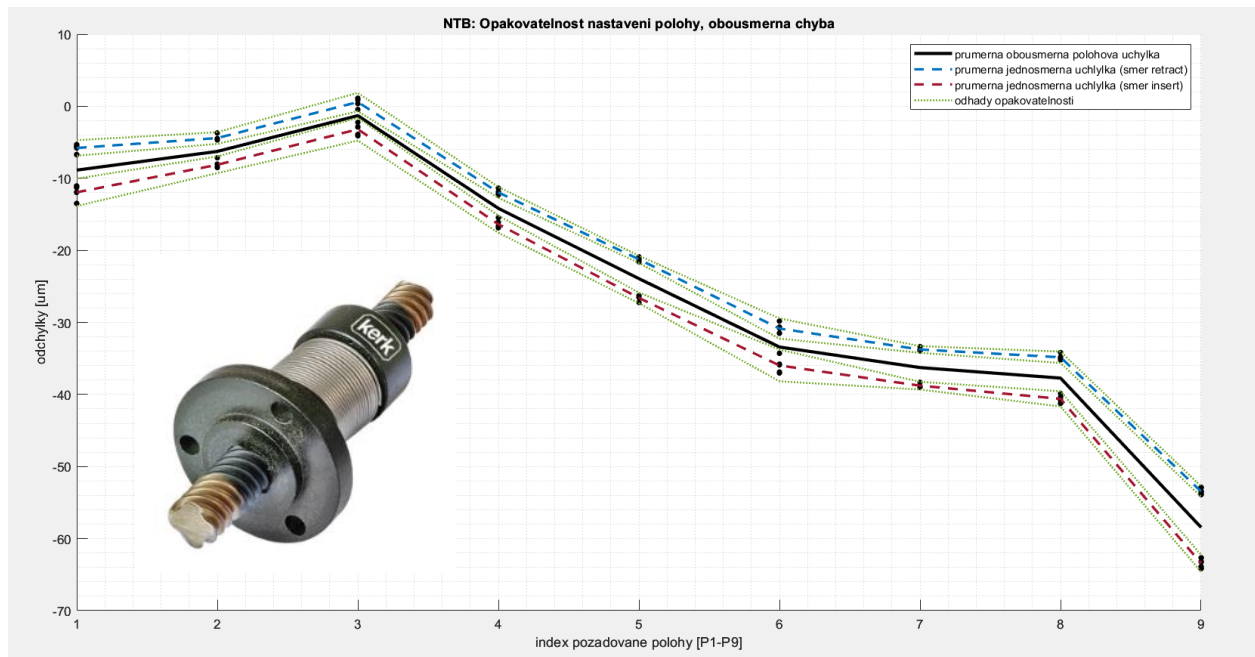
2.8.1 Měření různých typů matic

Pro ověření vhodnosti zvolené anti-backlashové matice na retractu byly otestovány celkem 4 různé matice, které jsou dostupné pro pohybový šroub průměru ¼ in se stoupáním 0.096 in. Byly to typy NTB, ZBA, ZBX a BFW. Bližší informace ke každé z matic jsou popsány v kapitole 1.3.2. Protože je matice typu NTB momentálně používána na retractu určeném k prodeji, budou naměřené hodnoty ostatních matic vždy srovnávány s maticí NTB.

Ke každé matici budou prezentovány následující hodnoty, každá z nich spočítána dle vztahů 1.2-1.10:

1. Obousměrná chyba polohování v ose, značená: A
2. Průměrná obousměrná chyba polohování v ose, značená: M
3. Necitlivost v ose, značená: B
4. Obousměrná opakovatelnost nastavení polohy v ose, značená: R
5. Jednosměrná opakovatelnost nastavení polohy ve směru insert v poloze P9, značená: R_{9-insert}

Výsledky měření pro typ matice NTB:



Obrázek 2.11: Výsledek měření matice typu NTB

$$A = 66.5 \mu\text{m}$$

$$M = 57.1 \mu\text{m}$$

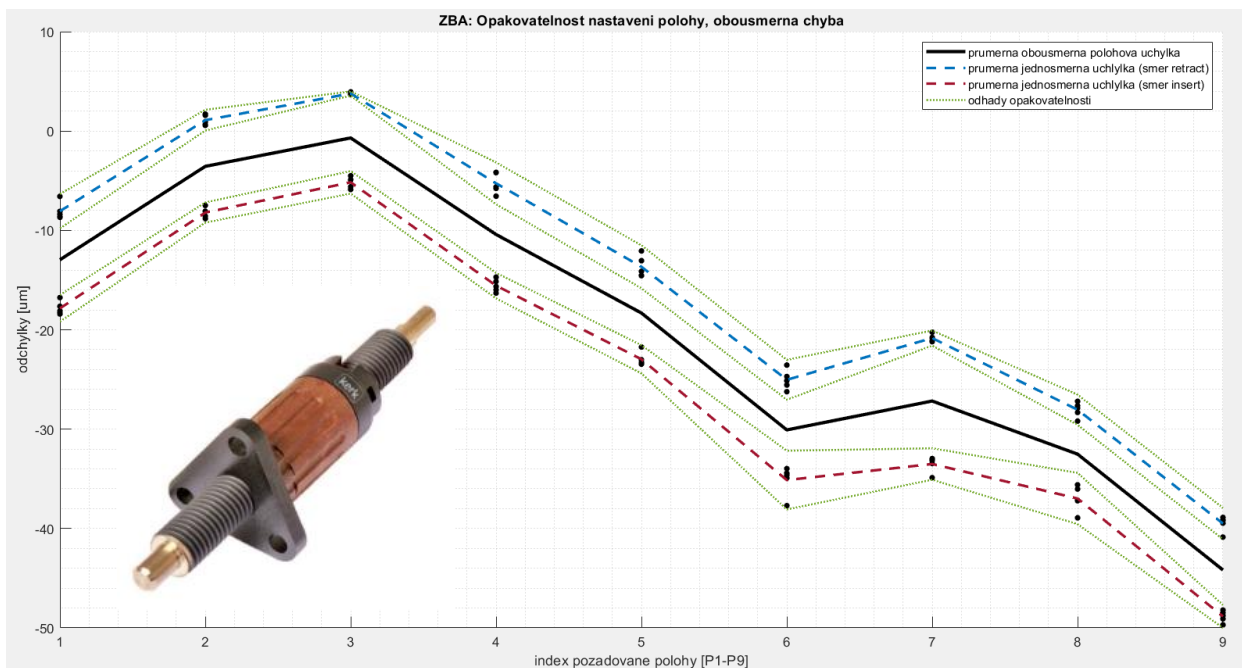
$$B = 10.0 \mu\text{m}$$

$$R = 11.9 \mu\text{m}$$

$$R_{9\text{-insert}} = 2.4 \mu\text{m}$$

Matice NTB byla předepnuta dle instrukcí pro montáž k retractům určeným k prodeji. Z grafu je patrné, že i anti-backlash matice nějaký backlash vykazuje. Výsledek měření je uspokojivý a splňuje požadavky kladené na mechanismus. Hodnoty matice NTB jsou základem pro srovnání s ostatními typy matic.

Výsledky měření pro typ matice ZBA:



Obrázek 2.12: Výsledek měření matice typu ZBA

$$A = 54.0 \mu\text{m}$$

$$M = 43.5 \mu\text{m}$$

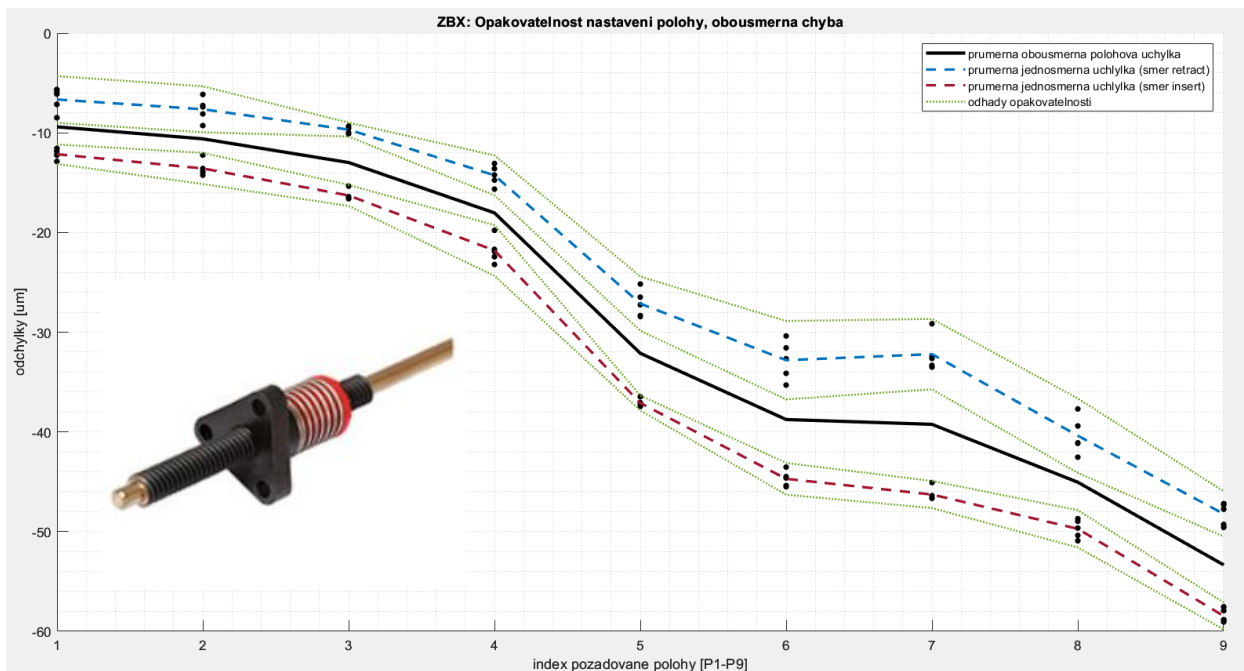
$$B = 12.7 \mu\text{m}$$

$$R = 15.1 \mu\text{m}$$

$$R_{9\text{-insert}} = 2.3 \mu\text{m}$$

Oproti matici NTB je výsledek opakovatelnosti v ose o 26.9 % horší. Menší obousměrná a průměrná chyba polohování může být dána delším závitem v matici, který je v kontaktu s pohybovým šroubem. Jednosměrná opakovatelnost ve směru *insert* do polohy P9 je stejně jako u matice NTB v pořádku.

Výsledky měření pro typ matice ZBX:



Obrázek 2.13: Výsledek měření matice typu ZBX

$$A = 55.5 \mu\text{m}$$

$$M = 43.9 \mu\text{m}$$

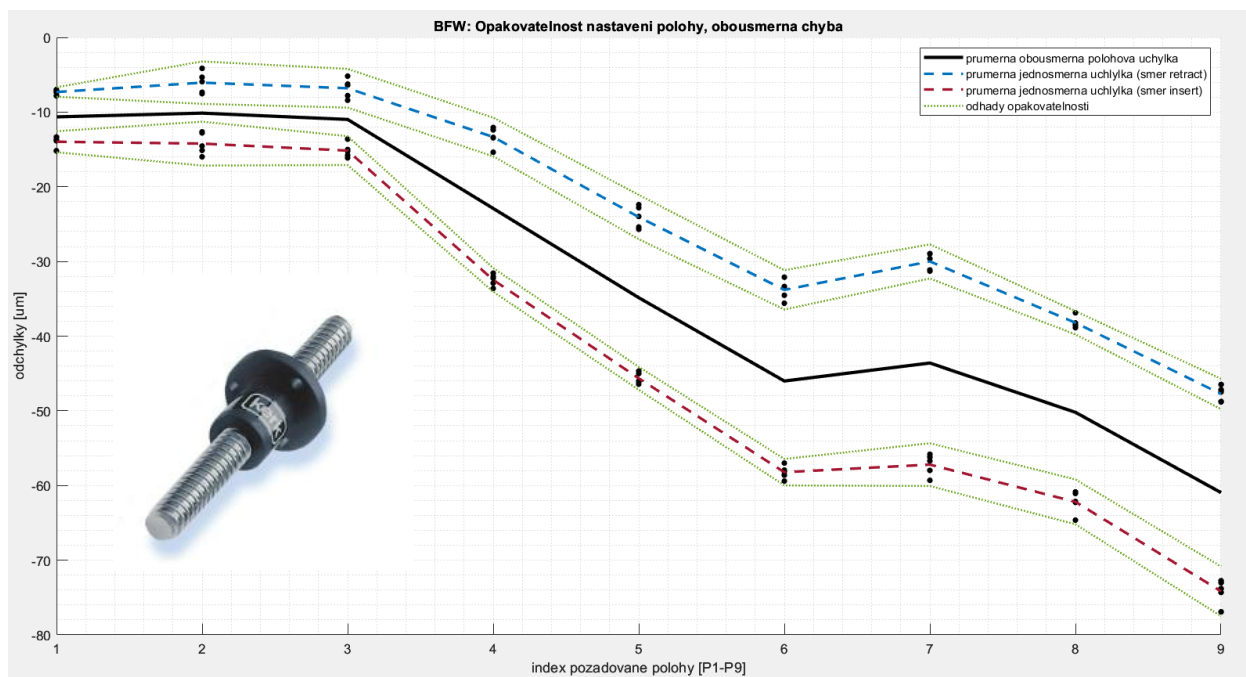
$$B = 14.1 \mu\text{m}$$

$$R = 19.0 \mu\text{m}$$

$$R_{9\text{-insert}} = 2.7 \mu\text{m}$$

Stejně jako u matice ZBA vykazuje typ ZBX lepší vlastnosti pro chyby polohování. Předepnutí matice je pravděpodobně nižší, než na kolik byly předepnuty předchozí typy matic, což má za následek narůst v hodnotě obousměrné opakovatelnosti v ose oproti matici NTB o 59.7 %.

Výsledky měření pro typ matice BFW:



Obrázek 2.14: Výsledek měření matice typu BFW

$$A = 74.3 \mu\text{m}$$

$$M = 50.8 \mu\text{m}$$

$$B = 27.2 \mu\text{m}$$

$$R = 32.4 \mu\text{m}$$

$$R_{9\text{-insert}} = 6.6 \mu\text{m}$$

Matice BFW nepatří do kategorie anti-backlash matic. Neumožňuje žádný způsob předepnutí a jedná se pouze o „přesnou“ matici pro pohybové šrouby. Nárůst hodnot opakovatelnosti v ose o téměř dvojnásobek proti typu NTB je očekávaný výsledek. Zajímavé je i téměř trojnásobné zhoršení v jednosměrné opakovatelnosti do polohy P9 oproti ostatním modelům matic, na kterou by backlash neměl mít významný vliv.

Chyby v polohování, velmi podobné pro všechny typy matic, jsou nejspíše dány nepřesnostmi při výrobě pohybového šroubu. Ačkoliv se jedná o chyby nežádoucí, nejsou tak problematické jako vysoké hodnoty pro opakovatelnost, jelikož nepřesnosti v ose je možné kompenzovat mapováním. Z grafů je patrné, že chyba polohování se více projevuje

u matic s větší mírou předepnutí, jelikož ty jsou pak citlivé na jemnější nepřesnosti v soustavě matice–šroub. Přehledné hodnoty všech matic jsou v tabulkách 2.1 a 2.2.

Tabulka 2.1: Naměřené hodnoty všech testovaných typů matic

Typ matice	A [μm]	M [μm]	B [μm]	R [μm]	R _{9-insert} [μm]
NTB	66.5	57.1	10.0	11.9	2.4
ZBA	54.0	43.5	12.7	15.1	2.3
ZBX	55.5	43.9	14.1	19.0	2.7
BFW	74.3	50.8	27.2	32.4	6.6

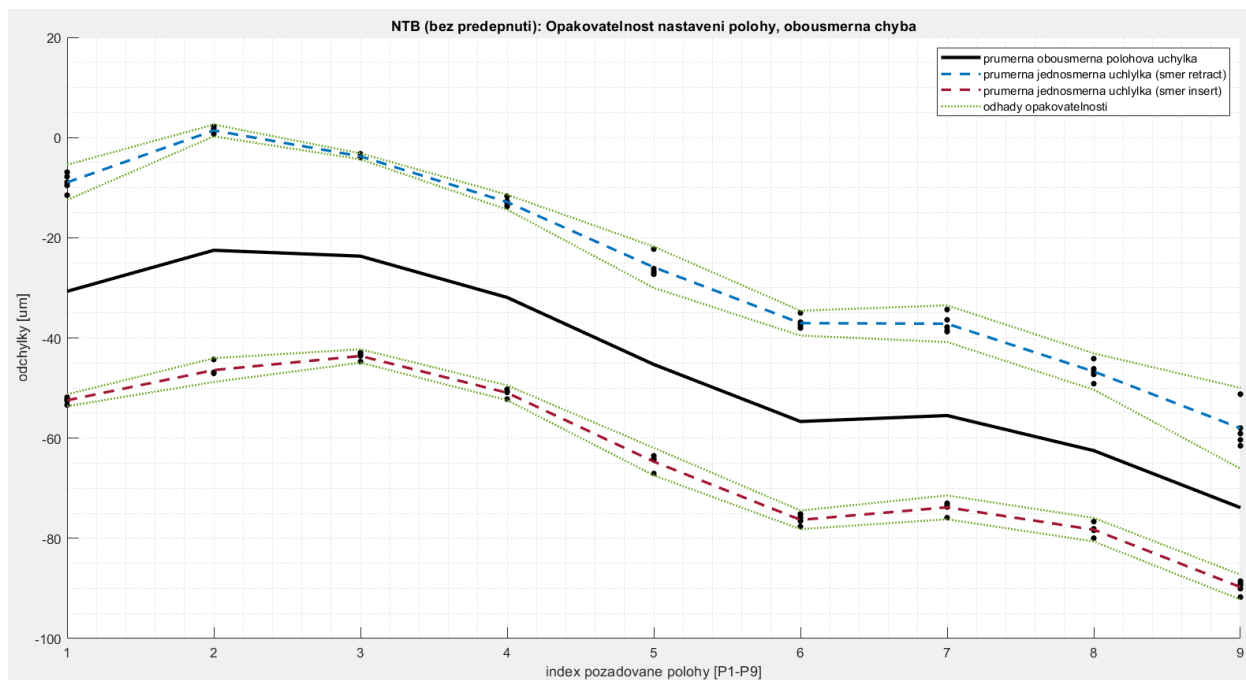
Tabulka 2.2: Procentuální nárůst nebo pokles naměřených hodnot proti hodnotám matice NTB (zeleně – lepší hodnoty než NTB, červeně – horší)

NTB	66.5 μm	57.1 μm	10.0 μm	11.9 μm	2.4 μm
Typ matice	ΔA [%]	ΔM [%]	ΔB [%]	ΔR [%]	$\Delta R_{9\text{-insert}}$ [%]
ZBA	18.78	23.82	27.00	26.89	4.17
ZBX	16.54	23.12	41.00	59.66	12.50
BFW	11.83	11.03	172.00	172.27	175.00

2.8.2 Měření různých úrovní předepnutí matice typu NTB

Matice typu NTB umožňuje nastavení předepnutí po fixních krocích vždy o $\frac{1}{4}$ otáčky pružiny – od nulového předepnutí až po otočení o celou otáčku. Testování všech možností nastavení může poskytnout informaci o ideální úrovni předepnutí, popřípadě informaci o tom, zda je přílišné předepnutí kontraproduktivní i mimo problémy s větším třením a opotřebením.

NTB 0 % předepnutí:



Obrázek 2.15: Výsledek měření matice typu NTB pro úroveň předepnutí 0 %

$$A = 94.8 \mu\text{m}$$

$$M = 51.4 \mu\text{m}$$

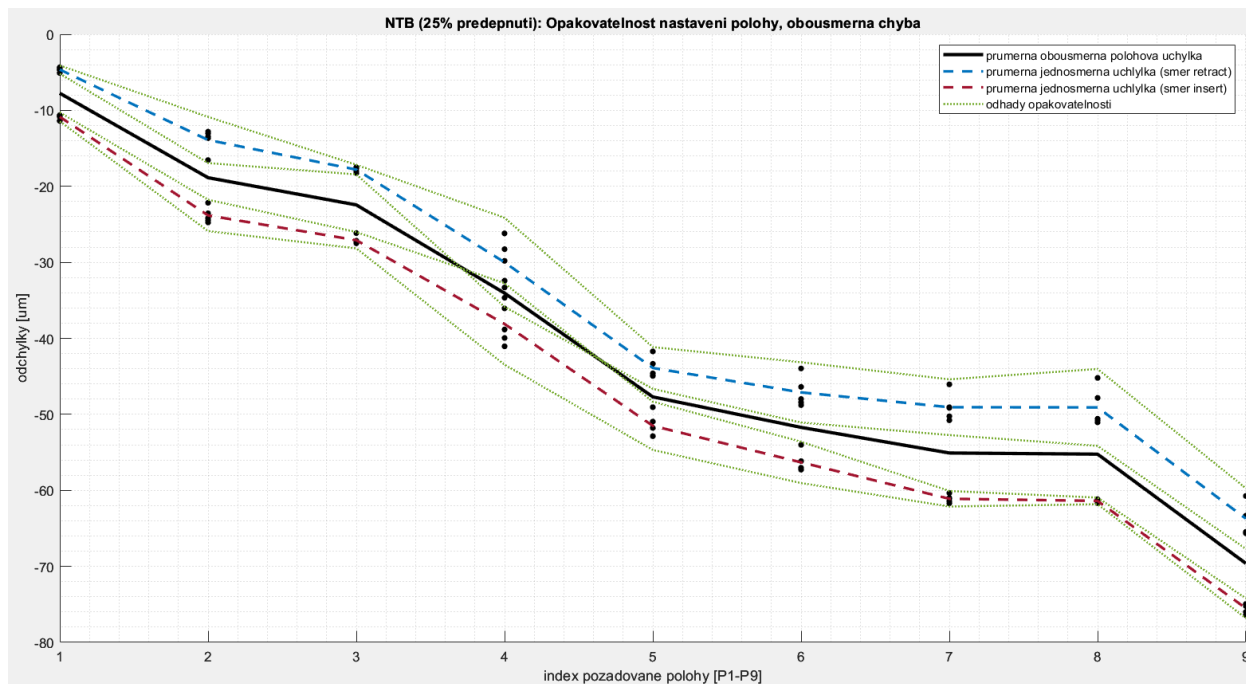
$$B = 47.8 \mu\text{m}$$

$$R = 51.4 \mu\text{m}$$

$$R_{9\text{-insert}} = 5.0 \mu\text{m}$$

Nepředepnutá matice vykazuje hodnoty podobné matici BFW, která ani předepnutí neumožňuje. O poznání horší hodnota opakovatelnosti v ose oproti typu BFW je nejspíše způsobena horší výrobní přesností (spoléhá se na předepnutí) a zároveň kratším závitem, který je v kontaktu se šroubem. Výsledek z měření nepředepnuté matice je naprosto nepřijatelný pro provoz zařízení.

NTB 25 % předepnutí:



Obrázek 2.16: Výsledek měření matice typu NTB pro úroveň předepnutí 25 %

$$A = 72.7 \mu\text{m}$$

$$M = 61.9 \mu\text{m}$$

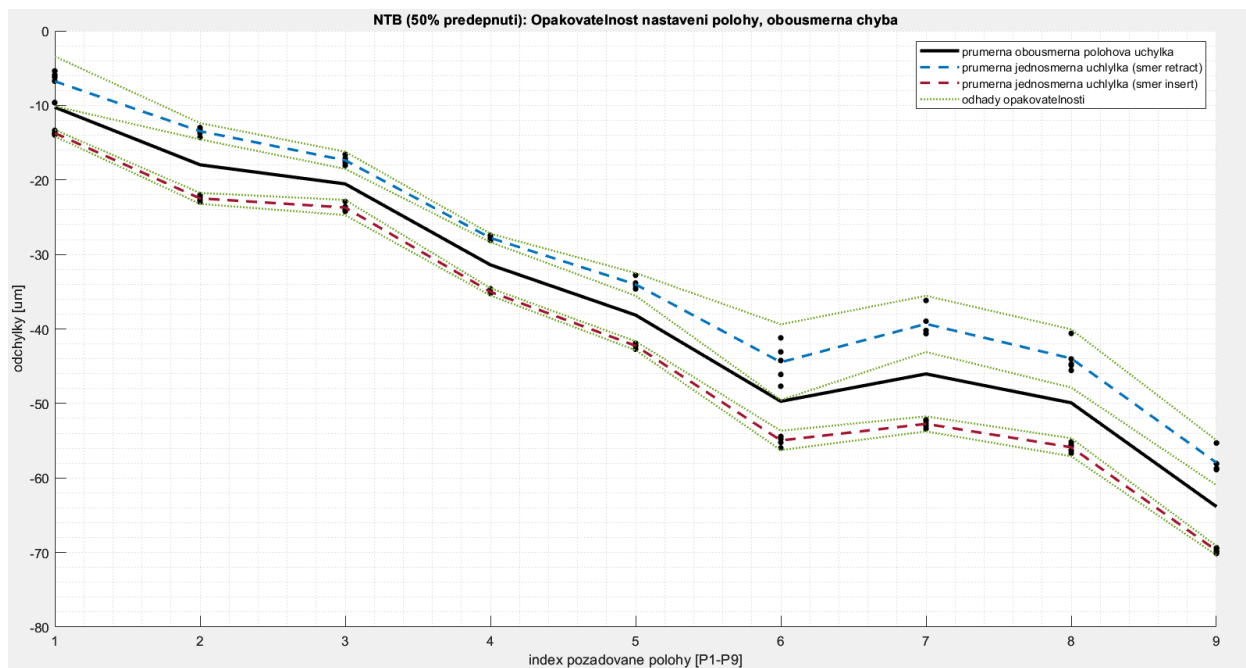
$$B = 12.3 \mu\text{m}$$

$$R = 19.3 \mu\text{m}$$

$$R_{9\text{-insert}} = 2.6 \mu\text{m}$$

Předepnutí o pouhých 25 % již zajistí požadovanou jednosměrnou opakovatelnost do polohy P9 a lepší obousměrnou opakovatelnost v ose 2.5x. Nedochozí k žádným výrazným projevům nesouososti mechanismu, rozdíl absolutních odchylek od průměrných je po celé délce retractu téměř konstantní.

NTB 50 % předepnutí:



Obrázek 2.17: Výsledek měření matice typu NTB pro úroveň předepnutí 50 %

$$A = 66.9 \mu\text{m}$$

$$M = 53.6 \mu\text{m}$$

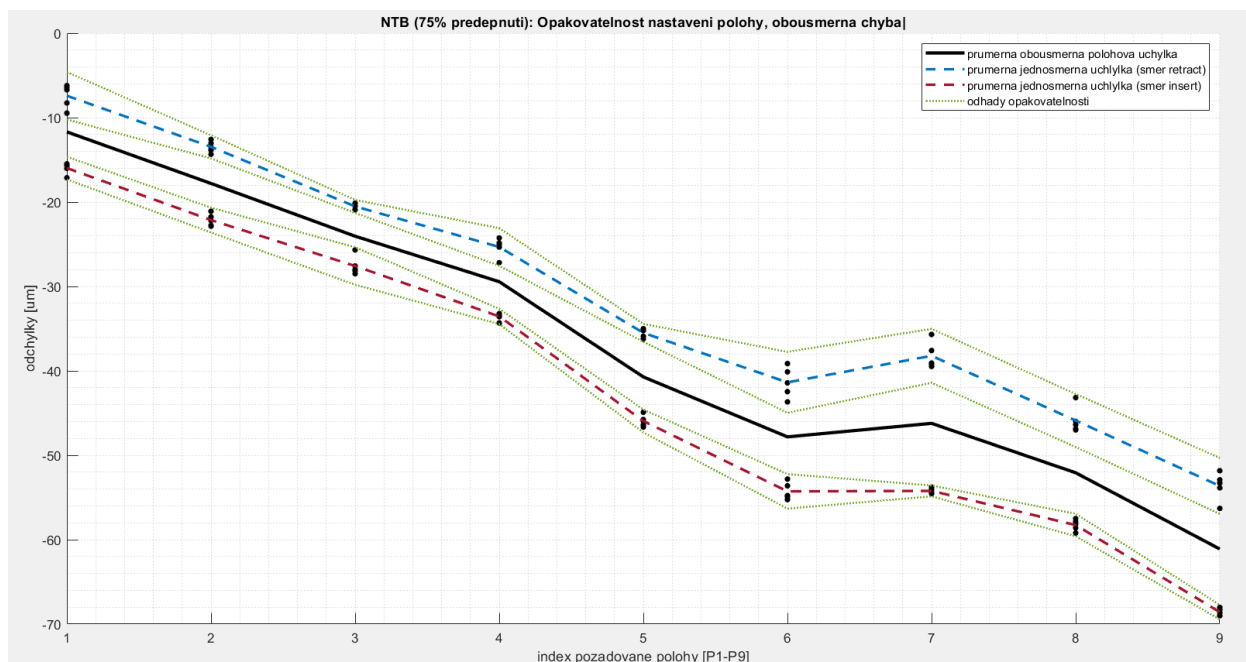
$$B = 13.4 \mu\text{m}$$

$$R = 18.2 \mu\text{m}$$

$$R_{9\text{-insert}} = 1.2 \mu\text{m}$$

Zvýšení předepnutí o dalších 25 %, zajistí další zlepšení v oblasti obousměrné i jednosměrné opakovatelnosti.

NTB 75% předepnutí:



Obrázek 2.18: Výsledek měření matice typu NTB pro úroveň předepnutí 75 %

$$A = 64.8 \mu\text{m}$$

$$M = 49.4 \mu\text{m}$$

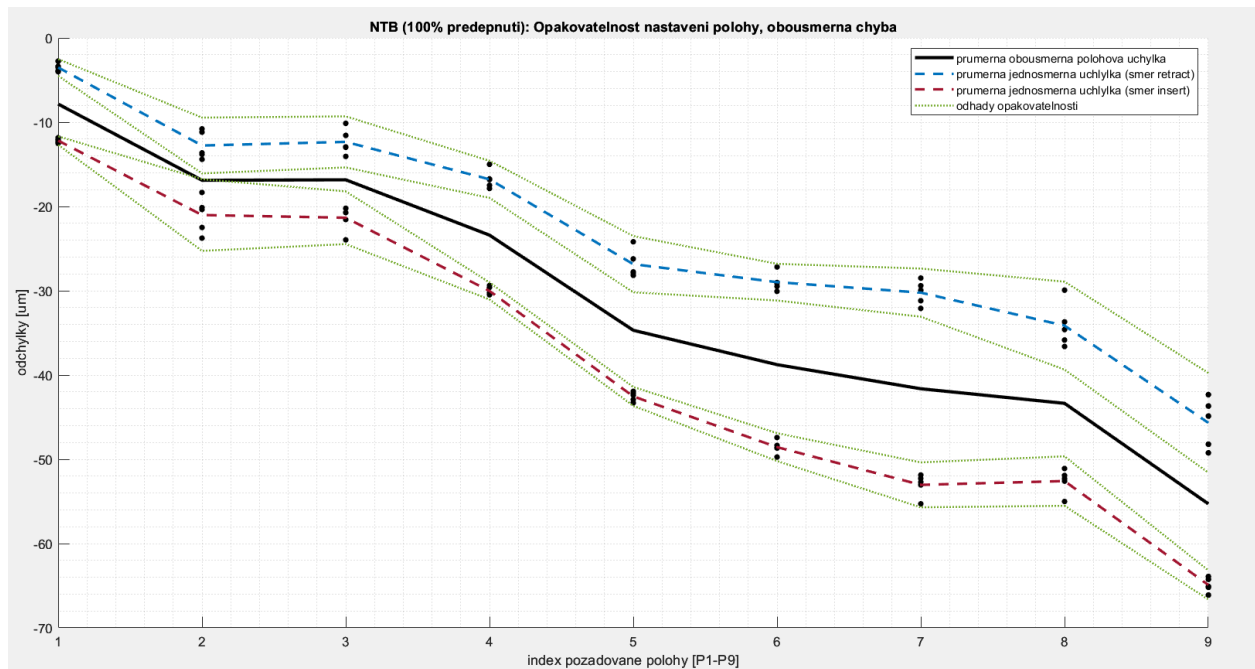
$$B = 16.0 \mu\text{m}$$

$$R = 19.8 \mu\text{m}$$

$$R_{9\text{-insert}} = 1.7 \mu\text{m}$$

Při předepnutí matice na 75 % již dochází k mírnému zhoršení její vlastností. Oproti 50procentnímu předepnutí byl naměřen nárůst hodnot opakovatelností a necitlivosti v ose. Výsledek stále vyhovuje požadavkům, které jsou na mechanismus kladeny, dochází však již k mírným projevům v nesouososti mechanismu, a nekvalitně provedená montáž a seřízení matice mohou mít za následek větší zhoršení měřených hodnot.

NTB 100% předeprnutí:



Obrázek 2.19: Výsledek měření matice typu NTB pro úroveň předeprnutí 100 %

$$A = 64.1 \mu\text{m}$$

$$M = 47.4 \mu\text{m}$$

$$B = 22.8 \mu\text{m}$$

$$R = 28.3 \mu\text{m}$$

$$R_{9\text{-insert}} = 3.5 \mu\text{m}$$

V případě maximálního předeprnutí matice dojde k zřetelnému zhoršení vlastností. Začne se výrazně projevovat způsob montáže, při kterém se příruba matice dotahuje k vozičku v pozici *inserted* co nejblíže motoru (tento postup je zvolen proto, aby nedocházelo ke křížení závitové tyče na malé vzdálenosti). V místě nejlepšího vystředění matice je chyba polohování malá spolu s obousměrnou opakovatelností (pozice P1 až P3). Se zvětšující se vzdáleností od motoru chyba narůstá, jelikož domeček na konci pohybového šroubu umožňuje jemný pohyb, aby nedocházelo k příliš velkým pnutím v mechanismu.

Stejný jev je pozorovatelný i s předeprnutím 75 %, není však ani zdaleka tak výrazný jako při úplném předeprnutí.

Úroveň předeprnutí matice NTB má velký vliv na její chování a celkové vlastnosti retractu. Z naměřených dat vyplývá, že přijatelná úroveň předeprnutí je poměrně široká a

požadavky splňovala matice předepnutá na 25 %, 50 % a 75 %. Na druhou stranu nepředepnutí má za následek tak výrazné zhoršení obousměrné opakovatelnosti v ose, že je naprosto nutné požadovanou úroveň předepnutí při montáži dodržet.

Při přílišném předepnutí dochází ke zhoršení anti-backlash vlastností matice vlivem extrémní citlivosti na způsob, jakým byl mechanismus smontován. Vyrovnáním závitové tyče a matice spolu s motorem a domečkem lze dosáhnout lepších výsledků, avšak chyby se budou výrazněji projevovat při opotřebení zařízení, nehledě na to, že při tak silném předepnutí bude opotřebení matice také mnohem rychlejší. Přehled naměřených hodnot viz tabulka 2.3.

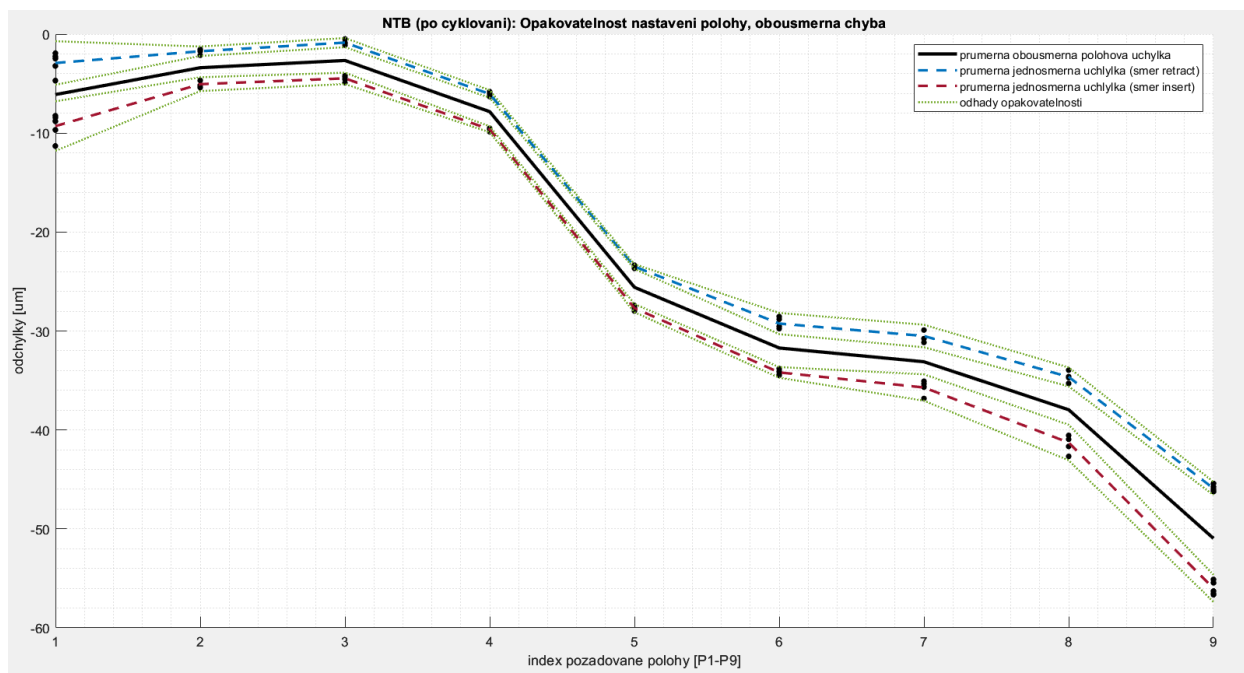
Tabulka 2.3: Naměřené hodnoty matice typu NTB pro různé úrovně předepnutí

Úroveň předepnutí	A [μm]	M [μm]	B [μm]	R [μm]	R _{9-insert} [μm]
0 %	94.8	51.4	47.8	51.4	5.0
25 %	72.7	61.9	12.3	19.3	2.6
50 %	66.9	53.6	13.4	18.2	1.2
75 %	64.8	49.4	16.0	19.8	1.7
100 %	64.1	47.4	22.8	28.3	3.5

2.8.3 Srovnání matice NTB před a po cyklování

Test vlivu opotřebení matice po vykonání cca 40 000 cyklů měl za úkol zjistit, zda je matice schopná udržet své vlastnosti po celou dobu životnosti retractu. Matice byla namontována a předepnuta dle stejných instrukcí jako pro oficiální dodavatele. Cyklování probíhalo po částech po dobu několika týdnů. Po vykonání životnostního testu nebylo s maticí žádným způsobem manipulováno a byly změřeny charakteristiky matice jako v předešlých případech.

NTB po životnostním testu:



Obrázek 2.20: Výsledek měření matice typu NTB po vykonání 40 000 cyklů

$$A = 57.0 \mu\text{m}$$

$$M = 48.3 \mu\text{m}$$

$$B = 10.1 \mu\text{m}$$

$$R = 12.1 \mu\text{m}$$

$$R_{9\text{-insert}} = 2.7 \mu\text{m}$$

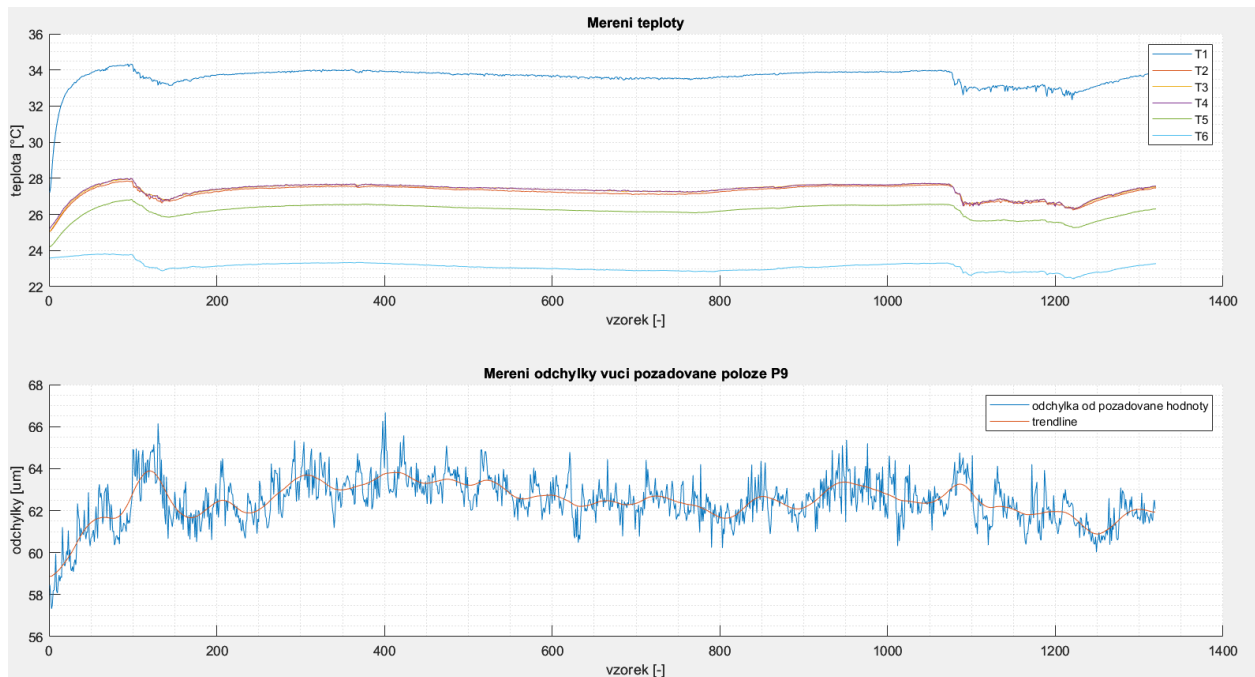
Po vykonaných cyklech nedošlo ke zhoršení vlastností matice. Dokonce došlo ke zlepšení celkové obousměrné chyby polohování a průměrné chyby polohování. Opakovatelnost v ose a jednosměrná opakovatelnost do polohy P9 zůstaly téměř stejné, viz tabulka 2.4.

Tabulka 2.4: Srovnání matice typu NTB před a po vykonání 40 000 cyklů

40 000 cyklů	A [μm]	M [μm]	B [μm]	R [μm]	R _{9-insert} [μm]
Před	66.5	57.1	10.0	11.9	2.4
po	57.0	48.3	10.1	12.1	2.7

2.8.4 Vliv teploty na chybu polohování

Životností test byl koncipován tak, aby sloužil i jako test pro získání informací o tepelných procesech za provozu. Mechanismus byl několikrát spuštěn ze studeného stavu, což odpovídalo teplotě okolí, a ponechán v chodu bez zastavení vždy cca 1500 cyklů.



Obrázek 2.21: Výsledek měření teplot na retractu (nahore), spolu s měřením odchylky polohování (dole)

K ustálení teploty dojde vždy za cca 180 cyklů, což odpovídá přibližně dvěma a půl hodinám nepřetržitého provozu. Viditelné výkyvy v křivkách teplot jsou způsobeny změnou teploty okolí. Nejpravděpodobněji došlo k otevření okna v laboratoři, kde probíhalo měření. Díky referenčnímu měření okolní teploty (světle modrá křivka T6) je možné tyto vlivy identifikovat a nepovažovat je za změny způsobené měřeným zařízením.

Nejvyšších teplot bylo dosaženo na díle držící krokový motor (T1). Teplo zde vzniká proudem tekoucím přes vinutí motoru. Teploty na vozičku (T2, T3, T4) jsou po celou dobu téměř totožné. Teplota z termočlánku T4 umístěného na držáku enkodéru, je vždy nepatrně vyšší než teploty na stranách vozičku. Z toho je možné odvodit, že zdrojem tepla byla enkodérová hlava a že teplo od motoru se přes pohybový šroub a matici do vozičku nepřenáší. Nejnižší teplota byla naměřena na domečku držícím druhý konec závitové tyče.

Nárůst této teploty pak byl způsoben kombinací přeneseného tepla z motoru přes celou platformu a tření gumového o-kroužku v domečku.

Z grafů je patrné, že trend odchylky v bodě P9 ve směru *insert* sleduje nárůst teploty způsobený provozem mechanismu. Změna odchylky je však i v extrémních případech do 10 μm . Změnu teploty je proto možné vyloučit jako faktor způsobující potenciální problémy s funkcí *retractu*.

Diskuse

Protože bylo experimentální měření provedeno na retrahovacím mechanismu (zatím prvním takovým uceleným testováním) bylo omezeno jen na naprosto zřejmé vlastnosti, které mají vliv na funkci celého zařízení. Přesnost a opakovatelnost závislá na použité anti-backlash matici je poměrně snadno uchopitelná a předpokládalo se, že výsledky měření přinesou cenné informace o zkoumaných typech matic. Toho bylo s úspěchem dosaženo a máme teď jasnější představu o tom, jak se matice v systémech chovají.

Zbývá však velké množství dat a informací, které mohou být vhodným měřením a testováním mechanismu získány. Pro úplné pochopení vůle vznikající mezi maticí a pohybovým šroubem by bylo vhodné otestovat šrouby od různých výrobců s různým stoupáním závitu a z různých materiálů, respektive s jinou povrchovou úpravou. To by umožnilo otestování výrazně širší spektrum matic (opět od různých výrobců). Dále je možné testovat vliv maziva jak na backlash, tak na životnost matic a jejich vlastnosti v průběhu cyklování. Další cenné informace by mohlo přinést experimentování s pokročilejšími metodami pro řízení motoru mikrokrokováním. Naměření skutečné charakteristiky motoru a její použití pro generování pulsů do motoru by mohlo přispět k plynulejšímu chodu a k lepším hodnotám přesnosti a opakovatelnosti.

Backlash, který vzniká v sestavě matice–pohybový šroub, však není jediným zdrojem odchylek od ideálního chování retractu. Značné množství experimentů může být provedeno na poli měření teplot. Důležité informace by mohly být získány při měření za podmínek, které budou nejlépe odpovídat reálnému provozu. To znamená uchycení retractu ke komoře mikroskopu (komoza mikroskopu umožňuje značný odvod tepla, avšak v různých konfiguracích mikroskopu k ní může být přimontováno široké spektrum zařízení s různým topným výkonem, což komplikuje vytvoření univerzálního experimentu, který by byl schopen pokrýt kompletní škálu vyráběných mikroskopů) a jeho zakrytování tak, jak je určen k prodeji. Další variantou měření, která by mohla přinést důležité informace, je zkoumání vlastností retractu při cíleném zahřívání platformy, která tvoří základnu celého mechanismu. Výsledky takového testu, by pak měly dát odpověď na otázku, zda je možné lože retractu využít v principu jako chladič pro řídicí elektroniku nebo pro elektroniku, která se stará o zpracování dat z detektorů.

Řešení, které splňuje zadání práce, bylo navrženo zároveň tak, aby jej bylo možné snadno rozšířit o měření vlastností popsaných výše a aby bylo přenositelné i na jiné moduly

ovládané krokovým motorem s co nejmenší úpravou. To umožňuje vytvářet další experimenty a testování dle potřeb při návrhu nových nebo vylepšování starých verzí retrahovacích mechanismů.

Závěr

Měření provedené na polohovacím zařízení firmy Thermo Fisher Scientific Brno s.r.o. přineslo řadu zajímavých a v praxi užitečných informací jak pro návrh nových zařízení, tak pro porozumění a odhalení problémů na zařízeních stávajících. Ze srovnání anti-backlash matic vyšla nejlépe matice typu NTB. Její největší výhodou je snížení vůle při polohování do žádané polohy v obou směrech a dosahuje tak oproti ostatním maticím o desítky procent lepších hodnot obousměrné opakovatelnosti. Avšak při jednosměrném režimu jsou ostatní anti-backlash matice srovnatelné, v hodnotách jednosměrné opakovatelnosti v klíčové poloze P9 (standardní poloha *Inserted* pro většinu detektorů) dosahují téměř shodných výsledků.

Velmi důležité informace vyplynuly z testu různých úrovní předepnutí matice NTB. Ukázalo se, že matice při nulovém předepnutí naprosto ztrácí schopnost potlačit vůli mezi sebou a pohybovým šroubem. Hodnoty opakovatelnosti naměřené na nepředepnuté matici jsou naprosto nevyhovující pro provoz zařízení a je nutné dbát na dodržení pokynů při mechanické montáži. Na druhou stranu pozitivním výsledkem měření je, že rozsah předepnutí matice, pro který mechanismus pracuje dle požadavků, je poměrně široký (25 %–75 %) a předepnutí matice při montáži nevyžaduje žádný speciální přípravek. Při vyšších úrovních předepnutí se však začíná projevovat mechanická nedokonalost zařízení, která způsobuje zhoršení měřených vlastností v polohách vzdálenějších směrem od motoru. Při maximálním předepnutí je již tato chyba tak výrazná, že opakovatelnost je opět mimo akceptovatelné hodnoty.

V testu životnosti, se kterým byl spojen i test měření teplot na klíčových místech retractu, se ukázalo, že matice po 40 000 cyklech neztratila své anti-backlash vlastnosti, a nedošlo ani ke zhoršení přesnosti polohování celého mechanismu. Největším zdrojem tepla byl dle předpokladů zjištěn krokový motor. Při cyklování se jeho ustálená teplota pohybovala kolem 34 °C, což bylo vždy cca o 10 °C více než okolní teplota. Díky termočládkům na ostatních místech retractu bylo možné dojít k závěru, že teplo z motoru se do ostatních dílů šíří jen minimálně a že i když je pozorovatelná změna v odchylkách v závislosti na narůstající teplotě mechanismu, je tato chyba v polohování při plně zahřátém retractu od stavu při pokojové teplotě odlišná jen o nízké jednotky μm . Odchyly v polohování způsobené změnou teploty, která vzniká nepřetržitým provozem zařízení, lze tedy považovat za málo podstatné.

Měřicí prvky, hardware a software byly navrženy tak, aby experimentální měření mohlo být snadno rozšířeno o další testy, které by mohli pomoci při vývoji nových polohovacích zařízení nebo pro odstranění chyb ve stávajících zařízeních firmy Thermo Fisher Scientific Brno s.r.o.

Seznam použitých zdrojů

- [1] *NTB-anti backlash nut* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.haydonkerkpittman.com/products/lead-screws-and-nuts/lead-screws-and-nut-assemblies/ntb>
- [2] KOLÁČNÝ, Josef. *Elektrické mikropohony*. Brno, 2009. Skripta. VUT.
- [3] *Microstepping for Stepper Motors - Linear Motion Tips*. [online]. 2017 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.linearmotiontips.com/microstepping-basics/>
- [4] *Microstepping Myths and Realities | FAULHABER Tutorial* [online]. 2020 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.faulhaber.com/en/know-how/tutorials/stepper-motor-tutorial-microstepping-myths-and-realities/>
- [5] *Gear Basics: Backlash vs Lost Motion* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://blog.orientalmotor.com/gear-basics-backlash-vs-lost-motion>
- [6] JUKIĆ, Tomislav a Nedjeljko PERIC. *A Comparative Study of Backlash Compensation Methods* [online]. Zagreb, 2015 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/228812004_A_Comparative_Study_of_Backlash_Compensation_Methods
- [7] *Methods to minimize gear backlash* [online]. 2002 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/mechanical-motion-systems/article/21831618/methods-to-minimize-gear-backlash>
- [8] *ANTI BACKLASH SPUR GEARS* [online]. In: . [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.kggear.co.jp/en/kg-stock-gears/anti-backlash-spur-gears>
- [9] *Anti-backlash nut* [online]. In: . [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://cdn.myshoptet.com/usr/www.laskakit.cz/user/shop/big/7788_brass-plastic-delrin-anti-backlash-silent-nut-for-8mm-t8x8-tr8x2-tr8x4-lead-screw-trapezoidal-acme-jpg-q90.jpg?61b228d5
- [10] *Technical Documents - Ametek: Kerk Lead Screw and Anti-backlash Nut Technology* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.haydonkerkpittman.com/>

/media/ametekhaydonkerk/downloads/technical-
documents/haydon_kerk_lead_screw_technology_engineering_data.pdf?la=en
&revision=9432055a-bb78-4387-a877-
feb2622885b6&hash=2B27622D647A07D78F8A1CAD06F66362

- [11] *ZBX-anti backlash nut* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.haydonkerkpittman.com/products/lead-screws-and-nuts/lead-screws-and-nut-assemblies/zbx>
- [12] *ZBA-anti backlash nut* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.haydonkerkpittman.com/products/lead-screws-and-nuts/lead-screws-and-nut-assemblies/zba>
- [13] ISO 230-1. *Zásady zkoušek obráběcích strojů: Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek*. Třetí vydání. Praha, 2014.
- [14] ISO 230-2. *Zásady zkoušek obráběcích strojů: Část 2: Určení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách*. Čtvrté vydání. Praha, 2016.
- [15] Baumer limit switch. In: *Baumer* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://www.baumer.com/medias/sys_master/images/images/h47/h83/8977468489758/mamfile-26256-720Wx540H-c.png
- [16] Microswitch. In: *Farnell* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://cz.farnell.com/productimages/standard/en_GB/103444-40.jpg
- [17] *Smaract - interferometer: PICOSCALE V2* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.smaract.com/en/picoscale-interferometer>
- [18] *Resolution, Accuracy, and Precision of Encoders: USdigital* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.usdigital.com/media/yuxn4veq/usd-encoder-precision.pdf>
- [19] *Renishaw: Data sheet: TONiC™ encoder system* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/resourcecentre/en/details/Data-sheet-TONiC-encoder-system--123340?lang=en>

- [20] *TONiC interface* In: Renishaw [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z:
<https://www.renishaw.com/resourcecentre/download?data=26109&lang=gen&userLanguage=en>
- [21] *Thermocouple Details* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z:
https://instrumentationtools.com/thermocouple-details/?utm_content=cmp-true
- [22] ŠUBRT, Kamil. *Návrh zařízení pro měření smáčivosti povrchů*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Pavel Houška, Ph.D.

Seznam obrázků

- Obrázek 1.1: Ilustrace testovaného mechanismu
- Obrázek 1.2: Matice typ NTB použitá na retractu [1]
- Obrázek 1.3: Srovnání v řezu dvoufázového (vlevo) a třífázového (vpravo) krokového motoru [2]
- Obrázek 1.4: Spínání fází motoru při řízení po celých krocích [2]
- Obrázek 1.5: Spínání fází motoru při řízení metodou half-step [2]
- Obrázek 1.6: Průběh proudů ve fázích motoru při mikrokrokování [2]
- Obrázek 1.7: Rozdíl mezi aproximovanou, sinusovou charakteristikou motoru (tečkovaně) proti skutečné charakteristice (modře) [4]
- Obrázek 1.8: Backlash (vyznačený červeně) mezi spoluzabírajícím ozubením [5]
- Obrázek 1.9: Možnosti předeptnutí ozubených kol [7], [8]
- Obrázek 1.10: „Klasické“ provedení anti-backlash matice [9]
- Obrázek 1.11 Matice typu ZBX [11]
- Obrázek 1.12 Matice typu ZBA [12]
- Obrázek 1.13: Označení chyb v jednotlivých osách polohovacího stroje [13]
- Obrázek 1.14: varianty kontaktních spínačů [15], [16]
- Obrázek 1.15: možnosti násobení výstupního signálu z inkrementálního enkodéru [18]
- Obrázek 1.16: Zobrazení výsledných signálů po interpolaci (vlevo) a možnosti rozlišení (tabulka vpravo) [19]
- Obrázek 1.17: Interface s interpolátorem pro enkodér TONiC [20]
- Obrázek 1.18: Zapojení odporového snímače teploty dle požadované kompenzace
- Obrázek 2.1: Zobrazení dílu pro uchycení enkodérové hlavy
- Obrázek 2.2: Doporučená vzdálenost čtecí hlavy enkodéru od pravítka [19]
- Obrázek 2.3: Uchycení enkodéru a pravítka na skutečném zařízení v laboratoři
- Obrázek 2.4: Koncový spínač MY-COM H75/S35 použitý pro získání home pozice při měření [15]
- Obrázek 2.5: Retract kompletně osazený měřicími prvky. Zelené kabely jsou termočlánky T1-T5
- Obrázek 2.6: Silová deska pro napájení krokového motoru
- Obrázek 2.7: Zapojení měřicí soustavy
- Obrázek 2.8: LabVIEW kód běžící na FPGA čipu
- Obrázek 2.9: Označení poloh na retractu, do kterých bylo při měření najížděno
- Obrázek 2.10: Průběh testu přesnosti a opakovatelnosti dle normy ISO 230-2 [14]
- Obrázek 2.11: Výsledek měření matice typu NTB
- Obrázek 2.12: Výsledek měření matice typu ZBA
- Obrázek 2.13: Výsledek měření matice typu ZBX
- Obrázek 2.14: Výsledek měření matice typu BFW
- Obrázek 2.15: Výsledek měření matice typu NTB pro úroveň předeptnutí 0 %
- Obrázek 2.16: Výsledek měření matice typu NTB pro úroveň předeptnutí 25 %
- Obrázek 2.17: Výsledek měření matice typu NTB pro úroveň předeptnutí 50 %
- Obrázek 2.18: Výsledek měření matice typu NTB pro úroveň předeptnutí 75 %
- Obrázek 2.19: Výsledek měření matice typu NTB pro úroveň předeptnutí 100 %
- Obrázek 2.20: Výsledek měření matice typu NTB po vykonání 40 000 cyklů
- Obrázek 2.21: Výsledek měření teplot na retractu (nahore), spolu s měřením odchylky polohování (dole)

Seznam tabulek

Tabulka 1.1: Normalizované páry termočlánků [21]

Tabulka 2.1: Naměřené hodnoty všech testovaných typů matic

Tabulka 2.2: Procentuální nárůst nebo pokles naměřených hodnot proti hodnotám matice NTB (zeleně – lepší hodnoty než NTB, červeně – horší)

Tabulka 2.3: Naměřené hodnoty matice typu NTB pro různé úrovně předepnutí

Tabulka 2.4: Srovnání matice typu NTB před a po vykonání 40 000 cyklů