

VYSOKÁ ŠKOLA POLYTECHNICKÁ JIHLAVA

Aplikované strojírenství

**BEZKONTAKTNÍ MĚŘIČ PRŮHYBU TYČOVÉHO
MATERIÁLU**

Bakalářská práce

Autor práce: Aleš Pitour

Vedoucí práce: Ing. Ivan Krejčí, CSc.

Jihlava 2025

Vysoká škola polytechnická Jihlava

Tolstého 16, 586 01 Jihlava

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Autor práce: **Aleš Pitour**

Studijní program: Aplikované strojírenství

Obor: Aplikované strojírenství

Garant studijního programu: Ing. Miloslav Vilímek, Ph.D.

Název práce: **Bezkontaktní měřič průhybu tyčového materiálu**

Vedoucí práce: Ing. Ivan Krejčí, CSc.

Cíl práce: Navrhněte mechanickou část bezkontaktního měřiče průhybu tyčového materiálu průměru 15 až 75 mm, jehož délka se pohybuje od 500 do 1500 mm. Návrh bude zahrnovat mechanismus úchopu materiálu, pohyblivý nosič snímačů vzdálenosti a připojení snímačů k řídicí jednotce.

Abstrakt

Práce řeší návrh bezkontaktního měřiče průhybu tyčového materiálu určeného pro průmyslové nasazení. Zvolené řešení využívá dvojici světelných clon Balluff BLA orientovaných v průřezu pod úhly $\pm 45^\circ$ a $\pm 135^\circ$. Jediným plynulým přejezdem nad tyčí se nasnímá dvojice průběhů $U_1(x)$, $U_2(x)$; z rozsahů ΔU_1 a ΔU_2 (max-min) se následně určí výsledná provozní metrika δ_{celk} pomocí Pythagorovy věty. Metoda je inherentně odolná vůči posunutí nule a díky měření stínu hrany (nikoli odrazu) vykazuje robustní chování v proměnlivých světelných podmínkách výrobní haly. Výstupy jsou poskytovány přímo v milimetrech přes IO-Link, což usnadňuje zapojení do PLC/HMI. Praktická část popisuje konstrukci měřicí hlavy a podpor, doporučení pro jejich polohu, a sadu provozních indikátorů pro rychlou diagnostiku a dlouhodobý dohled nad stabilitou měření. Přínosem je jednoduché, rychlé a reprodukovatelné stanovení velikosti průhybu.

Klíčová slova

Bezkontaktní měření; Průhyb tyčového materiálu; Světelná clona; Optický snímač; automatizovaná kontrola

Abstract

The thesis deals with the design of a contactless deflection meter for bar material intended for industrial use. The selected solution uses a pair of Balluff BLA light barriers oriented in the cross-section at angles of $\pm 45^\circ$ and $\pm 135^\circ$. A single continuous pass over the bar captures a pair of waveforms $U_1(x)$ and $U_2(x)$; the resulting operating metric δ_{total} is then determined from the ranges ΔU_1 and ΔU_2 (max-min) using Pythagoras' theorem. The method is inherently resistant to zero offset and, thanks to the measurement of the edge shadow (rather than the reflection), exhibits robust behaviour in the variable lighting conditions of a production hall. The output results are expressed directly in millimetres via IO-Link, which facilitates integration into PLC/HMI. The practical part describes the design of the measuring head and supports, recommendations for their position, and a set of operating indicators for quick diagnostics and long-term monitoring of measurement stability. The benefit is a simple, fast, and reproducible determination of the deflection size.

Keywords

Contactless measurement; Bar deflection; Light array; Optical sensor; Automated inspection

Prohlašuji, že předložená bakalářská práce je původní a zpracoval/a jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil/a autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, v platném znění, dále též „AZ“).

Byl/a jsem seznámen/a s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje **AZ**, zejména § 60 (školní dílo).

Podle § 47b zákona o vysokých školách souhlasím se zveřejněním své práce podle Směrnice pro vedení, vypracování a zveřejňování závěrečných prací na VŠPJ, a to bez ohledu na výsledek obhajoby.

Beru na vědomí, že VŠPJ má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom/a toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠPJ, která má právo ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených vysokou školou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše), z výdělku dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence.

V Jihlavě dne 25. listopadu 2025

.....

Podpis studenta/ky

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří se podíleli na vzniku této bakalářské práce a realizaci popsaného měřicího zařízení.

Především děkuji společnosti ExactCut za příležitost věnovat se tématu v reálném průmyslovém prostředí, za poskytnutí zázemí, technickou podporu a cenné podněty při návrhu i testování měřicího systému. Bez této spolupráce by práce nemohla dosáhnout své současné podoby.

Zvláštní poděkování patří vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Ivanovi Krejčímu, CSc. za jeho trpělivost, odborné vedení, věcné připomínky a čas, který mi věnoval při konzultacích.

V neposlední řadě děkuji své rodině a přátelům za dlouhodobou podporu, toleranci a povzbuzení během celého studia i při zpracování této práce.

Obsah

Seznam obrázků.....	7
Seznam zkratk.....	8
Úvod	9
1 Teoretická část	10
1.1 Úvod do problematiky	10
1.2 Teoretické základy ohybu tyčí	11
1.3 Kontaktní a bezkontaktní měření tvaru a průhybu	13
1.4 Light array (optická světelná clona s CCD) – princip technologie.....	15
1.5 Zdroje chyb a nejistoty u „light array“ a jejich vyhodnocení.....	17
2 Praktická část	20
2.1 Zadání, požadavky a provozní kontext	20
2.2 Vyřazené řešení – laserový triangulační snímač.....	23
2.3 Zvolený princip.....	24
2.4 Měřicí strategie a vyhodnocení	26
2.5 Konstrukce a realizace	27
2.6 Ověření funkčnosti a robustnost	33
2.7 Závěr praktické části	35
Závěr	37
Seznam použité literatury	38
Přílohy.....	40

Seznam obrázků

Obr. 1: Prvotní testování	24
Obr. 2: Zakládání tyče.....	29
Obr. 3: 3D model měřicího zařízení.....	32

Seznam zkratek

CAD – počítačově podporované konstruování (Computer-Aided Design)

CMM – souřadnicový měřicí stroj (Coordinate Measuring Machine)

HMI – rozhraní člověk–stroj (Human–Machine Interface)

IO-Link – průmyslové komunikační rozhraní IO-Link

PLC – programovatelný logický automat (Programmable Logic Controller)

LVDT – lineární diferenciální transformátor (Linear Variable Differential Transformer)

EWMA – exponenciálně vážený klouzavý průměr (Exponentially Weighted Moving Average)

Úvod

Kontrola průhybu tyčových polotovarů je ve strojírenské výrobě běžným, avšak provozně citlivým úkolem. Kontaktní metody (úchylkoměr, spároměrky) vyžadují obsluhu, hůře se automatizují a výsledky ovlivňuje ustavení, prostředí a kvalitu obsluhy. Bezkontaktní metody sice umožňují vyšší produktivitu a zapojení do automatizovaných linek, avšak jejich spolehlivost může u náročných podmínek výrobních prostor kolísat. Úvodní test laserového triangulačního snímače byl v této práci vyřazen pro nestabilitu na leštěných kruhových tyčích a citlivost na změny osvětlení, odrazy světla a přesnou kolmost dopadu. Proto byl zvolen princip světelné clony, který vyhodnocuje stín hrany a eliminuje kořenové problémy s odrazem.

Cíl práce je navrhnout, realizovat a provozně ověřit jednoduché a robustní měřidlo, které jedním přejezdem po celé délce tyče vrátí jedinou srozumitelnou hodnotu celkovou hodnotou průhybu δ_{celk} v mm, vhodnou pro automatizované třídění kusů.

Přínos spočívá v provozně ověřené strategii, která je nezávislá na posunutou nulu, nevyžaduje archiv celých průběhů, je nenáročná na obsluhu a údržbu (čištění oken, kontrola pracovní vzdálenosti snímače a kolmosti) a v typických podmínkách haly vykazuje reprodukovatelné výsledky. Teoretická část shrnuje potřebné základy ohybu prutů a metrologické aspekty optických měření; praktická část popisuje konstrukci, měřicí postup a ověřovací zkoušky robustnosti.

1 Teoretická část

1.1 Úvod do problematiky

Měření a kontrola rozměrové přesnosti patří mezi základní činnosti každého strojírenského procesu. Správně zvolená měřicí metoda umožňuje hodnotit kvalitu výrobků, řídit procesy a zajistit jejich opakovatelnost. Metrologie jako věda o měření vytváří systém pravidel a nástrojů, který zaručuje jednotnost a sledovatelnost měření napříč všemi stupni výroby (Tichá, 2004).

Ve strojírenské praxi se rozlišují kontaktní a bezkontaktní metody měření. Kontaktní měření je založeno na přímém dotyku měřidla s povrchem součásti, což v některých případech může ovlivnit výsledek měření. Přesto se tyto metody stále hojně používají pro svou jednoduchost a nízké pořizovací náklady. Při kontrole průhybu tyčového materiálu se nejčastěji využívá úchylkoměr, který měří rozdíl výšek mezi středem a konci tyče uložené na opěrných bodech. V jednodušších podmínkách se průhyb kontroluje pomocí spároměrek, kdy se mezera mezi tyčí a referenční plochou zjišťuje ručně. Obě metody však vyžadují manuální obsluhu, jsou časově náročné a obtížné je lze automatizovat (Petřekovská, Čepová, 2012).

Rostoucí důraz na přesnost a produktivitu výroby vede k postupnému nahrazování kontaktních metod bezkontaktními systémy. Tyto systémy využívají různé fyzikální principy pro určení vzdálenosti – nejčastěji optické, laserové, kapacitní nebo ultrazvukové. Jejich výhodou je eliminace vlivu měřicí síly, možnost měření deformovatelných nebo pohybujících se objektů a snadné zapojení do automatizovaných linek. Bezkontaktní měření tak umožňuje sběr dat v reálném čase a přímé vyhodnocení výsledků v rámci řízení kvality (Tichá, 2004).

V oblasti geometrických kontrol se za nejpresnější a nejrychleji se rozvíjející považují optické metody, zejména ty založené na principu laserové triangulace. Tento princip umožňuje vyhodnocovat vzdálenost na základě geometrického vztahu mezi vysílaným laserovým paprskem, jeho odrazem od povrchu a polohou detektoru. Triangulační senzory dosahují rozlišení v řádu mikrometrů a jsou vhodné pro měření rovinnosti, kruhovitosti, vystředění i průhybu. Díky odolnosti vůči vnějším vlivům a vysoké rychlosti měření se tyto senzory staly standardem v automatizovaných měřicích systémech (Petřekovská, Čepová, 2012).

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem bezkontaktního měřidla průhybu tyčí určeného pro průmyslové nasazení. Měřicí systém bude využívat dvojici senzorů Balluff BLA založených na principu světelného pole, které se pohybují nad tyčí a měří pozici hrany tyče v rámci daného pole. Na základě rozdílu minimálních a maximálních hodnot bude pomocí Pythagorovy věty stanovena velikost průhybu. Navrhované řešení má odstranit nedostatky kontaktních metod, zvýšit přesnost měření a umožnit sjednocení do automatizovaného procesu.

Teoretická část práce shrnuje základní principy metrologie, teoretické základy ohybu tyčí, princip optického snímání a metody vyhodnocování nejistoty měření. Na základě těchto poznatků je v praktické části navrženo a ověřeno bezkontaktní měřidlo průhybu tyčí.

1.2 Teoretické základy ohybu tyčí

Průhyb tyče patří mezi základní projevy mechanického namáhání a je jedním z nejčastějších způsobů deformace, se kterými se ve strojírenství setkáváme. K ohybu dochází, když je prut nebo tyč vystavena vnějším silám, které působí kolmo na její podélnou osu. Tím vzniká ohybový moment, jenž způsobí zakřivení původně přímé osy tělesa. Z pohledu mechaniky pružných těles je ohyb definován jako deformace, při níž zůstávají průřezy prutu po zatížení přibližně rovinné a kolmé na jeho osu, alespoň v oblasti malých deformací (Halama, a kol., 2011).

Při ohybu se v různých vrstvách materiálu vytvářejí tahová a tlaková napětí. Vlákna, která se prodlužují, ubývá na straně tahu, zatímco na opačné straně se vlákna zkracují vlivem tlaku. Mezi těmito oblastmi se nachází tzv. neutrální vrstva, v níž nedochází ke změně délky. Vzdálenost vláken od této vrstvy zásadně ovlivňuje velikost napětí, a tedy i pravděpodobnost vzniku trvalé deformace nebo lomu. Pochopení rozložení napětí je klíčové pro správný návrh konstrukčních prvků, protože umožňuje předvídat, kde bude materiál nejvíce namáhán.

1.2.1 Napětí a deformace při ohybu

Napětí σ vznikající v ohýbaném prutu je podle Hookeova zákona přímo úměrné poměrné deformaci ϵ . Tento vztah lze vyjádřit rovnicí: $\sigma = E \cdot \epsilon$. Tento lineární vztah platí pouze v oblasti pružných deformací, tedy do mezí, kdy po odstranění síly těleso zcela obnoví původní tvar (Halama a kol., 2011, s. 95). Při rovinném ohybu vzniká na jedné straně prutu tahové a na druhé tlakové napětí. Mezi nimi leží neutrální vrstva, jejíž body se při deformaci neprodlužují ani nezkracují (Belyaev, 1979). Rozložení napětí v průřezu je lineární, přičemž maximální hodnoty se nacházejí na vzdálenějších vláknech od neutrální osy. Pro maximální napětí v průřezu platí: $\sigma_{\max} = M_{\max} \cdot y_{\max} / I$ (Halama, a kol., 2011).

Kde

$\sigma_{\max}$ – maximální ohybové napětí [Pa]

$M_{\max}$ – maximální ohybový moment [N.m]

$y_{\max}$ – vzdálenost krajního vlákna od neutrální osy [m]

I – druhý moment plochy průřezu kolem neutrální osy [m⁴]

1.2.2 Rovnice ohybu a průhybová čára a řešení pro běžné případy

Průběh deformované osy prutu (nosníku) popisuje průhybová čára $w(x)$. V lineárně pružné oblasti, při malých deformacích a za předpokladu rovinných průřezů (Bernoulli–Euler), je křivost osy přímo úměrná ohybovému momentu:

$$\kappa(x) = 1/R(x) = M(x)/(E \cdot I(x))$$

kde

$\kappa(x)$ – křivost průhybové čáry v poloze x [1/m]

$R(x)$ – poloměr zakřivení osy prutu v poloze x [m]

$M(x)$ – ohybový moment v průřezu v poloze x [N.m]

E – modul pružnosti v tahu [Pa]

$I(x)$ – druhý moment plochy průřezu v poloze x [m⁴]

Protože pro malé průhyby platí $\kappa(x) \approx d^2w/dx^2$, kde $w(x)$ je průhyb osy prutu v poloze x [m], dostáváme diferenciální rovnici průhybové čáry:

$$d^2w/dx^2 = M(x)/(E \cdot I(x))$$

Integrací jednou podle x získáme úhel natočení průřezu $\theta(x) = dw/dx$, kde $\theta(x)$ je úhel natočení průřezu v poloze x [rad], a druhou integrací průhyb $w(x)$. Tato rovnice tedy umožňuje určit nejen hodnotu průhybu, ale i sklon a zakřivení v libovolném bodě prutu (Halama, a kol., 2011.).

Aby bylo možné získat analytické řešení, je nutné doplnit okrajové podmínky vyplývající z uložení:

- prosté podepření: obvykle $w = 0$ na obou koncích a ohybový moment v podporách $M = 0$;
- vetknutí: ve vetknutí $w = 0$ a $\theta = 0$;
- konzola: ve vetknutí $w = 0$, $\theta = 0$; na volném konci působí síla a /nebo moment dle zadání (Young, Budynas, 2002; Halama a kol., 2011.).

Pro lineární model platí princip superpozice: výsledný průběh $w(x)$ pro kombinované zatížení je součtem dílčích řešení. Pokud je průřez proměnný (tedy $I(x)$ se mění po délce), pracuje se přímo s členem $E \cdot I(x)$ v rovnici a řeší se po úsecích s konstantním I ; na hranicích úseků se uplatní spojitost průhybu w i úhlu θ (Halama, a kol., 2011.).

1.2.3 Moment setrvačnosti, průřezový modul a vliv geometrie

Geometrie průřezu zásadně ovlivňuje odolnost prutu vůči ohybu. Mírou rozložení materiálu kolem neutrální osy je druhý moment plochy (moment setrvačnosti) I , definovaný jako:

$$I = \int y^2 dA$$

kde

y – vzdálenost elementární plochy od neutrální osy [m]

dA – elementární plocha průřezu [m²]

Typické příklady:

- Kruhová tyč o poloměru r : $I = (\pi \cdot r^4)/4$
- Obdélníkový průřez (šířka b , výška h): $I = (b \cdot h^3)/12$

Pro kontrolu napětí se používá průřezový modul W , definovaný vztahem:

$$W = I / y_{\max}$$

Kde

I – druhý moment plochy průřezu [m⁴]

$y_{\max}$ – vzdálenost krajního vlákna od neutrální osy [m]

W – průřezový modul v ohybu [m³]

Potom platí:

$$\sigma_{\max} = M_{\max} / W$$

Kde

$\sigma_{\max}$ – maximální ohybové napětí [Pa]

$M_{\max}$ – maximální ohybový moment [N·m]

Praktické tvary:

- Kruhová tyč: $y_{\max} = r \Rightarrow W = (\pi \cdot r^3)/4$
- Obdélník: $y_{\max} = h/2 \Rightarrow W = (b \cdot h^2)/6$

Z uvedených vztahů vyplývá, že zvýšení modulu pružnosti E (volba materiálu) nebo momentu setrvačnosti I (volba/optimalizace průřezu) snižuje průhyb. V praxi se tedy buď volí materiál s vyšším E (např. ocel vs. hliník), nebo se optimalizuje průřez tak, aby co největší část plochy ležela dále od neutrální osy (Halama, a kol., 2011).

Poznámka k omezením teorie:

Uvedené vztahy platí za předpokladů malých průhybů, lineárně pružného chování a rovinných průřezů po deformaci (Bernoulli–Euler). U velmi štíhlých prutů s výrazným podílem smykové deformace je vhodnější Timošenkova teorie. Pro běžné tyčové polotovary je však Bernoulli–Eulerův model přiměřený (Halama, a kol., 2011).

1.2.4 Shrnutí

Ohyb tyče představuje jeden z nejdůležitějších problémů mechaniky deformovatelných těles. Teoretické rovnice poskytují rámec pro posouzení tuhosti a chování prutu při zatížení a ukazují vliv materiálových vlastností, tvaru průřezu a délky na velikost průhybu. Tyto poznatky tvoří nezbytný základ pro další kapitoly práce.

1.3 Kontaktní a bezkontaktní měření tvaru a průhybu

Cílem této kapitoly je podat ucelený přehled metod používaných pro měření tvaru a průhybu tyčových polotovarů, a to ve dvou komplementárních skupinách: kontaktní a bezkontaktní metody. Text klade důraz na praktickou použitelnost v průmyslovém prostředí, na metrologické souvislosti (sledovatelnost, opakovatelnost, zdroje chyb) a na racionální volbu metody podle požadované přesnosti, taktu linky a povrchových vlastností dílce.

1.3.1 Kontaktní metody

Kontaktní metody vycházejí z přímé interakce hrotu měřidla s povrchem součásti. Výhodou je jednoduchý princip, nízké pořizovací náklady a dobrá citlivost při lokálních měřeních. Nevýhodou

bývá závislost na obsluze, citlivost na montážní a environmentální podmínky a obtížnější zapojení do automatizace (Petřkovská, Čepová, 2012; Tichá, 2004).

Jedním z nejpoužívanějších prostředků je číselníkový či páčkový úchylkoměr. V kombinaci s přípravkem (měřicí deska, hranoly/V-bloky) lze určit lokální odchylky přímosti či průhybu v definovaných průřezích. Metodika ČSMS detailně popisuje zásady správného použití: volbu měřicí osnovy, přitlačnou sílu, kompenzaci teplotních vlivů a eliminaci tzv. kosinové chyby, která vzniká, není-li směr posuvu přesně kolmý k doteku. Metodika zároveň doporučuje ověřovací postupy a upozorňuje na časté provozní omyly (ČSMS, 2018; Hrabec, Helebrant, Mazalová, 2006).

Pro kontrolu průhybu tyče v praxi obvykle postačí dvojice opěr (hranoly, prizmatické podpěry) a měřicí hrot sledující rozdíl výšky mezi konci a středem tyče. Takto lze identifikovat maximální lokální odchylku vůči referenční rovině. Spolehlivost měření však vyžaduje stabilní podmínky (teplota, vibrace), čisté styčné plochy a jednoznačně definované opěrné body. Zkušenost obsluhy má zásadní vliv na reprodukovatelnost výsledků, zejména při opakovaných měřeních na různých kusech (ČSMS, 2018; Tichá, 2004).

Vedle úchylkoměrů se využívají dotykové snímače posuvu (např. LVDT). Ty umožňují spojitý záznam malých posuvů s vysokým rozlišením a hodí se pro laboratorní a poloautomatické stanice. Jejich dlouhodobá metrologická stabilita v provozu ovšem závisí na kvalitě mechanického začlenění, ochraně před nečistotami a opotřebením hrotu. Pro komplexnější geometrické úlohy (přímost, válcovitost, poloha) se využívají souřadnicové měřicí stroje (CMM) s dotykovými sondami, které z měřených bodů rekonstruují geometrické entity a umožňují srovnání s CAD či referenční soustavou (Petřkovská, Čepová, 2012).

Kontaktní přístupy jsou běžné i v oblasti technické diagnostiky a nastavování strojů. Při zarovnávání hřídelů nebo kontrole výstřednosti se úchylkoměry využívají pro rychlé ověření geometrického stavu a pro nastavení mechanických uzlů. Tyto aplikace dobře ilustrují robustnost dotykových měřidel a jejich praktickou užitečnost mimo laboratorní prostředí (ČSMS, 2018).

1.3.2 Bezkontaktní metody

Bezkontaktní metody eliminují vliv měřicí síly, umožňují vysokou rychlost sběru dat a dobře se zapojují do automatizovaných linek. Geometrická informace je získávána optickou cestou: z obrazových dat nebo z optické rekonstrukce profilu. Volba konkrétního principu závisí na povrchových vlastnostech, požadované přesnosti a dostupném čase cyklu (Petřkovská, Čepová, 2012; Tichá, 2004).

Kamerové systémy s telecentrickou optikou minimalizují perspektivní zkreslení a udržují konstantní měřítko napříč zorným polem. Pro měření hran, průměrů a vzdáleností je tento přístup velmi efektivní za předpokladu kvalitní kalibrace (měřítko, zkreslení) a stabilního homogenního osvětlení. Nevýhodou je citlivost na odrazy a na změny osvětlení, což vyžaduje pečlivý návrh světelných podmínek a stínění (Tichá, 2004; Tichá, Mrkvica, 2012).

Optické profilometry se světelným řezem nebo laserovou linií rekonstruují 2D profil průřezu z polohy projekční linie na detektoru. Při řízeném posuvu snímače nebo měřeného dílce je možné získat 3D množinu bodů a z ní odvodit tvarové charakteristiky. Metoda je rychlá a bohatá na

data, nicméně je citlivá na vlastnosti povrchu (matnost/lesk, tmavé povrchy) a na geometrii scény (úhly dopadu, stíny), takže pro spolehlivost je nutná experimentální verifikace a správná konfigurace optiky (Petřkovská, Čepová, 2012; Tichá, 2004).

Bezdotykové snímací hlavy jsou dnes běžně dostupné také na CMM, kde doplňují dotykové sondy a umožňují multisenzorový přístup. Výhodou je možnost kombinovat rychlou optickou metodu s přesným dotykovým ověřením, a to v jednotném souřadnicovém rámci s řízenou teplotou a stabilní kinematikou stroje. Tento přístup je vhodný zejména pro kontrolu komplexních dílců a pro referenční verifikaci výsledků měření přímo na lince (Petřkovská, Čepová, 2012; Dukendijev, a kol., 2022).

1.3.3 Souřadnicové měřicí stroje (CMM) jako společná platforma

Souřadnicové měřicí stroje umožňují realizovat kontaktní i bezkontaktní měření v jednom systému se standardizovanou správou kalibrací a programovatelnými trajektoriemi snímání. Silnou stránkou CMM je přesné ustavení referenčních soustav, možnost kombinovat různé typy sond a robustně řídit měřicí proces s ohledem na teplotní kompenzace, nejistoty a statistiku dat. Je však nutné respektovat provozní limity: nároky na klimatickou stabilitu, kratší vhodnou délku dílců vzhledem k pracovnímu prostoru a nezanedbatelný cyklový čas ve srovnání s jednoúčelovými stanicemi s měřením přímo na lince (Petřkovská, Čepová, 2012; Dukendijev, a kol., 2022; Tichá, Mrkvica, 2012).

Z hlediska měření průhybu tyčí se CMM dobře uplatní jako etalonové pracoviště pro referenční ověření, případně pro rozšířené tvarové analýzy. Pro kontinuální dohled v toku výroby přináší větší hodnotu nasazení specializovaných optických snímačů přímo na lince, kde je možné dosáhnout vyšší propustnosti a dostatečné opakovatelnosti bez nutnosti manipulace s dílci (Petřkovská, Čepová, 2012; Tichá, 2004; Dukendijev, a kol., 2022).

1.3.4 Srovnání a doporučení pro volbu metody

Kontaktní metody: vhodné pro lokální, vysoce citlivá měření, protokolované postupy a nízké náklady; vyžadují zkušenou obsluhu, stabilní prostředí a pečlivé ustavení přípravků. Bezkontaktní metody: vhodné pro rychlý sběr dat, automatizaci a měření bez mechanického ovlivnění povrchu; vyžadují precizní optickou konfiguraci, kalibraci a řízení osvitů. V praxi se osvědčuje kombinované nasazení: bezkontaktní průběžná kontrola v provozu a kontaktní (či CMM) verifikace v referenčních podmínkách. Tento postup odpovídá doporučením univerzitních opor a průmyslových metodik a napomáhá systematickému řízení nejistoty měření v celém procesu kontroly kvality (ČSMS, 2018; Petřkovská, Čepová, 2012; Tichá, 2004).

1.4 Light array (optická světelná clona s CCD) – princip technologie

Tato kapitola vysvětluje obecný princip optického mikrometru typu „light array“ (světelná clona) v uspořádání s přímým paprskem a zdůrazňuje metrologické souvislosti, které jsou důležité pro návrh stabilního měřicího pracoviště v průmyslových podmínkách. Vycházíme z neutrální literatury k optickým mikrometrům a z univerzitních skript pro rámeček metrologie a integrace (Micro-Epsilon, n. d.; KEYENCE, n. d.; Edmund Optics, n. d.; Petřkovská, Čepová, 2012; Petřkovská, 2013).

1.4.1 Princip měření „through-beam“ (světelná clona)

Optický mikrometr ve variantě světelné clony tvoří dvojice hlav: vysílač a přijímač. Vysílač generuje kolimovaný světelný pás (paralelní „záclonu“ paprsků) a přijímač s CCD řádkem (lineárním senzorem) měří intenzitu na jednotlivých pixelech. Když měřený objekt (např. tyč) vstoupí do svazku, část světelného pásu se zastíní a na CCD vznikne ostrá hranice mezi osvětlenou a tmavou oblastí. Místo práce s absolutní intenzitou se vyhodnocuje poloha hrany (případně dvou hran současně), resp. šířka zástinu – z ní je přímo odvozen průměr, šířka či poloha (KEYENCE, n. d.; Micro-Epsilon, n. d.). Tento princip je robustní vůči pozvolným změnám celkového osvětlení: algoritmus sledování hrany (např. prahování nebo sub-pixelové určení těžiště přechodu) je na homogenní změny intenzity méně citlivý než klasické „měření intenzity“ (KEYENCE, n. d.).

Klíčovou roli hraje kolimace. Pokud je světelný pás dostatečně rovnoběžný, je penumbra (přechod mezi světlem a stínem) úzká a hrana na CCD je „tvrdá“, což zlepšuje přesnost určení její polohy. Při měření průměru se typicky detekují dvě protilehlé hrany objektu a z jejich vzdálenosti v pixelech se počítá šířka stínu; pro polohová měření postačuje sledovat jednu hranu nebo těžiště zástinu (Micro-Epsilon, n. d.). V porovnání s profilometrií (laserová linie + triangulace) světelná clona neposkytuje výškový profil povrchu, ale hranovou informaci v projekci – právě ta je však pro průměr/šířku/okrajové polohy ideální (KEYENCE, n. d.).

1.4.2 Metrologické charakteristiky a měřicí řetězec

Z hlediska metrologie je užitečné oddělit tři sledované veličiny: rozlišení, linearitu a opakovatelnost. Rozlišení je dáno především roztečí pixelů a algoritmem detekce hrany. U moderních řádkových CCD lze polohu hrany určit i mezi obrazovými elementy interpolací přechodu, což v praxi zvyšuje jemnost odečtu vůči prostému binárnímu prahování (KEYENCE, n. d.). Linearita popisuje, jak přesně „měřítko“ mikrometru odpovídá skutečnosti v celém rozsahu. Ovlivňuje ji jak optika (kolimace, případně telecentricita v širším kontextu), tak geometrie (rovnoběžnost hlav, stabilita vzdálenosti Tx–Rx) (Edmund Optics, n. d.). Opakovatelnost (krátkodobý rozptyl odečtů) je funkcí kvality hrany v obraze, šumu signálu a mechanických vibrací konstrukce. Zlepšuje ji stabilní osvětlení, spektrální filtrace (potlačení parazitního světla) a mechanická tuhost uchycení (Petřkovská, Čepová, 2012).

Kvalitu hrany výrazně ovlivňuje optická konfigurace. Použití telecentrického/kolimovaného osvětlení vytváří hranový přechod s vysokým kontrastem, který je méně citlivý na změny polohy objektu v ose zorného pole. Tím klesá neurčitost polohy hrany a zlepšuje se shoda měření při různém umístění objektu v okně (Edmund Optics, n. d.). V průmyslové praxi k tomu patří i stínění proti vnějšímu světlu, pravidelné čištění optických oken a monitoring saturace detektoru (Petřkovská, Čepová, 2012; Tichá, 2004).

1.4.3 Integrační zásady a praktické vlivy

Stabilní výsledky předpokládají geometricky správné ustavení a tuhý rám. Nejčastější systematické chyby plynou z:

- nesouososti a naklopení vysílače vůči přijímači (svazek není rovnoběžný s řádkem CCD, hranový přechod se může „rozmazat“ nebo posunout)

- naklopení objektu (tyče) vůči světelnému pásu
- vibrací a mikropohybů během odečtu, zejména u delších rozponů mezi hlavami
- znečištění optiky

Zmírnění zahrnuje přesné ustavení a fixaci hlav na rozměrově stabilní konstrukci, stínění a spektrální filtry, přístup pro čištění a vizualizaci hrany (diagnostické okno v SW), aby byla patrná kvalita přechodu a případná saturace (Petřkovská, Čepová, 2012; Tichá, 2004).

Specifickou kapitolou je měření průhybu tenkých drátů a tyčí malých průměrů. U průměrů srovnatelných s tloušťkou penumbry se může projevit difrakce a další okrajové jevy: hrana není dokonale strmá, ale rozšířená, což zvyšuje neurčitost polohy. Praktickými protipatřeními jsou optimalizace pracovní vzdálenosti, kvalitní kolimace a (dle potřeby) užší spektrální pásmo s filtrem. U průsvitných materiálů část světla může procházet skrz, profil zástinu se změní; v těchto případech je vhodné provést aplikovanou zkoušku a upravit prahování, popř. zvolit jiné spektrum (Micro-Epsilon, n. d.).

1.4.4 Krátké srovnání s jinými bezkontaktními principy

Na rozdíl od triangulačních profilometrů, které rekonstruují výškový profil povrchu (vzdálenost), světelná clona poskytuje hranovou informaci v projekci a tím velmi stabilně určuje šířky/průměry/mezer a polohy hran. Je tedy výhodná všude tam, kde je dominantní měření průměru či polohy hrany a je požadována rychlost a robustnost v provozu. Pro úlohy zaměřené na 3D topografii, mikronovou profilaci drsnosti nebo hluboké dutiny je vhodnější triangulace, konfokální či interferenční metody (KEYENCE, n. d.; Petřkovská, Čepová, 2012; Tichá, 2004).

1.5 Zdroje chyb a nejistoty u „light array“ a jejich vyhodnocení

1.5.1 Identifikace zdrojů chyb

Tato kapitola shrnuje hlavní vlivy chyb u optického mikrometru typu světelná clona (through-beam, kolimovaný světelný pás + CCD řádek) a navrhuje postup vyhodnocení nejistoty pro úlohu měření průměru/šířky a odvozeného průhybu. Navazujeme na principy z kap. 4 a na univerzitní rámec metrologie (Petřkovská, Čepová, 2012; Tichá, 2004; KEYENCE, n. d.; Micro-Epsilon, n. d.; Edmund Optics, n. d.).

Geometrie a ustavení:

- nesouosost a naklopení vysílače vůči přijímači mění kolimaci a tvar penumbry → hrana na CCD není dostatečně „tvrdá“
- naklopení měřeného objektu (tyče) vůči světelnému pásu geometricky zkresluje šířku zástinu
- vibrace a mikropohyby během odečtu rozšiřují přechod.

Zmírnění: tuhá mechanika, přesné zarovnání Tx–Rx, fixace vzdálenosti, diagnostika hrany v softwaru (Petřkovská, Čepová, 2012; Tichá, 2004).

Optická konfigurace a osvětlení: kolimace/telecentricita zvyšuje kontrast hrany a snižuje neurčitost její polohy; okolní světlo a odlesky se řeší stíněním a spektrální filtrací, popř. modulací

vysílaného a demodulací přijímaného optického signálu; znečištění optiky (prach/olej) snižuje kontrast a může způsobit systematický posun (Edmund Optics, n. d.).

Povrch a tvar objektu: u tenkých drátů a malých průměrů se projevuje difrakce a okrajové jevy (rozšíření hrany); u průsvitných materiálů část světla prochází materiálem – v obou případech je vhodná aplikovaná zkouška s úpravou prahování/optiky (Micro-Epsilon, n. d.) nebo použití strojového učení kvantifikace uvedených parazitních jevů k jejich potlačení.

Senzor a zpracování: rozteč pixelů CCD a algoritmus detekce hrany (prahování vs. sub-pixel) limitují rozlišení; linearita převodu pixel $\rightarrow$ μm závisí na optice a kalibraci (KEYENCE, n. d.).

1.5.2 Vyhodnocení nejistoty – typy složek a kombinace

Složky nejistoty (příklad): u_{rep} – opakovatelnost (typ A); u_s – měřítko S (typ B); u_b – offset b (typ B); u_{geom} – geometrie (zarovnání, naklopení); u_{opt} – optika/okolí (osvětlení, znečištění, difrakce). Pro lineární model platí kombinovaná směrodatná nejistota:

$$u_c(w) = \sqrt{[(n_{px} \cdot u_s)^2 + (S \cdot u_n)^2 + u_b^2 + u_{geom}^2 + u_{opt}^2]}$$

kde

$u_c(w)$ – kombinovaná směrodatná nejistota měřené veličiny w [mm]

n_{px} – naměřená šířka/průměr v pixelech (počet pixelů mezi hranami) [–]

u_s – směrodatná nejistota měřítka S [mm/px]

S – měřítko převodu z pixelů na délku [mm/px]

u_n – směrodatná nejistota odečtu n_{px} (šum, opakovatelnost) [px]

u_b – směrodatná nejistota offsetu b [mm]

u_{geom} – složka nejistoty vlivem geometrie ustavení (zarovnání, naklopení) [mm]

u_{opt} – složka nejistoty vlivem optiky a okolí (osvětlení, znečištění, difrakce) [mm]

Rozšířená nejistota ($\approx 95\%$): $U = k \cdot u_c(w)$, $k \approx 2$

kde

U – rozšířená nejistota veličiny w [mm]

k – činitel rozšíření (faktor pokrytí) [–]

$u_c(w)$ – kombinovaná směrodatná nejistota veličiny w [mm]

V praxi: u_s a u_b kalibrujeme proti etalonům v několika bodech rozsahu; u_{geom} snížíme zarovnáním a kontrolou rovnoběžnosti; u_{opt} údržbou optiky a stíněním; u_n stanovíme z opakovaných odečtů (např. 30×) a statistického vyhodnocení (Petřkovská, Čepová, 2012; Tichá, 2004).

1.5.3 Metodika ověření metrologických charakteristik

Opakovatelnost: série rychlých odečtů na stabilním etalonu, výpočet směrodatné odchylky. Linearita: měření více etalonů napříč rozsahem, regrese w vs. nominál, kontrola reziduí. Stabilita

v čase (R&R): dvě obsluhy, dva dny; u clony je vliv obsluhy malý, ale prostředí hraje roli.
Robustnost optiky: zkouška s parazitním osvitem a po mírném znečištění okna ověří vliv na u_{opt}
(Edmund Optics, n. d.).

2 Praktická část

2.1 Zadání, požadavky a provozní kontext

Tato kapitola vymezuje cíle a hranice praktické části projektu „Bezkontaktní měřič průhybu tyčového materiálu“ a popisuje reálné podmínky, ve kterých bude systém pracovat. Účelem je sjednotit terminologii, ujasnit si vstupní omezení a formulovat sadu funkčních i nefunkčních požadavků, které následně řídí návrh měřicí strategie a konstrukční řešení.

2.1.1 Měřený objekt a definice os

Měřeným objektem je kovová kruhová tyč (leštěné i běžně obráběné povrchy), ukládaná pro měření na dvě posuvné podpory. V praxi se délka i průměr měřených tyčí liší podle zakázek. Pro návrhové účely budeme pracovat s provozním rozmezím:

- délka 0,5–1,5 m (podpory lze přestavit pro libovolnou délku v tomto intervalu),
- průměr $\varnothing$ v řádu desítek milimetrů 15–75 mm.

Pro jednoznačnost zavádíme osový systém:

Pro jednoznačnost zavádíme trojrozměrný systém se třemi osami, které se zajišťují úplný popis sledovaného objektu: X – směr přejezdu měřicí hlavy (lineární pohyb snímače nad tyčí). Y – vodorovná osa v průřezu tyče. Z – svislá osa v průřezu tyče.

Použité snímací uspořádání používá dvě světelné clony (light array) orientované v průřezu pod úhly $\pm 45^\circ$ a $\pm 135^\circ$ vůči osám Y/Z. V dalším textu je budeme označovat U_1 (směr $+45^\circ$) a U_2 (směr $+135^\circ$). Tyto dvě clony poskytují dvě na sebe kolmé projekce pohybu horní hrany tyče, a dovolují tedy z jediného přejezdu určit celkovou velikost průhybu v průřezu.

2.1.2 Měřené veličiny a výsledek měření

Výsledkem měření je jediná srozumitelná hodnota:

- δ_{celk} – maximální velikost průhybu v průřezu (bez ohledu na směr), získaná z dvojice ortogonálních rozsahů ΔU_1 , ΔU_2 Pythagorovou větou.

Volitelně lze dopočítat i složky průhybu v kartézském souřadném systému:

- ΔY (vodorovná složka), ΔZ (svislá složka) – převodem z ΔU_1 , ΔU_2 .

Pro provozní rozhodování (třídění, alarmy, SPC karty) je plně dostačující skalární veličina δ_{celk} , která vyjadřuje celkové prohnutí tyče, bez nutnosti rozlišovat směr, což je v praxi dostačující.

2.1.3 Provozní prostředí a omezení z praxe

Systém pracuje ve výrobní hale za podmínek s proměnlivým osvětlením (denní přísvit, lokální stíny obsluhy a jeřábů, odlesky od strojů), dochází k vibracím a drobným otřesům, ve vzduchu se může vyskytovat prach či olejová mlha a obsluha střídá sortiment (různé délky L a průměry $\varnothing$ testovaných tyčí). Tyto faktory zásadně ovlivňují volbu principu i způsob vyhodnocení.

2.1.4 Funkční požadavky

Měřicí systém má podobu stolice a je navržen tak, aby jedním přejezdem po celé délce tyče nasnímal průběhy $U_1(x)$ a $U_2(x)$ ze dvou světelných clon orientovaných přibližně pod úhly $\pm 45^\circ$ a $\pm 135^\circ$ vůči ose. Z každé clony se následně vyhodnotí maximální odchylka od ideálního průběhu $\Delta U_x = U_{x\max} - U_{x\min}$, která je dána rozdílem největší a nejmenší hodnoty U_x během jednoho měření, přičemž index x nabývá hodnoty 1 nebo 2, a z dvojice ΔU_1 a ΔU_2 se určí jediná provozní hodnota průhybu δ_{celk} v milimetrech. Protože se pracuje s rozdíly (max-min), metoda je odolná vůči případnému konstantnímu posunutí a nevyžaduje nulování polohy každé tyče. Princip light array měří polohu hrany pomocí stínění, nikoli odrazu, takže v kombinaci s vhodným stíněním okna zůstává výsledek stabilní i při proměnlivých světelných podmínkách výrobní haly. Naměřená data (včetně ΔU_1 , ΔU_2 , δ_{celk} , L , času a stavových příznaků) jsou poskytována v jednotkách milimetrů přímo přes rozhraní IO-Link pro snadné zapojení do PLC/HMI a archivaci. Podpory jsou posuvné a přizpůsobují se aktuální délce obrobku, takže se měří vždy v celém zadaném rozsahu průměrů i délek bez technologického omezení měřicí strategie.

2.1.5 Požadavky na komfort obsluhy a údržby

Tyto požadavky vymezují standardy uživatelského komfortu, výkonu a provozní spolehlivosti měřicí stanice. Obsluha pouze určí a nastaví potřebnou vzdálenost podpor a zahájí měření, přičemž rozhraní HMI přehledně zobrazí výslednou hodnotu δ_{celk} a srozumitelný stav vyhodnocení podle nastavených tolerancí. Je požadováno, aby cyklus měření proběhl v co nejkratším čase, přejezd v řádu jednotek sekund, vlastní výpočet ΔU_1 , ΔU_2 a δ_{celk} řádově kratší. Měření musí vykazovat dobrou opakovatelnost – opakované přejezdy téže tyče bez zásahu do nastavení vykazují jen k malý rozptyl výsledků. Zároveň se požaduje reprodukovatelnost, tedy aby ani při běžném přestavení podpor v rámci tolerance a obvyklých změnách prostředí (světelné podmínky, drobné vibrace) nedocházelo k výraznému rozptylu výsledků měření. Údržba má být jednoduchá a pravidelná (vizuální kontrola a čištění oken clony), bez nutnosti složitých kalibračních postupů před každou šarží. Konstrukce stanice má splňovat požadavky na bezpečnost a odolnost, což zahrnuje průmyslové provedení, krytování oken, promyšlené vedení kabeláže a definované chování při chybových stavech (např. pozice hrany mimo okno, výpadek signálu). Tyto požadavky dohromady tvoří rámec, který zajišťuje, že řešení bude v praxi dlouhodobě použitelné a nenáročné na obsluhu.

2.1.6 Přesnost, rozsah platnosti a praktické tolerance

Přesnost a rozlišovací schopnost výsledku jsou dány zejména vlastnostmi použitých světelných clon v režimu detekce hrany (edge) a kvalitou mechanického vedení přejezdu. Praktická koncepce vyhodnocení je nastavena tak, aby i při běžném provozním šumu (vibrace, proměnlivé osvětlení) bylo možné spolehlivě identifikovat extrémy (maxima a minima) v obou projekcích a z jejich rozdílů určit hodnoty ΔU .

Rozsah měření průhybu je vymezen mechanickým uspořádáním stanice (nastavenou pracovní vzdáleností snímače od tyče a výškou měřicího okna snímače), které musí zajistit změření průhybu v definovaném rozsahu průměrů a délek tyčí. Po celou dobu přejezdu musí horní hrana tyče zůstat v pracovním okně obou clon; pouze tehdy je zajištěna správná interpretace průběhů a tím i výsledného průhybu δ_{celk} .

Z hlediska nastavení se požaduje, aby měřicí směry obou clon zůstaly vzájemně kolmé s cílovou odchylkou do $\pm 0,5^\circ$. Dráha přejezdu má být rovnoběžná s osou tyče a pracovní vzdáleností snímače se nastavují tak, aby i při maximálně očekávaném průhybu zůstala dostatečná rezerva vůči okrajům pracovního okna. Tyto tolerance zajišťují, že naměřené hodnoty nejsou zatíženy systematickými chybami vlivem geometrie a že měření probíhá v podmínkách, pro které je metoda určena.

2.1.7 Vstupy a výstupy systému

Vstupy

Vstupem do měření je především geometrie uspořádání stolice: délka L , podle níž se nastavují posuvné podpory, a zvolená pracovní vzdálenost měřicí hlavy. Dále sem patří parametry přejezdu – rychlost v a vzorkovací frekvence f_s – které společně určují prostorovou hustotu nasbíraných dat (zachycení tvaru průběhu jemných deformací). Výstupní senzorká data tvoří průběhy $U_1(x)$ a $U_2(x)$ v milimetrech v poloze přejezdu x . Data jsou přenášena standardním digitálním rozhraním IO-Link.

Výstupy

Z nasbíraných průběhů se po dokončení přejezdu vyhodnotí rozdíl mezi největší a nejmenší vypočte celková velikost průhybu δ_{celk} v milimetrech, která slouží jako hlavní výsledek měření. Současně se ukládají stavové informace, zda hrana po celou dobu zůstala v pracovním okně snímačů a zda nedošlo k výpadkům signálu či saturaci – aby byla zajištěna dohledatelnost a kontrola kvality měření.

2.1.8 Vymezení měřicího rozsahu

V běžném provozu je zásadní zisk rychlého a spolehlivého výsledku vyjádřeného hodnotou celkového průhybu δ_{celk} . Určování směru průhybu (Y/Z) není pro rozhodování o kvalitě nutné – složky ΔY a ΔZ lze v případě potřeby kdykoli dopočítat z hodnot ΔU_1 a ΔU_2 . Stejně tak se v této aplikaci nevyužívá rekonstrukce profilu $\delta(x)$ po délce tyče; pro provozní účely stačí identifikace maximální velikosti průhybu metodou max-min v obou projekcích. Neprovádí se odčítání základní úrovně ani určení nulové polohy pro každou tyč, protože vyhodnocení Δ je diferenciální, a proto vůči konstantnímu posuvu nulové polohy odolné. Výstupy měření v podobě analogové veličiny nejsou požadovány – digitální přenos dat průhybu v milimetrech přes IO-Link zjednodušuje zapojení, zvyšuje robustnost a snižuje nároky na údržbu. Tato volba omezení drží systém jednoduchý a odolný, což je v každodenním provozu rozhodující.

2.1.9 Kritéria věrohodnosti výsledků

Regulérnost výsledků je dána následujícími podmínkami měření a vyhodnocení:

1. Měření probíhá napříč délkou tyče oběma směry bez ztráty hrany z okna.
2. Systém vyhodnocuje celkový průhyb δ_{celk} v mm a archivuje veličiny ΔU_1 , ΔU_2 .
3. Reprodukovatelnost měření v čase i v provozních podmínkách je dostatečná vůči definované technologické mezi (interní limit δ_{limit} pro třídění „vyhovuje/nevyhovuje“).

4. Obsluha zvládne pracovní postup (nastavit podpory, spustit přejezd, číst výsledek) a provést základní údržbu.

2.1.10 Jevy omezující kvalitu měření a jejich potlačení

Nejvýznamnějším zdrojem nejistoty je proměnlivé okolní osvětlení a odlesky v hale. Proto je zvoleno bezkontaktní měření pomocí světelné závěsové bariéry (light array) se snímáním stínu hrany tyče, doplněné jednoduchým krytváním okna snímače proti parazitnímu světlu. Doba jednoho přejezdu je krátká, takže pomalé změny osvětlení v hale se během jednoho měření prakticky neprojeví; navíc se pro každou clonu vyhodnocuje pouze rozdíl $\Delta U = \max(U) - \min(U)$ po celé délce tyče, což snižuje vliv případné konstantní složky nebo pomalého driftu úrovně signálu. Vliv vibrací a drobných pohybů mechanické části stanice se omezuje především plynulým, bezrázovým přejezdem nad tyčí bez opakovaných rozjezdů a zastávek, které by jinak vyvolávaly rázy v mechanice. Teoreticky by bylo možné měřit v jednotlivých ustálených polohách po zastavení a utlumení kmitů, takový režim by však výrazně prodloužil cyklovou dobu a zatížení pohonů. Z těchto důvodů je zvolen kontinuální přejezd s dostatečnou vzorkovací frekvencí, aby byl průběh signálu mezi podporami popsán dostatečným počtem vzorků pro spolehlivé určení maxima a minima průhybu. Do archivu se ukládají minimální metriky (ΔU_1 , ΔU_2 , δ_{celk} a příznaky kvality), plné průběhy jsou vyhrazeny servisnímu režimu. Vliv justace nebo nevhodné pracovní vzdálenosti snímače se snižuje jasným pracovním návodem, periodickou kontrolou kolmosti měřících směrů a rovnoběžnosti dráhy s osou tyče a jednoduchou vizuální kontrolou po každém přestavení. Variabilitu délky L řeší posuvné podpory; jejich doporučená poloha $a \approx 0,223 \cdot L$ omezuje gravitační průhyb a pomáhá udržet hranu v pracovním okně po celé délce přejezdu. Dodržením těchto opatření lze garantovat výsledky měření v požadované kvalitě.

2.2 Vyřazené řešení – laserový triangulační snímač

V počáteční fázi projektu jsme ověřovali možnost měřit polohu horní hrany tyče pomocí laserového triangulačního snímače od firmy Baumer. Princip spočívá v projekci laserové stopy na povrch a v jejím snímání kamerou pod pevným úhlem; z posunu obrazu stopy se po kalibraci odvozuje relativní poloha povrchu. Na matných, dostatečně difuzních površích funguje tento postup spolehlivě. V našem případě však byla potřeba měření na leštěných kovových tyčích s výrazně spekulárním (zrcadlovým) odrazem v prostředí výrobní haly s proměnlivým osvětlením. Kombinace těchto vlivů vedla k nestabilním výsledkům měření, a proto bylo řešení opuštěno.

Rozhodující problém představovaly zrcadlové odlesky a citlivost na přesnou kolmost paprsku. Kruhový profil tyče znamená, že místní normála povrchu se po obvodu neustále mění; „správná“ orientace dopadu nastává jen v úzké oblasti, mimo ni se laserový signál odráží mimo snímací optiku nebo se stopa deformuje. Už malé úhlové odchylky tak způsobovaly skokové změny jasnosti, saturaci senzoru (clipping) nebo naopak výpadky signálu. Výsledkem byly nepravidelné „skoky“ v poloze stopy a zhoršená opakovatelnost.

Dále se projevil jev spojený s koherentním zdrojem na hladkém kovu: speckle (zrnitý interferenční obrazec) a změna tvaru stopy při šikmém dopadu. V takových podmínkách je určení těžiště stopy méně stabilní – optimalizační algoritmus často vyhledává lokální maxima a poloha kolísá. Situaci výrazně zhoršovalo reálné prostředí haly: během směny se mění podíl denního světla, vznikají lokální stíny obsluhy a jeřábů a objevují se odlesky od strojů či svítidel.

Tyto časově proměnlivé vlivy způsobovaly kolísání návratové intenzity i v případech, kdy mechanické nastavení zůstalo neměnné.

Zkoušeli jsme potlačení jevu pomocí matovacího (křídového) spreje s cílem zvýšit difuzní podíl odrazu. Ačkoli se lokálně zlepšil kontrast, celkový přínos nebyl dostatečný: zakřivení profilu stále vedlo k proměnlivé geometrii dopadu, přesná kolmost v celé délce přejezdu byla obtížně udržitelná, a navíc se přidala provozní režie (nanášení, čištění, zbytky). Nepodařilo se dosáhnout takové reprodukovatelnosti výsledků, která by byla v souladu s požadovanou stabilitou měření na leštěných tyčích.

Ani po konzultaci s obchodním zástupcem a technickou podporou firmy Baumer se nepodařilo najít vhodné řešení pro danou aplikaci. Laserová triangulace u leštěných, kruhových tyčí v proměnlivých světelných podmínkách vykazovala kombinaci systematických (geometrie, kolmost) i náhodných (zrnitost, osvit) chyb, které vedly k nestabilním výsledkům. Světelná clona, která pracuje se stínem hrany místo odrazu, tyto kořenové problémy eliminuje a poskytuje v našem nasazení reprodukovatelné hodnoty.



Obr. 1: Prvotní testování

Zdroj: Vlastní zpracování

2.3 Zvolený princip

Finální řešení využívá světelnou clonu snímače Balluff BLA 32D-002-S4 v režimu detekce hrany. Snímač vytváří seřízený světelný pás a přijímač určuje polohu hrany v pracovním okně podle zástiny. Tím, že se nevyhodnocuje odražené světlo z povrchu, ale geometrie stínu, je měření přirozeně robustní vůči lesku i běžným změnám osvětlení ve výrobní hale. Snímač interně

vyhodnocuje polohu hrany v milimetrech a tuto číselnou hodnotu poskytuje prostřednictvím rozhraní IO-Link, takže odpadá analogové škálování a externí převodníky a snímač lze jednoduše začlenit do nadřazeného řídicího systému.

Při výběru konkrétního typu snímače byl klíčový princip „light array“ – tedy spojitý laserový pás dopadající na CCD pole, které umožňuje sledovat hrany objektů v celém průřezu najednou, nikoli jen v jednom bodě jako u jednobodového laserového snímače. Řada BLA Series D, do které model BLA 32D-002-S4 patří, je navržena právě pro měřicí úlohy typu kontrola šířky, polohy okraje, průměru nebo počtu objektů. V našem případě to znamená, že snímač v každém řezu „vidí“ horní obrys tyče v určité výšce a při přejezdu po délce tyče poskytuje konzistentní informaci o změně její polohy vlivem průhybu. Výhodou je i to, že světelný pás je usměrněný, o šířce 32 milimetrů, takže využitelná výška měřicího okna je dostatečná pro sledování průhybu běžných průměrů tyčí, aniž by bylo nutné snímač extrémně přesně výškově doladovat (Balluff, n.d.).

Z hlediska vnitřního principu je snímač Balluff BLA 32D-002-S4 průchozí světelná clona typu „light array“. Vysílač vytváří pomocí optiky úzký, usměrněný laserový pás, který prochází měřicím oknem mezi vysílačem a přijímačem. Přijímač tento pás promítá přes zobrazovací optiku na pole CCD prvků. V okamžiku, kdy do světelného pásu vstoupí tyč, vznikne v obraze CCD ostrý stín – část pole je osvětlená a část zakrytá. Elektronika snímače zpracuje intenzitní profil podél pásu, detekuje přechod mezi osvětlenými a zastíněnými prvky a z jejich rozložení dopočte polohu hrany v rámci měřicího okna. Měřená poloha hrany je interně vyhodnocována v diskrétních krocích daných rozlišením CCD pole a následně převedena na fyzikální jednotky (mm) pomocí kalibrace snímače. Rozhraní IO-Link zde slouží jako komunikační rozhraní, které tuto již přepočtenou hodnotu přenáší do nadřazeného systému jako číselnou veličinu v milimetrech (Balluff, n.d.).

Důležitou vlastností tohoto principu je, že snímač pracuje s geometrickým stínem v usměrněném světelném pásu, nikoli s množstvím odraženého světla od povrchu tyče. Rozhodující je poloha ostrého přechodu světlo/tma, takže měření je méně citlivé na změny odrazivosti povrchu (lesklé vs. matné tyče) a na běžné změny okolního osvětlení. CCD technologie současně umožňuje detekci více hran v jednom záběru, což se v řadě BLA využívá pro režimy měření šířky, průměru nebo více objektů; v této práci je však záměrně využit pouze jednoduchý režim jediné hrany, který poskytuje robustní a jednoznačnou informaci o poloze horní hrany tyče v každém řezu (Balluff, n.d.).

Z pohledu funkce měřicího systému je zásadní, že snímač v rámci řady BLA umožňuje více měřicích režimů – od detekce jediné hrany přes měření šířky mezery až po současnou analýzu více objektů. Pro tuto práci byl zvolen jednoduchý režim detekce hrany, kdy se v každém řezu sleduje poloha horní hrany tyče vůči světelnému pásu. To odpovídá cíli měřit pouze velikost průhybu, nikoli kompletní tvar profilu. Multifunkční charakter BLA (v jiných aplikacích schopnost současně vyhodnotit například průměr, polohu a počet objektů) je v této úloze využit jen částečně, ale dává do budoucna prostor pro případné rozšíření měření bez nutnosti měnit snímač (Balluff, n.d.).

V našem uspořádání jsou v jednom průřezu dvě nezávislé clony orientované pod úhly $+45^\circ$ a $+135^\circ$ vůči osám Y/Z (signály U_1 a U_2). Při jediném plynulém přejezdu měřicí hlavy v ose X tak získáme dvě na sebe kolmé projekce posunu horní hrany tyče. Z každé clony se po dojetí

vyhodnotí rozsah $\Delta U = \max(U) - \min(U)$ přes celý záznam; dvojice ΔU_1 a ΔU_2 vstupuje do výpočtu celkové velikosti průhybu. Tato strategie je nezávislá na posunutí nuly (není nutné nulovat každou tyč) a je málo citlivá na pomalé posuny v čase. V kombinaci s principem stínění světelným pásem tvoří základ měřicího systému určeného pro bezkontaktní měření průhybu tyčí v podmínkách sériové výroby.

2.4 Měřicí strategie a vyhodnocení

Strategie měření vychází z plynulého přejezdu měřicí hlavy nad horní hranou tyče v ose X a ze současného snímání dvou šikmých clon $\pm 45^\circ$ (U_1 pro $+45^\circ$, U_2 pro $+135^\circ$). Měří se vždy v celém úseku tyče, aby byly zachyceny skutečné extrémy průhybu v reálném uložení na podporách. Hodnoty $U_1(x)$ a $U_2(x)$ jsou ve snímači interně převáděny na milimetry a jako číselné hodnoty jsou předávány do řídicího systému prostřednictvím rozhraní IO-Link. Po dojetí se z celého záznamu pro každou clonu určí rozdíl naměřených extrémů ($\Delta U = \max(U) - \min(U)$) a z dvojice ΔU_1 , ΔU_2 se vypočte výsledná hodnota průhybu.

Pro zvýšení množství dat a rychlou kontrolu opakovatelnosti se v jednom cyklu provádí obousměrný přejezd (tam i zpět) se stejnou rychlostí a stejnou pracovní vzdáleností snímače od horní hrany tyče. Pro každý směr se samostatně vyhodnotí ΔU_1 , ΔU_2 a odpovídající hodnota δ_{celk} a obě sady výsledků se uloží do archivu. Pro interní hodnocení lze použít například větší z dvojice δ_{celk} nebo jejich průměr, podle zvyklostí daného závodu.

Postup měření (princip) lze stručně shrnout následovně:

- 1) Tyč je uložena na posuvných podporách v závislosti na délce L tak, aby horní hrana zůstala v pracovním okně obou clon napříč celou délkou.
- 2) Měřicí hlava provede plynulý přejezd v ose X konstantní rychlostí a současně se zaznamenají průběhy $U_1(x)$ a $U_2(x)$ v mm.
- 3) Po dojetí se pro každou clonu vypočte rozsah přes celý záznam:

$$\Delta U_1 = \max(U_1(x)) - \min(U_1(x))$$

$$\Delta U_2 = \max(U_2(x)) - \min(U_2(x))$$

- 4) Z dvojice ΔU_1 , ΔU_2 určete celkovou velikost průhybu v daném průřezu:

$$\delta_{\text{celk}} = \sqrt{(\Delta U_1)^2 + (\Delta U_2)^2}$$

Výsledek δ_{celk} je skalární (bez směru) a jeho hodnota slouží jako provozní kritérium pro třídění a statistické řízení procesu (SPC).

- 5) Volitelně (pokud je potřeba rozklad směru) převedte výsledek na složky v osách Y/Z:

$$\Delta Y = (\Delta U_1 + \Delta U_2) / \sqrt{2}$$

$$\Delta Z = |\Delta U_1 - \Delta U_2| / \sqrt{2}$$

Kde

$U_1(x)$ – signál první clony v poloze x [mm]

$U_2(x)$ – signál druhé clony v poloze x [mm]

ΔU_1 – rozsah signálu U_1 (max–min) po celé délce tyče [mm]

ΔU_2 – rozsah signálu U_2 (max–min) po celé délce tyče [mm]

δ_{celk} – celková velikost průhybu tyče (bez směru) [mm]

ΔY – složka změny polohy hrany v ose Y [mm]

ΔZ – složka změny polohy hrany v ose Z [mm]

2.5 Konstrukce a realizace

2.5.1 Postup návrhu a volba hlavních komponent

Návrh mechanické části měřicího zařízení vycházel z požadavku zajistit plynulý přejezd měřicí hlavy nad tyčí po celé délce měřicího úseku a současně umožnit nastavení podpor tyče podle konkrétní délky a průměru. Z tohoto důvodu byla zvolena koncepce samostatného ocelového rámu, na kterém jsou umístěna jak lineární vedení pro měřicí hlavu, tak vedení pro posuv podpor tyče a vlastní podpěrná konstrukce.

Postup návrhu začínal hrubým koncepčním modelem, z byly určeny celkové rozměry, umístění měřicí hlavy se snímačem Balluff BLA a průchod tyče. V této fázi byly definovány hlavní stavební uzly – nosný rám, pojezd měřicí hlavy, nastavitelné podpěry tyče a prostor pro uložení pohonu a rozvaděče. Teprve po odsouhlasení základního uspořádání se model postupně zpřesňoval do podoby detailní sestavy, která už zohledňuje konkrétní katalogové komponenty a výrobní možnosti.

Nosný rám zařízení je koncipován jako svařenec z ocelových profilů, uložený na podvozku s kolečky a rektifikačními patkami. To umožňuje jednak přesné ustavení zařízení v prostoru linky, jednak jeho případné přemístění při změně uspořádání linky. Na horní části rámu jsou uchyceny podélné nosníky, které nesou lineární vedení pojezdu měřicí hlavy. Tato lineární vedení jsou řešena jako standardní valivá vedení HIWIN HGR20R. Vlastní vozíky pro měřicí hlavu jsou typu HGH20, opět z řady HIWIN. Volba katalogového lineárního vedení namísto vlastní „kolejnice“ zajišťuje dostatečnou tuhost a přesnost vedení a zároveň usnadňuje montáž a seřízení.

Měřicí hlava se snímačem je nesena na vozících HGH20 a pohybována pomocí ozubeného řemene. Pro pohon byl zvolen profilový řemen HTD 5M o šířce 25 mm s odpovídajícími řemenicemi. Řemen pracuje jako oběžná smyčka mezi hnací a napínací řemenicí a je kotven k nosné desce měřicí hlavy. Tento způsob pohonu byl zvolen kvůli tichému chodu, snížení vibrací, dostatečné přesnosti polohování pro účely měření průhybu a jednoduché konstrukci bez citlivých závitových tyčí v dlouhé délce. Hnací moment dodává elektromotor Siemens 1LA7073-4AB12, který přes šnekovou převodovku BONFIGLIOLI VF 44/P1 7 P71 B14 snižuje otáčky a zvyšuje dostupný krouticí moment pro rozběh a brzdění měřicí hlavy. Motor, převodovka, řemenice a řemen tvoří ucelený pohonný uzel, který je mechanicky uložen na čele rámu zařízení.

Pod tyčí je navržen systém nastavitelných podpor, které zajišťují definovanou výšku tyče v průběhu měření. Podpory jsou vedeny po samostatné kolejnici s vozíkem, opět na bázi lineárního vedení HIWIN HGR20R. Uspořádání umožňuje podélně posouvat jednotlivé podpěry

a přizpůsobit tak měřicí úsek různým délkám tyčí. Vlastní podpěrné „vidlice“ nebo lože tyče jsou zakázkové díly vycházející z 3D modelu – tvarově respektují požadovaný průměr tyče a umožňují její opakovatelné uložení bez výrazného poškození povrchu.

Všechny pohyblivé kabely od snímače, motoru a případných senzorů jsou vedeny v energetickém řetězu IGUS B17.2.048. Ten je uložen podél jednoho boku rámu a sleduje pohyb měřicí hlavy po celé délce pojezdu. Použití standardního energetického řetězu zajišťuje ochranu kabeláže proti mechanickému poškození a zároveň udržuje minimální poloměr ohybu podle požadavků výrobců kabelů a snímače.

Konstrukčně byly jako zakázkové díly řešeny zejména nosné desky měřicí hlavy, konzoly pro uchycení lineárních vedení na rám, speciální držáky podpor tyče a plechové kryty kolem pohonu a elektrických částí. Tyto díly byly navrženy v CAD systému podle rozměrů zvolených katalogových komponent a následně vyrobeny externě (pálený plech, svařence, obráběné bloky). Naopak lineární vedení HIWIN, vozíky HGH20, ozubený řemen a řemenice, elektromotor Siemens, šneková převodovka Bonfiglioli, energetický řetěz IGUS a samozřejmě samotný snímač Balluff BLA 32D-002-S4 byly převzaty jako katalogové komponenty bez zásahu do jejich konstrukce.

Po kompletaci 3D modelu byly z konstrukce odvozeny kusovníky, které jednoznačně rozdělují nakupované komponenty a vyráběné díly. Montáž prototypu probíhala podle tohoto modelu a v závěru byla využita i pro kontrolu dosažitelnosti a možných kolizí s manipulátorem. Detailní CAD model tak v celém procesu sloužil nejen jako podklad pro výrobu, ale i jako nástroj pro ověření, že navržená geometrie rámu, pojezdu i podpor umožní spolehlivé měření průhybu v požadovaném rozsahu délek tyčí.

2.5.2 Mechanická koncepce měřicí hlavy

Cílem měřicí hlavy je zajistit stabilní a opakovatelný průjezd nad horní hranou tyče tak, aby hrana po celou dobu zůstávala v pracovním okně obou clon $\pm 45^\circ$. Konstrukce se proto soustředí na tuhé, jemně stavitelné uložení snímače, plynulý lineární pohyb bez rázů, účinnou ochranu okna snímače před nečistotami a bezpečné vedení kabeláže, které pohyb nijak neomezuje.

Použitým prvkem je světelná clona (light array) Balluff BLA 32D-002-S4; ve stejném průřezu pracují dvě clony (U_1 , U_2) orientované pod úhly $+45^\circ$ a $+135^\circ$ k osám Y/Z. Výstup je poskytován v milimetrech prostřednictvím rozhraní IO-Link. Snímač je uložen na tuhém rameni s jemnou justací ve dvou náklonech (pitch/yaw) a s podélným posuvem pro nastavení pracovní vzdálenosti snímače od horní tyče. Uspořádání umožňuje přesně nastavit vzájemnou kolmost směrů U_1 a U_2 ; cílová tolerance kolmosti je přibližně $\pm 0,5^\circ$. Pracovní vzdálenost se volí tak, aby horní hrana tyče byla uprostřed pracovního okna a měla rezervu i při maximálně očekávaném průhybu. V praxi se poté nastaví na zkušební tyči a krátkým zkušebním přejezdem se ověří, že signál v žádném místě nevypadává z okna.

Pohyb zajišťuje jednoosé lineární vedení s nízkou vůlí (např. profilová lišta/vozik Hiwin). Dráha přejezdu je udržována rovnoběžně s osou tyče; odchylky je vhodné držet v řádu desetin milimetru na délku pole. Pohon s plynulým rozjezdem a dojezdem (S-křivka) minimalizuje dynamické rázy; zrychlovací a brzděné fáze je vhodné umístit mimo oblast očekávaného extrému

(střed mezi podporami). Mechanické dorazy vymezují bezpečné krajní polohy tak, aby snímač nikdy „nepřešel“ mimo okno na začátku ani na konci trasy.

Okno snímače je chráněno průhledným štítkem/krytem proti prachu a olejové mlze; kryt se snadno sejímá kvůli čištění a současně omezuje přímé boční oslnění (světlíky, svítidla). Nosné prvky a spoje jsou z nerezových či hliníkových profilů s pevnými aretačními šrouby; nastavovací prvky jsou opakovatelné a opatřené jemnou stupnicí, aby bylo možné po zásahu reprodukovat původní nastavení.

Kabely jsou vedeny v energetickém řetězu s kontrolovaným poloměrem ohybu; jsou zajištěny proti vytržení a fixovány jak na pohyblivém vozíku, tak v pevných bodech. Délková rezerva (smyčka) je dimenzována pro krajní polohy, aby kabel neovlivňoval plynulost pohybu ani jemné natočení držáku. Pro spolehlivost a z důvodu dodržení pravidel elektromagnetické kompatibility (EMC) se používají výrobcem doporučené IO-Link kabely a konektory; připojení je chráněno proti tahu a vibracím. Datový tok je přenášen digitálně v milimetrech přímo do PLC/HMI.



Obr. 2: Zakládání tyče

Zdroj: Snímek obrazovky z videa ExactCut Circular Saws TAC75 & TAC155 | Automated Cutting (YouTube, [cit. 2025-10-27])

2.5.3 Posuvné podpory a měření napříč délkou

Účelem posuvných podpor je umožnit uložení tyčí různé délky tak, aby bylo možné bezpečně měřit po celé jejich délce během plynulého přejezdu a aby horní hrana po celou dobu zůstávala v pracovním okně obou clon. Používají se dvě posuvné, aretovatelné podpory, jejichž poloha se přizpůsobuje aktuální délce L. Tato část popisuje princip uložení, nastavení a praktické detaily obsluhy.

Na společném rámu jsou dvě posuvné podpory, které lze rychle nastavit do požadované vzdálenosti od čel tyče. Kontaktní plocha podpory je hladká a dostatečně široká, aby nevznikalo vtlačení do povrchu; podle potřeby může být doplněna vložkou s vyšším třením, která brání nechtěnému posuvu obrobku. Výška uložení je definovaná – tyč neleží na nerovnostech a nemá vůle, které by během přejezdu měnily její polohu. Tvar podpor je prizmatický a jejich konstrukce je navržena tak, aby nezastínila snímač ani neomezovala pracovní okno.

Protože měření probíhá po celé délce tyče, je přejezd plánován tak, aby snímač pokryl i krátký přesah před prvním a za druhým uložením; tím se do záznamu dostanou i okrajové úseky. Podpory jsou nastaveny podle doporučení a $\approx 0,223 \cdot L$, takže gravitační průhyb je minimální a získaná data věrně reprezentují průhyb tyče v celé délce, nikoli lokální deformace způsobené uložením. Během snímání se tyč dále nepřidrhuje ani nedotlačuje, aby nedocházelo ke zkreslení průběhů.

Pokud hrana ve středu vyjíždí z okna, zpravidla pomůže upravit polohu podpor blíže ke koncům (menší gravitační průhyb) a případně doladit pracovní vzdálenost. Nečekané skoky hodnot při najetí nebo odjetí bývají důsledkem nerovnoměrného rozjezdu či špatně nastavených dorazů; start a stop je vhodné posunout mimo vyhodnocovaný úsek a zajistit plynulý profil rychlosti. Lokální nestabilita v konkrétním místě často souvisí s nečistotami na kontaktní ploše podpory nebo s povolenou aretací – stačí vyčistit a dotáhnout.

2.5.4 Optimální poloha podpor

Poloha dvou podpor přímo ovlivňuje gravitační průhyb měřeného prutu během přejezdu. Uvažujeme standardní model Euler–Bernoulliho prutu s rovnoměrným zatížením vlastní tíhou (zatížení na jednotku délky q), konstantní tuhostí v ohybu (EI) a dvěma jednoduchými podporami umístěnými symetricky ve vzdálenosti a od čel tyče ($x = a$ a $x = L - a$). Cílem je zvolit a tak, aby se minimalizoval největší průhyb (Verdirame, 2016).

Analytické řešení vede k tomu, že v optimální konfiguraci se „vyrovnají“ tři potenciální extrémy průhybu (středový a dva symetrické v okolí podpor). Z podmínek rovnosti extrémů vychází poměr pro každou podporu od příslušného čela prutu (Verdirame, 2016).

$$a/L \approx 0,223$$

tedy

$$a \approx 0,223 \cdot L$$

kde

a – vzdálenost každé podpory od bližšího čela prutu [m]

L – celková délka prutu [m]

a/L – relativní vzdálenost podpory od čela prutu [–]

Pro praktické nastavení podpor:

- 1) Změř délku tyče L .
- 2) Spočítej $a = 0,223 \cdot L$ (zaokrouhli na celé mm).
- 3) Nastav obě podpory symetricky ve vzdálenosti a od čel tyče.

Model předpokládá rovnoměrné zatížení vlastní tíhou a konstantní EI; pro běžné štíhlé ocelové tyče je odchylka od praxe zanedbatelná (Verdirame, 2016).

2.5.5 Automatizovaná manipulace robotem Fanuc

Zařízení je určeno pro plně automatizovaný provoz, a proto byl pro manipulaci s měřeným materiálem použit robot. Cílem této kapitoly je popsat, jak je řešena bezobslužná manipulace s tyčemi: průmyslový robot Fanuc odebírá nařezané kusy z pily, zakládá je do měřicí stanice a po vyhodnocení je třídí do příslušných beden podle výsledku δ_{celk} (akceptován / neakceptován). Automatizace tím snižuje variabilitu spojenou s ručním zakládáním, zkracuje celkový čas cyklu a zvyšuje opakovatelnost měření.

Materiálový tok je navržen přímočaře: z pily robot odebere tyč, přesune ji do měřicí stanice a uloží ji na posuvné podpory nastavené podle délky L . Po založení proběhne plynulý přejezd a záznam, stanice po dojetí spočte δ_{celk} a stav předá robotu. Na základě obdržené informace robot provede odložení do vyhrazeného místa pro akceptované kusy, případně do bedny pro kusy určené k vyřazení nebo doplňkové kontrole.

Robot je vybaven paralelním pneumatickým chapadlem SCHUNK PGN+P. Prsty chapadla jsou tvarově přizpůsobeny zpracovávaným průměrům tak, aby při uchopení nedocházelo k poškození povrchu ani k nechtěnému prokluzu. Pohyby jsou řízeny bez rázů a po uložení do měřicí stanice není tyč během měření přidržována — zůstává volně opřena o podpory, což zajišťuje nezávislost výsledku na manipulačních silách.

Založení musí být opakovatelné a geometricky přesné: tyč se ukládá bez „zaklopení“ a bez lokálního vtlačení do podpor, aby horní hrana po celé délce zůstala v pracovním okně obou clon. Správné založení je předpokladem pro spolehlivé určení extrémů a tím i pro výpočet δ_{celk} , program zakládání proto respektuje polohu podpor i jejich výšku a vede tyč do ustálené polohy s minimem korekcí.

Komunikace je realizována jednoduchým potvrzovacím protokolem: stanice signalizuje „připraveno“, robot založí tyč a potvrdí „založeno“, stanice provede měření a po zpracování výsledku předá stav „výsledek“. Robot následně provede „odloženo“ a cyklus se uzavírá. Přenos výsledku má formu stavové informace (akceptován / neakceptován, případně „k doplňkové kontrole“). Implementační detaily (PLC/HMI/fieldbus) nejsou předmětem této práce; klíčové je, že rozhraní jednoznačně určuje odpovědnost a pořadí kroků.

Prostředí pily a pracovní prostor je vybaven krytím a bezpečnostními prvky, trajektorie robota jsou vedeny tak, aby se vyhnuly optické ose snímačů i mechanice měřicí hlavy. Kabeláž a kryty měřicí sestavy jsou navrženy s ohledem na pohyby robota, aby nedocházelo ke kolizím ani k vytržení vedení. Při změně sortimentu (délka L , průměr) se přestaví posuvné podpory, robotický program respektuje definované pracovní zóny a bezpečné odstupy a udržuje konzistentní založení pro všechny varianty.

2.5.6 Shrnutí kapitoly

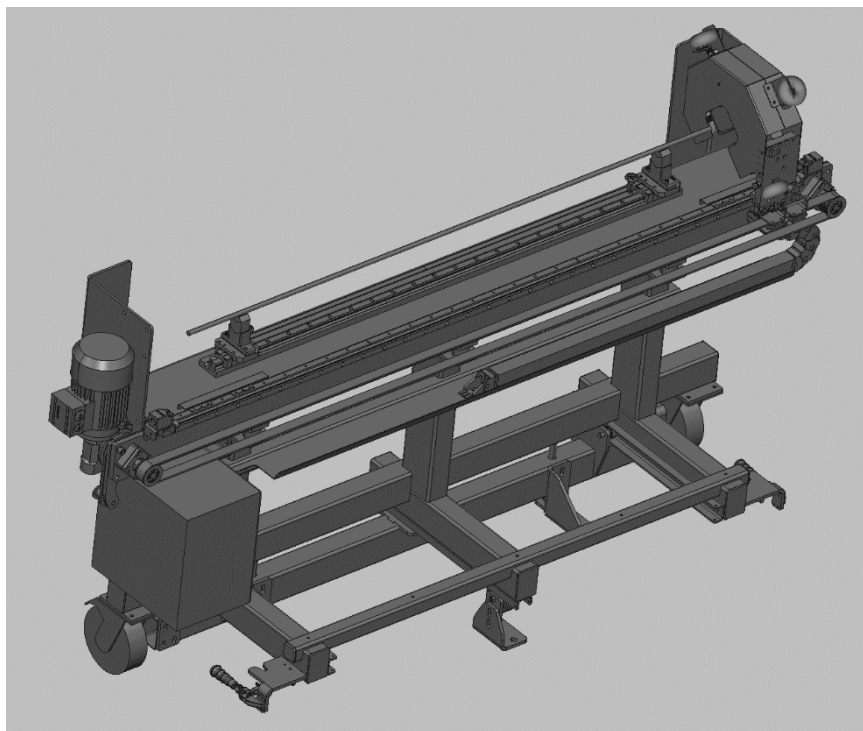
Tato kapitola shrnuje konstrukční a provozní řešení měřicí stanice tak, aby při plynulém přejezdu zůstávala horní hrana tyče v pracovním okně dvojice clon $\pm 45^\circ$ (Balluff BLA 32D-002-S4, IO-Link v mm) a bylo možné spolehlivě stanovit δ_{celk} z rozsahů ΔU_1 a ΔU_2 .

Měřicí hlava je uložena tuze s jemnou justací směřů $\pm 45^\circ$ a s kontrolovanou pracovní vzdáleností snímače od horní hrany tyče; pohyb zajišťuje lineární vedení s plynulým rozjezdem a dojezdem, okno snímače je chráněno proti prachu a oslnění. Tyč je ukládána na dvě posuvné podpory pro libovolnou délku L ; pro omezení gravitačního průhybu je doporučena poloha $a \approx 0,223 \cdot L$. Přesun dat zajišťuje standardní rozhraní IO-Link, předávaná data jsou udávána v milimetrech; do archivu se ukládají pouze nezbytná data.

Obsluha nachystá bedny pro odkládání materiálu, nastaví podpory, spustí přejezd a po dojetí zkontroluje δ_{celk} . Zapisují se minimální údaje: L , ΔU_1 , ΔU_2 , δ_{celk} , čas a stavové příznaky.

Ztráta pokrytí okna se řeší úpravou pracovní vzdálenosti nebo polohy podpor, nedostatek vzorků mezi podporami odstraní nižší rychlost či vyšší vzorkovací frekvence, oslnění a saturace se tlumí krytváním a pravidelným čištěním okna. Po mechanickém zásahu se provádí krátký kontrolní přejezd na referenční tyči.

Měření stínu hrany je robustní vůči lesku a proměnlivému osvětlení, max-min vyhodnocení je nezávislé na posunutou nulovou polohu a celý cyklus probíhá jedním průjezdem s výsledkem přímo v mm.



Obr. 3: 3D model měřicího zařízení

Zdroj: Vlastní zpracování

2.6 Ověření funkčnosti a robustnost

Cílem této kapitoly je ukázat, jak v reálném provozu ověřit stabilitu a spolehlivost metody bez vracení se k binárnímu rozhodování. Zaměříme se na indikátory kvality měření, zkoušky robustnosti a jednoduché hlídače posunu v čase – tak, aby výsledek δ_{celk} byl dlouhodobě důvěryhodný.

2.6.1 Indikátory kvality měření

Pro každý přejezd se vedle výsledku δ_{celk} vyplatí ukládat také několik indikátorů kvality. Nejsou to limity, ale „zdravotní stav“ měření, který pomáhá včas zachytit problém bez zásahu do vlastní metodiky.

Pokrytí okna

$r_{\text{cov}} = (\text{počet vzorků, kde je hrana současně v pracovním okně obou clon}) / (\text{celkový počet vzorků})$.

Vyjadřuje, jak často byla hrana skutečně platně snímána oběma směry. Hodnoty blízké 1 znamenají dobré pokrytí; pokles ukazuje na špatnou pracovní vzdálenost snímače, ztrátu hrany nebo občasné výpadky.

Maximální souvislý výpadek

$t_{\text{drop max}} = \text{nejdelší souvislý čas bez platného vzorku}$.

Jednorázový dlouhý výpadek je kritičtější než sporadické jednotlivé ztráty; metrika odhalí problémy s kabeláží, oslněním či nevhodným stíněním okna.

Podíl saturace

$r_{\text{clip}} = (\text{počet vzorků „na dorazu“ rozsahu alespoň u jedné clony}) / N$.

Vyšší r_{clip} typicky značí oslnění, nevhodnou pracovní vzdálenost snímače nebo znečištěné okno; pomáhá rozlišit, zda je problém optický, nebo mechanický.

Počet vzorků mezi podporami (dostatečnost dat)

Počet platných vzorků N_{sb} nasbíraných mezi podporami je jedním z parametrů kvality dat. Je-li N_{sb} nízké, hrozí, že numericky určené minimum a maximum nebudou odpovídat skutečným extrémům průhybu a průběh deformace bude zkreslený. Počet vzorků proto musí být volen s ohledem na charakter deformací – zejména na jejich frekvenci a délku. Vzdálenost mezi dvěma vzorky by měla být výrazně menší než charakteristická délka změny průhybu. Přičemž konkrétní hodnota vychází z kombinace zvolené rychlosti přejezdu v a vzorkovací frekvence f_s .

Symetrie projekcí (diagnostický ukazatel)

$s_{\text{sym}} = |\Delta U_1 - \Delta U_2| / (\Delta U_1 + \Delta U_2)$

Tento parametr nerozhoduje kritérium „dobře/špatně“, ale upozorňuje, že výrazná nesymetrie může signalizovat neobvyklou geometrii, chybnou justaci +45° nebo nevhodnou pracovní vzdálenost snímače od horní hrany tyče.

2.6.2 Hlídač dlouhodobého posunu v čase

Cílem tohoto sledování je v běžném provozu včas odhalit pozvolné změny měřicí soustavy, aniž by bylo nutné zavádět složité statistické postupy. Jako základní ukazatel trendu se používá posuvný medián δ_{celk} , který se počítá z okna posledních 7–30 měření. Aktuální hodnota se průběžně porovnává s mediánem; náhlá odchylka od této referenční úrovně, doprovázená současným poklesem r_{cov} (pokrytí okna) nebo nárůstem r_{clip} (podíl saturace), je praktickým signálem k rychlé kontrole stavu (čistota a krytování okna, pracovní vzdálenost snímače, jemná justace).

Pro zvýraznění pomalých posunů, které se na samotném mediánu projeví jen zvolna (např. postupné špinění okna nebo nepatrný posun držáku), lze doplnit jednoduchý filtr EWMA:

$$z_t = \lambda \cdot \delta_{celk} + (1 - \lambda) \cdot z_{t-1}$$

s doporučenou $\lambda \approx 0,2-0,3$.

kde

z_t – vyhlazená hodnota celkového průhybu v cyklu t [mm]

δ_{celk} – aktuální (nemodifikovaná) hodnota celkového průhybu v cyklu t [mm]

z_{t-1} – vyhlazená hodnota z předchozího cyklu [mm]

λ – váhový parametr filtru EWMA [–]

t – index cyklu / měření [–]

Počáteční hodnota z_0 se nastaví na první dostupné měření nebo na medián úvodního okna. EWMA tlumí náhodný šum a současně citlivěji zachytí plíživé změny, které by jinak unikaly pozornosti.

V praxi je možné doplnit trendové ukazatele o „semafor“ z provozních metrik. Pokud r_{cov} dlouhodobě klesá, je vhodné provést kontrolu pracovní vzdálenosti snímače a čistoty/krytování okna (varovná úroveň). Naopak rostoucí r_{clip} obvykle ukazuje na oslnění nebo zanesení a vyžaduje stínění a vyčištění. Výrazně prodlužující se $t_{drop\ max}$ (nejdelší souvislý výpadek platných vzorků) je důvodem k okamžité kontrole kabeláže, rozhraní IO-Link a transparentního krytu. Tato jednoduchá kombinace mediánu, EWMA a „semaforu“ dává přehled o dlouhodobé stabilitě měření bez nutnosti zavádět složité statistické testy.

2.6.3 Dohledatelnost a práce s daty

Pro dohledatelnost a pozdější analýzy se u každého měření ukládají minimálně: datum a čas, délka L (včetně nastavení a), hodnoty ΔU_1 a ΔU_2 , výsledná δ_{celk} , dále provozní indikátory r_{cov} , r_{clip} , $t_{drop\ max}$ a počet platných vzorků mezi podporami N_{sb} . Doba uchování se řídí interní politikou závodu; v praxi se osvědčuje krátkodobý detailní archiv v řádu týdnů a dlouhodobé souhrny a

agregace dat v řádu měsíců. Pro jasné označení záznamů je vhodné používat jednotný vzor názvu souboru nebo záznamu, například:

YYYY-MM-DD_hhmm_L{mm}_delta{mm}_recID.ext

kde {mm} představují hodnoty v milimetrech a recID je interní identifikátor měření.

Dohledání a zpětná kontrola se provádí zejména tehdy, když se objeví neobvyklý trend δ_{celk} , současně se zhorší indikátory r_{cov} či r_{clip} , nebo se opakovaně prodlužuje $t_{\text{drop max}}$. V těchto případech je k dispozici dostatek kontextu k rychlé diagnostice bez nutnosti uchovávat celé časové průběhy všech signálů.

2.6.4 Limity metody a poznámka k rozšíření

Zvolená metoda záměrně reportuje jedinou skalární veličinu δ_{celk} bez směrové informace. Pro běžné provozní třídění je tento přístup nejpraktičtější: umožňuje rychlé rozhodnutí na základě jednoho čísla a minimalizuje potřebu další interpretace. Směr průhybu (Y/Z) proto není povinnou součástí výstupu.

Pokud by v konkrétních případech byla nutná podrobnější diagnóza, lze ze stejných dat dopočítat i složky ΔY a ΔZ . Vychází se z toho, že měření probíhá ve dvou šikmých projekcích $\pm 45^\circ$, takže převod z dvojice ΔU_1 , ΔU_2 na kartézské složky je čistě geometrická transformace (viz kap. 6.4). Tato doplňková analýza může pomoci například při potvrzení směru namáhání, při hledání chybné justace či při ladění mechaniky, avšak není vyžadována pro rutinní provoz.

Rekonstrukce průběhu $\delta(x)$ po celé délce tyče není v této práci zaváděna. Pro smysluplné profilové sledování by bylo nutné archivovat celé časové série $U_1(x)$, $U_2(x)$ včetně synchronizované polohy x , řešit větší datový objem a zavést jednoznačnou metodiku filtrování a detekce extrémů. Takový režim je vhodný spíše pro servisní diagnostiku nebo vývojové testy než pro každodenní provoz.

Shrnutá omezení jsou tedy volbou účelné jednoduchosti, dávají rychlý, robustní a snadno interpretovatelný výsledek pro výrobu, přičemž případná rozšíření ($\Delta Y/\Delta Z$, profil $\delta(x)$) lze doplnit bez změny použité sensoriky, pokud to bude v budoucnu potřeba.

2.7 Závěr praktické části

Praktická část práce popsala, navrhla a zdůvodnila měřicí řešení průhybu tyčového materiálu založené na světelných clonách $\pm 45^\circ$ (Balluff BLA 32D-002-S4) s výstupem v milimetrech přes průmyslové rozhraní IO-Link. Oproti úvodně zkoušenému odrazovému laserovému snímači, který u leštěných tyčí v proměnlivém osvětlení haly vykazoval nestabilitu, je zvolený princip založený na detekci stínu hrany vůči těmto vlivům výrazně robustnější.

Měřicí strategie je záměrně jednoduchá a provozně proveditelná: jedním plynulým přejezdem v celé délce tyče se současně snímají dvě šikmé clony (U_1 , U_2). Po dojetí se pro každou clonu vezme rozsah hodnot (max-min) přes celý záznam a z dvojice ΔU_1 , ΔU_2 se přímo spočítá výsledná veličina δ_{celk} . Tato metodika je nezávislá na posunutí nulové polohy (není třeba učit nulu pro každou tyč), nevyžaduje analogové škálování a dobře se zapojuje do PLC/HMI.

Konstrukční část stanovila praktické požadavky na měřicí hlavu (tuhé uložení, jemná justace $\pm 45^\circ$, kontrolovaná pracovní vzdálenost snímače od horní hrany tyče, krytování okna), na vedení přejezdu (plynulost, dorazy) a na posuvné podpory. Bylo odůvodněno doporučení nastavení podpor ve vzdálenosti $a \approx 0,223 \cdot L$ od čel, které snižuje gravitační průhyb a pomáhá udržet hranu v pracovním okně v celém úseku. Do řešení je zapojena i automatizovaná manipulace robotem Fanuc s chapadlem SCHUNK PGN+P, která snižuje variabilitu způsobenou ručním zakládáním a zkracuje vedlejší časy.

Pro ověření funkčnosti byly místo opakovaného binárního hodnocení definovány provozní indikátory kvality (pokrytí okna, maximální výpadek, podíl saturace, počet vzorků mezi podporami, rychlý ukazatel opakovatelnosti), scénáře krátkých zkoušek robustnosti a jednoduché hlídače dlouhodobého posunu v čase (trend/medián, volitelně EWMA). Tyto prvky poskytují praktickou „zdravotní kartu“ měření a umožňují včas odhalit degradaci (znečištěné okno, oslnění, posun pracovní vzdálenosti snímače či justace) dříve, než ovlivní výrobu.

Omezení metody jsou vědomě zvolená: výstupem je skalární velikost průhybu δ_{celk} bez směru; profil po délce tyče se nerekonstruuje a není zaveden detailní model nejistot nad rámec provozních ukazatelů. V případné budoucí rozšiřující fázi lze ze stejných dat dopočítat složky ΔY a ΔZ či doplnit servisní režim s archivem průběhů $U_1(x)$, $U_2(x)$ pro diagnostiku speciálních případů.

Celkově řešení splňuje zadání: umožňuje bezkontaktní, rychlé a reprodukovatelné stanovení velikosti průhybu napříč délkou tyče v reálných podmínkách výrobní haly. Přínosem je jednoduchý a srozumitelný výstup v mm, provozní robustnost vůči proměnlivému osvětlení a praktická udržitelnost díky jasným mechanickým zásadám, pracovní instrukci a minimální, ale užitečné archivaci.

Závěr

Hlavní výzkumná otázka této práce zněla, zda lze navrhnout a realizovat bezkontaktní měřicí systém, který jedním přejezdem po celé délce tyče spolehlivě určí velikost průhybu v milimetrech a bude dlouhodobě použitelný v podmínkách výrobní haly. V rámci práce byl systém navržen, zkonstruován a integrován do automatizované manipulační stanice. Výsledné zařízení bylo instalováno a uvedeno do provozu u průmyslového zákazníka a v době dokončení práce je používáno ve výrobní hale pro třídění tyčového materiálu podle hodnoty δ_{celk} . Lze tedy uzavřít, že navržený princip je prakticky ověřen a splňuje cíle vymezené v úvodu práce alespoň v rozsahu běžného provozu na konkrétní výrobní lince. Kombinace dvojice světelných clon orientovaných v šikmých směrech ($\pm 45^\circ$ a $\pm 135^\circ$) s vyhodnocením rozsahů signálu ΔU_1 a ΔU_2 (max-min) a následným výpočtem výsledné metriky δ_{celk} naplnila požadavek jednoduchého, rychlého a reprodukovatelného měření, které je navíc inherentně odolné vůči posunutí nule. Úvodně zvažovaná laserová triangulace se ukázala jako méně vhodná pro leštěné povrchy v proměnlivém osvětlení; přechod na princip světelné clony, jenž pracuje se stínem hrany místo spekulárního odrazu, proto odstranil klíčový zdroj nestability.

Původní přínos autora spočívá zejména v definici provozní metriky δ_{celk} odvozené z dvojice ΔU_1 , ΔU_2 pro jedno přejezdové měření po celé délce tyče, v návrhu a justaci měřicí hlavy se šikmým snímáním včetně praktických zásad (pracovní vzdálenost snímače, krytování oken, jemná kolmost), a v zavedení sady jednoduchých indikátorů kvality měření (r_{cov} , r_{clip} , $t_{\text{drop max}}$, N_{sb}), které umožňují včas odhalit degradaci vlivem znečištění, rozladění justace nebo oslnění. Dále bylo odůvodněno doporučení k umístění podpor přibližně na $a \approx 0,223 \cdot L$, které napomáhá průběžnému udržení hrany v pracovním okně během přejezdu. Začlenění výstupu v jednotkách milimetrů přes IO-Link potvrdila snadné napojení na PLC/HMI a umožnila hospodárnou archivaci klíčových veličin pro trendové sledování a SPC.

Z hlediska využitelnosti výsledků je navržený postup vhodný pro třídění přímo na lince i pro vstupní či provozní kontroly. Nevyžaduje nulování každého kusu, klade minimální nároky na obsluhu a údržbu a díky skalárnímu výsledku δ_{celk} usnadňuje jednoznačné nastavení rozhodovacích prahů v řízení výroby. Limity metody jsou záměrné: práce reportuje velikost průhybu bez určení jeho směru a nezavádí rekonstrukci profilu $\delta(x)$ po délce ani úplnou metrologickou bilanci kombinované nejistoty; dosažitelná přesnost proto závisí na dodržení mechanicko-optických zásad (pracovní vzdálenost snímače, kolmost, čistota a krytování oken) a správném ustavení podpor.

Pro další bádání se nabízí dopočet směrových složek (ΔY , ΔZ) z již získaných ΔU_1 a ΔU_2 v případech, kdy je žádoucí podrobnější diagnostika ohybu, a také servisní režim s omezeným záznamem průběhů $U_1(x)$, $U_2(x)$ pro řešení sporadických neshod a kořenových analýz. Za přínosné lze považovat i systematické R&R studie a kvantifikaci kombinované nejistoty v různých provozních scénářích a rozšíření ověření na širší škálu průměrů, povrchů a materiálů. Práce prokazuje, že parametr δ_{celk} získaný z dvojité světelné clony a snímání během jediného přejezdu je prakticky použitelná, robustní vůči posunu nuly i proměnlivým světelným podmínkám a snadno začlenitelná do automatizovaných linek.

Seznam použité literatury

- ČSMS. Metodika měření číselníkovými a páčkovými úchylkoměry. Praha: Český svaz měření a mechatroniky, 2018. [online]. [cit. 2025-8-31]. Dostupné z: https://www.spolky-csvts.cz/cms/sites/default/files/mpm_1120418_metodika_mereni_ciselnikovymi_a_packovymi_uchylkomery_0.pdf
- PETŘKOVSKÁ, L.; ČEPOVÁ, L. Metrologie a řízení kvality. Online. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2012. [cit. 2025-8-31]. Dostupné z: https://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/metrologie_a_rizeni_kvality.pdf
- TICHÁ, Š. Strojírenská metrologie. Online. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2004. [cit. 2025-8-31]. Dostupné z: <https://books.fs.vsb.cz/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf>
- DUKENDJIEV, Georgi; DIAKOV, Dimitar; NIKOLOVA, Hristiana; VASSILEV, Velizar a MITEVA, Rositsa. Evaluation the Performance of Stationary Coordinate-Measuring Systems with MSA Methodology. Online. IEEE, 2022. ISBN 978-1-6654-8569-2. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9992579/citations?tabFilter=papers#citations>. [cit. 2025-08-09].
- PETŘKOVSKÁ, L.; Technická měření a metrologie – Teoretický základ. Online. Ostrava: VŠB – TUO, 2013. [cit. 2025-8-31]. Dostupné z: https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_025/Technick%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20a%20metrologie%20-%20Teoretick%C3%BD%20z%C3%A1klad/02%20Text%20pro%20e-learning/Technick%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20a%20metrologie%20-%20Teoretick%C3%BD%20z%C3%A1klad_13.pdf
- TICHÁ, Š.; MRKVICA, I.; Vybrané kapitoly ze strojírenské technologie. Online. První vydání. Ostrava: VŠB – TUO, 2012. ISBN 978-80-248-2709-4. [cit. 2025-8-31]. Dostupné z: <https://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2709-4.pdf>
- HRABEC, I.; HELEBRANT, F.; MAZALOVÁ, J.; TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA A SPOLEHLIVOST III. Online. Ostrava: VŠB – TUO. 2006. [cit. 2025-8-31]. Dostupné z: <https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/340/.content/galerie-souboru/vyuka/Technicka-diagnostika-III-Ustavovani-stroju-skripta.pdf>
- HALAMA, R.; ADÁMKOVÁ, L.; FOJTÍK, F.; FRDRÝŠEK, K.; ŠOFER, M.; ROJÍČEK, J.; FUSEK, M.; Pružnost a pevnost. Online. Ostrava: VŠB – TUO. 2011. [cit. 2025-8-31]. Dostupné z: https://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/pruznost_a_pevnost.pdf
- YOUNG, C. W.; BUDYNAS, G. R.; Roark's Formulas for Stress and Strain. Online. 7th ed. New York: McGraw-Hill, 2002. [cit. 2025-8-31]. Dostupné z: <https://jackson.engr.tamu.edu/wp-content/uploads/sites/229/2023/03/Roarks-formulas-for-stress-and-strain.pdf>
- BELIAEV, N. M.; Strength of Materials. Online. Moscow: Mir Publishers, 1979. [cit. 2025-8-31]. Dostupné z: <https://btpm.nmu.org.ua/en/students/subject/Belyaev-Strength-of-Materials-Mir-1979.pdf>
- KEYENCE.; Multi-Purpose CCD Laser Micrometer – IG Series. [online]. n. d. [cit. 2025-8-31]. Dostupné z: <https://www.keyence.eu/products/sensor/positioning/ig/>

MICRO-EPSILON.; optoCONTROL – Optical precision micrometers (ODC2600). Online. n. d. [cit. 2025-8-31]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.cz/fileadmin/download/excerpts/dax--optoCONTROL-2600--en.pdf>

EDMUND OPTICS.; Telecentric Illumination – Why You Need It in Machine Vision Applications. Online. n. d. [cit. 2025-8-31]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/telecentric-illumination-why-you-need-it-in-machine-vision-applications/>

BALLUFF.; BLA 32D-002-S4: Light Array – Datasheet. Online. [cit. 2025-8-8]. Dostupné z: <https://publications.balluff.com/pdfengine/pdf?type=pdb&id=269896&con=cs>

Verdirame, J.; Airy Points, Bessel Points, Minimum Gravity Sag, and Vibration Nodal Points of Uniform Beams Online. Mechanics & Machines. 2016 [cit. 2025-8-8]. Dostupné z: <https://mechanicsandmachines.com/?p=330>

EXACTCUT S.R.O.; ExactCut Circular Saws TAC75 & TAC155 | Automated Cutting ... [online]. YouTube, 25.3.2025 zveřejnění. [cit. 2025-10-27]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=pzXF4YpEhs>

Přílohy

Příloha 3D model měřícího zařízení (.stp)