



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

NÁVRH DVOUOSÉHO LINEÁRNÍHO MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ PRO LISOVÁNÍ ŽELEZNIČNÍCH SOUKOLÍ

DESIGN OF TWO-AXIS LINEAR MEASURING DEVICE FOR RAILROAD AXLES PRESSING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Mlynář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Brabc

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Vojtěch Mlynář
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	Ing. Martin Brablc
Akademický rok:	2019/20

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 bakalářské práce:

Návrh dvouosého lineárního měřicího zařízení pro lisování železničních soukolí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je návrh dvouosého měřicího zařízení s velkým rozsahem i požadovanou přesností. Zařízení má sloužit k přesnému měření rozteče prvků během jejich lisování na hřídel, konkrétně jde o lisování železničních soukolí. Práce se zabývá rešerší existujících řešení jak mechanické, tak sensorické části. Na základě této rešerše bude vybrána vhodná koncepce, která bude podpořena citlivostní analýzou. Výsledkem práce by měl být návrh prototypu měřicího zařízení použitelného v průmyslovém závodě. Práce je realizována ve spolupráci se společností ŽĎAS a.s. v rámci projektu NCK MESTEC.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Proveďte rešerši obdobných zařízení a pokuste se definovat kritické vlastnosti a požadavky na funkci.
- 2) Na základě provedené rešerše navrhňte různé konfigurace konstrukce i použitých senzorů a pomocí citlivostní analýzy zhodnoťte jejich vhodnost a realizovatelnost. Pokuste se modelovat typické odchylky (rozlišení a linearita senzorů, konstrukční přesnost, vůle, tuhost konstrukce), vycházejte z údajů udávaných výrobcí konkrétních konstrukčních a senzorických prvků.
- 3) Na základě předchozích úvah navrhňte vhodnou konfiguraci konstrukce a senzorů
- 4) Pro navržené zařízení dimenzujte pohony – vstupní parametry pro dimenzování vycházejí z tabulkových hodnot (hmotnosti, momenty setrvačnosti apod.).

Seznam doporučené literatury:

NELLES, Oliver. Nonlinear system identification: from classical approaches to neural networks and fuzzy models. Berlin: Springer, 2011. ISBN 978-364-2086-748.

LJUNG, Lennart. System identification: theory for the user. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 1999. ISBN 978-0136566953.

VALÁŠEK, Michael. Mechatronika. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-010-1276-X.

NOSKIEVIČ, Petr. Modelování a identifikace systémů. Ostrava: Montanex, 1999. ISBN 80-722-50-0-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je návrh zařízení určeného k měření rozteče prvků železničních soukolí během lisování. V rešeršní části jsou přiblíženy parametry lisu a prezentována současná řešení problému. Dále jsou popsány senzory pro měření vzdálenosti, metody pro dimenzování pohonů, a nakonec metody citlivostní analýzy. Je nastíněn proces návrhu zařízení, od prvotních koncepcí, přes jejich analýzu až po konkrétní návrh.

Summary

The main goal of this bachelor's thesis is the design of the device capable of measuring the distance between railroad wheelset elements during pressing. The research part presents the parameters of the wheelset press and the existing solutions to the problem. Additionally, distance-measuring sensors, motor sizing methods, and sensitivity analysis methods are described. The third chapter outlines the design process, beginning with early conceptions, their analysis, and leading into the final design.

Klíčová slova

hydraulický lis, železniční soukolí, citlivostní analýza, Monte Carlo, měření rozteče

Keywords

hydraulic press, railroad wheelset, sensitivity analysis, Monte Carlo, span measuring

Bibliografická Citace

MLYNÁŘ, Vojtěch. *Návrh dvouosého lineárního měřicího zařízení pro lisování železničních soukolí*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125169>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Ing. Martin Brablc.

Prohlašuji, že jsem tuto práci napsal sám, pouze na základě vlastní práce, připomínek mého vedoucího a níže citovaných zdrojů.

Vojtěch Mlynář

Brno

.

Děkuji každému, kdo mi pomohl drobnou věcnou radou, doporučením i podporou. Konkrétní díky patří Ing. Martinovi Brabčovi za příkladné vedení práce i konzultace s ní spojené.

Vojtěch Mlynář

Obsah

1	Úvod	9
1.1	Rozbor zadání	9
2	Rešerše	11
2.1	Popis lisu CDRA 500	11
2.2	Senzorika	12
2.2.1	Základní pojmy	13
2.2.2	Měření vzdálenosti na principu času	15
2.2.3	Kapacitní a indukční senzory	15
2.2.4	Laserový triangulační senzor	16
2.2.5	Magnetický lineární enkodér	17
2.3	Dimenzování pohonů	17
2.3.1	Zatěžovací charakteristika	17
2.3.2	Metody ekvivalentního momentu a výkonu	17
2.4	Citlivostní analýza	18
2.4.1	Využitelnost citlivostní analýzy	18
2.4.2	Souvislost konvergence a náhodných čísel	19
2.4.3	Odhad rozdělení pravděpodobnosti	20
2.4.4	Realizace metody analýzy rozptylu	20
3	Postup práce	23
4	Navrhované koncepce	25
4.1	Vysvětlení požadavků	25
4.2	Lineární kříž	27
4.2.1	Funkční vize	28
4.2.2	Matematický model	28
4.3	Koncepce Z	30
4.3.1	Funkční vize	30
4.3.2	Matematický model	32
5	Analýza navržených konstrukcí	35
5.1	Lineární kříž	35
5.2	Koncepce Z	37
6	Výběr komponent	40
6.1	Mechanika	40
6.1.1	Konstrukce	41
6.1.2	Výpočet lineárního vedení	42

6.2	Senzory	43
6.3	Pohony	44
6.3.1	Výpočet výsuvné osy	44
6.3.2	Výpočet vodorovné osy	46
7	Závěr	47
7.1	Přehled výsledků navrženého zařízení	47
7.2	Navržené využití	49
	Literatura	50
	Seznam obrázků	53
	Seznam tabulek	55
	Seznam příloh	56

1 Úvod

Již od dob vzniku prvních strojů byla jejich výroba spjata s nároky na přesnost použitých komponent. S rozšířením sériové výroby byly tyto nároky dále zpřísňovány, vznikaly požadavky na zaměnitelnost dílů a tím vznikl systém tolerancí. Avšak ve většině případů byly úrovně přesnosti jednotlivých součástí odpovídající jejich velikosti, tedy malé součásti bylo možné vyrobit s vysokou přesností, a naopak čím větší součást, s tím většími nepřesnostmi a odchylkami výroby musel konstruktér počítat.

Tato úměra může být patrná například v rozdílu ozubených kol v hodinkách a pohonu velkých průmyslových strojů. U hodinek je žádoucí dosažení vysoké přesnosti výroby pro zajištění plynulosti a přesnosti chodu, naopak u kol velkých se dříve počítalo s adekvátním mazáním a záběhem, kdy se provozem dorovnávaly výrobní nedokonalosti. Pro to byly součásti dostatečně mohutné, a především tak velké prvky obvykle nebyly součástí strojů, od kterých byla vyžadována vysoká přesnost.

S rozvojem strojírenství i dostupností přesných měření se požadavky na přesnost výroby stále zpřísňují, což znamená, že se tolerance dříve požadované od malých součástí dostávají i k těm relativně velkým. Motivací pro to může být úspora materiálu, prodloužení životnosti, zlepšení účinnosti, případně vylepšení ergonomie. Tento trend s sebou přináší požadavky na vývoj nových zařízení schopných měření s přesnostmi o několik řádů menšími, než je rozsah měření. Takový vývoj odhaluje s každou úrovní nové inženýrské výzvy a nutnost uvažovat faktory, které by byly v jiných případech zanedbatelné.

1.1 Rozbor zadání

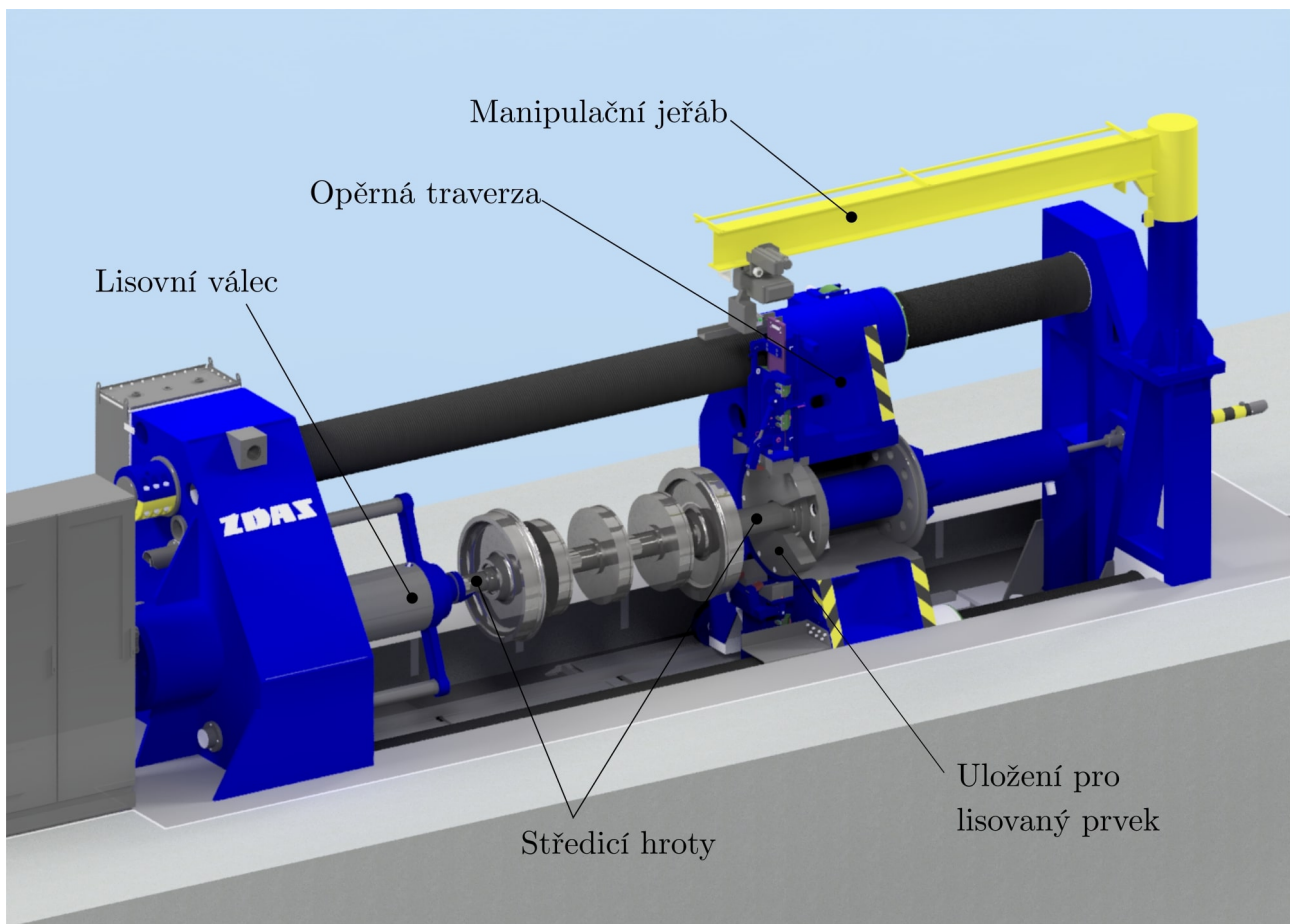
Tato práce vznikla současně s vývojem měřicího zařízení pro hydraulický lis CDRA 500 určený k lisování soukolí pro železniční vozidla, který vyrábí firma ŽĎAS a.s. Spolupráce s Fakultou strojního inženýrství VUT probíhá v rámci projektu NCK MESTEC.

Konstrukce lisu a jeho parametry jsou rozebrány v kapitole 2.1. Samotný proces lisování spočívá v uložení lisovaného prvku (nejčastěji to jsou pojezdová kola, ale také brzdové kotouče nebo převodovky) do opěrné traverzy a umístění hřídele mezi středící trny. Poté opěrná traverza posune lisovaný prvek do počáteční pozice, tedy k okraji osazení hřídele pro náboj. Opěrná traverza je následně zafixována v této poloze a samotné lisování proběhne pohybem lisovního válce z druhé strany, kdy je hřídel vtlačen do náboje lisovaného prvku do požadované vzdálenosti. Umístění jednotlivých prvků je zřejmé z obrázku 1.1. Tento proces je opakován obdobným způsobem pro každý lisovaný prvek na hřídeli.

Původní metodika měření využívá kalibrovaného měřítka s přesnými koncovými spínači. Toto měřítko se pomocí magnetů upevní na hřídel a jeden jeho konec se umístí k referenčnímu prvku již umístěnému na hřídeli. Následně lis nalisuje nový prvek do takové vzdálenosti, kdy dojde k sepnutí spínače, který tím proces lisování ukončí. Tato měřítka jsou řešení efektivní, nicméně sama o sobě jsou poměrně drahá, je třeba je pravidelně kalibrovat a z logiky věci je potřeba nové sady měřítka pro každý typ soukolí, které se má na lisu vyrábět.

Z těchto nedostatků kalibrovaných měřítka vzešla nutnost vývoje nového systému měření, který by měl splňovat následující požadavky:

- Přesnost měření rozteče dvou prvků alespoň $\pm 0,5$ mm
- Dosažení uvedené přesnosti nezávisle na stavu povrchu lisovaných prvků – např. barva, čerstvě broušený povrch, rez, škrábance
- Rozsah měření 100–2650 mm
- Možnost měřit jak relativní přesnosti prvků mezi sebou, tak absolutní přesnost prvků k základní hraně hřídele
- Možnost integrace ovládání zařízení do již existujícího ovládacího rozhraní lisu
- Možnost měřit v libovolné vzdálenosti od hřídele v rozsahu 0–600 mm
- Nezávislá montáž zařízení umožňující instalaci k již existujícím lisům



Obrázek 1.1: Popis jednotlivých součástí lisu. Render z modelu laskavě poskytnutého a.s. ŽDAS

2 Rešerše

Tato kapitola popisuje metody použité k návrhu měřicího zařízení. Nejdříve je popsán lis, pro který je zařízení navrhováno a uvedeny příklady různých již existujících řešení problému, kde jsou také diskutována. Dále jsou rozebrány současné možnosti senzorů s vysvětlením používané terminologie spojené s hodnocením přesnosti.

Důležitou součástí funkčního zařízení je i možnost s ním pohybovat a dosáhnout potřebného rozsahu pohybu. V souvislosti s tím jsou popsány metody dimenzování pohonů metodou ekvivalentního momentu a výkonu a odhad zatěžovací charakteristiky. Nakonec jsou představeny použité metody citlivostní analýzy s využitím simulační metody Monte Carlo.

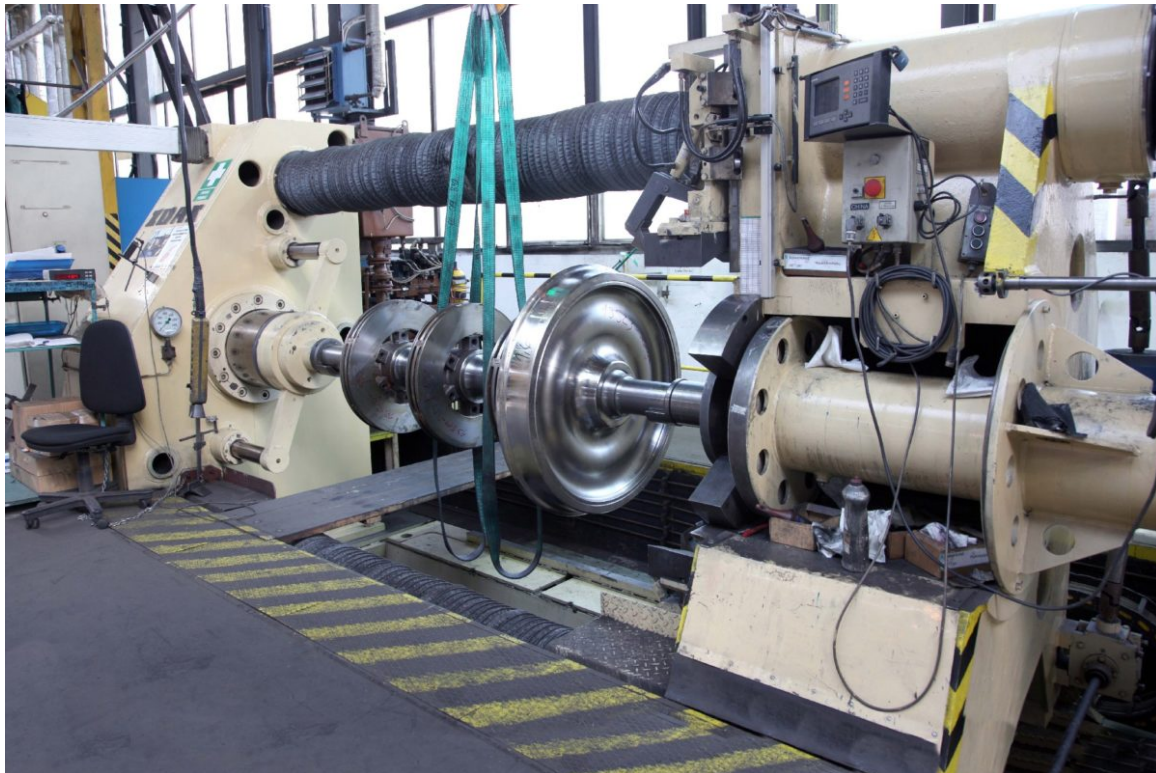
2.1 Popis lisu CDRA 500

Popisované měřicí zařízení má být navrženo konkrétně pro použití na lisu CDRA 500 (obr. 2.1) českého výrobce ŽĎAS a.s. Tento lis je určen jak do výroby nových železničních soukolí, tak do opravárenských dep, kde probíhá repasování, oprava a údržba různých kolejových vozidel. Vybrané parametry viz tab. 2.1.

Lis sestává z hlavní nepohyblivé konstrukce uchycené k betonovému základu a pohyblivé opěrné traverzy (viz obr.2.1, v popředí), která je vedena v závitových tyčích, proti které pracuje lisovní válec. Na opěrné traverze probíhá pomocí hydrauliky středění kola a na zadní traverze středění nápravy. Průběh lisovní síly je regulován a zaznamenáván do grafu, umožňující kontrolu kvality, samotné lisování probíhá za studena [1]. Obvyklá sekvence pohybů je popsána v kapitole 1.1.

Jmenovitá síla	5000 kN
Zdvih	700 mm
Rychlost pracovní	$0,5 \div 3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$
Max. délka dvojkolí	2 650 mm
Svírací síla středicího zařízení	30 kN
Max. průměr kola (jízdní plocha)	1250 mm
Max. hmotnost dvojkolí	3 500 kg
Výkon hlavního motoru	15 kW
Půdorys lisu	$8\,900 \times 2\,000 \text{ mm}$
Výška lisu	3 100 mm

Tabulka 2.1: Vybrané parametry lisu CDRA 500. Převzato z [1]



Obrázek 2.1: Lis CDRA 500. Převzato z [2]

Existující řešení Na trhu lze najít různé ekvivalenty lisu CDRA 500, které nabízí různou úroveň automatizace procesu lisování a různé realizace měření. Konstrukčně podobným je například lis *Fully Automatic Single Cylinder Wheel Press*, výrobce BBM Railway equipment, LLC [3]. V tomto případě je měření rozteče prvků prováděno laserovými senzory umístěnými na konci dvouosého manipulátoru a jeho podélná osa je umístěna přímo nad osou hřídele lisované nápravy, přesnost měření bohužel není uvedena. Tohle řešení je elegantní a univerzální, nicméně nevyhovuje zadání, protože vyžaduje integraci přímo do konstrukce lisu a neumožňuje manipulaci s lisovanými prvky pomocí jeřábu.

Další variantou je lis SCP 400 výrobce Simmons Machine Tool Corporation [4], kde je uvedena přesnost 0,5 mm, nicméně z dostupných materiálů není zřejmý princip měření. U druhého lisu stejného výrobce (SMP 200) je v prostoru mezi koly pevná referenční konstrukce, která je také nevyhovujícím řešením z důvodu, že umožňuje lisování pouze jednoho typu soukolí.

Posledním nalezeným řešením je lis RADS (na obr. 2.2), výrobce MAE GmbH [5], kde je měření realizováno obdobným způsobem jako u lisu firmy BBM, tedy laserovým senzorem umístěným na konci dvouosého manipulátoru, pouze v tomto případě se mírně liší umístění podélné osy, která je namontována přímo na konstrukci lisu a výsuvná osa manipulátoru se pohybuje pod mírným úhlem, avšak stále kolmo k hřídeli. Tato konstrukce je nevhodná ze stejných důvodů, které byly uvedeny u lisu BBM.

2.2 Senzorika

Dá se říci, že takřka nejdůležitějšími částmi celého zařízení jsou senzory, ty umožňují zprostředkovat informace o reálném světě řídicímu algoritmu. Pro účely této práce jsou rozebrány především různé možnosti měření vzdálenosti plochy od senzoru samotného a magnetický lineární enkodér, umožňující velice přesné polohování a měření pohybu.

Tato rešerše má pomoci čtenáři objasnit základní principy fungování výše uvedených typů senzorů a porozumět jejich hlavním výhodám a nevýhodám.



Obrázek 2.2: Lis RADS, výrobce MAE GmbH. Převzato z [6]

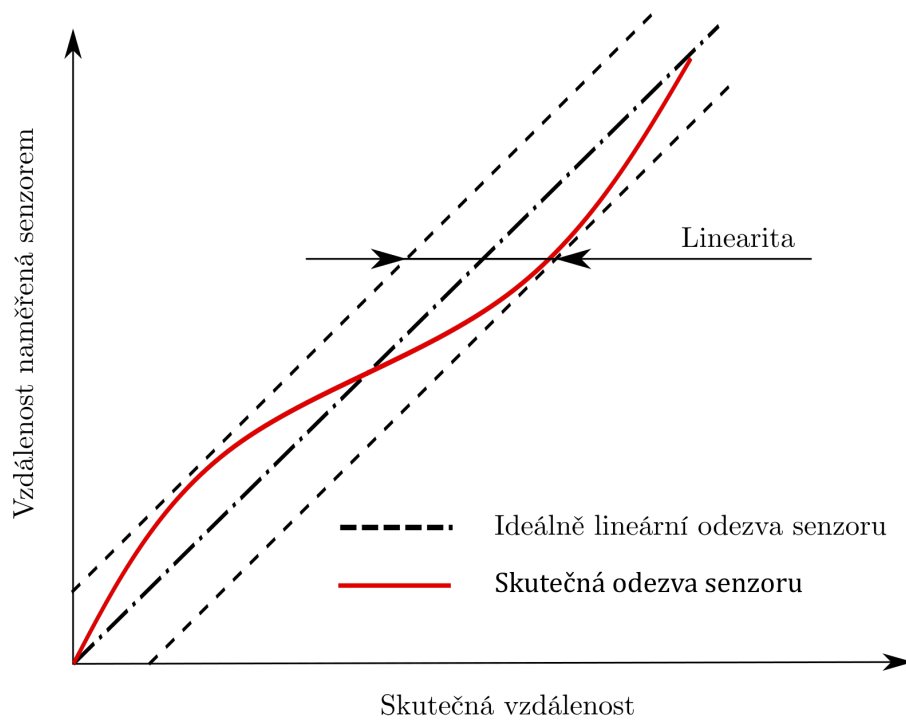
2.2.1 Základní pojmy

V souvislosti s hodnocením kvality měření existuje více parametrů, které lze používat pro výběr vhodné metodiky a zařízení. Tyto pojmy jsou především rozlišení, linearita a opakovatelnost, ty budou na dalších řádcích blíže popsány:

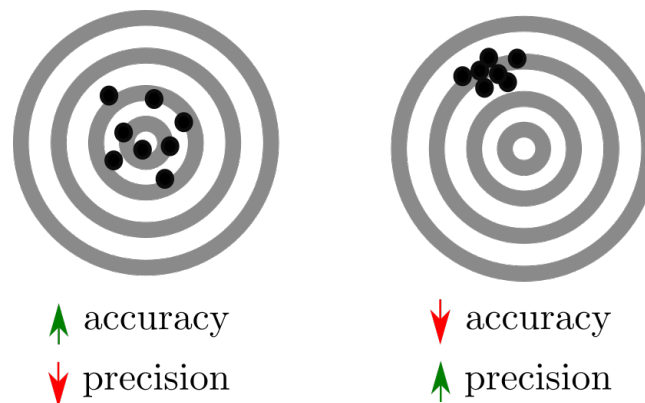
- **Rozlišení** uvádí nejmenší změnu vzdálenosti, kterou senzor dokáže spolehlivě postihnout a zprostředkovat, *spolehlivě* v tomto případě znamená situaci, kdy je možno rozeznat skutečný signál od šumu. Může být chápána také jako citlivost na změnu měřené veličiny. U stupnicových mechanických měřitek rozlišení odpovídá polovina nejmenšího dělení stupnice (pro obyčejné kancelářské pravítko 0,5 mm, pro posuvné měřítko obvykle 0,05 mm), pro složitější senzory už je výsledkem více vlivů. Nicméně podobně jako u mechanických měřitek, v případě digitálního signálu ovlivňuje rozlišení jeho binární reprezentace, kdy nevhodným zaokrouhlením může dojít k nechtěnému snížení rozlišení.
- **Linearita** určuje odchylku odezvy senzoru od ideálně lineárního průběhu v závislosti na dalším parametru, kterým je obvykle skutečná měřená vzdálenost (viz obr. 2.3), ale může to být i jiná veličina, např. teplota. Uvádí se obvykle v procentech měřicího rozsahu ¹.
- **Opakovatelnost** je podobným parametrem jako linearita, ale specifikuje konkrétně odchylku od skutečné hodnoty při opakovaném měření ve stejném bodě za stejných podmínek. Uvádí se obvykle v absolutních jednotkách.

V anglickém jazyce se používají mimo výše uvedených termínů i pojmy *accuracy* a *precision*. První zmíněný vyjadřuje průměrnou odchylku hodnot od skutečné hodnoty, zatímco druhý jejich rozptyl. V analogii s házením šipek *accuracy* říká, jak blízko středu šipky dopadly, zatímco *precision* hodnotí, jak blízko vzájemně jsou (viz obr. 2.4).

¹V angličtině FSO – Full Scale Output



Obrázek 2.3: Příklad nelinearity senzoru



Obrázek 2.4: Porovnání pojmů accuracy a precision

2.2.2 Měření vzdálenosti na principu času

Jednou z možností měření vzdálenosti jsou senzory založené na stopování doby letu², buďto světelného, nebo zvukového signálu. Nejjednodušší realizace spočívá ve vyslání ultrazvukového impulsu a vyčkávání na jeho odraz. Jakmile je zachycen, vzdálenost odrazné plochy se získá výpočtem dle vzorce 2.1:

$$\text{Vzdálenost} = \frac{\text{Rychlost zvuku} \times \text{Doba návratu impulsu}}{2} \quad (2.1)$$

V praxi se používají různé modifikace výše uvedeného přístupu, kdy lze použít jeden vysílač pro více přijímačů, nebo není vysílán pouze jediný impuls, ale jejich série [7]. Výhodou ultrazvukových čidel je cenová dostupnost a snadné zpracování signálu, kdy je obvykle k jeho přesnému zachycení dostačující vzorkovací frekvence základních mikrokontrolerů, potažmo ADC převodníků. Jsou také schopné měřit i na vzdálenosti několika metrů. Nevýhodami jsou špatná kvalita signálu v prostorově komplikovaném prostředí, kde vzniká více falešných odrazů, snadné zarušení při využívání více čidel ve vzájemné blízkosti a neschopnost zachytit malé plochy. Jsou tedy vhodné například jako parkovací senzory automobilů nebo detektory přítomnosti objektů. Nejvyšší přesnost v ideálních podmínkách, které jsou tyto senzory schopné dosáhnout, se pohybuje řádově v desetinách, spíše jednotkách milimetru.

Výše zmíněné nevýhody lze částečně eliminovat použitím světla namísto zvuku jako nosiče signálového impulsu. Tímto způsobem je možno dosáhnout mnohem vyššího rozlišení závislého především na čipu (resp. součástce) zpracovávajícím obraz. Pro tento případ se zřídka používá diskretních impulsů, ale spíše fázového posunu dopadajícího signálu (světla). Výsledná vzdálenost d poté vychází ze vzorce:

$$d = \frac{c\varphi}{4\pi f_m} \quad (2.2)$$

Kde c je rychlost světla, φ fázový posun a f_m modulační frekvence. Z toho vyplývá, že nejvyšší rozlišení, kterého lze dosáhnout, je $c/2f_m$. Toto omezení lze částečně obejít superpozicí více modulačních frekvencí [8].

Hlavní výhodou světelných TOF senzorů je jejich vysoké rozlišení a rychlá odezva. Mezi nevýhody se řadí vyšší složitost konstrukce senzoru a s tím spojená cena, náchylnost na světelné podmínky okolí a omezení měřenými povrchy, kdy ty matné mohou odrážet příliš málo světla na to, aby bylo spolehlivě detekováno. Přesnost měření je srovnatelná s ultrazvukovými senzory, nicméně je možné je využít jako 3D kamery, používané jak pro výrobní, tak i zábavní průmysl.

2.2.3 Kapacitní a indukční senzory

Další možností měření vzdálenosti je využití elektromagnetických jevů, konkrétně kapacity a magnetické indukce. V případě indukčního senzoru jeho konstrukce tvoří primární vinutí transformátoru a měřená plocha se díky vířivým proudům chová jako to sekundární. Čím blíže čelu senzoru povrch je, tím se snižuje rozptylová indukčnost, dochází k rozladění rezonančního obvodu a snížení amplitudy snímané veličiny (napětí nebo proud). Je zřejmé, že je vhodné, aby měřený povrch byl elektricky dobře vodivý. [9, s. 97–100]

Na podobném principu fungují čidla kapacitní, kdy čelo senzoru a měřený povrch tvoří kondenzátor, jehož kapacita je nepřímo úměrná vzdálenosti. Tento kondenzátor se vzduchovou mezerou je opět součástí rezonančního obvodu a změna fyzické vzdálenosti jeho dvou ploch se

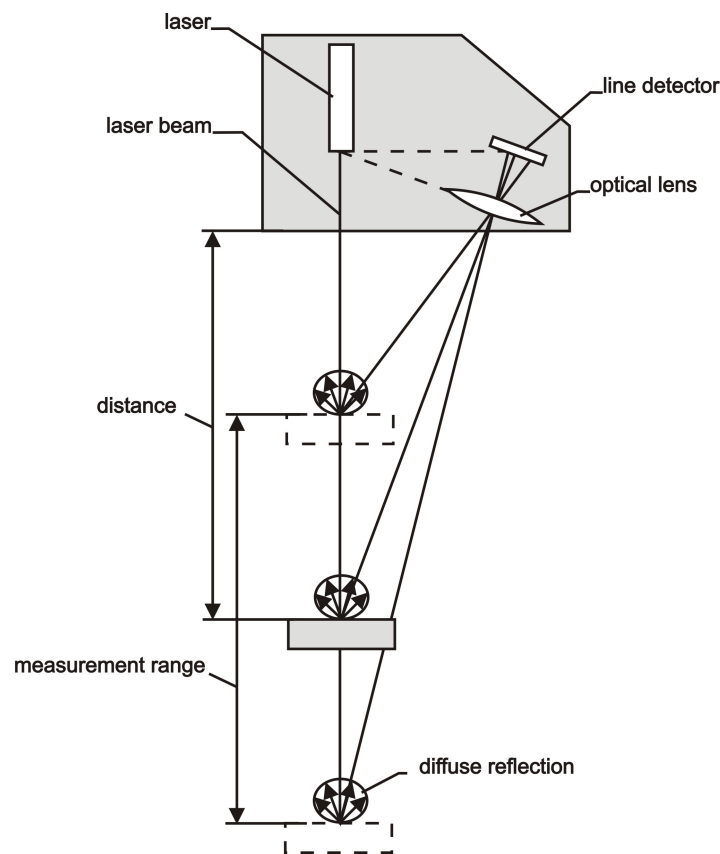
²V angličtině TOF – Time Of Flight

projeví změnou signálu.

Oba typy senzorů mají krátký dosah, nejvýše pár centimetrů, a byť dokáží dosahovat dobré, až nanometrové přesnosti, jsou z principu fungování velice závislé na materiálu měřené plochy, kdy je k dosažení zmíněné přesnosti nutná jejich kalibrace. Jsou tedy vhodné spíše k relativnímu měření posunu materiálu, než k získání spolehlivé informace o absolutní poloze. Dalším obvyklým využitím je jejich zapojení jako bezkontaktní koncové spínače. Kapacitní senzory jsou náchylné na nečistoty ve vzduchové mezeře, což ale umožňuje přesně měřit tloušťku nevodivých materiálů. Indukční senzory na většinu běžných nečistot náchylné nejsou [10, s. 204].

2.2.4 Laserový triangulační senzor

Oblíbenou variantou pro přesné měření vzdálenosti jsou laserové senzory fungující na principu triangulace, tedy odečtení úhlu odraženého paprsku světla od měřeného povrchu (viz obr. 2.5). Tuto informaci je získána z světlocitlivého čipu, většinou CMOS nebo CCD. Zdroj světla bývá pro běžné aplikace červený laserový paprsek, pro potřeby vyšší přesnosti, nebo měření povrchu s teplotou přesahující 700°C, může být použit paprsek modré barvy [11].



Obrázek 2.5: Schematický náčrt triangulačního laserového senzoru. Převzato z [12]

Tyto senzory nejsou závislé na fyzikálních vlastnostech materiálu jako dříve zmíněná indukční a kapacitní čidla, ale jejich přesnost výrazně ovlivňuje kvalita povrchu. Jak bylo ukázáno například v [13], výstupní signál ztrácí linearitu na površích, které omezují rozptyl odraženého světla. Takové omezení vzniká úpravami a výrobními postupy jako je broušení, frézování, válčování, případně napadením povrchu rzi, mechanickým a chemickým poškozením, apod. Výrobci současných senzorů uvádějí, že jejich výrobky údajně obsahují signál zpracující algoritmy, které by měly do značné míry redukovat chybu způsobenou stavem povrchu.

Využití těchto senzorů je poměrně široké, vyrábějí se totiž s rozsahy měření a dosahy od milimetrů až po metry, s tím, že ty nejpřesnější se chlubí celkovou přesností menší než jeden

mikrometr. Je možné je využít i k měření vibrací, díky absenci hystereze a vysoké frekvenci měření dosahující desítek kilohertzů.

2.2.5 Magnetický lineární enkodér

Stejně jako rozšířenější, optické enkodéry, i rozebírané magnetické fungují na obdobném principu, kdy čtecí hlava s čidlem (obvykle Hallovým) pohybující se nad magnetickým páskem reaguje na změny v magnetickém poli, což vytváří buďto spojitý, nebo obdélníkový signál. Magnetický pásek je tedy konstruován jako dlouhá série střídajících se pólů.[14]

Výhodou oproti optickým enkodérům je vysoká odolnost proti znečištění a možnost vyrábět pásky v dlouhých nepřerušovaných délkách. Je důležité zamezit jakémukoliv přiblížení magnetických polí k pásku, protože by tím bylo narušeno jeho rozložení pólů a byl by nenávratně poškozen. Tyto pásky výrobce RLS [15] nabízí ve dvou alternativách, absolutní a inkrementální, kdy první zmíněný umožňuje přesné určení pozice čtecí hlavy v rozsahu svého pohybu. Nejpresnější sestavy enkodéru a pásku dosahují rozlišení nižší než jeden mikrometr.

2.3 Dimenzování pohonů

V této části jsou krátce popsány metody použité k dimenzování pohonů zajišťujících pohyb zařízení. Prvním krokem je identifikace zatěžovací charakteristiky, na základě které může následně proběhnout výběr motoru s požadovanými charakteristikami s využitím metody ekvivalentního momentu či výkonu.

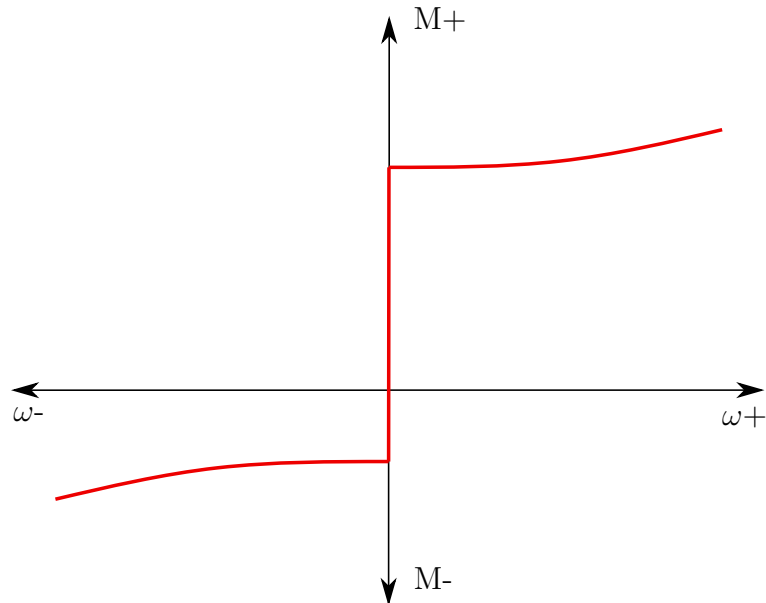
2.3.1 Zatěžovací charakteristika

Zatěžovací charakteristika popisuje závislost síly působící proti pohybu v závislosti na jeho rychlosti. Její znalost je důležitá pro dimenzování pohonu, kdy je na jejím základě určen požadovaný moment, respektive zpětně dopočítána maximální rychlost, kterou zařízení vyvine. Existují různé typy dělené dle mocniny úhlové rychlosti x v předpisu $M_z = k \cdot \omega^x$, avšak charakteristika reálných strojů je zpravidla kombinací více druhů (viz obr. 2.6).

U mechanických pohybů s nízkou rychlostí lze většinou předpokládat tzv. výtahová, nebo hoblovková charakteristika, v závislosti na tom, zda motor překonává pouze odporovou sílu (např. suché tření), nebo tíhovou sílu. V obou případech je moment konstantní napříč rychlostmi, pouze v případě tíhové síly při pohybu dolů působí ve směru pohybu, zatímco odporová síla působí vždy proti. To má vliv na výběr motoru s převodovkou, případně montáž externí brzdy. Při vyšších rychlostech mechanických pohybů se začne výrazněji projevovat viskózní tření, jehož odporová síla/moment je závislá na první mocnině rychlosti a působí vždy proti pohybu.[16, s. 31–35]

2.3.2 Metody ekvivalentního momentu a výkonu

Metoda ekvivalentního momentu je využitelná pouze pro motory, kde platí přímá úměra momentu na hřídeli odebíranému proudu, jako jsou v tomto případě DC motory s konstantním buzením. Metoda ekvivalentního výkonu je potom využitelná v situaci, kdy je výkon lineární funkcí momentu. Výrobci motorů uvádí v katalogových listech zpravidla alespoň tři údaje, které jsou pro dimenzování pohonu nejdůležitější – jmenovitý výkon, jmenovitý moment a maximální moment. První údaj je důležitý pro metodu ekvivalentního výkonu, další dva údaje už jsou klíčové pro druhou metodu. Jmenovitý moment uvádí velikost momentu, který je motor schopen vyvíjet po neomezeně dlouhou dobu. Moment maximální je zpravidla výrazně vyšší, ale nesmí být dopuštěno, aby takový moment motor vyvíjel po dobu delší než pár sekund (konkrétní údaj specifikuje výrobce motoru).



Obrázek 2.6: Příklad kombinované zatěžovací charakteristiky

Ekvivalentní moment je vypočítán z následující rovnice[16, s. 99]:

$$M_{ekv} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \alpha_i t_i} \sum_{i=1}^n \int_{\Delta t_i} M_i^2 dt} \quad (2.3)$$

kde suma pod zlomkovou čarou je součet jednotlivých délek časových úseků vynásobených α_i , poměrným součinitelem přestupu tepla ($\alpha_i = 1$ pro jmenovité otáčky) a M_i zátěžný moment v daném časovém úseku. Hodnota získaná tímto výpočtem musí být teoreticky menší nebo rovna jmenovitému momentu motoru, aby nedošlo k jeho přílišnému oteplení a zničení. Prakticky je vhodné při návrhu zavést určitou rezervu a nedimenzovat motor přímo na teoretickou vypočítanou hodnotu.

Nahrazením momentu M výkonem P v rovnici 2.3 lze vypočítat ekvivalentní výkon, který je užitečný pro prvotní výběr motoru, kdy nemusí být znám převod potřebný pro výpočet momentu. Po výpočtu ekvivalentního momentu a výběru motoru je třeba dodatečně zkontrolovat, aby v některém z úseků zátěžný moment nepřevyšoval maximální moment motoru. [16, s. 99–100]

2.4 Citlivostní analýza

Jednou z důležitých součástí úspěšného návrhu složitějších systémů je dobré chápání vlivu jednotlivých parametrů na výsledek. U jednoduchých systémů s několika málo parametry lze obvykle výsledný vliv jednoho z nich intuitivně odhadnout, nicméně u složitějších systémů s velkým množstvím parametrů už může intuice selhat. Právě pro zmíněné složitější případy existují analytické nástroje umožňující nahradit intuici výpočty a simulacemi, čímž se zabývá globální a lokální citlivostní analýza, v této práci využívající simulací Monte Carlo.

2.4.1 Využitelnost citlivostní analýzy

Motivací k využití citlivostní analýzy je obvykle potřeba znát míru vlivu známých, v určitých mezích náhodných, parametrů na výstup modelu, nebo v opačném případě, kdy existuje po-

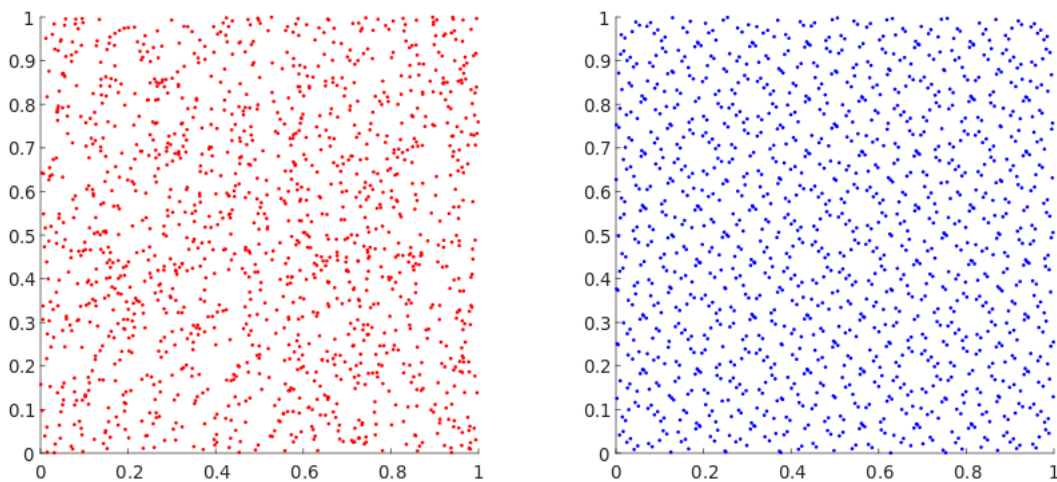
žadavek na výsledek, určit kterým parametrům je třeba při návrhu nejvíce věnovat pozornost. Vstupem do této analýzy je libovolný matematický model, výstupem pak obvykle relativní podíl parametrů na celkové nepřesnosti výstupu.

Z hlediska komplexity lze matematické modely rozdělit do dvou tříd – první jsou ty, kde spolu parametry neinteragují, jinak řečeno jejich vliv na výsledek je stále stejný, nezávisle na parametrech ostatních. Dle očekávání, v druhé skupině jsou modely, kdy se vliv alespoň jednoho z náhodných parametrů mění v závislosti na minimálně jednom dalším³.

V souvislosti s různou komplexitou modelů přichází dva hlavní přístupy citlivostní analýzy – lokální a globální. Lokální metody jsou zpravidla jednodušší a zkoumají vliv každého parametru postupně a odděleně. Mezi takové metody patří například parciální derivace. Ovšem v této chvíli vyvstává problém, kde v rámci příslušných rozdělení pravděpodobnosti parametry zafixovat. Tento problém řeší metody globální citlivostní analýzy, kdy jsou prozkoumány vlivy všech vstupních parametrů napříč jejich rozděleními pravděpodobnosti, včetně vzájemných interakcí [17, s. 11]. Konkrétních realizací opět existuje několik, pro účely této práce je popsána pouze metoda analýzy rozptylu.

2.4.2 Souvislost konvergence a náhodných čísel

Pro zpracování modelů s velkým počtem proměnných je s oblibou využíváno metody Monte Carlo, což je „[...] numerická metoda založená na řešení matematických úloh pomocí náhodných veličin a statistického odhadu jejich charakteristik.“ [18, s. 6] Ve spojení s výpočty touto metodou se používá termín *konvergence*, který popisuje ustálenost řešení. To by se při správném provedení mělo vždy blížit stejné hodnotě v rozdílných simulacích s nezměněnými rozděleními pravděpodobnosti, tedy při použití libovolných vstupních hodnot ze specifikovaných intervalů.



Obrázek 2.7: Porovnání prostorového rozložení náhodných čísel vygenerovaných pomocí Matlabu příkazy *rand* (vlevo), který patří do rodiny pseudo-náhodných a *sobolset*, jeden z algoritmů pro generování kvazi-náhodných čísel

Právě konvergenci ovlivňuje metoda použitá k vygenerování vstupních hodnot, kdy se ukazuje, že lze urychlit použitím tzv. *kvazi-náhodných* čísel. Narozdíl od *pseudo-náhodných* čísel se vyznačují rovnoměrnějším rozdělením v prostoru vstupních parametrů (viz obr. 2.7). Konvergence chyby metody Monte Carlo při použití těchto čísel má obecně hranici $\log(N)^s/N$, kde N je počet vzorků a s počet dimenzí prostoru vstupních parametrů. Nicméně mimo specifické případy zmíněný předpis degraduje téměř až na $1/N$ [19], což je výrazně efektivnější, než $1/\sqrt{N}$

³A. Saltelli [17, s. 25] tyto modely pojmenovává jako neaditivní a ty bez vzájemných interakcí jako aditivní

při použití pseudo-náhodných čísel.

Kvazi-náhodná čísla nejsou náhodná v pravém slova smyslu, jejich největší výhodou je právě deterministické zaplňování prostoru. V případě, že existuje požadavek tento determinismus eliminovat, lze vhodným způsobem změnit jejich pořadí. Z tohoto determinismu vyplývá, že výstupní sekvence čísel odpovídá rovnoměrnému rozdělení pravděpodobnosti na intervalu $\langle 0, 1 \rangle$, jiná, např. normální, rozdělení lze získat vhodnou transformací. Teorie generování i řazení kvazi-náhodných čísel zdaleka přesahuje potřeby této práce, avšak vývojáři poskytující výpočetní software zpravidla tyto metody implementují a jejich použití je pro koncového uživatele snadné.

2.4.3 Odhad rozdělení pravděpodobnosti

Jak je zřejmé ze samotné úlohy citlivostní analýzy, je třeba definovat typ a parametry rozdělení pravděpodobnosti jednotlivých parametrů. Tento odhad je proveden na základě katalogových údajů, měření nebo zkušenosti. První dva způsoby, v případě aplikace citlivostní analýzy v počátku návrhu, mohou snadno selhat. Ať už ze skutečnosti, že jde o vývoj nového, zakázkového zařízení, nebo pro to, že výsledkem analýzy mají být definované parametry, pro které je třeba následně nalézt konkrétní technickou realizaci a tedy z podstaty problému nelze tyto parametry získat.

Aby se konstruktér vymanil z tohoto kruhu, musí provést odborný odhad. Popsaných, ať už reálných nebo teoretických rozdělení pravděpodobnosti existuje nespočet, ale bez hlubší znalosti problému se na základě intuitivních představ nabízí několik nejznámějších, jako je normální, rovnoměrné, logaritmicko-normální, exponenciální a další rozdělení.

Jako nejjednodušší řešení se nabízí právě rovnoměrné rozdělení, pro které Dr. Howard Castrup[20] představil nutné podmínky opravňující jeho použití:

- Je třeba zajistit, aby zvolené limity intervalu skutečně byly těmi extrémními hodnotami, jichž může proměnná nabýt, konzervativnější přístup je takovýto interval ještě rozšířit.
- Z předchozí podmínky vyplývá, že všechny hodnoty, kterých může proměnná nabýt, musí spadat do zvoleného intervalu.
- Všechny hodnoty musí mít stejnou pravděpodobnost výskytu.

Existují případy, kdy definované podmínky určitě platí, těmi jsou například chyby v zao-krouhlování digitálních měření nebo v kvantování ADC převodníků.

V případě, že selže některá z předchozí podmínek, je na místě uchýlit se k jinému rozdělení, pro jehož výběr je třeba zvážit, zda je pravděpodobnost všech možností symetrická kolem střední hodnoty, zda může nabývat libovolných hodnot, nebo existují jasná fyzikální či jiná omezení, apod. V situaci, kdy o daném jevu nevíme nic víc kromě okrajových hodnot, je možné použít rovnoměrné rozdělení s vědomím, že výsledek simulace nemusí plně odpovídat realitě a jakmile to bude možné, verifikovat výsledky experimentem.

2.4.4 Realizace metody analýzy rozptylu

Zajímavými vlastnostmi této metody jsou schopnost pojmut neurčitost vstupních parametrů v celých příslušných rozsazích, nezávislost získaných měřítek citlivosti na podstatě analyzovaného modelu a schopnost do výsledků postihnout interakce mezi jednotlivými parametry (volně přeloženo z [17, s. 158]). Pro usnadnění orientace čtenáře je použita symbolika shrnutá a uvedena v tabulce 2.2.

Zjednodušeně, *index prvního řádu* (2.4) udává míru toho, jak moc by se snížil rozptyl Y v případě, že bylo možné zafixovat X_i na konkrétní hodnotě. Tento index nezohledňuje interakce s dalšími parametry[17]. Označuje se S_i .

$V(X)$	Rozptyl veličiny X
$E(X)$	Střední hodnota X
$V(X) = E(X^2) - E(X)^2$	Výpočet rozptylu X
V_{x_i}	Rozptyl ovlivněný nejistotou i -tého faktoru (obdobně pro střední hodnotu)
$V_{x_{\sim i}}$	Rozptyl ovlivněný nejistotou všech faktorů vyjma i -tého (obdobně pro střední hodnotu)
$V_{x_i}(E_{x_{\sim i}}(Y X_i))$	Rozptyl všech možných hodnot Y se zafixovaným parametrem X_i . Je to tedy míra rozptylu, ke kterému přispívají všechny parametry krom „zafixovaného“ X_i – nikoliv však na jedné konkrétní hodnotě, nýbrž v celém rozmezí svého rozdělení pravděpodobnosti!
$\begin{pmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{B} \end{pmatrix}$	Matrice vygenerovaných vstupních hodnot o rozměru $2N \times$ počet parametrů
$\mathbf{A}_{\mathbf{B}}^{(i)} = \mathbf{C}_i$	Upravená matice vstupních hodnot sestavená z i -tého sloupce (odpovídající i -tému parametru) z matice \mathbf{B} a zbylých z \mathbf{A}

Tabulka 2.2: Přehled použité symboliky

$$S_i = \frac{V_{x_i}(E_{x_{\sim i}}(Y | X_i))}{V(Y)} \quad (2.4)$$

Jeho obdobou je *index totálního efektu* (2.5), který zahrnuje interakce s dalšími parametry. Pro intuitivní představu lze říct, že to je očekávané snížení rozptylu při zafixování všech parametrů kromě X_i . Označuje se S_{Ti} .

$$S_{Ti} = \frac{E_{x_{\sim i}}(V_{x_i}(Y | X_{\sim i}))}{V(Y)} = 1 - \frac{V_{x_i}(E_{x_{\sim i}}(Y | X_i))}{V(Y)} \quad (2.5)$$

Při využití metody Monte Carlo jsou indexy (2.4) a (2.5) získány pomocí tzv. estimatorů⁴. Těch existuje opět vícero, ale pro účely této práce se nejefektivnějšími ukázaly (2.6) z [21] a (2.7) z [22] pro indexy prvního řádu a (2.8) z [21] pro indexy totálního efektu.

$$V_{x_i}(E_{x_{\sim i}}(Y | X_i)) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f(\mathbf{B})_j (f(\mathbf{A}_{\mathbf{B}}^{(i)})_j - f(\mathbf{A})_j) \quad (2.6)$$

$$V_{x_i}(E_{x_{\sim i}}(Y | X_i)) = V(Y) - \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N (f(\mathbf{B})_j - f(\mathbf{A}_{\mathbf{B}}^{(i)})_j)^2 \quad (2.7)$$

$$E_{x_{\sim i}}(V_{x_i}(Y | X_{\sim i})) = \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N (f(\mathbf{A})_j - f(\mathbf{A}_{\mathbf{B}}^{(i)})_j)^2 \quad (2.8)$$

⁴V angličtině *estimator* – V době psaní práce neexistoval ustálený český termín

Interpretace výsledných indexů je⁵:

- Jednotlivé indexy prvního řádu musí být kladné a ležet v intervalu $\langle 0 : 1 \rangle$. Jejich součet musí být menší než nebo roven jedné. Je-li součet roven jedné, je to dostačující podmínka k tvrzení, že na výsledný rozptyl nemají vliv vzájemné interakce, analyzovaný model je tedy *aditivní* (viz 2.4.1).
- Indexy totálního efektu mohou ležet teoreticky v intervalu $\langle 0 : \infty \rangle$, zároveň nesmí být větší než příslušné indexy prvního řádu.
- Rozdíl indexů totálního efektu a prvního řádu jednoho parametru udává podíl interakcí s dalšími parametry. Pokud je rozdíl nulový, znamená to, že interakce s dalšími parametry žádný vliv nemají.
- Pokud vyjde index totálního efektu nulový, je to dostačující podmínka k tvrzení, že daný parametr je nevýznamný a je možné ho zafixovat kdekoli v rámci jeho rozdělení pravděpodobnosti bez vlivu na výsledný rozptyl. Z toho vyplývá, že index prvního řádu může být nulový, ale interakce s daným parametrem stále mohou mít vliv na výsledný rozptyl.

⁵Převzato z [17, s. 166]

3 Postup práce

Zde je vysvětlen postup práce při návrhu, který je pro přehlednost vizualizován jako flowchart (obr. 3.1). Proces začíná rozbořem zadání (kap. 4.1), kdy je třeba identifikovat klíčové vlastnosti, které musí zařízení splňovat. Těmi jsou například přesnost měření, rozsah pohybu nebo montážní prostor.

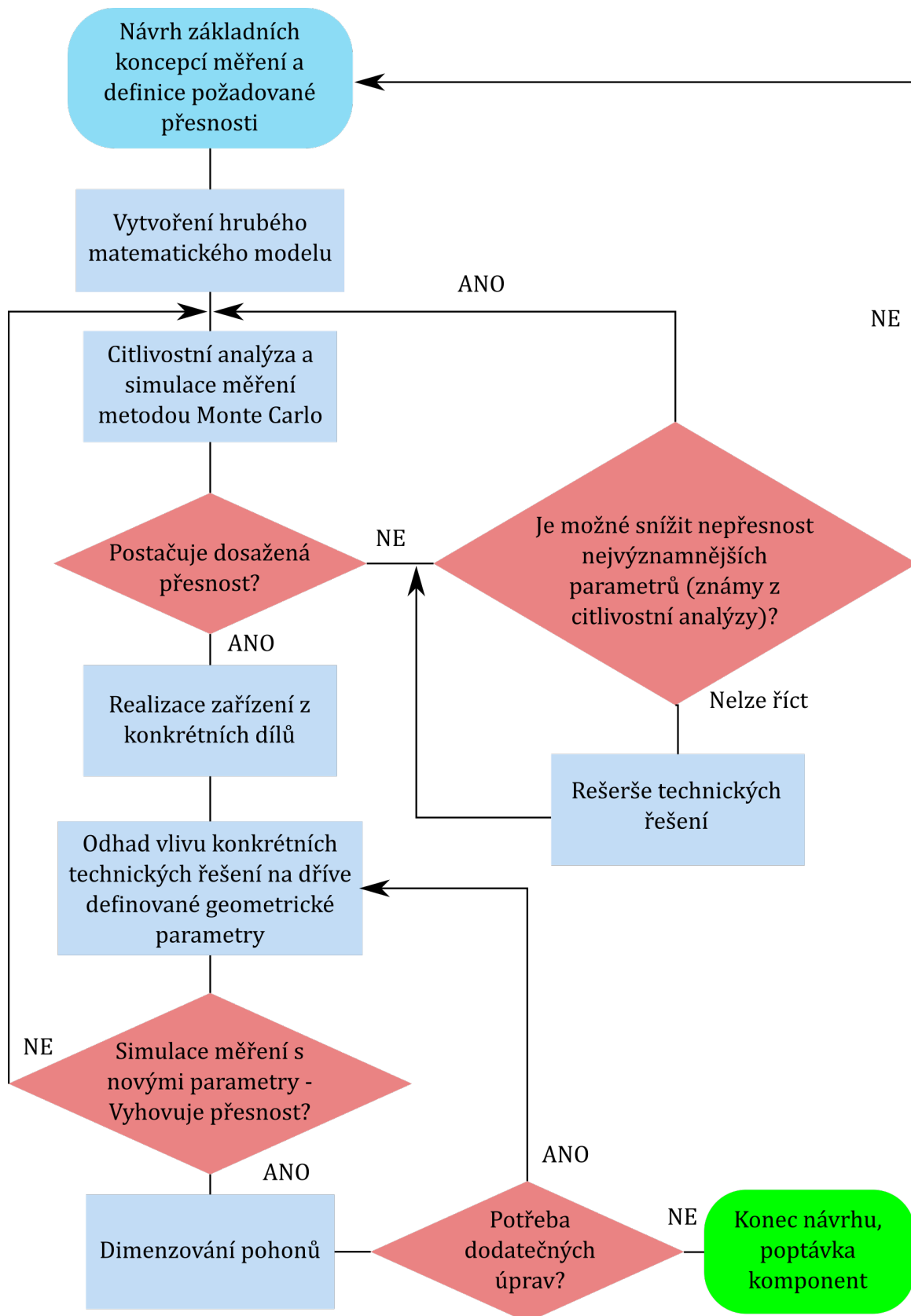
Z tohoto rozboru vychází první hrubé návrhy koncepcí měřicího zařízení. V této práci jsou návrhy rozebrány dva – *Lineární kříž* (kap. 4.2) a *Koncepce Z* (kap. 4.3). Pro tyto návrhy byly odvozeny schematické geometrické modely, které dále vstupují do citlivostní analýzy. V této fázi nemusí být přesně známo, jak budou konkrétní parametry realizovány, ale je vhodné disponovat určitou intuicí, jaké přesnosti je možné realizovat. Jmenovitá hodnota jednotlivých parametrů vychází obvykle z konstrukčních požadavků, jejich nejistota je buďto katalogový údaj (např. u senzoru), nebo odhad s různou úrovní exaktnosti.

V situaci, kdy není zřejmé, které parametry budou ovlivňovat přesnost měření nejvíce, umožňuje prozkoumání vlivu jednotlivých parametrů globální citlivostní analýza. Použité vzorce a postupy byly popsány v kapitole 2.4, výsledky citlivostní analýzy navržených koncepcí jsou popsány v kapitolách 5.1 a 5.2. Ze simulace měření metodou Monte Carlo je vyhodnoceno, zda kombinace navržených parametrů umožňuje dosáhnout uspokojivé přesnosti. Pokud ne, je třeba snížit nejistotu nejvýznamnějších parametrů za podmínky, že to je technicky realizovatelné. V případě, že je dosaženo konstrukčních, či jiných technických limitů a přesnost stále nevyhovuje, je na místě vrátit se na začátek procesu a zvolit jiný přístup.

Je-li simulovaná přesnost měření dostatečná, je možné přistoupit k návrhu zařízení z dostupných komponent a materiálů (kap. 6). Během návrhu je důležité věnovat pozornost tomu, aby byly dodrženy limity vycházející ze simulací, v případě, že to není možné, je třeba opět provést simulace, citlivostní analýzu a iteračním procesem konstrukci modifikovat. Poslední krokem je dimenzování a výběr pohonů (kap. 6.3), což může opět vést na potřebu modifikovat konstrukci.

Výsledkem celého procesu je tedy návrh zařízení v podobě 3D CAD modelu a seznam komponent, které by byly následně poptávány a případně zadávány do výroby.

3 POSTUP PRÁCE



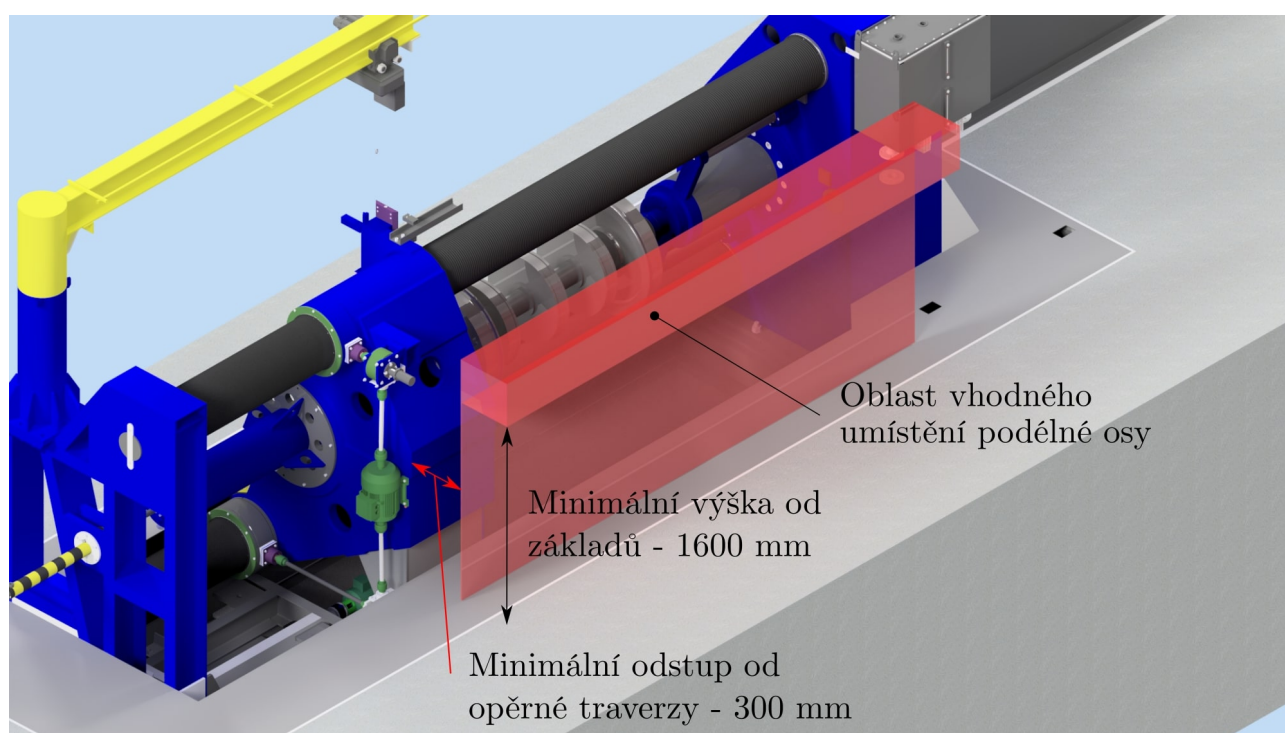
Obrázek 3.1: Pracovní postup návrhu měřicího zařízení

4 Navrhované koncepce

Na základě zadání výrobce popsaného v kapitole 1.1 a jeho rozboru v 4.1 byly jako vstup do procesu analýzy navrženy dvě koncepce měření, které jsou nazvány *koncepce Z* (viz obr. 4.7) a *lineární kříž* (viz obr. 4.4). V příslušných kapitolách jsou dané návrhy vysvětleny a jsou prezentovány jejich matematické modely, které slouží jako podklady pro citlivostní analýzu a simulaci přesnosti.

4.1 Vysvětlení požadavků

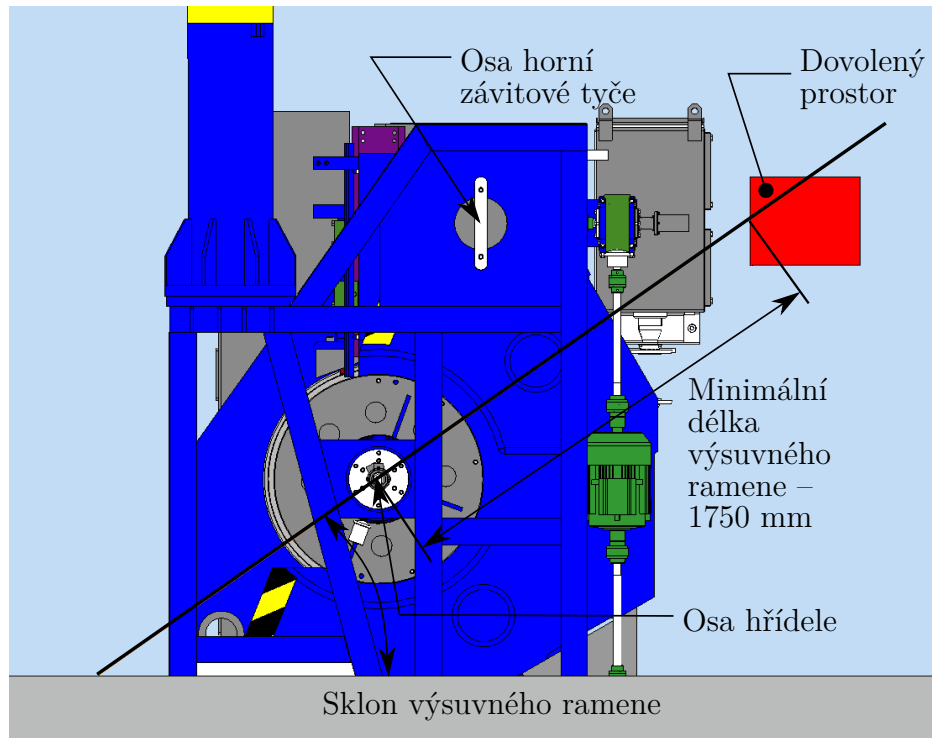
Výrobce lisu zadává požadavky (viz kap. 1.1) jak na výslednou přesnost, kterou zařízení musí dosáhnout, tak na umístění v prostoru, způsob jeho montáže a samotnou metodiku měření, což jsou všechno kritéria určující rozsah pohybů, kterých je třeba dosáhnout. Jednou z hlavních specifikací je nutnost umístění zařízení v úrovni horní závitové tyče (její spodní okraj se nachází přibližně ve výšce 1600 mm od základů), aby bylo zamezeno poškození zařízení manipulací s jeřábem. Druhou podmínkou je dostatečný odstup od opěrné traverzy (300 mm), aby nebylo bráněno jejímu pohybu v celém rozsahu.



Obrázek 4.1: Pohled zezadu na lis a definice vhodného montážního prostoru

Oba požadavky spolu definují prostor znázorněný na obrázku 4.1. V podélném směru prostor vymezuje z jedné strany pevná traverza a z druhé maximální požadovaný rozsah, definovaný maximální délkou hřídele zvětšenou o možnost lisování v různých polohách lisovního válce a opěrné traverzy, výrobce tento rozměr (rozsah pohybu v podélné ose) definuje jako 3500 mm od okraje pevné traverzy. Spojnice osy hřídele upevněné mezi středící hroty a dovoleného

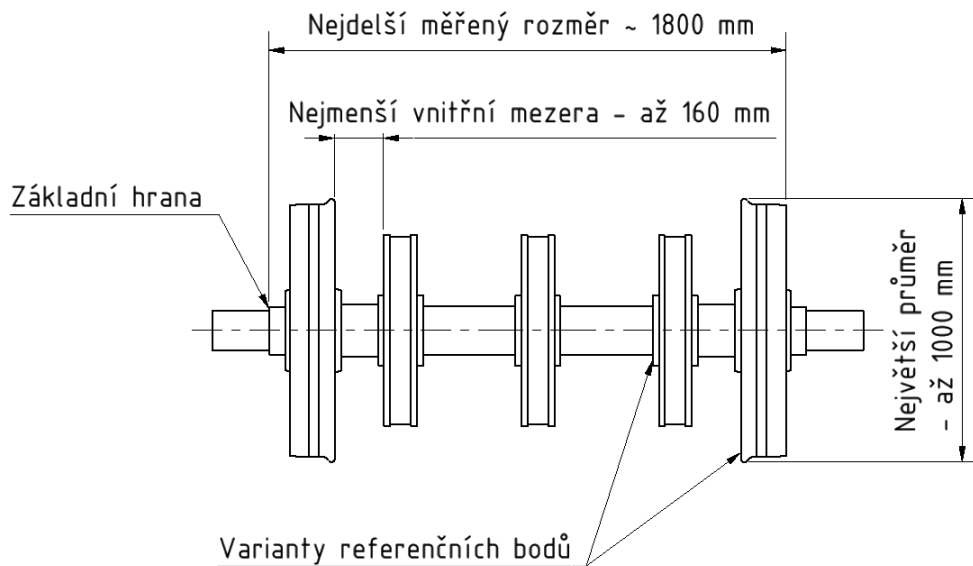
prostoru svírá se základy úhel 35° (viz obr. 4.2) a určuje minimální vzdálenost (1750 mm), kterou musí rameno dosáhnout, aby umožňovalo měření u hřídele a existovala možnost rameno úplně vysunout. Vzhledem k požadavku na snadnou integraci k již existujícím lisům je vyloučeno jakékoliv zabudování zařízení přímo do konstrukce lisu a je nutné využít pouze uchycení k základům.



Obrázek 4.2: Pohled zprava na lis se znázorněným sklonem výsuvného ramene

Další požadavky vyplývají z různých variant lisovaných soukolí, a různých možností měření polohy. Současná metoda měření kalibrovanými měřítky zmíněná v kap. 1.1 spočívá v měření relativních roztečí mezi jednotlivými prvky, nicméně je požadováno, aby zařízení umožňovalo i měření k základní hraně hřídele (viz obr. 4.3). Právě měření k základní hraně zpřisňuje požadavek na přesnost zařízení. Obvyklá tolerance rozteče dvou prvků je $\pm 1 \text{ mm}$, avšak dle informací od ŽĐAS může u přesných soukolí pro rychlostní vlaky dosahovat až $\pm 100 \mu\text{m}$. Při absolutním měření k základní hraně je tedy třeba ideálně dosáhnout přesnosti $\pm 50 \mu\text{m}$. Vzdálenost od základní hrany k nejvzdálenějšímu referenčnímu bodu určuje nejdelší měřený rozměr, který je nutno spolehlivě měřit. Tyto body mohou ležet kdekoli v rozmezí od hřídele po vnější poloměr pojezdových kol (viz obr. 4.3). Nejmenší rozteč mezi jednotlivými prvky, která se na soukolích může vyskytnout, je 160 mm.

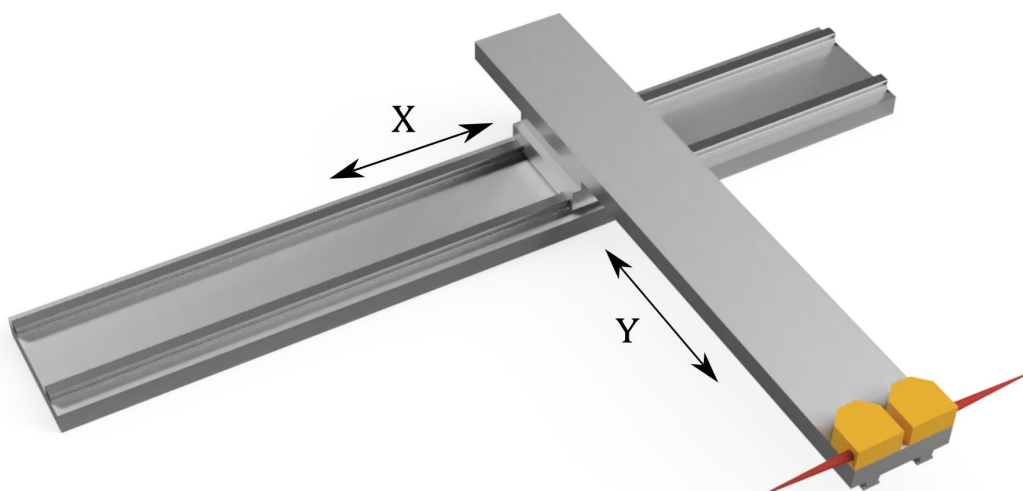
Zmíněné referenční body se mohou nacházet na površích s neurčitou povrchovou úpravou, typicky nový broušený brzdový kotouč, barvená skříň převodovky nebo pojezdové kolo s povrchovou rzí a různými vrypy či škrábanci.



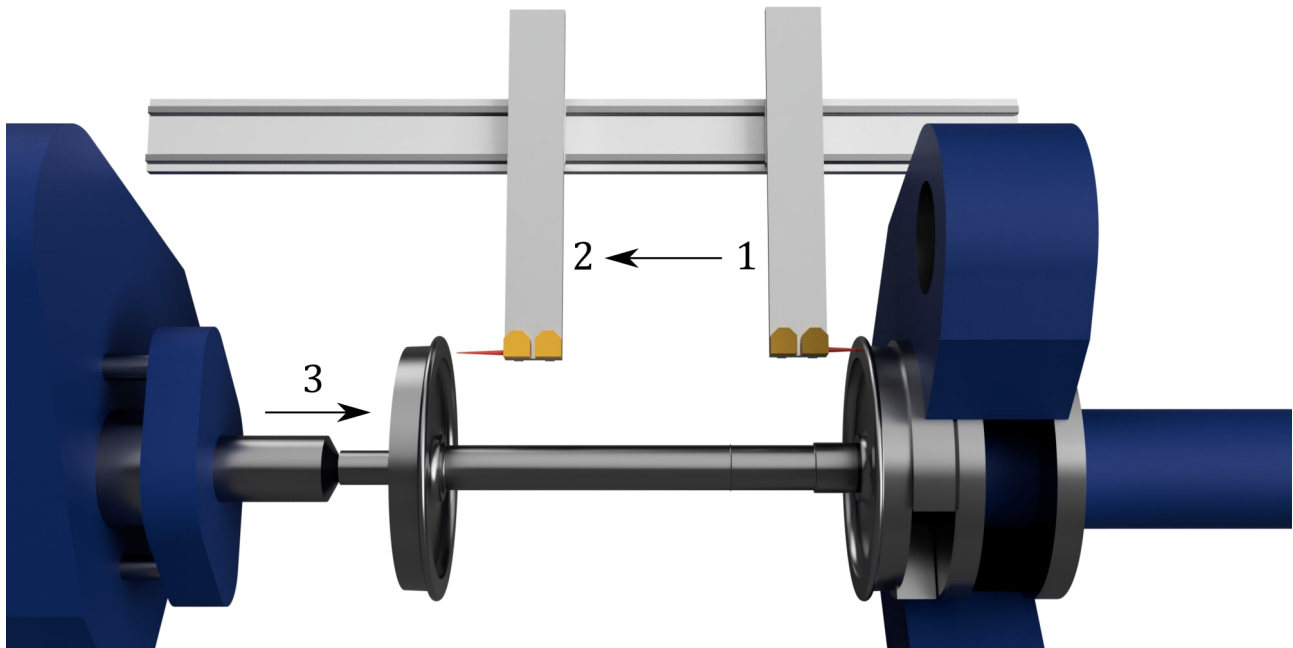
Obrázek 4.3: Ukázkové soukolí s vyznačenými důležitými parametry. Pozn.: Délkové údaje neodpovídají zobrazenému soukolí.

4.2 Lineární kříž

První navrženou konstrukcí je *lineární kříž* (viz obr. 4.4), který sestává z dvouosého manipulátoru (realizovaného např. lineárním vedením) a upevněním dvou senzorů na výsuvnou osu Y manipulátoru, v tomto případě jsou předpokládány bezdotykové senzory, ale varianta s dotykovými čidly by byla rovněž realizovatelná. Obě osy jsou vybaveny přesným odměřováním polohy, jehož přesnost se pohybuje na úrovni použitých senzorů.



Obrázek 4.4: Hrubý návrh koncepce lineárního kříže



Obrázek 4.5: Navrhovaný postup lisování pomocí koncepce lineárního kříže

4.2.1 Funkční vize

Navrhovaná sekvence měření (viz obr. 4.5) při použití této konstrukce začíná měřením polohy prvního referenčního bodu na prvku určeném k nalisování, uloženého v opěrné travěze (1). Výsuvná osa Y se následně posune do pozice připravené pro měření konečného dolisování prvku (2). Lisovací válec poté začne tlačit hřídel do lisovaného prvku (3), výsuvná osa Y je stále na stejném místě a probíhá měření polohy druhého referenčního bodu (v tomto případě na druhém, již nalisovaném pojezdovém kole). Po dosažení definované vzdálenosti je vyslán příkaz k zastavení lisu. Po dolisování prvku je výsuvná osa Y zasunuta dozadu mimo pracovní prostor.

Na obrázku 4.5 je vyobrazeno měření vnitřní rozteče mezi prvky, ale teoreticky umožňuje i měření z vnější strany, nebo k různým dalším prvkům na hřídeli za podmínky, že bude mezi prvky dostatek prostoru.

4.2.2 Matematický model

Matematický model měření pomocí této koncepce je odvozen pomocí vektorové metody, kdy vstupem do modelu jsou geometrie a pozice výsuvného ramene, senzorů a odpovídající nejistoty. Všechny parametry vyskytující se na obr. 4.6 jsou uvedeny v tabulce 4.1. Tento model je popsán rovnicí 4.1, která vyjadřuje součet posunu mezi měřicími pozicemi nx_1 zatíženého chybou dx_1 , vzdáleností od měřených povrchů naměřených senzory m_L (rovnice 4.2) a m_R (rovnice 4.3), dále zatížených chybami měření senzorů unc_L a unc_R . Pro přehlednost je zavedena substituce s_1 (4.4) a s_2 (4.5).

Z rovnice 4.1 je zřejmé, že kritickými parametry jsou určitě přesnosti měření posunu na vodorovné ose X a samotné senzory. Dalším důležitým, ne tak očividným parametrem je odchylka úhlu svíraného osami X a Y. Pro odvození modelu bylo užito následujících předpokladů:

- Měřené plochy jsou dokonale rovnoběžné vůči sobě, kolmé na osu lisování a základy lisu.
- Zanedbání vlivu povrchu měřených prvků (drsnost, odrazivost, apod.) na přesnost měření.
- Zanedbání vlivu teploty na přesnost měření senzorů.

- Zanedbání vlivu úhlové odchylky paprsku na měření senzorů – předpokládané odchylky jsou velmi malé.
- Horizontální část vedení je dokonale tuhá/podložena dokonale tuhou konzolí, tudíž se na ni nemohou projevit deformace ovlivňující přesnost v rovině měření.
- Deformace ve svislé části vedení se mohou objevit pouze v rovině kolmé na osu lisu, tj. vedení se může prohnut dolů, což neovlivní přesnost v rovině měření.
- Odchylka a_{dev} je realizována oddálením pravého konce vodorovné osy X od osy lisování. Levý konec je pevný.
- Je zanedbána vzájemná vzdálenost senzorů.
- Nepřesnosti parametrů jsou modelovány rovnoměrným rozdělením o zvoleném poloměru se střední hodnotou odpovídající jmenovitému rozměru (viz kap. 2.4.3).

Koncepce lineárního kříže se zdá být nejpřímějším řešením, jak splnit zadání. Umožňuje měření k téměř libovolnému bodu v rámci pracovního prostoru, čímž umožňuje volbu nejvhodnější technologického postupu a klade realistické požadavky na přesnost senzorů i odměřování pohybu vedení. Konstrukční tolerance vedení samotného jsou otázkou především citlivostní analýzy.

L	Skutečná vzdálenost měřených povrchů
r_0	Vzdálenost výsuvné osy Y od konce vedení vpravo
x_1	Vzájemná vzdálenost pozic měření
$y_{1L/R}$	Vzdálenost senzoru od vodorovné osy v levé/pravé poloze
$a_{0L/R}$	Úhel výsuvné osy Y vůči vodorovné ose X pro levou a pravou měřicí pozici
$a_{1L/R}$	Úhel paprsku levého/pravého senzoru vůči výsuvné ose Y
a_{dev}	Odchylka horizontální části vedení vůči vodorovné poloze
$m_{L/R}$	Přesná měřená vzdálenost, ta je dále zatížena chybou $unc_{L/R}$
$h_{L/R}$	Výška měřeného bodu od průsečíku přímky horizontálního vedení a měřené plochy

Tabulka 4.1: Vysvětlení jednotlivých parametrů z obr. 4.6

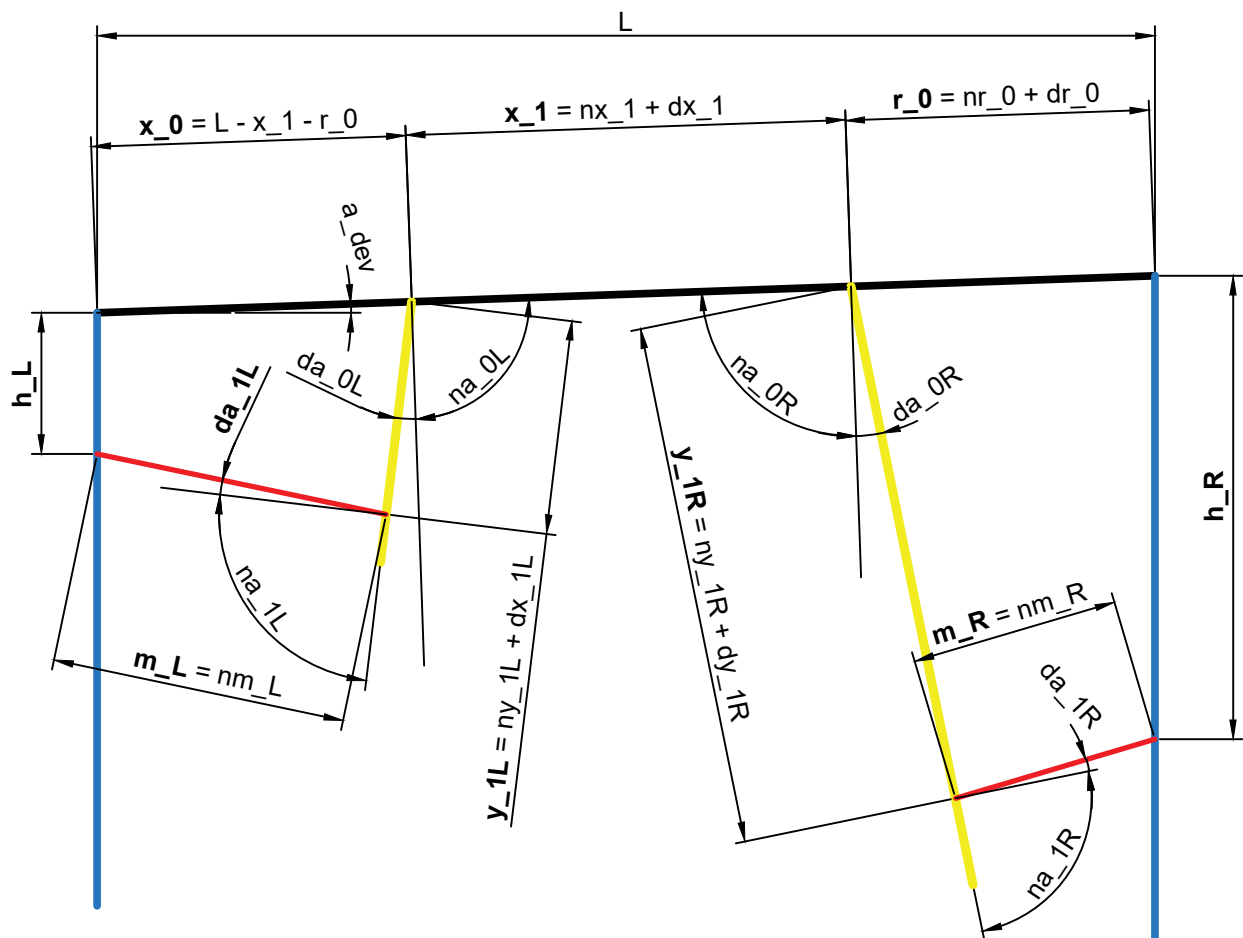
$$L' = m_L + m_R + dx_1 + nx_1 + unc_L + unc_R \quad (4.1)$$

$$m_L = -\frac{dy_{1L} \cos(s_1) + ny_{1L} \cos(s_1) - \cos(a_{dev}) (dr_0 - L + dx_1 + nr_0 + nx_1)}{\cos(da_{0L} - a_{dev} + da_{1L} + na_{0L} + na_{1L})} \quad (4.2)$$

$$m_R = \frac{L - L \cos(a_{dev}) - dy_{1R} \cos(s_2) - ny_{1R} \cos(s_2) + dr_0 \cos(a_{dev}) + nr_0 \cos(a_{dev})}{\cos(a_{dev} - da_{0R} + da_{1R} - na_{0R} + na_{1R})} \quad (4.3)$$

$$s_1 = da_{0L} - a_{dev} + na_{0L} \quad (4.4)$$

$$s_2 = da_{0R} - a_{dev} + na_{0R} \quad (4.5)$$



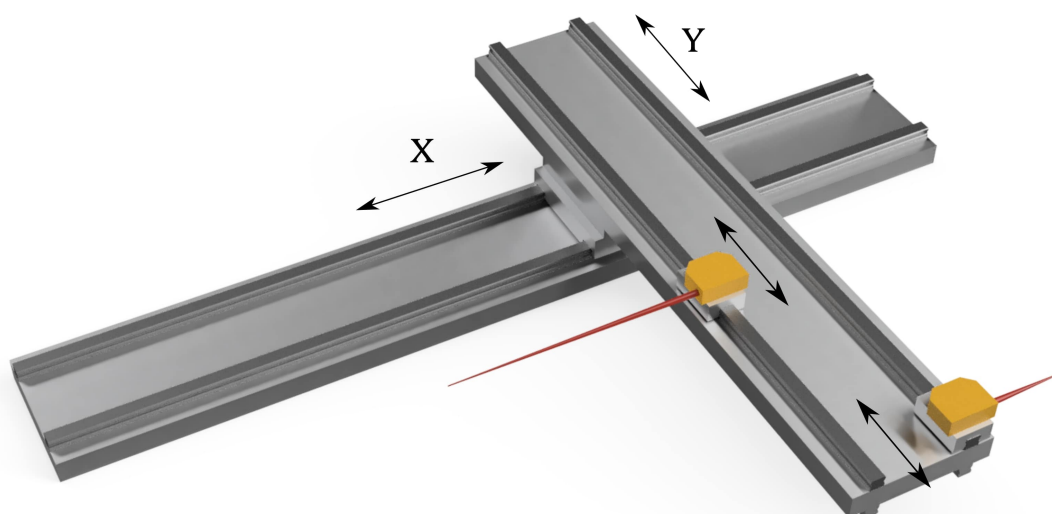
Obrázek 4.6: Schematický náčrt s popisy jednotlivých parametrů modelu – modře jsou vyznačeny měřené plochy, žlutě výsvuná osa Y ve dvou polohách a červeně výsledná měřená vzdálenost. Pozn.: Tučné písmo značí vektor, předpona n jmenovitý rozměr a d naopak odchylku od jmenovitého rozměru.

4.3 Koncepte Z

Druhý navržený přístup je konstrukčně podobný tomu uvedenému v kapitole 4.2, využívá rovněž dvouosého manipulátoru a dvou senzorů, ty jsou ale oba schopny nezávislého posuvu po výsvuné ose. Tím je možné jednak měřit ve více bodech, a tím odhadnout úhlovou odchylku výsvuné osy, ale především měřit současně v jedné pozici na vodorovné ose X . Realizace takové konstrukce je možná využitím dvouosého lineárního vedení a osazením výsvuné osy dvěma např. kuličkovými vedeními. Sensory by byly umístěny na vozíky na zmíněném vedení a pohyb může být zajištěn ozubeným hřebenem, pohybovým šroubem, nebo řemenem. Konstrukce je v zjednodušené podobě vyobrazena na obrázku 4.7.

4.3.1 Funkční vize

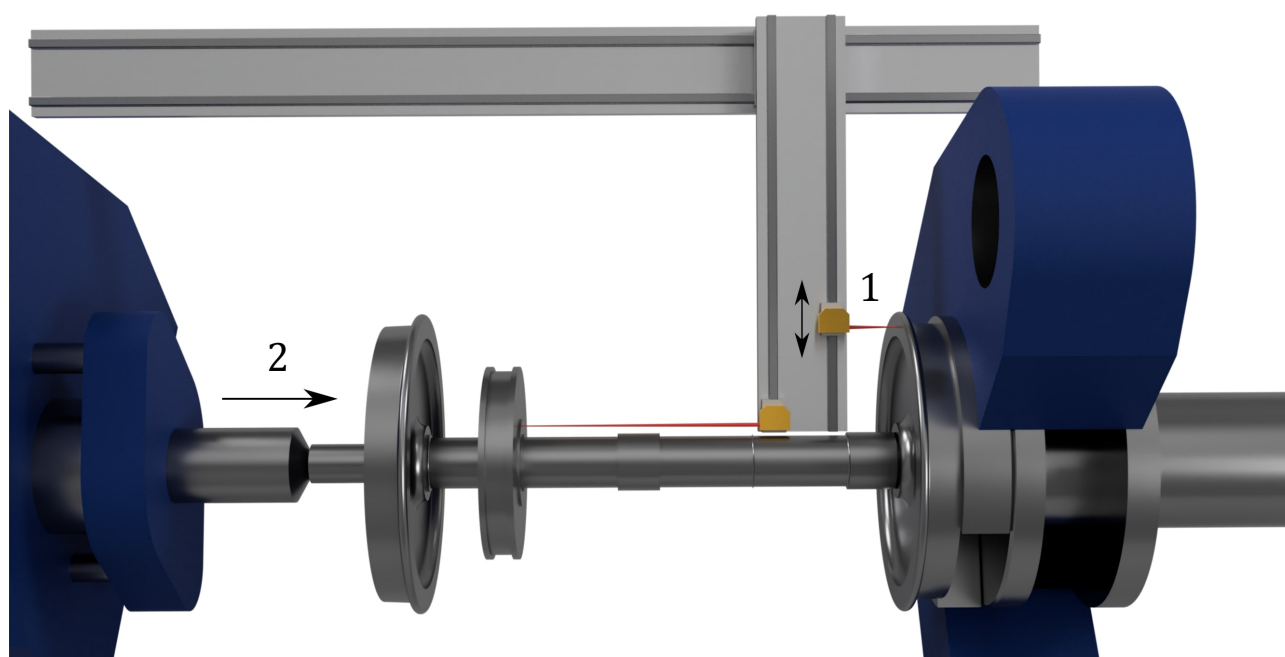
Jak bylo zmíněno, využití této koncepce teoreticky umožňuje dosáhnout dokonalé kompenzace určitých konstrukčních nedokonalostí a odchylek, využitím současného měření obou měřených povrchů. Pracovní sekvence v kombinaci lisem začíná přípravou všech lisovaných komponent, vystředění prvku určeného k nalisování a přibližnému posuvu sestavy do pozice připravené ke



Obrázek 4.7: Hrubý návrh koncepce Z

konečnému dolisování. Obrázek 4.8 zachycuje situaci po provedení zmíněných úkonů a nasunutí výsuvné osy do pracovního prostoru a příslušného polohování sensorů. Pravý sensor provede měření ve dvou bodech v rámci plošky referenčního bodu (1). Z rozdílu těchto měření lze odhadnout chybu odklonu výsuvné osy Y od ideální kolmé polohy. Pomocí tohoto odhadu je měřena a korigována vzdálenost levé plochy během lisování (2), kdy je po dosažení požadované vzdálenosti vyslán signál k zastavení lisu. Měření na levé ploše probíhá pouze v jednom bodě.

Tato varianta z principu činnosti umožňuje pouze měření prvků z vnitřní strany a také je nutné, aby viditelnost a přístupnost příslušných referenčních bodů nebyla blokována již nalísovanými prvky.



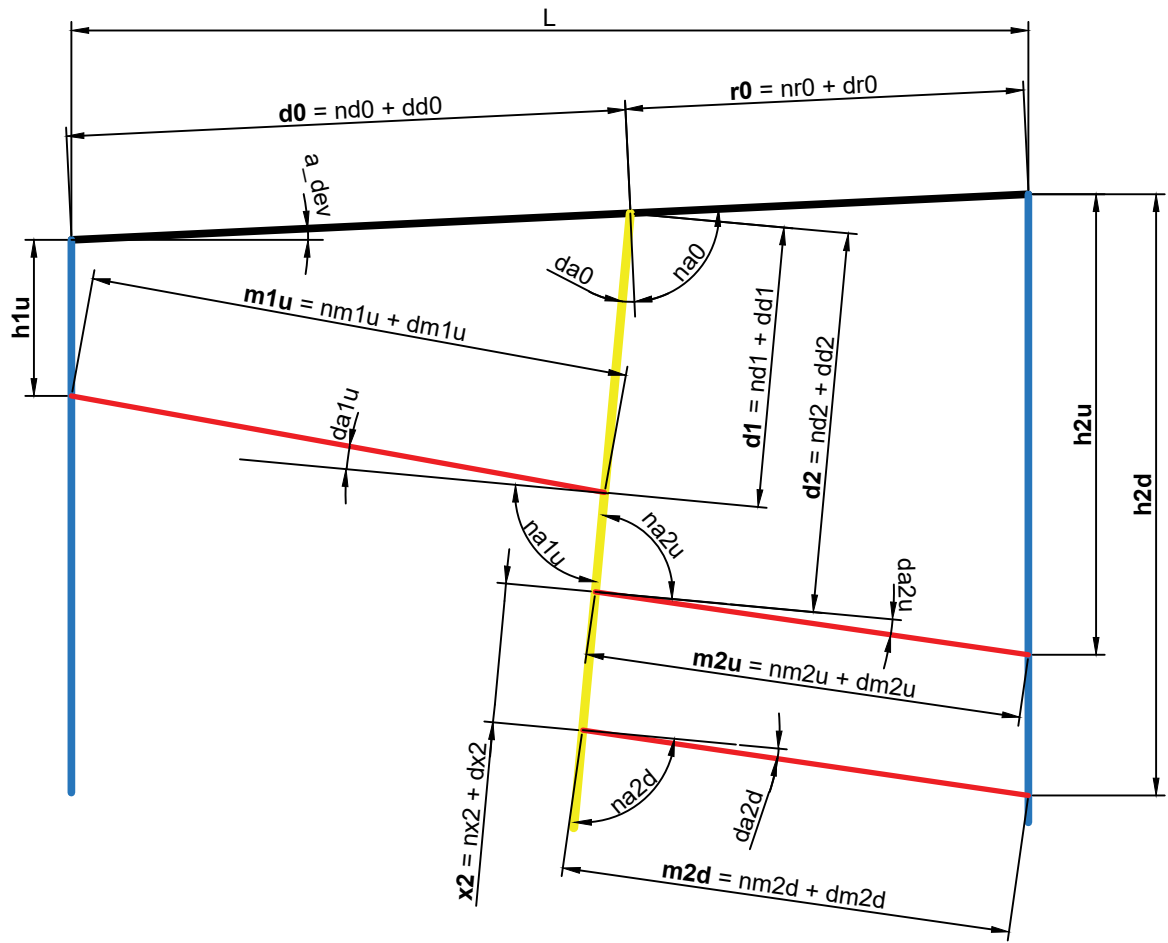
Obrázek 4.8: Navrhovaný postup měření konstrukcí Z

4.3.2 Matematický model

Matematický popis je opět odvozen pomocí vektorové metody, kdy jsou výpočtem z odvozeného modelu získány vzdálenosti „naměřené“ senzory. Ty jsou následně zatíženy chybou měření a dále zpracovány k určení korekce úhlové odchylky výsuvné osy Y. Schematický náčrt modelu je na obrázku 4.9 a vysvětlení zavedených parametrů v tabulce 4.2. Výstupem z modelu je naměřená vzdálenost získaná z rovnice 4.6. V ní vystupující měření vzdálenosti $m1u$, $m2u$ a $m2d$ jsou vypočteny z rovnic 4.8, 4.9 a 4.10. Z těchto měření vzdálenosti a rozteče pozic měření pravého senzoru $x2$ je vypočten odhad úhlové odchylky $ea0$ rovnicí 4.7. Pro přehlednost je opět zavedena substituce s_1 (4.11). Pro odvození byly užity předpoklady:

- Měřené plochy jsou dokonale rovnoběžné vůči sobě, kolmé na osu lisování a základy lisu.
- Zanedbání vlivu povrchu měřených prvků (drsnost, odrazivost, apod.) na přesnost měření.
- Zanedbání vlivu teploty na přesnost měření senzorů.
- Zanedbání vlivu úhlové odchylky paprsku na měření senzorů – předpokládané odchylky jsou dostatečně malé.
- Horizontální část vedení je dokonale tuhá/podložena dokonale tuhou konzolí, tudíž se na ni nemohou projevit deformace ovlivňující přesnost v rovině měření.
- Deformace ve svislé části vedení se mohou objevit pouze v rovině kolmé na osu lisu, tj. vedení se může prohnout dolů, což neovlivní přesnost v rovině měření.
- Odchylka a_{dev} je realizována oddálením pravého konce vodorovné osy X od osy lisování. Levý konec je pevný.
- Je zanedbána vzájemná vzdálenost vedení senzorů.
- Nepřesnosti parametrů jsou modelovány rovnoměrným rozdělením o zvoleném poloměru a se střední hodnotou odpovídající jmenovitému rozměru (viz kap. 2.4.3).
- Sekvence měření probíhá tak, že jako první je změřena vzdálenost od pravé plochy v dvou bodech pro odhad korekce úhlu a poté se levým senzorem měří vzdálenost od lisovaného prvku. Během tohoto procesu (až do ukončení lisování) se geometrické parametry nijak nezmění.
- Dokonalá vzájemná rovnoběžnost vedení senzorů a nosného vedení osy Y.

Tato konstrukce by měla umožňovat pomocí přesných senzorů eliminovat výchytku na konci dlouhého výsuvného ramene a poskytovat rychlý způsob měření během lisování, ukládá však přísné nároky na senzory. Levý senzor musí ideálně poskytovat měřicí rozsah v intervalu $\langle 0 : 1750 \rangle$ mm, pravý nemusí mít zvláště velký rozsah, nicméně musí být dostatečně přesný, aby bylo možné odlišit chybu měření od změny vzdálenosti z důvodu úhlové odchylky výsuvné osy Y. Tento odhad komplikuje fakt, že velikost referenčních plošek umožňujících měření je poměrně malá, obvykle 1x1 cm.



Obrázek 4.9: Schematický náčrt s popisy jednotlivých parametrů modelu *koncept Z* – modře jsou vyznačeny měřené plochy, žlutě výsuvná osa Y a červeně výsledné měřené vzdálenosti. Pozn.: Tučné písmo značí vektor, předpona n jmenovitý rozměr a d naopak odchylku od jmenovitého rozměru.

$$L' = m1u \cos(e_{a0}) + m2u \cos(e_{a0}) - \sin(e_{a0}) (dd_1 - dd_2 + nd_1 - nd_2) \quad (4.6)$$

$$e_{a0} = -\text{atan} \left(\frac{m2d - m2u}{dx_2 + nx_2} \right) \quad (4.7)$$

$$m1u = dm1u - \frac{dd_1 \cos(s_1) + nd_1 \cos(s_1) + dd_0 \cos(a_{dev}) + nd_0 \cos(a_{dev})}{\cos(da_0 - a_{dev} + da1u + na_0 + na1u)} \quad (4.8)$$

$$m2u = dm2u - \frac{L + \cos(s_1) \cdot (dd_2 + nd_2) - \cos(a_{dev}) \cdot (L + nr_0 + dr_0)}{\cos(a_{dev} - da_0 + da2u - na_0 + na2u)} \quad (4.9)$$

$$m2d = dm2d - \frac{L + \cos(s_1) \cdot (dd_2 + dx_2 + nd_2 + nx_2) - \cos(a_{dev}) \cdot (L + nr_0 + dr_0)}{\cos(a_{dev} - da_0 + da2d - na_0 + na2d)} \quad (4.10)$$

$$s_1 = da_0 - a_{dev} + na_0 \quad (4.11)$$

L	Skutečná vzdálenost měřených povrchů
r0	Vzdálenost výsuvné osy Y od konce vedení vpravo
d0	Vzdálenost výsuvné osy Y od konce vedení vlevo
d1	Vzdálenost levého senzoru od vodorovné osy
d2	Vzdálenost první pozice pravého senzoru od vodorovné osy
x2	Rozteč dvou měřicích pozic pravého senzoru
a0	Úhel výsuvné osy Y vůči vodorovné ose X
a1u	Úhel paprsku levého vůči výsuvné ose Y
a2u/d	Úhel paprsku pravého senzoru vůči výsuvné ose Y v horní/spodní pozici
a_{dev}	Odchylka horizontální části vedení vůči vodorovné poloze
m1u	Přesná měřená vzdálenost levým senzorem
m2u/d	Přesné měřené vzdálenosti pravým senzorem v horní/spodní pozici
h1u, h2u/d	Výška měřeného bodu od průsečíku přímky horizontálního vedení a měřené plochy

Tabulka 4.2: Vysvětlení jednotlivých parametrů z obr. 4.9

5 Analýza navržených konstrukcí

V této kapitole jsou prezentovány výsledky citlivostní analýzy obou navržených koncepcí, jsou diskutovány a zdůrazněny nejvýraznější rozdíly mezi oběma koncepcemi. Pro citlivostní analýzu byly použity matematické modely konstrukcí prezentované v kapitole 4, které jsou simulovány metodou Monte Carlo využívající intervaly povolených odchylek parametrů. Díky globální citlivostní analýze je zřejmé, které konkrétní parametry mají největší vliv na výslednou přesnost. Z citlivostní analýzy vychází konkretizované požadavky na jednotlivé parametry, které je třeba dodržet při návrhu reálné konstrukce.

Pro výpočet indexů citlivosti bylo využito programu Matlab (verze R2019b) a estimatorů 2.6, 2.7 a 2.8 uvedených v kap. 2.4.4. Ukázalo se, že rychlejší konvergenci zajišťuje využití Sobolovy sekvence čísel, která je v Matlabu implementovaná v podobě příkazu *sobolset*. Tato sekvence čísel navíc umožňuje postupné rozšiřování souboru, čehož je s výhodou využito při výpočtu citlivostních indexů, kdy lze potřebné dílčí výpočty provádět opakovaně na menších částech vstupního souboru a výpočet zastavit v momentě, kdy je dosaženo dostatečné konvergence.

Jak bylo řečeno, citlivostní indexy napovídají, které parametry (potažmo jejich nejistotu) je třeba omezit, aby bylo dosaženo lepšího výsledku. Výsledný odhad konkrétní přesnosti měření je získán také ze simulace Monte Carlo a v případě, že nesplňuje požadavky, je zopakována citlivostní analýza s novými parametry. Tento proces je iterován dokud není dosaženo uspokojivých výsledků, nebo technicky nerealizovatelných limitů.

Střední hodnoty jednotlivých parametrů vyplývají ze zadání, jejich nejistoty jsou většinou:

- Informace z katalogů – typicky u senzorů
- Jednoduchý intuitivní odhad – například je jisté, že maximální výchylka výsuvného ramene na konci nesmí být větší než požadovaná přesnost měření
- Požadavek vyplývající z analýzy, aby byla splněna požadovaná přesnost měření

Výsledná simulovaná přesnost měření odpovídá poloměru intervalu obsahujícím 99% simulovaných hodnot se středem rovnajícím se střední hodnotě ze všech měření L . Pro platnost tohoto tvrzení musí být ověřeno, zda střední hodnota vzorků měření odpovídá měřené vzdálenosti.

5.1 Lineární kříž

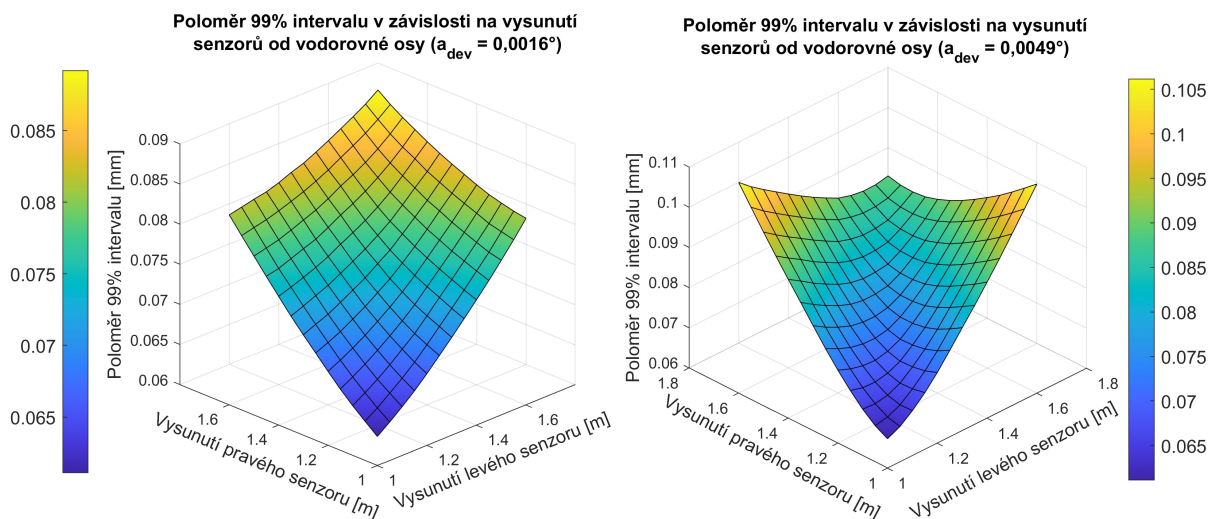
Konkrétní nejistoty jednotlivých parametrů dle modelu z kapitoly 4.2.2 jsou uvedeny v tabulce 5.1. Předpokládá se využití lineárního magnetického enkodéru pro odměřování pohybu os, dosahuje totiž vynikajících přesností (i $1 \mu\text{m}$) a laserového triangulačního senzoru. V tomto případě hodnoty odpovídají senzoru optoNCDT 2300–20 výrobce Micro–Epsilon, který má střed měřicího rozsahu 50 mm a dosahuje linearit $\pm 4 \mu\text{m}$.

Důležité je simulovat přesnost v různých měřících polohách, tedy na různých jmenovitých vzdálenostech povrchů L a různých vysunutích senzoru v levé i pravé pozici. Závislost přesnosti na vysunutí senzorů lze vynést do 3D grafu, viz obr. 5.1. Na zmíněném obrázku je demonstrována i překvapivě významná závislost přesnosti na parametru a_{dev} , která se projevuje především

Parametr	Jmenovitý rozměr + nejistota	Zdroj nejistoty
L	(1800 ± 0) mm	Měřená vzdálenost
r_0	$(50 \pm 0,01)$ mm	Katalogové hodnoty laserového senzoru a mag. enkodéru
x_1	$(1700 \pm 0,01)$ mm	Katalogová hodnota mag. enkodéru
$y_{1L/R}$	$(1100 : 1700 \pm 0,3)$ mm	Rozsah pohybu \pm Běžná hodnota enkodéru
$a_{0L/R}$	$(90 \pm 0,0016)^\circ$	Požadavek odpovídající vertikální odchylce 0,05 mm na konci ramene o délce 1800 mm
$a_{1L/R}$	$(90 \pm 0,23)^\circ$	Požadavek odpovídající vertikální odchylce 0,2 mm na konci ramene o délce 50 mm
a_{dev}	$(0 \pm 0,0016)^\circ$	Odhad odpovídající 0,1 mm rozdílu vzdálenosti konců vedení dlouhého 3500 mm od osy lisování
$m_{L/R}$	skutečná vzdálenost $\pm 0,004$ mm	Interní parametr
$h_{L/R}$	\emptyset	Interní parametr

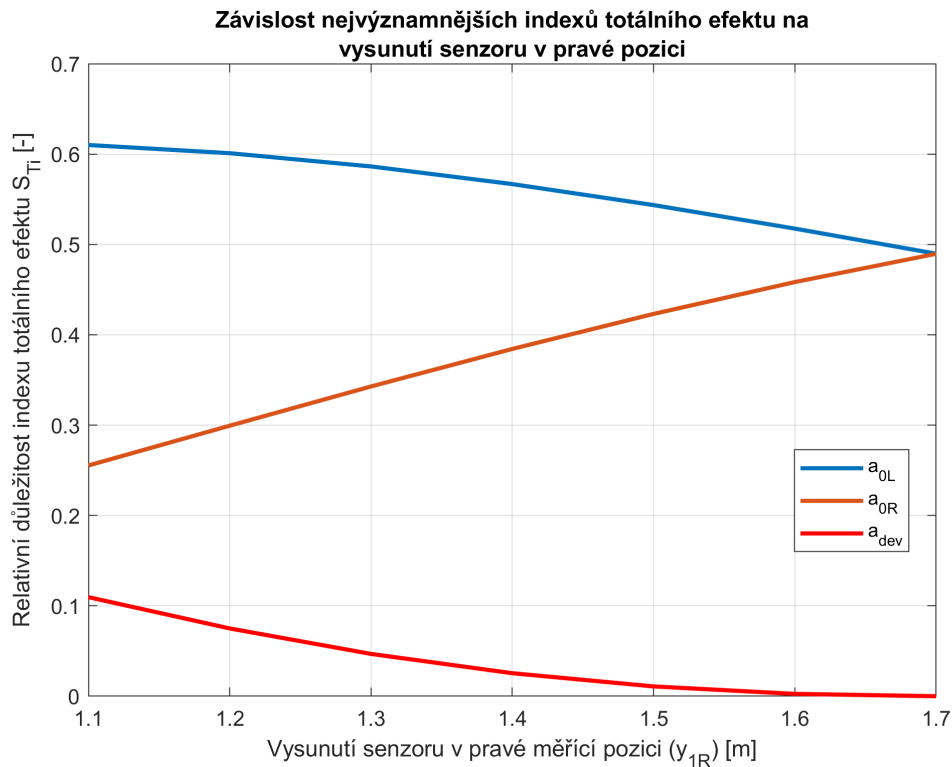
Tabulka 5.1: Konkrétní hodnoty parametrů užitých v citlivostní analýze Lineárního kříže

při maximálním vysunutí v jedné poloze a minimálním v druhé. Ta je nadále potvrzena indexy citlivosti na obr. 5.2, kde je vidět, že parametr a_{dev} nabývá na důležitosti s rozdílem vysunutí. Z toho důvodu byla zvolena přísnější hodnota $0,0016^\circ$ odpovídající odchylce 0,1 mm mezi konci 3500 mm dlouhého vedení.

Obrázek 5.1: Porovnání přesnosti v závislosti na vysunutí pro hodnoty $a_{dev} = 0,0016^\circ$ (vlevo) a $a_{dev} = 0,0049^\circ$

Zajímavé je také sledování závislosti přesnosti na měřené vzdálenosti ploch, která dle očekávání s ohledem na použítou metodu měření neexistuje, tedy konstrukce dosahuje stejné přesnosti napříč celým rozsahem.

Z výsledků citlivostní analýzy na obr. 5.2 je patrné, že primárním zdrojem nepřesnosti měření je úhlová odchylka výsuvné osy Y. V případě, že je vysunutí menší, je zřejmé, že se tato odchylka projevuje méně a proto klesá i její důležitost, nicméně parametry a_{0R} a a_{0L} jsou od sebe neoddelitelné, protože reprezentují tu samou konstrukční nepřesnost, pouze v rozdílných pozicích. Nepředpokládá se tedy, že by byla odchylka konstantní, ale že může nabývat v obou pozicích libovolné hodnoty z definovaného intervalu. Parametry a_{1L} a a_{1R} ovlivňují posunutí střední hodnoty, což není patrné z analýzy rozptylu. To je vysvětlitelné tím, že při větší úhlové



Obrázek 5.2: Citlivostní indexy totálního efektu pro konstrukci Lineárního kříže v závislosti na vysunutí senzoru v pravé pozici

odchylce senzory naměří delší vzdálenosti. Ostatní parametry, které na grafu nejsou vyneseny, se ukázaly být nevýznamnými.

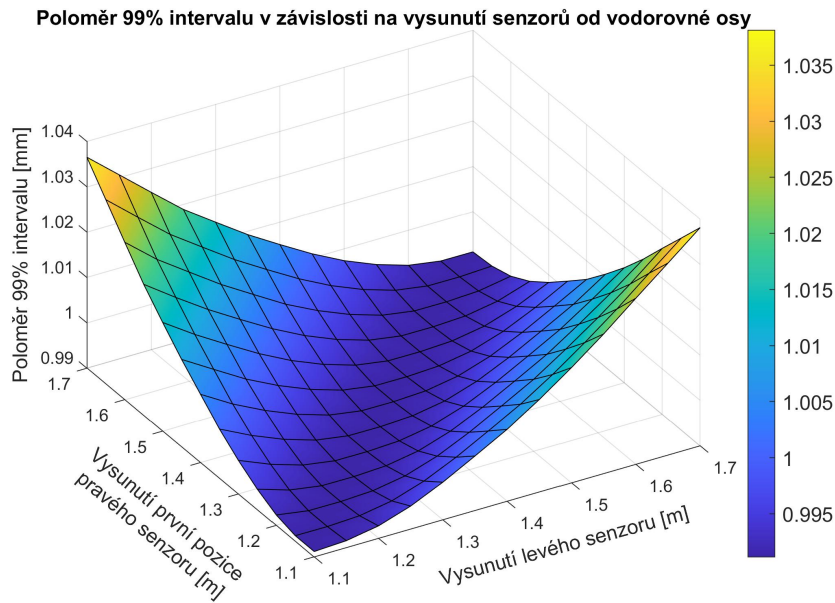
5.2 Koncepce Z

Důležitým prvkem této konstrukce je senzor mířící vlevo (ten, který není využitý k odhadu úhlové odchylky), který musí zajišťovat dostatečný měřicí rozsah ($0 \div 1700$ mm) s dostatečnou přesností – méně než alespoň 0,5 mm, ideálně než 0,01 mm. Při rešerši dostupných senzorů se ukázalo, že v době vypracování práce nebyl k dispozici sériově vyráběný senzor, který by dokázal splnit oba požadavky zároveň. Sensory poskytující přesnost v řádu mikrometrů obvykle pracují s poměrně úzkými rozsahy měření (nejvýše nízké stovky mm).

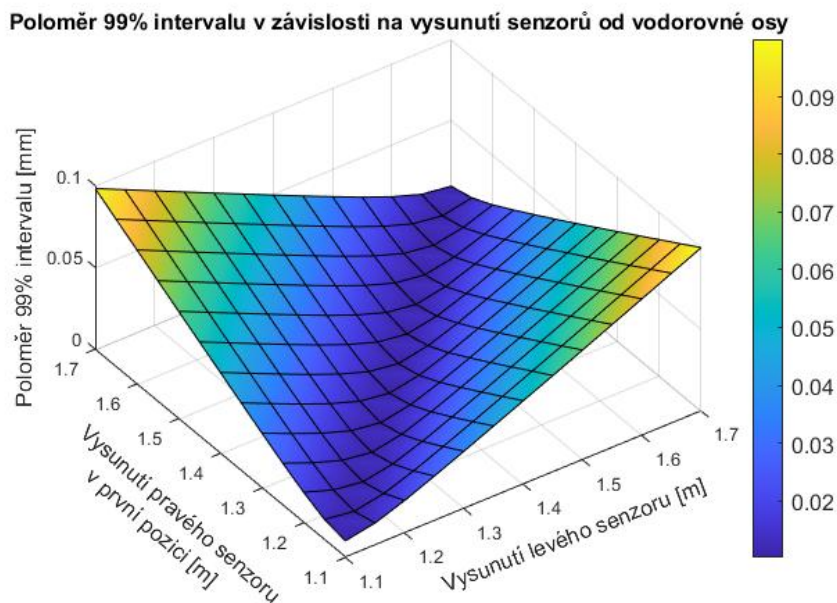
Alespoň měřicí rozsah splňuje (a to pouze částečně) laserový triangulační senzor optoNCDT ILD1710–1000 výrobce Micro–Epsilon, který umožňuje měřit v rozsahu 1000–2000 mm s přesností ± 1 mm. Z toho vyplývá, že už samotný senzor nesplňuje požadavek na přesnost, tedy konstrukce s tímto senzorem ji splnit také nemůže. Na obr. 5.3 je vidět, že průběh přesnosti sice není konstantní, ale téměř celá oblast se nachází výše než 1 mm, což výrazně nevyhovuje zadání.

Z akademického hlediska je zajímavé prozkoumat, jaké přesnosti by tato konstrukce dosáhla v případě, že by bylo možné použít senzor s požadovanou přesností a rozsahem. Pravý senzor je uvažován optoNCDT ILD2300–2 výrobce Micro–Epsilon s udávanou přesností $\pm 0,6 \mu\text{m}$ a rozsahem měření od 24 do 26 mm. Stejně jako u Lineárního kříže by osy byly osazeny magnetickými lineárními enkodéry. Příslušné jmenovité rozměry a nejistoty všech parametrů modelu (viz kap. 4.3.2) jsou uvedeny v tabulce 5.2.

Tato konstrukce při uvažování dokonale přesného levého senzoru dosahuje poměrně dobré přesnosti, jejíž závislost na polohách senzorů je na obr. 5.4.



Obrázek 5.3: Závislost přesnosti koncepce Z na vysunutí senzorů při použití levého senzoru s přesností ± 1 mm



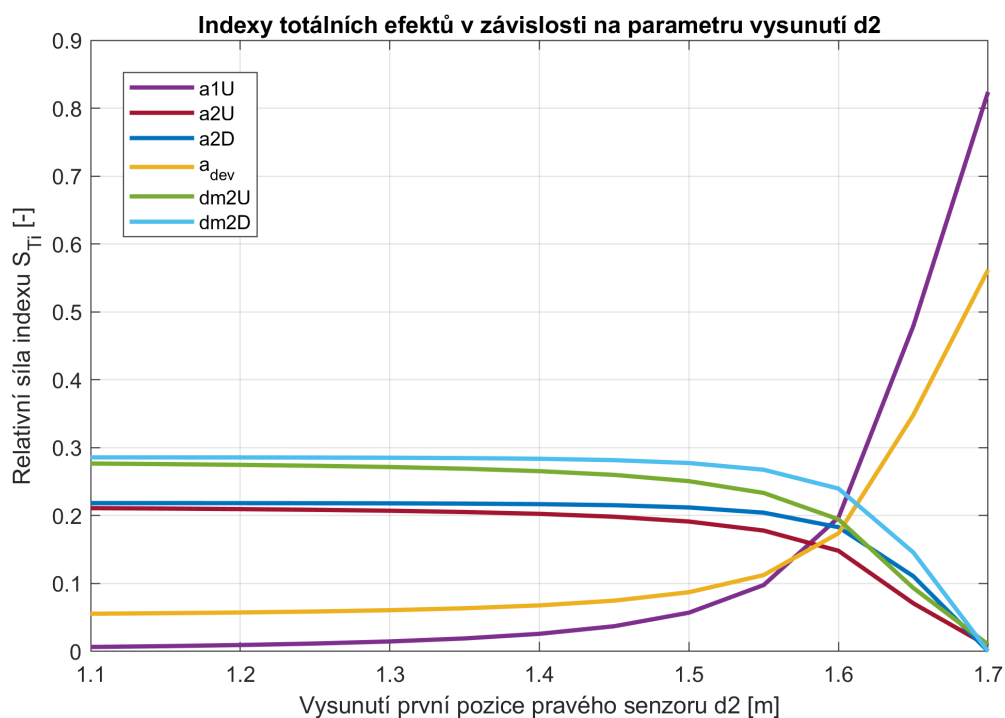
Obrázek 5.4: Závislost přesnosti koncepce Z na vysunutí senzorů při uvažování dokonale přesného levého senzoru

Výsledkem citlivostní analýzy s uvedenými parametry, v různých polohách pravého senzoru d_2 , jsou indexy znázorněny v grafu 5.5. Je patrné, že při maximálním rozdílu vysunutí levého a pravého senzoru je výsledná přesnost výrazně závislá na přesnosti měření pravého senzoru a jeho montáži, tedy úhlové odchylce paprsku. To je pochopitelné vzhledem k tomu, že právě z těchto měření je počítána korekce úhlové odchylky.

Z uvedeného grafu byla zjištěna zajímavá závislost, kdy význam a_{dev} roste s přibližujícími se pozicemi levého a pravého senzoru, což je opačné chování než u Lineárního kříže (viz obr. 5.2). Také je vidět, že nabývá důležitosti odchylka paprsku levého senzoru a_{1u} , naopak nejistoty ostatních parametrů se stávají zanedbatelnými.

Parametr	Jmenovitý rozměr + nejistota	Zdroj nejistoty
L	(1800 ± 0) mm	Měřená vzdálenost
r0	(25 ± 0,001) mm	Katalogové hodnoty laserového senzoru a mag. enkodéru
d0	(1775 ± 0,001) mm	Katalogová hodnota mag. enkodéru
d1	(1100 : 1700 ± 0,001) mm	Rozsah pohybu ± katalogová hodnota mag. enkodéru
d2	(1100 : 1700 ± 0,001) mm	Rozsah pohybu ± katalogová hodnota mag. enkodéru
x2	(10 ± 0,001) mm	Rozteč pozic měření pravého senzoru ± katalogová hodnota mag. enkodéru
a0	(90 ± 0,016)°	Požadavek odpovídající vertikální odchylce 0,5 mm na konci ramene o délce 1800 mm
a1u	(90 ± 0,16)°	Požadavek odpovídající vertikální odchylce 5 mm na konci ramene o délce 1800 mm
a2u/d	(90 ± 0,5)°	Odhad
a _{dev}	(0 ± 0,082)°	Odhad odpovídající 5 mm rozdílu vzdálenosti konců vedení dlouhého 3500 mm od osy lisování
m1u	∅	Interní parametr, dokonale přesný
m2u/d	skutečná vzdálenost ± 0,6 μm	Interní parametry ± katalogová hodnota
h1u, h2u/d	∅	Interní parametr

Tabulka 5.2: Konkrétní hodnoty parametrů užitých v citlivostní analýze koncepce Z

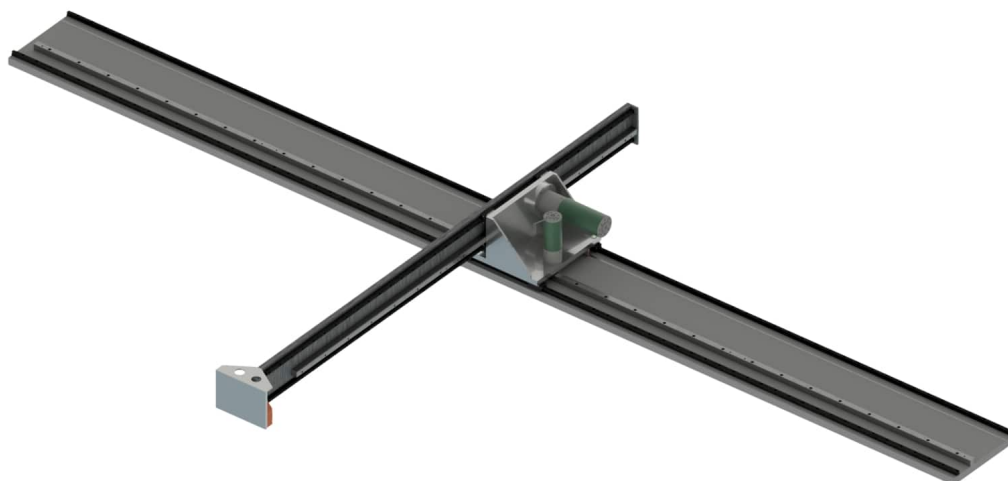


Obrázek 5.5: Citlivostní indexy totálního efektu důležitých parametrů v závislosti na vysunutí první pozice pravého senzoru. Vysunutí levého senzoru odpovídá 1.7 m

6 Výběr komponent

Na základě citlivostní analýzy navržených koncepcí byl vybrán *Lineární kříž*, především z důvodu, že v době psaní práce nebyl dostupný sensor, který by umožnil použití *Koncepce Z*. Detailnější porovnání je popsáno v kapitole 7. Následně je nutné navrhnout reálnou konstrukci zařízení. Při návrhu je třeba respektovat zadání definované v kapitole 4.1 a dodržet omezení geometrických parametrů vyplývající z citlivostní analýzy. V případě, že to není z různých důvodů možné, je nutné provést znovu simulaci pro ověření, jaké přesnosti lze dosáhnout.

Komponenty lze rozdělit do hlavních sekcí – mechanické, sensorické a pohonné, v tomto pořadí jsou v následujících sekcích popsány. Návrh probíhal souběžně s vytvářením 3D CAD modelu (viz obr. 6.1), který je zde rovněž prezentován.



Obrázek 6.1: Celkový pohled na navržené měřicí zařízení

6.1 Mechanika

Navržená koncepce *Lineární kříž* (z kap. 4.2) sestává z dvouosého manipulátoru, na jehož konci jsou umístěny dva senzory mířící na každou stranu, v této sekci je řešena mechanická část. Klíčovým parametrem, který je třeba zajistit, je úhlová odchylka výsuvné osy Y od podélné osy X (parametr $a_{0L/R}$ z obr. 4.6) – konkrétně musí dosahovat nejvýše $\pm 0,0016^\circ$, což odpovídá odchylce $50 \mu m$ na konci ramene o délce 1800 mm. Tato odchylka může vznikat ze dvou důvodů a to z nepřesnosti pohyblivých prvků (uložení výsuvné osy) nebo odchylky od přímosti výsuvné osy samotné. Výsuvná osa musí zajišťovat zdvih alespoň 1750 mm, aby bylo možné měření v celém rozsahu průměru lisovaných prvků a také aby bylo možné osu vysunout mimo pracovní

prostor pro účely manipulace se soukolím. Jak bylo rovněž uvedeno v kap. 4.1, podélná osa musí umožňovat zdvih 3500 mm, aby bylo umožněno měření v různých lisovních polohách. Také není vhodné, aby se při plném vysunutí osa příliš neprohýbala vlivem hmotnosti vlastní i sensorů, tento parametr nebyl v zadání přímo specifikován, ale vzhledem k rozměrům referenčních plošek je vhodné, aby nepřesahoval 1 mm.

6.1.1 Konstrukce

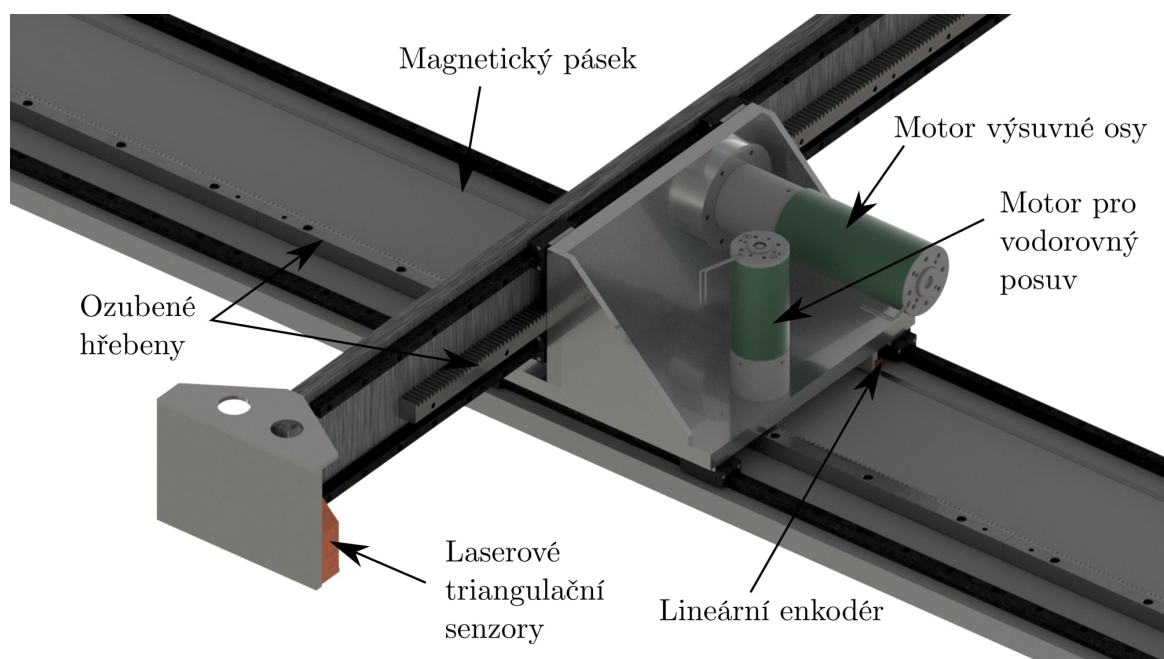
Existují různá hotová řešení lineárních os, která ale běžně nedosahují výše uvedené přesnosti, případně není tento parametr pro letmé uložení vůbec uváděn, z toho důvodu bylo třeba přistoupit k návrhu vlastních os. Možností pro samotný nosný profil existuje více, nabízí se např. hliníkové extrudované profily, nicméně tolerance přímosti těchto profilů je standardně 0,3 mm na délce 2000 mm[23], což je násobně více, než je v tomto případě dovoleno. Z tohoto důvodu bylo zvoleno využití standardního hliníkové obdélníkového profilu, který umožňuje snadné obrobění, např. pro účely uložení prvků vedení a poskytuje dostatečnou tuhost. Profil výsuvné osy má rozměry 25x150x2100 mm, profil podélné osy 25x350x4060 mm. Výsuvná osa je uložena tak, že delší strana průřezu profilu je kolmá na podélnou osu X (viz obr. 6.2).

Při zanedbání vlivu tuhosti kolejnic lineárního vedení a ozubeného hřebene, vyjde z rovnice (6.1) průhyb konce podélné osy Y posazené na kratší straně na 0,45 mm při plném vysunutí. Je předpokládáno, že výsuvná osa se bude chovat jako vetknutá.

$$w = \frac{\rho_L g \cos(\beta)}{E \cdot J_y} \left(\frac{x^4}{24} - \frac{x \cdot \text{vysunutí}^3}{6} + \frac{3 \cdot \text{vysunutí}^4}{24} \right) \quad (6.1)$$

Z rovnice 6.1: $\beta = 35^\circ$, $\rho_L = b \cdot h \cdot \rho = 0,025 \cdot 0,15 \cdot 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$, $J_y = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{0,025 \cdot 0,15^3}{12} \text{ m}^4$, $E = 69,5 \text{ GPa}$ a $\text{vysunutí} = 1,7 \text{ m}$.

Další konstrukční prvky slouží zpravidla k zjednodušení montáže a tuhosti, nicméně nebyly nikterak počítány vzhledem k předpokladu, že na zařízení nebudou působit žádné výrazné vnější síly.



Obrázek 6.2: Detail středové části navržené konstrukce Lineárního kříže

6.1.2 Výpočet lineárního vedení

Pro zajištění lineárního posuvu je vhodné využití kuličkového vedení, které zajišťuje hladký a velice přesný pohyb. Pro obě osy byly zvoleny vozíky i kolejnice výrobce Thomson [24]. Tento výrobce poskytuje příručku pro dimenzování vedení, na základě které lze vypočítat síly působící na jednotlivé vozíky, jejich přibližné deformace a další aspekty provozu, jako je např. mazání.

Z vzorců uvedených na obr. 6.3 a předpokladu, že $F = |F_v| + |F_h|$ (postup uváděný výrobcem vozíků), vychází při maximálním vysunutí 1,7 m (ostatní parametry viz tab. 6.1) síly působící na vozíky 1 a 4 na 611 N a vozíky 3 a 4 na 459 N. Statická únosnost nejmenších vozíků je 19600 N, tedy rezerva je více než třicetinásobná. Konkrétně byly pro výsuvnou osu zvoleny vozíky s katalogovým číslem 511U15E2.

Nejpřesnější řada těchto vozíků (výrobcem značená *Ultra precision*) poskytuje montážní toleranci výškového rozdílu vozíků polohách $\pm 5 \mu m$, výškový rozdíl různých vozíků ve stejné pozici výrobce udává jako $3 \mu m$. V teoreticky nejhorší situaci, kdy bude výškový rozdíl mezi vozíky na stejné kolejnici s roztečí 300 mm největší možný (tedy $10 \mu m$), umožňuje tato tolerance odchylku 0,07 mm na konci 2,1 m dlouhého ramene, nebo také úhlovou odchylku $0,0019^\circ$. Při tomto výpočtu je uvažováno, že se jednotlivé vozíky chovají jako kulová vazba, tedy nijak nebrání vychýlení. V případě, že by bylo možné kalibrovat montážní nepřesnosti a odchylka by byla způsobena pouze rozdíly mezi vozíky, lze úhlovou odchylku zredukovat na $5,7 \cdot 10^{-4}$ stupně, což odpovídá odchylce $21 \mu m$ na konci ramene o délce 2100 mm.

$$W = g \cdot (\text{hmotnost hliníkového profilu, kolejnic, hřebenu a senzorů}) = 9,81 \cdot 37,7 \text{ N}$$

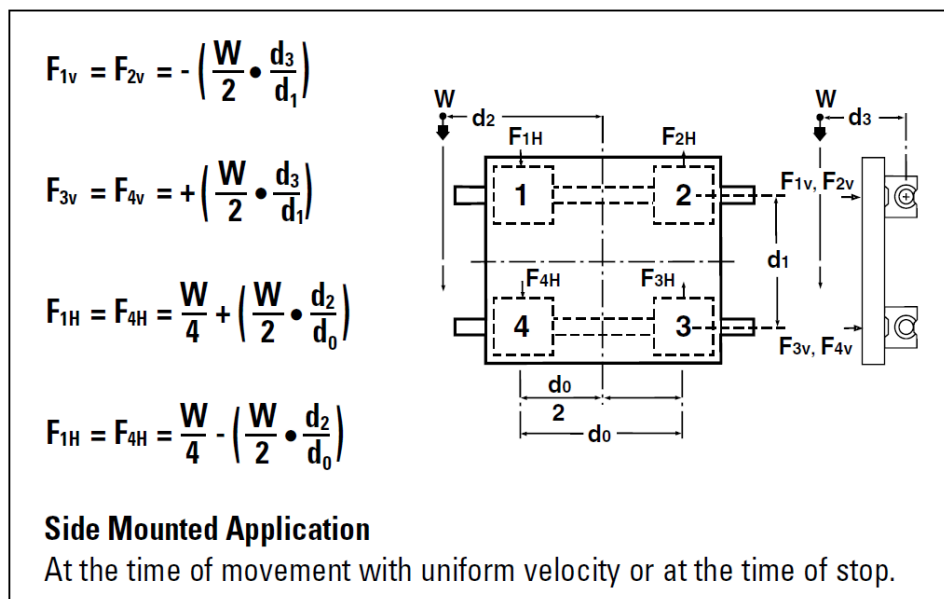
$$d_3 = 22,5 \text{ mm}$$

$$d_1 = 116 \text{ mm}$$

$$d_2 = \text{vysunutí} + 0,15 \text{ m pro prvky na konci vedení (vysunutí/2 pro profil, kolejnice a hřeben)}$$

$$d_0 = 300 \text{ mm}$$

Tabulka 6.1: Tabulka parametrů z obr. 6.3

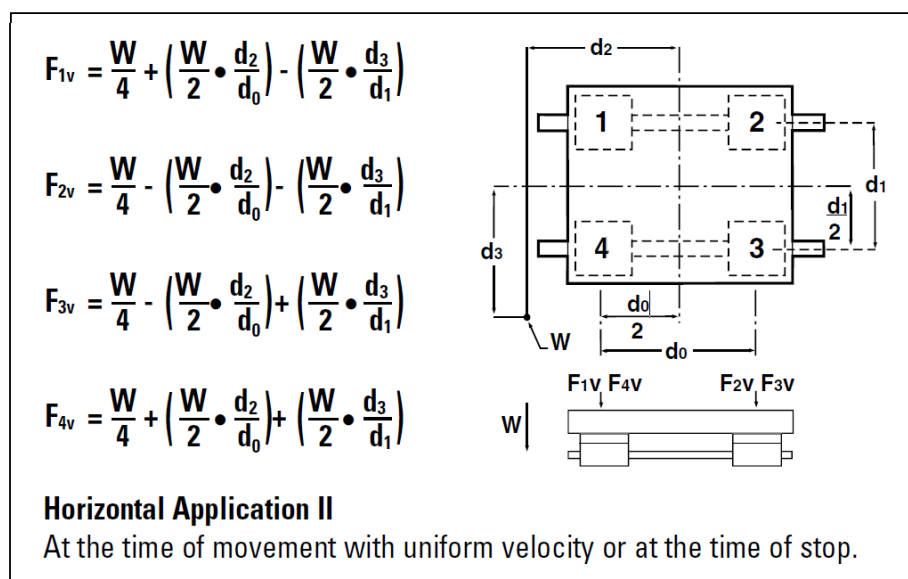


Obrázek 6.3: Vzorce pro výpočet sil působících na jednotlivé vozíky výsuvné osy. Převzato z [24]

Stejně jako v případě výsuvné osy výrobce udává obdobné vzorce pro výpočet sil působících na vozíky pohybující se po vodorovných kolejnicích (obr. 6.4). Hmotnost všech prvků na středové konzoli (konstrukce, motory a vozíky) je přibližně 19 kg, hmotnost celé výsuvné osy je přibližně 37,5 kg. Pro jednoduchost je uvažováno, že $d_2 = 0$, ostatní parametry jsou: $d_1 = 0,3$ m, $d_0 = 0,3$ m, $d_3 = 0$ pro vliv středové konzole a $d_3 = \text{vysunutí}/2 + 0,15$ m pro vliv výsuvné osy.

Výsledné síly pak jsou 484 N pro vozíky 1 a 2 a 740 N pro vozíky 3 a 4. To je opět výrazně více, než je statická únosnost nejmenších vozíků, jsou tedy zvoleny stejné modely jako pro výsuvnou osu, tedy 511U15E2. Tolerance rovnoběžnosti vozíku s kolejnicí je rovněž $\pm 5 \mu\text{m}$, což v nejhorším případě vede na odchylku 0,07 mm na konci 2,1 m dlouhého ramene ($0,0019^\circ$).

Kombinací nejhoršího případu odchylky na výsuvné ose a na středové ose je získána teoretická maximální úhlová odchylka $da_0 = 0,0019 + 0,0019 = 0,0038^\circ$. Ta je více než dvakrát větší než odchylka získaná v analýze popsané v kapitole 5.1 – $0,0016^\circ$. Vozíky kuličkového vedení jsou předepnuté, do odchylky by se tedy neměla projevovat vůle.



Obrázek 6.4: Vzorce pro výpočet sil působících na jednotlivé vozíky středové části. Převzato z [24]

6.2 Senzory

Jak vyplývá z popisu konstrukce v kapitole 4.2, je využito tří senzorů – dvou pro měření vzdálenosti povrchu a třetího pro přesné odměřování posunu výsuvné osy. Pro měření vzdálenosti povrchu je zvoleno využití laserového triangulačního senzoru, který poskytuje dostatečnou přesnost, rozsah měření a do určité míry i nezávislost na měřeném povrchu. Výrobce Micro Epsilon udává, že pro strukturované povrchy je vhodné použít senzory, které místo laserového bodu používají širší oválnou plošku, která by měla poskytovat spolehlivější měření.

Byl tedy vybrán senzor optoNCDT ILD2300-20LL výše zmíněného výrobce [25], jehož vybrané parametry jsou vypsány v tabulce 6.2. Signálový výstup senzor umožňuje jak analogový (proudový i napěťový), tak i různé komunikační rozhraní, např. RS422, Ethernet, příp. průmyslový EtherCAT. Vzhledem k těmto možnostem by mělo být snadné měření implementovat do řídicího algoritmu lisu. Přímou tento senzor byl uvažován v citlivostní analýze v kapitole 5.1, kde se ukázalo, že jeho přesnost je dostatečná.

Pro odměřování posuvu na vodorovné ose je vhodné využití magnetického lineárního enkodéru, který poskytuje mikrometrovou přesnost a relativně dobrou odolnost vůči běžným nečistotám. Oproti alternativě v podobě měření otáček motoru rotačním enkodérem spojeným

Měřicí rozsah	40–60 mm (50–60 mm při frekvenci měření 49,14 kHz)
Frekvence měření	1,5–49,14 kHz
Linearita	$< \pm 4 \mu m$
Rozlišení	$0,3 \mu m$
Velikost měřicího bodu na konci rozsahu	$195 \times 1200 \mu m$
Vlnová délka zdroje paprsku	670 nm

Tabulka 6.2: Tabulka parametrů senzoru ILD2300-20LL

s hřídelí eliminuje lineární enkodér vliv vůle v převodovce motoru, případně mezi zuby pastorku a ozubeného hřebenu, respektive jakékoliv významné posunutí tímto vlivem je schopen v reálném čase měřit.

Byl vybrán enkodér LM13IC2D0CB10F00 a magnetický pásek MS10D0350C výrobce RLS [26]. Tato kombinace poskytuje rozlišení $1 \mu m$ s přesností $\pm 10 \mu m$ do vzdálenosti 10 m. Maximální rychlost, kterou je enkodér schopen měřit při čítací frekvenci 1 MHz, je 0,47 m/s. Výstup je možné získat buďto čítáním impulsů na periférii mikrokontroleru/PLC, nebo také z komunikačního rozhraní RS422.

Osy je vhodné osadit dodatečnými koncovými spínači, aby nedošlo k poškození vedení. Zde se nabízí např. indukční snímače, konkrétní typ by poté vycházel z požadavků výrobce lisu a na tento prvek nejsou kladeny žádné zvláštní požadavky.

6.3 Pohony

Vzhledem k tomu, že manipulace s prvky a samotným lisem je práce poměrně časově náročná (oproti měření samotnému), není předpokládáno, že by zařízení fungovalo v intenzivním cyklu. Při zohlednění jednoduchosti řízení i příznivé ceny byly vybrány běžné kartáčové DC motory, nicméně samozřejmě by existovala možnost použít například bezkartáčové DC motory (BLDC) v případě, že by byla požadována delší životnost.

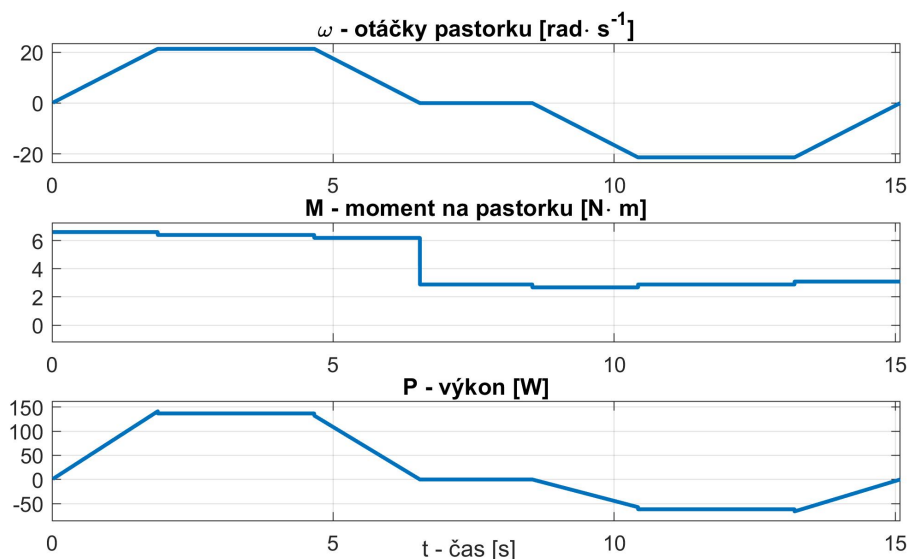
Ze stejných důvodů, které byly uvedeny výše, neexistuje konkrétní požadavek na rychlosti posuvů, které by zařízení mělo umožňovat. Maximální rychlost obou os byla tedy zvolena na $0,47 m \cdot s^{-1}$ při zrychlení $0,25 m \cdot s^{-2}$. Pro realizaci pohybu samotného byly zvoleny ocelové hřebeny výrobce Apex dynamics (katalogové číslo 02051100M10). Jedná se o přesné ocelové hřebeny kvality Q5 s modulem ozubení 2. Na obou osách je použit pastorek s 22 zuby stejného výrobce (průměr roztečné kružnice 44 mm). Tato sestava byla zvolena především z důvodů kompatibility s hřídelemi převodovek, montážního prostoru a také jsou přímo v katalogu dostupné informace o únosnosti převodu. Ta je v tomto případě 8182 N, což vede na až téměř nevhodnou bezpečnost, která je ale zdůvodněna na předchozích řádcích a určitě zde existuje prostor pro optimalizaci.

6.3.1 Výpočet výsuvné osy

Vzhledem k náklonu osy úhlem 35° je předpokládána kombinace výtahové a hoblovkové zatěžovací charakteristiky. Výrobce lineárních vedení uvádí dva hlavní zdroje odporu vznikajícího v vedení – jeden vnitřní, který má velikost 15 N pro každý vozík a druhý odpovídající suchému tření, pro který je uveden výpočet 6.2. V této rovnici $F_{předpětí}$ odpovídá zvolenému předpětí vozíku (720 N) a síla působící na vozík odpovídá zatížení konkrétního vozíku. Koeficient suchého tření f výrobce uvádí jako 0,003. Koeficient viskózního tření výrobce neudává a není tedy uvažován.

$$F_t = F_{vnitřní} + f \cdot \left(2 \cdot F_{předpětí} + \frac{1}{3} F_{působící na vozík} \right) \quad (6.2)$$

Tíhové síly odpovídají pohyblivé hmotnosti 37,5 kg pod zmíněným úhlem 35°. Síly setrvačné jsou v porovnání s předchozími dvěma řádově menší z důvodu nízkého zrychlení. Pro výpočet ekvivalentního momentu a výkonu je vhodné sestavit průběh rychlosti, momentu a výkonu v závislosti na čase, tedy pracovní cyklus (viz obr. 6.5). Pracovní cyklus je definován jako zasunutí osy 1750 mm směrem dozadu nahoru z pracovního prostoru, kde následuje dvouvteřinová přestávka a poté je opět o stejnou vzdálenost spuštěna dolů. Je vidět, že během spouštění osy zůstává moment stále kladný (tedy proti směru pohybu), to znamená, že je třeba pohyb dolů brzdit. Realizace brzdění záleží na zvolené výkonové elektronice, především zda umožňuje brzdění generátorické.



Obrázek 6.5: Průběh rychlosti, momentu a výkonu během pracovního cyklu výsuvné osy

Výpočetem z rovnice 2.3 a za předpokladu použití převodovky s poměrem 14,5:1 je získán ekvivalentní moment o velikosti 0,35 $\text{N} \cdot \text{m}$ a ekvivalentní výkon 77,6 W. Zde dochází k rozporu, že motory v dané výkonové úrovni nejsou schopny dodat dostatečný moment při zachování zvoleného převodového poměru, z toho důvodu je vybrán motor GR 80x80 (parametry viz tabulka 6.3) s planetovou převodovkou PLG75EP 14,5:1.

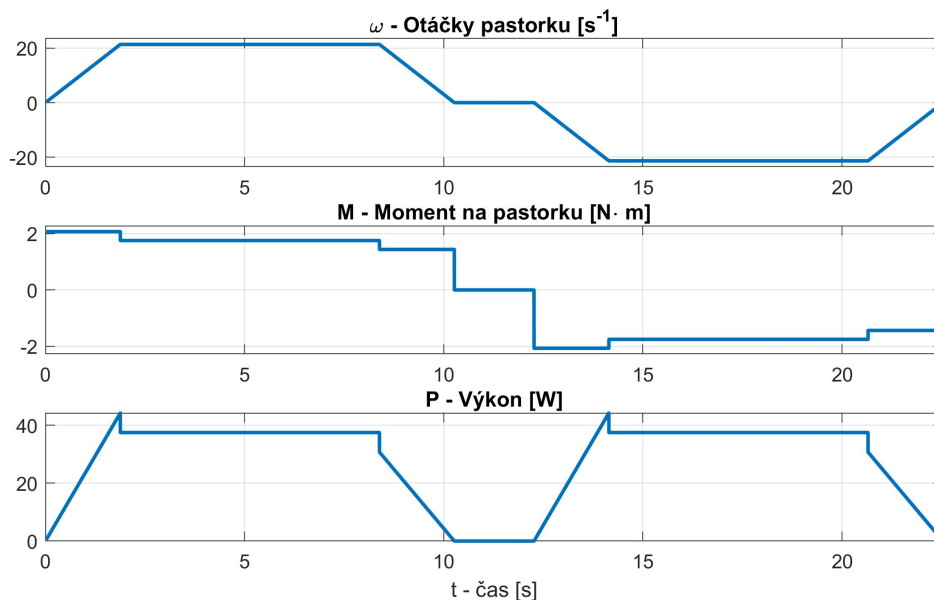
Nominální výkon	195 W
Napájecí napětí	24 V
Nominální moment motoru	0,59 $\text{N} \cdot \text{m}$
Maximální moment motoru	6,06 $\text{N} \cdot \text{m}$
Nominální otáčky motoru	3150 ot./min
Účinnost převodovky	90%
Nominální moment převodovky	2 $\text{N} \cdot \text{m}$
Moment brzdy na hřídeli	1 $\text{N} \cdot \text{m}$

Tabulka 6.3: Parametry sestavy motoru GR 80x80, převodovky PLG75EP 14,5:1 a brzdy E90

Sestava je dále vybavena brzdou E90 a rotačním enkodérem RE20, který v přepočtu poskytuje rozlišení lineárního pohybu osy 0,095 mm. Všechny zmíněné prvky a parametry pochází od výrobce Dunkermotoren [27].

6.3.2 Výpočet vodorovné osy

U vodorovné osy je situace jednodušší, jelikož je předpokládána čistě hoblovková charakteristika, tedy odpor způsobený pouze suchým třením a odpory vozíků. Celková třecí síla je vypočítána stejným vzorcem (6.2) jako u výsuvné osy. Vynesením pracovního cyklu do grafu je získán obrázek 6.6. Tento cyklus odpovídá posunu středové konzole z jednoho konce vedení o vzdálenost 3500 mm na druhý a zpět, s vloženou přestávkou o délce dvou vteřin.



Obrázek 6.6: Průběh rychlosti, momentu a výkonu během pracovního cyklu vodorovné osy

Ekvivalentní moment na hřídeli motoru tohoto cyklu odpovídá 0,18 N·m (při předpokladu převodového poměru 1:10) a ekvivalentní výkon 31,2 W. Na základě těchto výpočtů byl zvolen motor GR63x55 s planetovou převodovkou PLG63EP 10:1 a brzdou E90, opět od výrobce Dunkermotoren. Parametry této sestavy jsou uvedeny v tabulce 6.4. Je zde zvolena převodovka 10:1, z důvodu, že model s převodovým poměrem 14,5:1 umožňuje pouze nominální moment 1,2 N·m, což neodpovídá momentu požadovanému na pastorku – 1,75 N·m. Z toho důvodu by motor dokázal vyvinout vyšší rychlost, nicméně ta je omezena maximální dovolenou rychlostí vybraného lineárního enkodéru. V případě, že by řídicí elektronika zvládala měření na vyšší frekvenci než 1MHz, může být zvolen jiný typ enkodéru a tím umožněna vyšší rychlost.

Nominální výkon	94,7 W
Napájecí napětí	24 V
Nominální moment motoru	0,27 N·m
Maximální moment motoru	2,57 N·m
Nominální otáčky motoru	3350 ot./min
Účinnost převodovky	90%
Nominální moment převodovky	4 N·m
Moment brzdy na hřídeli	1 N·m

Tabulka 6.4: Parametry sestavy motoru GR63x55, převodovky PLG63EP 10:1 a brzdy E90

7 Závěr

Cílem práce bylo navrhnout zařízení umožňující měření rozteče prvků lisovaných na nápravu železničních soukolí, nezávisle na jejich poloze a rozměrech. Při návrhu bylo třeba zohlednit jak požadavky na přesnost a rozsah pohybu, tak montážní požadavky pro integraci k lisu CDRA 500 výrobce ŽDAS a.s. (viz kapitola 2.1). V začátku byly v kapitole 4 navrženy dva přístupy.

Prvním byla koncepce *Lineární kříž* (kap. 4.2), která spočívá v použití dvouosého manipulátoru, na jehož konci jsou umístěny dva senzory pro měření lisovaných povrchů. Navrhovaný proces měření začíná měřením vzdálenosti plochy prvku určeného k nalisování a následnému přesunu do druhé pozice, kde bude měřena vzdálenost druhé plochy během závěrečného dolišování a lis bude v patřičnou chvíli zastaven. Tato koncepce je přímočará z hlediska zpracování signálu i použití, nicméně pro dosažení požadované přesnosti klade přísné nároky na konstrukci samotného dvouosého manipulátoru, což vyplývá z analýzy popsané v kapitole 5.1.

Protikandidátem předchozímu návrhu byla *Koncepce Z* (kap. 4.3). Pro ni byl zvolen jiný přístup, byť také s využitím dvouosého manipulátoru s dvěma senzory, který se ale liší v možnosti nezávislého polohování senzorů vůči sobě na výsuvné ose. Samotné měření také probíhá odlišně, kde se předpokládá využití rozdílných senzorů. Jeden velice přesný, umožňující kompenzaci úhlové odchylky výsuvné osy od první měřené plochy a druhý s velkým rozsahem, který bude měřit vzdálenost druhé plochy. Tento přístup teoreticky uvolňuje požadavky na přesnost manipulátoru, ale tyto požadavky jsou přeneseny na senzory (viz kap. 5.2). Během citlivostní analýzy a s ní spojené rešerše se ukázalo, že v době vypracování práce neexistoval běžně dostupný senzor, který by dokázal měřit s přesností menší než milimetr na vzdálenost téměř dvou metrů.

V případě, že by tento senzor dostupný byl, stále by to nezajistilo, že by tato konstrukce dosáhla dobrých výsledků. Pomineme-li předpoklady dokonalé rovnoběžnosti měřených ploch, překážkou se jeví předpoklad dokonalé hladkých ploch. Senzory, které byly předpokládány poskytují méně než mikrometrovou přesnost, což je výrazně pod hladinou drsnosti běžně obroběných ploch (desítky mikrometrů), jaké se na měřených plochách mohou vyskytovat. Drsnost by bylo pravděpodobně možné do jisté míry eliminovat měřením na více bodech a následným zpracováním, avšak tato možnost vzhledem k jiným omezením nebyla zkoumána.

Další omezení *Koncepce Z* spočívá v možnosti měřit pouze vnitřní plochy, kdy konstrukce druhá umožňuje měřit rozteč k libovolným plochám, pokud jsou dostupné výsuvnou osou. Z těchto důvodů byla zvolena první zmíněná konstrukce – *Lineární kříž*.

7.1 Přehled výsledků navrženého zařízení

Na základě parametrů definovaných v kapitole 5.1 bylo přistoupeno k návrhu měřicího zařízení z reálných komponent. Bylo využito hliníkových obdélníkových profilů osazených lineárním kuličkovým vedením výrobce Thomson Linear (kap. 6.1), osazeným laserovými triangulačními senzory Micro Epsilon, magnetickým enkodérem RLS (kap. 6.2) a motory Dunkermotoren. Základní parametry jsou uvedeny v tabulce 7.1.

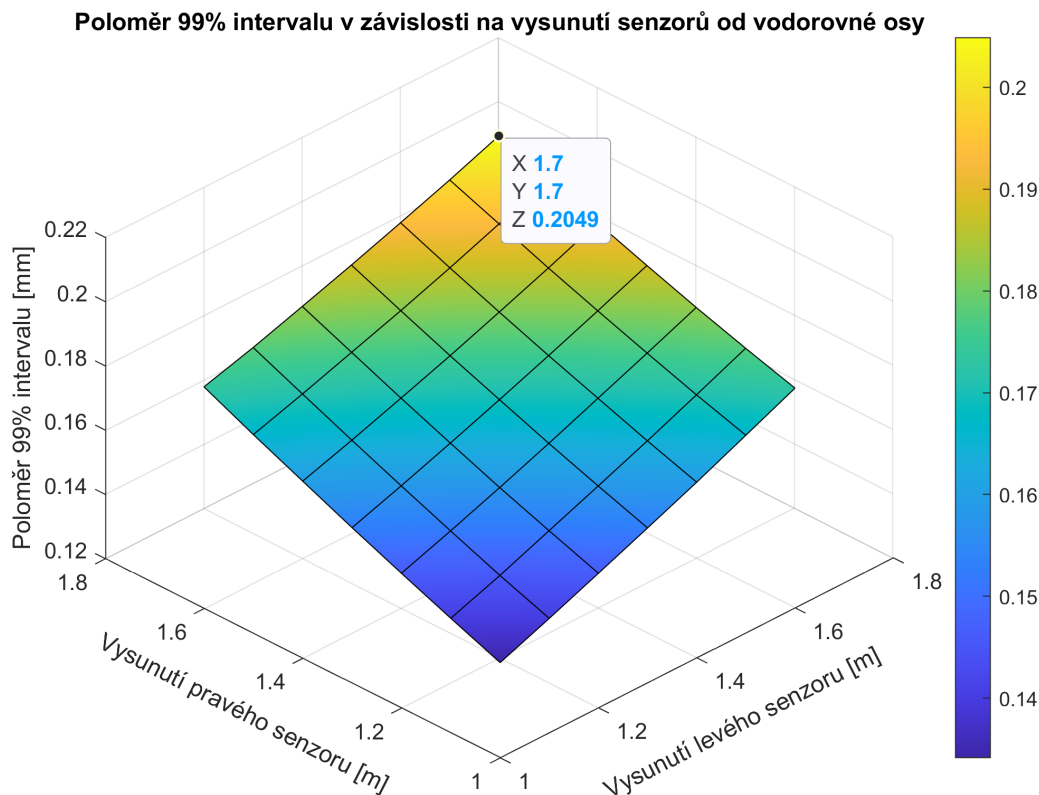
Bylo dosaženo teoretické přesnosti $\pm 0,21$ mm (viz obr. 7.1), což je dostačující pro měření většiny prvků s běžnou tolerancí $\pm 0,5$ mm, ať už relativními roztečemi, nebo měřením

k základní hraně. Není to však dostatečné pro přísnější tolerance $\pm 0,1$ mm vyskytující se na některých soukolích. Je to způsobeno větší úhlovou odchylkou výsuvné osy, vyplývající z odchylek vozíků lineárního vedení na ose vodorovné i výsuvné.

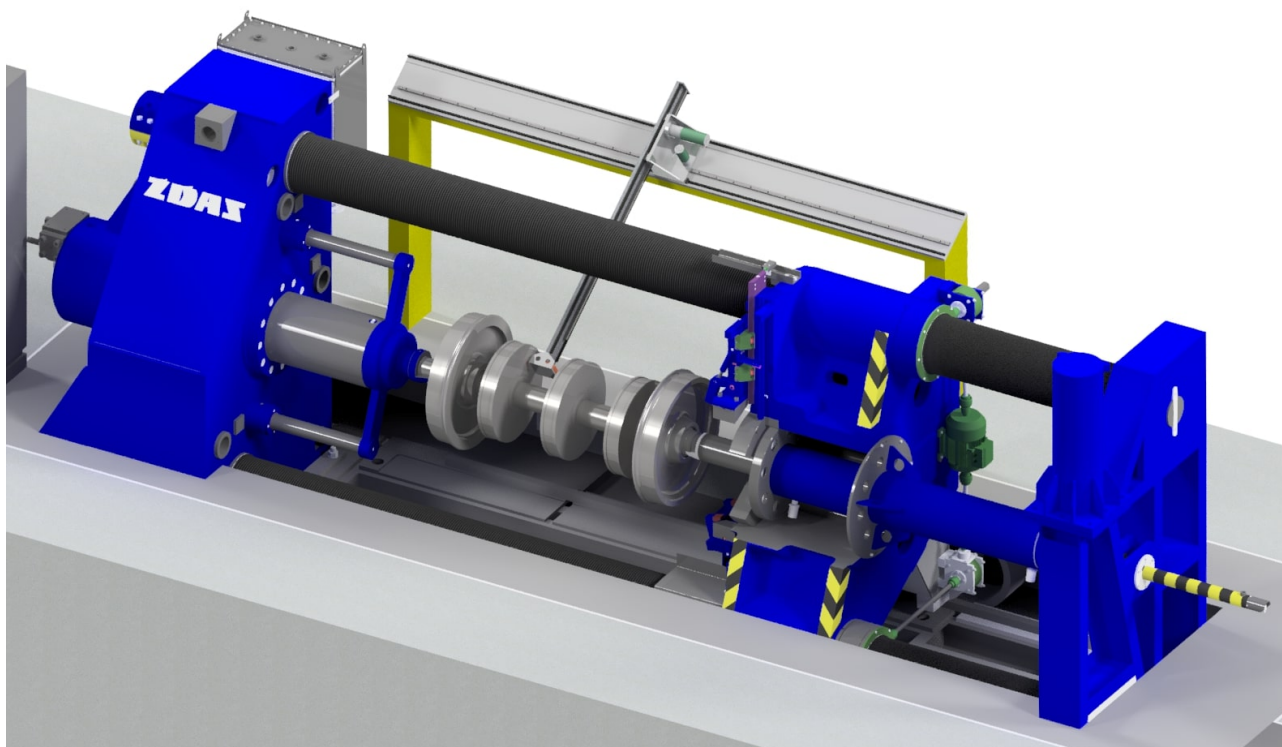
Ve skutečnosti by pravděpodobně nedošlo k maximální odchylce, se kterou bylo počítáno, z důvodu toho, že vozíky jsou k deskám připevněny ve více bodech a nemohou se příliš naklánět. Toto tvrzení je však pouze domněnkou a pro jeho verifikaci by byla nutná konzultace buď s výrobcem lineárních vedení, nebo ověření měřením na prototypu. Další možností zlepšení přesnosti by bylo zkrácení vzdálenosti vodorovné osy od osy lisování, tedy zkrácení ramene, na kterém se může projevit nepřesnost v lineárním vedení. Tato varianta by už pravděpodobně vyžadovala integraci do konstrukce lisu.

Celkové rozměry	2120x4060 mm
Celková hmotnost	~ 140 kg
Zdvih výsuvné osy	1750 mm
Hmotnost výsuvné osy	37,5 kg
Zdvih vodorovného posuvu	3500 mm
Teoretická přesnost měření	$\pm 0,21$ mm
Maximální rychlosti posuvů	$0,47 \frac{m}{s}$

Tabulka 7.1: Tabulka parametrů navrženého zařízení



Obrázek 7.1: Závislost přesnosti měření na vysunutí osy Y pro navrženou reálnou konstrukci



Obrázek 7.2: Pohled na navržené zařízení společně s lisem CDRA500

7.2 Navržené využití

Zařízení bylo navrženo tak, aby jej bylo možné instalovat k již existujícím a používaným lisům u zákazníků ŽDAS a.s., předpokládá se tedy umístění na konstrukci upevněnou v základech lisu samotného, podobně jako na obrázku 7.2. Proces lisování odpovídá popisu výše. Vzhledem k tomu, že jde o poměrně dlouhé letmo uložené rameno, může být nutné zařadit do postupu měření přestávky potřebné k dokmitání.

Měření povrchy by neměly vyžadovat žádnou speciální úpravu, jelikož výrobce senzorů udává, že by vybrané senzory měly disponovat algoritmy, které zabezpečují konzistentní měření na různých površích. Vzhledem k použité elektronice by měla být snadná následná integrace jak ovládání pohybu, tak zpracování signálů z měření. Výsledná měřená vzdálenost je jednoduchý součet vzdálenosti změřené na referenční ploše, posuvu a vzdálenosti měřené během lisování.

Ukázalo se, že na první pohled přímočarý úkol skrývá mnohá technická úskalí a proveditelnost se pohybuje na hranici v současnosti dostupných komponent. Tato úskalí plynou především ze skutečnosti, že bylo požadováno měření s přesností až na desítky mikrometrů na vzdálenosti blížící se dvěma metrům, to vše navíc z pracovního prostoru vzdáleného téměř dva metry od samotných měřených ploch.

Literatura

- [1] Katalog ŽĎAS: Hydraulické lisy. Žďár n. Sázavou (CZ): ŽĎAS a.s. Dostupné také z: <https://www.industry-eu.cz/files/companies/890388.pdf>
- [2] Hydraulické lisy. ŽĎAS [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://www.zdas.com/cs/produkce/hydraulicke-lisy/>
- [3] Wheelset presses. *BBM Railway equipment, LLC*. [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.bbm-railway.com/products/wheel-presses/>
- [4] Wheel set and bearing presses. *Simmons Machine Tool Corporation* [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://smtgroup.com/en/railway-wheel-shop-equipment/wheel-set-presses>
- [5] Wheel set presses - master force with accuracy. *MAE GmbH* [online]. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.mae-group.com/products/wheel-set-presses.html>
- [6] aistechprfinal-neue-baureihe-rads.jpg In: *Bernard and company's blog*. [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://bernardandcompany.files.wordpress.com/2012/05/aistechprfinal-neue-baureihe-rads.jpg>
- [7] MARIOLI, D., C. NARDUZZI, C. OFFELLI, D. PETRI, E. SARDINI a A. TARONI. Digital time-of-flight measurement for ultrasonic sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* [online]. 41(1), 93-97 [cit. 2020-05-16]. DOI: 10.1109/19.126639. ISSN 00189456. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/126639/>
- [8] GOKTURK, S.B., H. YALCIN a C. BAMJI. A Time-Of-Flight Depth Sensor - System Description, Issues and Solutions. In: *2004 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop* [online]. IEEE, 2004, s. 35-35 [cit. 2020-05-16]. DOI: 10.1109/CVPR.2004.291. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1384826>
- [9] VOREL, P. a P. PROCHAZKA: *Řídicí členy*, El. skriptum FEKT VUT Brno, 2010
- [10] WILSON, Jon S., ed. *Sensor Technology Handbook* [online]. Burlington: Elsevier, 2005 [cit. 2020-05-17]. DOI: 10.1016/B978-0-7506-7729-5.X5040-X. ISBN 9780750677295. Dostupné z: <https://www.elsevier.com/books/sensor-technology-handbook/wilson/978-0-7506-7729-5>
- [11] Blue Laser triangulation sensors for difficult surface types. *Micro-Epsilon* [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.com/displacement-position-sensors/laser-sensor/BL-Laser-sensors/?sLang=en>
- [12] Triangulation englisch.jpg. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Triangulation_englisch.jpg&oldid=223093507

- [13] MURAKAMI, F. Accuracy assessment of a laser triangulation sensor. In: *Conference Proceedings. 10th Anniversary. IMTC/94. Advanced Technologies in I & M. 1994 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (Cat. No.94CH3424-9)* [online]. IEEE, 1994, s. 802-805 [cit. 2020-05-17]. DOI: 10.1109/IMTC.1994.351883. ISBN 0-7803-1880-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/351883/>
- [14] Encoder Guide. *Anaheim Automation* [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://www.anaheimautomation.com/manuals/forms/encoder-guide.php>
- [15] Online katalog. *RLS merilna tehnika d.o.o.* [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://www.rls.si/en/products/linear-magnetic-encoders>
- [16] KOLÁČNÝ, J., *Elektrické pohony*, El. skriptum FEKT VUT Brno
- [17] SALTELLI, A., et al. *Global sensitivity analysis: the primer*. Hoboken, NJ: John Wiley, c2008. ISBN 0470059974.
- [18] DŘÍMAL, J., D. TRUNEC a A. BRABLEC. *Úvod do metody Monte Carlo* [online]. Skriptum. Brno: Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, 2006 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.physics.muni.cz/~trunec/mc.pdf>
- [19] KOCIS, Ladislav a William J. WHITEN. Computational investigations of low-discrepancy sequences. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)* [online]. 1997, 23(2), 266-294 [cit. 2020-05-19]. DOI: 10.1145/264029.264064. ISSN 0098-3500. Dostupné z: <http://dl.acm.org/doi/10.1145/264029.264064>
- [20] CASTRUP, Howard. *Selecting and applying error distributions in uncertainty analysis* [online]. Measurement Science Conference, Anaheim, 2004 [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: http://www.isgmax.com/Articles_Papers/Selecting%20and%20Applying%20Error%20Distributions.pdf
- [21] SALTELLI, Andrea, Paola ANNONI, Ivano AZZINI, Francesca CAMPOLONGO, Marco RATTO a Stefano TARANTOLA. Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index. *Computer Physics Communications* [online]. 2010, 181(2), 259-270 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1016/j.cpc.2009.09.018. ISSN 00104655. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010465509003087>
- [22] JANSEN, Michiel J.W. Analysis of variance designs for model output. *Computer Physics Communications* [online]. 1999, 117(1-2), 35-43 [cit. 2020-05-20]. DOI: 10.1016/S0010-4655(98)00154-4. ISSN 00104655. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010465598001544>
- [23] Technical data for strut profiles. *Bosch Rexroth* [online]. [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: https://www.boschrexroth.com/ics/cat/content/assets/Online/do/Technical_Data_MGE_EN_20170919_142138.pdf
- [24] Profile rail linear guides. *Thomson* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.thomsonlinear.com/downloads/bearings_guides/Profile_Rail_Linear_Guides_cten.pdf
- [25] Laserové snímače na kovové a hrubé povrchy. *Micro-Epsilon* [online]. [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.cz/displacement-position-sensors/laser-sensor/LL-Laser-sensors/>

- [26] LM13 LINEAR INCREMENTAL MAGNETIC ENCODER SYSTEM. *RLS merilna tehnika d.o.o.* [online]. [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <https://www.rls.si/en/lm13-linear-magnetic-encoder-system>
- [27] Products. *Dunkermotoren GmbH* [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://www.dunkermotoren.com/en/products/>

Seznam obrázků

1.1	Popis jednotlivých součástí lisu. Render z modelu laskavě poskytnutého a.s. ŽĎAS	10
2.1	Lis CDRA 500. Převzato z [2]	12
2.2	Lis RADS, výrobce MAE GmbH. Převzato z [6]	13
2.3	Příklad nelinearity senzoru	14
2.4	Porovnání pojmů accuracy a precision	14
2.5	Schematický náčrt triangulačního laserového senzoru. Převzato z [12]	16
2.6	Příklad kombinované zatěžovací charakteristiky	18
2.7	Porovnání prostorového rozložení náhodných čísel vygenerovaných pomocí Matlabu příkazy <i>rand</i> (vlevo), který patří do rodiny pseudo-náhodných a <i>sobolset</i> , jeden z algoritmů pro generování kvazi-náhodných čísel	19
3.1	Pracovní postup návrhu měřicího zařízení	24
4.1	Pohled zezadu na lis a definice vhodného montážního prostoru	25
4.2	Pohled zprava na lis se znázorněným sklonem výsuvného ramene	26
4.3	Ukázkové soukolí s vyznačenými důležitými parametry. Pozn.: Délkové údaje neodpovídají zobrazenému soukolí.	27
4.4	Hrubý návrh koncepce lineárního kříže	27
4.5	Navrhovaný postup lisování pomocí koncepce lineárního kříže	28
4.6	Schematický náčrt s popisy jednotlivých parametrů modelu – modře jsou vyznačeny měřené plochy, žlutě výsuvná osa Y ve dvou polohách a červeně výsledná měřená vzdálenost. Pozn.: Tučné písmo značí vektor, předpona <i>n</i> jmenovitý rozměr a <i>d</i> naopak odchylku od jmenovitého rozměru.	30
4.7	Hrubý návrh koncepce Z	31
4.8	Navrhovaný postup měření konstrukcí Z	31
4.9	Schematický náčrt s popisy jednotlivých parametrů modelu <i>koncepce Z</i> – modře jsou vyznačeny měřené plochy, žlutě výsuvná osa Y a červeně výsledné měřené vzdálenosti. Pozn.: Tučné písmo značí vektor, předpona <i>n</i> jmenovitý rozměr a <i>d</i> naopak odchylku od jmenovitého rozměru.	33
5.1	Porovnání přesnosti v závislosti na vysunutí pro hodnoty $a_{dev} = 0,0016^\circ$ (vlevo) a $a_{dev} = 0,0049^\circ$	36
5.2	Citlivostní indexy totálního efektu pro konstrukci Lineárního kříže v závislosti na vysunutí senzoru v pravé pozici	37
5.3	Závislost přesnosti koncepce Z na vysunutí senzorů při použití levého senzoru s přesností ± 1 mm	38
5.4	Závislost přesnosti koncepce Z na vysunutí senzorů při uvažování dokonale přesného levého senzoru	38
5.5	Citlivostní indexy totálního efektu důležitých parametrů v závislosti na vysunutí první pozice pravého senzoru. Vysunutí levého senzoru odpovídá 1.7 m	39

6.1	Celkový pohled na navržené měřicí zařízení	40
6.2	Detail středové části navržené konstrukce Lineárního kříže	41
6.3	Vzorce pro výpočet sil působících na jednotlivé vozíky výsuvné osy. Převzato z [24]	42
6.4	Vzorce pro výpočet sil působících na jednotlivé vozíky středové části. Převzato z [24]	43
6.5	Průběh rychlosti, momentu a výkonu během pracovního cyklu výsuvné osy . . .	45
6.6	Průběh rychlosti, momentu a výkonu během pracovního cyklu vodorovné osy . .	46
7.1	Závislost přesnosti měření na vysunutí osy Y pro navrženou reálnou konstrukci .	48
7.2	Pohled na navržené zařízení společně s lisem CDRA500	49

Seznam tabulek

2.1	Vybrané parametry lisu CDRA 500. Převzato z [1]	11
2.2	Přehled použité symboliky	21
4.1	Vysvětlení jednotlivých parametrů z obr. 4.6	29
4.2	Vysvětlení jednotlivých parametrů z obr. 4.9	34
5.1	Konkrétní hodnoty parametrů užívané v citlivostní analýze Lineárního kříže	36
5.2	Konkrétní hodnoty parametrů užívané v citlivostní analýze koncepce Z	39
6.1	Tabulka parametrů z obr. 6.3	42
6.2	Tabulka parametrů senzoru ILD2300-20LL	44
6.3	Parametry sestavy motoru GR 80x80, převodovky PLG75EP 14,5:1 a brzdy E90	45
6.4	Parametry sestavy motoru GR63x55, převodovky PLG63EP 10:1 a brzdy E90	46
7.1	Tabulka parametrů navrženého zařízení	48

Seznam příloh

1. **LC_absolutePrec2D.m** – Simulace přesnosti v závislosti na vysunutí pro Lineární kříž
2. **LC_GSA.m** – Výpočet citlivostních indexů pro Lineární kříž
3. **LC_General_algorithm_3.m** – Odvození vektorového modelu a vytvoření Matlab funkce pro Lineární kříž
4. **LC_completeFunc3_mod.m** – Funkce vygenerovaná programem *LC_General_algorithm_3.m* s upravenými vstupy
5. **z_absolutePrecision3_2D.m** – Simulace přesnosti v závislosti na vysunutí pro Koncepti Z
6. **z_GSA.m** – Výpočet citlivostních indexů pro Koncepti Z
7. **z_GeneralAlgorithm_3.m** – Odvození vektorového modelu a vytvoření Matlab funkce pro Koncepti Z
8. **z_CompleteFunction3.m** – Funkce vygenerovaná programem *z_GeneralAlgorithm_3.m* s upravenými vstupy
9. **findInterval.m** – Funkce sloužící k nalezení poloměru intervalu obsahující definované procento hodnot ze souboru
10. **TM.m** – Jednoduchá funkce transformační matice
11. **Vedeni_a_pohony.mlx** – Live script (Matlab R2019b) využitý k výpočtu sil působících na vozíky, nepřesnosti způsobenou kuličkovým vedením, prohnutí osy a dimenzování pohonů
12. **Linearni_kriz_3D.stp** – 3D CAD model finální navržené koncepce