

Řízení technologického pohybu pomocí krokového motoru s využitím měření odchylky od žádaného stavu z obrazu

Bc. Jiří Zátopek

Diplomová práce
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří Zátopek**
Osobní číslo: **A13436**
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Řízení technologického pohybu pomocí krokového motoru s využitím měření odchylky od žádaného stavu z obrazu**

Téma anglicky: **Technological Movement Control by Means of a Stepper Motor with the Utilization of Measurements of Deviation from the Requisite State Using Image Evaluation**

Zásady pro vypracování:

1. Nakreslete v 3D (SolidWorks) reálné základní funkční části uspořádání technologického zařízení.
2. Vytvořte simulační model (nejlépe fyzikální) uspořádání, včetně krokového motoru.
3. Provedte sérii plánovaných simulačních experimentů s fyzikálním (nebo kybernetickým – simulink) modelem za účelem jeho ověření a výsledky analyzujte.
4. Na základě simulačních experimentů proveďte analýzu a návrh řízení pohybu technologického efektoru.
5. Vytvořte algoritmy zpracování obrazu interakce efektoru a objektu zpracování.
6. S použitím optického měření odchylky výsledku činnosti zařízení navrhnete a realizujete řízení technologického pohybu efektoru.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. FREIBAUER, M., H. VLÁČILOVÁ a M. VILÍMKOVÁ. Základy práce v CAD systému SolidWorks. 2., aktualiz. vyd. Brno: Computer Press, 2010, 326 s. ISBN 978-80-251-2504-5.
2. ÚŘEDNÍČEK, Z. Elektromechanické akční členy. 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009. ISBN 978-807-3188-351.
3. Mann, H.,. Modelling and Simulation, DynLab, Course on Dynamics of multidisciplinary and controlled System, Computing and Information Centre Czech Technical University in Prague. 2006.
4. Sojka, E., Gaura, J., Krumnikl, M.:Matematické základy digitálního zpracování obrazu, Skripta VŠB-TU Ostrava a ZU Plzeň 2012.
5. CASTLEMAN, K.R. Digital image processing. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1996, xvii, 667 s. ISBN 01-321-1467-4.
6. ÚŘEDNÍČEK, Z. Robotika. 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2012. ISBN 978-80-7454-223-7.
7. VALÁŠEK, M. Kinematika robotických systémů [online]. ČVUT v Praze, 2011 [cit. 2015-01-29]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1102.pdf. Učební texty k semináři. ČVUT v Praze.
8. Rosenberg, R. C.: "MultiportModels in Mechanics". Trans. ASME, sept 1972

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Zdeněk Úředníček, CSc.

Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání diplomové práce:

27. února 2015

Termín odevzdání diplomové práce:

20. května 2015

Ve Zlíně dne 27. února 2015



doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu


Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové/bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně


.....
podpis diplomanta

ABSTRAKT

Cílem této práce je navrhnout řízení pohybu technologického efektoru na základě plánovaných simulačních experimentů části technologického zařízení s krokovým motorem. To zahrnuje zkuslení uspořádání základní funkční části technologického zařízení v CAD software, tvorbu fyzikálního modelu uspořádání včetně krokového motoru, provedení plánovaných simulačních experimentů, analýzy a konečného návrhu řízení technologického efektoru. Samotné řízení probíhá na PLC, na základě optického vyhodnocování odchylky průmyslovou kamerou v PC. Práce se dále zabývá algoritmy zpracování obrazu, jakožto prostředkem pro určení regulační odchylky. Algoritmy zpracování obrazu i nadřazené řízení pro PLC probíhá na osobním počítači s vizualizací celého děje.

Klíčová slova: simulace, řízení pohybu, fyzikální model, krokový motor, 3D modelování, PLC, zpracování obrazu, optické měření

ABSTRACT

The aim of this thesis is the proposal of motion control of technological effector on the basis of planned simulation experiments of technological device with stepper motor. This includes drawing the basic function of technological device arrangement in CAD software, the physical model creation of the arrangement including a stepper motor, planned simulation experiments implementation, analysis and the final proposal of the technological effector control. Own measurement takes place on the PLC based on the industrial camera evaluation of optical jags' position deviation in PC. The thesis also deals image processing algorithms, as a means for determine the deviation. Image processing algorithms and PLC master control take place on personal computers with process visualization.

Keywords: simulation, motion control, physical model, stepper motor, 3D modeling, PLC, image processing, optical measurement

Tímto chci poděkovat rodičům za podporu během studia a vedoucímu diplomové práce doc. RNDr. Ing. Zdeňkovi Úředníčkovi, CSc. za odborné vedení, rady, materiály, konzultace a velice vstřícnou pomoc. Mé díky patří také firmě Dudr Tools s.r.o za umožnění práce na reálném zařízení tohoto typu, věcné připomínky a poskytnuté materiály.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
A. ZÁKLADNÍ POJMY	12
A.1 KINEMATIKA.....	12
A.2 DYNAMIKA	12
A.3 TĚŽIŠTĚ / HMOTNÝ STŘED	13
A.4 MOMENT SETRVAČNOSTI.....	14
A.5 LAGRANGEOVY ROVNICE.....	15
A.6 DENAVIT-HARTENBERGOVA NOTACE.....	16
B. PRINCIPY A TECHNICKÁ ŘEŠENÍ.....	17
B.1 FYZIKÁLNÍ MODELOVÁNÍ.....	17
B.2 OPTICKÉ MĚŘENÍ.....	18
B.2.1 Vidění ve viditelné části spektra	18
B.2.1.a CCD	18
B.2.1.b CMOS	20
B.2.1.c CCD vs CMOS	21
B.3 3D MODELOVÁNÍ.....	22
B.3.1 SolidWorks.....	22
B.3.1.a Díl.....	22
B.3.1.b Sestava	22
B.3.1.c Výkres.....	22
B.3.1.d Vazba	23
B.3.1.e Pohybová studie	23
B.4 KROKOVÝ MOTOR	23
B.4.1 Základní princip	23
B.4.2 Způsoby řízení.....	24
B.4.2.a Unipolární vs. bipolární	24
B.4.2.b Jednofázové vs. dvoufázové	25
B.4.2.c S plným vs. děleným krokem.....	25
B.4.3 Model krokového motoru	25
B.4.4 Model krokového motoru ve stavovém prostoru	35
B.5 VAČKA	37
B.5.1 Zdvihová závislost.....	37
B.6 PLC.....	38
B.6.1 Vykonávání programu	38
B.6.2 Dělení PLC.....	38
B.6.2.a Mikro PLC	38
B.6.2.b Kompaktní PLC.....	39
B.6.2.c Modulární PLC.....	39
B.6.3 Způsoby programování PLC	39
B.6.3.a Jazyk mnemokódů	39
B.6.3.b Jazyk kontaktních (reléových) schémat.....	40
B.6.3.c Jazyk logických schémat (funkčních bloků).....	40
B.6.3.d Jazyk sekvenčního programování	41

C.	ROZVADĚČE ZUBŮ PILOVÝCH PÁSŮ.....	42
C.1	MANUÁLNÍ	42
C.2	POLOAUTOMATICKÉ	43
C.3	AUTOMATICKÉ	43
C.4	REPREZENTANTI NA TRHU.....	44
C.4.1	Wood-Mizer	44
C.4.2	VISCAT FULGOR.....	44
C.4.3	Streitlein GmbH	44
II	PRAKTICKÁ ČÁST	45
D.	3D MODEL REÁLNÉ ZÁKLADNÍ FUNKČNÍ ČÁSTI ZAŘÍZENÍ	46
D.1	HLAVNÍ DÍLY	46
D.1.1	Pevné části.....	46
D.1.2	Vačka	46
D.1.3	Vahadlo	47
D.1.4	Úderník	48
D.1.5	Ohýbací palec	48
D.1.6	Hnané ozubené kolo	49
D.1.7	Hnací ozubené kolo	49
D.2	KOMPLETNÍ ROZLOŽENÁ SESTAVA	50
E.	FYZIKÁLNÍ SIMULAČNÍ MODEL	51
E.1	KROKOVÝ MOTOR	51
E.2	POSUVNÁ ČÁST	52
E.3	OHÝBACÍ ČÁST.....	53
F.	SIMULAČNÍ EXPERIMENTY	58
F.1	POSUVNÁ ČÁST	58
F.1.1	Shrnutí.....	64
F.2	OHÝBACÍ ČÁST.....	64
G.	ANALÝZA A NÁVRH ŘÍZENÍ	69
G.1	OHÝBACÍ ČÁST.....	69
G.2	POSUVNÁ ČÁST	69
H.	ZPRACOVÁNÍ OBRAZU	71
H.1	ČELNÍ KAMERA	71
H.1.1	Průběh funkce pro analýzu zubu pilového pásu čelní kamerou.....	71
H.1.2	Reálné výstupy	73
H.1.3	Vývojový diagram	75
I.	REALIZACE ŘÍZENÍ POHYBU EFEKTORU	76
I.1	SPECIFIKACE JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ ZAŘÍZENÍ.....	76
I.1.1	Průmyslová USB kamera IDS 1240ML	76
I.1.2	Programovatelný logický automat SIMATIC S7-1200, CPU 1214C	76
I.1.3	Stabilizovaný zdroj S7-1200, PM 1207.....	77
I.1.4	HMI panel	77
I.1.5	Krokový motor s řídicí jednotkou Ezi-SERVO-ST.....	78
I.1.6	Stejnoseměrný motor EC180.240 se šnekovou převodovkou CM030.....	78
I.1.7	Obousměrný převodník signálních 24/5V	78

I.2	PLC PROGRAM.....	79
I.2.1	Posuvná část - krokový motor.....	79
I.2.2	Ohýbací část - DC motor	81
I.2.3	Manuální režim.....	83
I.2.4	Poloautomatický režim	83
I.2.5	Automatický režim	84
I.3	HMI PANEL.....	85
I.4	PC PROGRAM	86
ZÁVĚR		89
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		90
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		92
SEZNAM OBRÁZKŮ		93
SEZNAM TABULEK		95

ÚVOD

Tato práce se zabývá stěžejní částí zařízení, které je určeno pro nastavení rozvodu zubů pilového pásu. Tento druh stroje není příliš modernizován, přesto je jeho význam v dřevozpracujícím průmyslu obrovský. Každý pilový pás musí být po vybroušení požadovaného profilu, podroben procesu rozvodu jeho zubů (ohyb zubu mimo rovinu pilového pásu), který závisí na druhu zpracovávaného materiálu. Tímto je docíleno optimálního řezného výsledku. Pokusy o modernizaci zařízení pro nastavení rozvodu zubů pilového pásu se setkávají s problémem přesného měření rozvodu. Doposud realizované způsoby měření jsou vždy kontaktní. Ty mají problémy s rozvodem zubů použitých pilových pásů. Řešením je bezkontaktní posuzování rozvodu s využitím kamerového systému a algoritmů zpracování obrazu.

Namísto manuálního nastavování velikosti rozvodu zubů bylo zvoleno řešení automatizované - krokový motor řízen z PLC. Prostředníkem mezi kamerovým systémem a PLC je PC, na kterém je také vizualizován celý rozváděcí proces. Vytyčeným cílem je tento proces simulovat a řídit.

Pro simulaci pohybu jakéhokoli hmotného objektu je potřeba znát jeho konstrukční parametry a materiál, z kterého je zhotoven. Z těchto údajů je již možné určit, jak se bude objekt v závislosti na působení vnějších sil chovat. V dnešní době je k dispozici mnoho nástrojů, které lze úspěšně využít k řešení této problematiky. Pro tyto účely byl zvolen CAD software SolidWorks. S jeho pomocí lze získat rozložení hmoty jednotlivých částí, matice setrvačnosti, polohu těžišť a další potřebné parametry pro zkonstruování fyzikálního modelu. Simulační experimenty a samotné principy řízení budou realizovány pomocí programu DYNAST.

V teoretické části je k tomuto účelu vypracován přehled základních pojmů a popis i odvození funkce krokového motoru. Stejně tak jsou popsány např. principy optického měření, 3D modelování a způsobu programování PLC. Poté je pro přehled popsán i vývoj rozváděčů zubů pilových pásů s reprezentanty na trhu, kteří nabízejí zařízení, alespoň z části podobající se zde popsanému řešení. Jsou tedy uvedeny nejmodernější přístroje, zabývající se problémem rozvodu zubů pilových pásů.

Praktická část se již zabývá tvorbou 3D sestavy části stroje, simulací pohybu jednotlivých článků v závislosti na velikosti působící síly, následným návrhem řízení na základě údajů z optického systému snímání odchylky a předvedením praktické realizace řízení.

I. TEORETICKÁ ČÁST

A. ZÁKLADNÍ POJMY

A.1 Kinematika

Kinematika je část vědy zabývající se analýzou pohybu bez ohledu na to, co jej způsobilo. Pohybem se rozumí jakýkoliv typ přemístění, zahrnující změnu polohy a orientace. Tedy přemístění a následné derivace podle času (rychlost, zrychlení a jerk), jsou součástí kinematiky. [1]

Přímý kinematický problém se řeší tehdy, jsou-li známá kinematická data pro kloubové souřadnice (určující vzájemnou polohou sousedních článků). Ty jsou použita pro nalezení umístění libovolného bodu sestavy v globální soustavě souřadnic. [1]

Inverzní kinematický problém se řeší tehdy, jsou-li známá kinematická data pro koncový efektor v kartézské souřadné soustavě a je nutné nalézt kinematická data pro kloubové souřadnice. Inverzní kinematický problém je většinou nelineární a obvykle mnohem komplikovanější, než přímý kinematický problém. [1]

A.2 Dynamika

Dynamika se zabývá studiem systémů, které jsou podrobeny změnám stavu v čase. V mechanických systémech jako je tento, to znamená pohyb. Hlavním krokem pro dynamickou analýzu systému je odvození pohybových rovnic systému, protože jsou podstatné pro návrh, analýzu a jeho řízení. Dynamické pohybové rovnice popisují dynamické chování. Mohou být použity pro počítačovou simulaci pohybu zařízení, návrh vyhovujících zákonů řízení a vyhodnocení dynamické výkonnosti návrhu. Podobně jako v kinematice lze problém dynamiky rozdělit na přímý a inverzní. [1]

V přímém dynamickém problému je úkolem určit pohyb zařízení při daných počátečních podmínkách a momentech (obecných silách) v aktivních kloubech. [1]

V inverzním dynamickém problému je úkolem vypočítat síly a momenty, potřebné pro generování požadované trajektorie pro danou množinu poloh, rychlostí a zrychlení. [1]

Problém řízení pohybu lze charakterizovat jako požadovaný pohyb koncového efektoru. Požadovaný pohyb je specifikován jako trajektorie v kartézské soustavě souřadnic, zatímco řídicí systém vyžaduje hodnoty v kloubových souřadnicích. Senzory pohybových stavů generují data určující aktuální stav systému v prostoru kloubů, z čehož vyplývá požadavek na vyjádření kinematických proměnných z kartézské soustavy souřadnic, do odpovídající-

cích kloubových souřadnic. Tyto transformace jsou závislé na geometrii kinematiky manipulátoru. Řízení pohybu tedy obsahuje tři výpočtové problémy:

- 1) Určení požadované trajektorie v kartézském souřadnicovém systému
- 2) Transformace kartézské trajektorie do odpovídajících kloubových souřadnic
- 3) Generování zobecněných sil pro uskutečnění pohybu po žádané trajektorii [1]

A.3 Těžiště / Hmotný střed

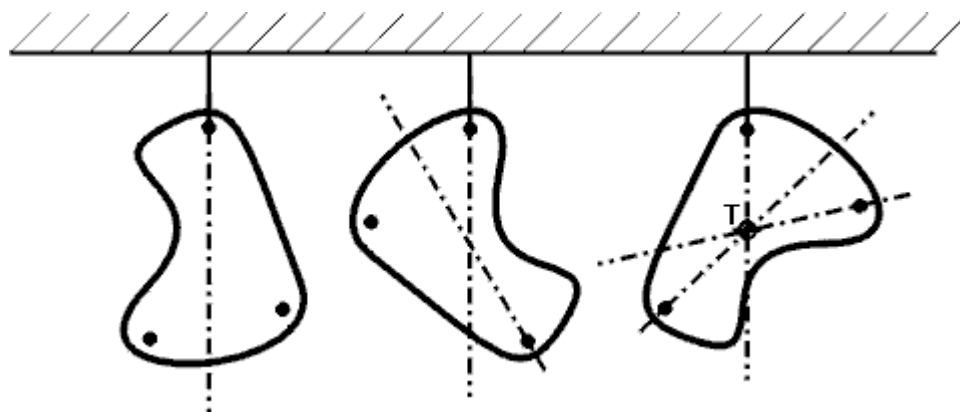
Těžiště (center of gravity) je obecně definováno jako působíště tíhové síly působící na těleso. Je tedy závislé na charakteru silového pole, v kterém se nachází.

Hmotný střed (center of mass) je bod, který je pevně určen tvarem tělesa a rozložením jeho hustot, bez ohledu na charakter vnějšího silového pole.

V gravitačním poli Země, které je homogenní, jsou tedy pojmy *těžiště* i *hmotný střed* brány jako ekvivalentní. To však neplatí v případě pole nehomogenního.

Lze tedy říci, že na každý bod tělesa působí v poli zemské tíže tíhová síla, která je úměrná hmotnosti daného bodu tělesa. Tato síla působí na bod svisle dolů, bez ohledu na natočení tělesa. Výslednice všech rovnoběžných tíhových sil udává celkovou tíhovou sílu tělesa a leží na těžnici, což je spojnice těžiště tělesa a bodu závěsu. Otočením tělesa dojde ke změně polohy těžnice. Průsečík všech těžnic se nazývá *těžiště* tělesa. [7]

Těžiště je využíváno při analýze translačních pohybů. [1]



Obr. 1 Určení těžiště tělesa zavěšováním [8]

A.4 Moment setrvačnosti

Moment setrvačnosti je fyzikální veličina, která vyjadřuje míru setrvačnosti tělesa při otáčivém pohybu. Její velikost závisí na rozložení hmoty v tělese vzhledem k ose otáčení. [9]

Moment setrvačnosti je využívám při analýze rotačních pohybů. Někdy je také nazýván centrifugálním momentem. Každé tuhé těleso v 3D prostoru má 3x 3 momentů setrvačnosti, které lze zapsat pomocí **matice setrvačnosti** I označené jako:

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Diagonální prvky I_{ij} pro $i = j$ se nazývají **polárními momenty setrvačnosti**

$$I_{xx} = \iiint_B [\rho(x, z, y) \cdot (y^2 + z^2)] dx dy dz \quad (2)$$

$$I_{yy} = \iiint_B [\rho(x, z, y) \cdot (x^2 + z^2)] dx dy dz \quad (3)$$

$$I_{zz} = \iiint_B [\rho(x, z, y) \cdot (x^2 + y^2)] dx dy dz \quad (4)$$

kde $\rho(x, z, y)$ je hustota materiálu tělesa. [1]

Nediagonální prvky matice setrvačnosti I_{ij} pro $i \neq j$ se nazývají **deviační momenty**

$$I_{xy} = I_{yx} = -\iiint_B [\rho(x, z, y) \cdot xy] dx dy dz \quad (5)$$

$$I_{xz} = I_{zx} = -\iiint_B [\rho(x, z, y) \cdot xz] dx dy dz \quad (6)$$

$$I_{yz} = I_{zy} = -\iiint_B [\rho(x, z, y) \cdot yz] dx dy dz \quad (7)$$

Prvky matice I tuhého tělesa jsou momenty setrvačnosti vzhledem k soustavě souřadnic spojené s těžištěm tělesa. Matice I je tedy závislá na souřadné soustavě a musí se psát jako ${}^B I$, aby bylo možné určit, k jaké soustavě souřadnic je vztažena. [1]

Moment setrvačnosti lze transformovat z jedné souřadné soustavy do druhé, rovněž umístěné v těžišti tělesa, pomocí **věty o rotaci os** a věty **o paralelních osách** (také nazývána Huygens-Steinerova věta). Jestliže je lokální souřadná soustava umístěna tak, že deviační

momenty zmizí, tak se tato lokální souřadná soustava nazývá **hlavní souřadnou soustavou** a příslušné momenty setrvačnosti **hlavními momenty setrvačnosti**. [1]

A.5 Lagrangeovy rovnice

Lagrangeova formulace mechaniky představuje jiný přístup k popisu mechaniky, než jaký využívají Newtonovy pohybové rovnice. Ty sice umožňují úplně popsat mechanický pohyb, z matematického hlediska se však ukazuje, že je možné zvolit jiný přístup k popisu tohoto pohybu, který je v mnoha případech výhodnější. V této formulaci mechaniky se k popisu systému používají zobecněné souřadnice, což zjednodušuje analýzu systému. Trajektorie pohybu se v Lagrangeově formulaci mechaniky získají řešením Lagrangeovy rovnice, která vychází z variačního počtu. Řešení Lagrangeovy rovnice přitom představuje nalezení cesty, která minimalizuje funkcionál akce, což je veličina, která je integrálem lagrangiánu. [3]

Newtonovy pohybové rovnice mohou být transformovány do tvaru:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W_k}{\partial \dot{q}_r} \right) - \frac{\partial W_k}{\partial q_r} = F_r; \quad r = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$F_r = \sum_{i=1}^n \left(F_{ix} \frac{\partial f_i}{\partial q_r} + F_{iy} \frac{\partial g_i}{\partial q_r} + F_{iz} \frac{\partial h_i}{\partial q_r} \right) \quad (9)$$

- rovnice (8) se nazývá Lagrangeovou pohybovou rovnicí
- W_k je kinetická energie systému s n DOF
- q_1, q_2, \dots, q_n jsou **zobecněné souřadnice systému**
- F_{ix}, F_{iy}, F_{iz} jsou vnější síly působící na i -tý článek systému
- F_r je zobecněná síla spojená s q_r [1]

S předpokladem, že některá síla působící na těleso je důsledkem potenciálu, tedy důsledkem potenciální energie, pak tuto sílu nazýváme potenciálovou (nekonzervativní) a Lagrangeovy rovnice lze přepsat do tvaru:

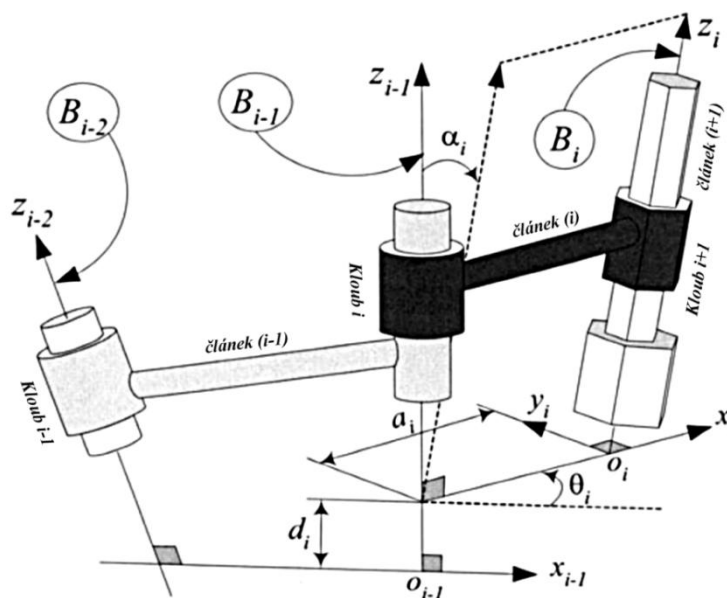
$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W_k}{\partial \dot{q}_r} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_r} = Q_r; \quad r = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

kde $L = W_k - W_p$ je tzv. Lagrangeova funkce (Lagrangian) a Q_r je nepotenciálová (nekonzervativní) zobecněná síla. Rovnice je známá také jako Lagrangeova rovnice 2. druhu. [1]

A.6 Denavit-Hartenbergova notace

Denavit-Hartenbergův (dále jen „D-H“) princip rozmístění souřadných systémů je první a nejpoužívanější metodou používanou v kinematice robotiky. Pro reprezentaci prostorových transformací polohového vektoru bodu je použita matice 4×4 , nebo homogenní transformace. Metoda transformační matice je nejpoužívanější technika pro popis pohybu robota. [1]

Každý kloub je označen svoji osou, která může být translační nebo rotační. Pro získání kinematických informací o částech zařízení, se ke každému članku pevně připojí lokální soustava souřadnic B_i v kloubu $i+1$ použitím D-H metody. Osa z_i je spojena s osou $i+1$ kloubu. Osa x_i je definována podél společné normály os z_{i-1} a z_i směřující od z_{i-1} k z_i . Osa y_i je definována jako vektorový součin os z_i a x_i , ale není nutné ji kreslit. [1]



Obr. 2 Kinematické uspořádání pro vysvětlení D-H notace [1]

D-H soustava je určena čtyřmi parametry: a_i , α_i , θ_i a d_i :

- 1) **Délka článku a_i** - vzdálenost mezi osami z_{i-1} a z_i podél osy x_i . a_i je kinematická délka článku (i). Řadí se mezi článkové parametry.
- 2) **Zkroucení článku α_i** - rotace osy z_{i-1} okolo osy x_i , aby se stala paralelní s osou z_i . Řadí se mezi článkové parametry.
- 3) **Vzdálenost kloubu d_i** - vzdálenost mezi osami x_{i-1} a x_i podél osy z_{i-1} . Je někdy nazývána offset článku a řadí se mezi kloubové parametry.
- 4) **Úhel článku θ_i** - požadované otočení osy x_{i-1} okolo z_{i-1} , aby se stala paralelní s osou x_i . Řadí se mezi kloubové parametry. [1]

Tabulka D-H parametrů má 5 sloupců - 1 pro index soustavy souřadnic a 4 pro parametry:

S.soustava č.	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	a_1	α_1	d_1	θ_1
2	a_2	α_2	d_2	θ_2
...
n	a_n	α_n	d_n	θ_n

Tab. 1. D-H parametry pro zavedení článkových soustav souřadnic

B. PRINCIPY A TECHNICKÁ ŘEŠENÍ

B.1 Fyzikální modelování

Modelování jakéhokoli jevu z oblasti fyzikálních disciplín, musí vždy vycházet ze znalosti jeho fyzikální podstaty. Je proto třeba alespoň kvalitativně (ale nejlépe i kvantitativně) znát, co všechno v rámci modelovaného jevu probíhá. Nejsou-li známy beze zbytku všechny fyzikální aspekty jevu, tedy není-li možné sestavit jeho korektní fyzikální model, může se takový problém modelovat jenom přibližně. V takovém případě však zákonitě vyvstává otázka, zda mají šanci být výsledky fyzikálně reálné a nakolik se budou lišit od skutečnosti. Pokud se podaří dostatečně přesný fyzikální model problému vytvořit (což je nutná, avšak nikoli postačující podmínka řešení úlohy), je k němu třeba vybudovat odpovídající model matematický, jehož hlavním smyslem je co nejpřesnější kvantifikace příslušných dějů. [6]

Zpravidla platí, že pokud je znám fyzikální model problému, podaří se vybudovat i jeho model matematický. Ten má ovšem smysl jen tehdy, je-li možné jej dostupnými prostředky vyřešit. Není-li to možné, je nutné takový model vhodným způsobem zjednodušit, což se také často v praxi provádí. Příkladem je vynechání jedné nebo několika rovnic popisujících veličiny, které není nutno respektovat, zanedbání méně významných prostorových, časových či jiných (např. teplotních) změn apod. Zjednodušení však nesmí vést k výsledkům, které jsou v zásadním rozporu s fyzikální realitou. [6]

Pokud se podařilo vytvořit spolehlivý a dostatečně přesný matematický model úlohy, je nutno jej vyřešit. A zde se již uplatní počítačový model, jenž v sobě zahrnuje spolehlivou, robustní a dostatečně rychlou algoritmicizaci úlohy, její samotné vyřešení a vyhodnocení výsledků. [6]

B.2 Optické měření

V této práci je využita metoda bezkontaktního posuzování, která je založena na optickém vyhodnocování odchylky, pomocí algoritmů zpracování obrazu. K optickému měření je použita průmyslová kamera s CMOS čipem.

B.2.1 Vidění ve viditelné části spektra

„...V dnešní době se pro záznam obrazu používají především snímáče s CCD a CMOS prvky. Jsou jak v lineárním, tak v maticovém uspořádání. Oproti klasickému filmu mají v současnosti nesrovnatelné výhody ve všech ohledech. Jejich kvantová účinnost (udává, kolik fotonů dopadajících na čip je přeměněno na signál) se pohybuje od 20 (běžné digitální fotoaparáty) do 90% (tenčené čipy osvětlovány zezadu – black-illuminated CCD). Oproti tomu kvantová účinnost klasických filmů se pohybuje v rozmezí 3-5%. Veškeré dřívější nedostatky, jako byly šumy, malá obrazová plocha, vysoká cena a malé rozlišení jsou v současnosti eliminovány)...“[5]

B.2.1.a CCD

„...Pokud se jedná o maticové uspořádání, je CCD čip tvořen maticí pixelů, které jsou reprezentovány tzv. „potenciálovými studněmi“ (světlocitlivými buňkami), z nichž elektrony nemohou uniknout (pokud tedy není na pixel přivedeno takové množství světla, že „potenciálová jáma“ přeteče do okolních „jam“ – blooming). Fotony se do „jam“ ukládají kontinuálně, dokud není zavřena elektronická či mechanická závěra a matice pixelů není vyčtena. CCD mají lineární odezvu na světlo, tudíž množství náboje nahromaděného v „jámách“ po převodu na napětí odpovídá intenzitě osvětlení daného pixelu.

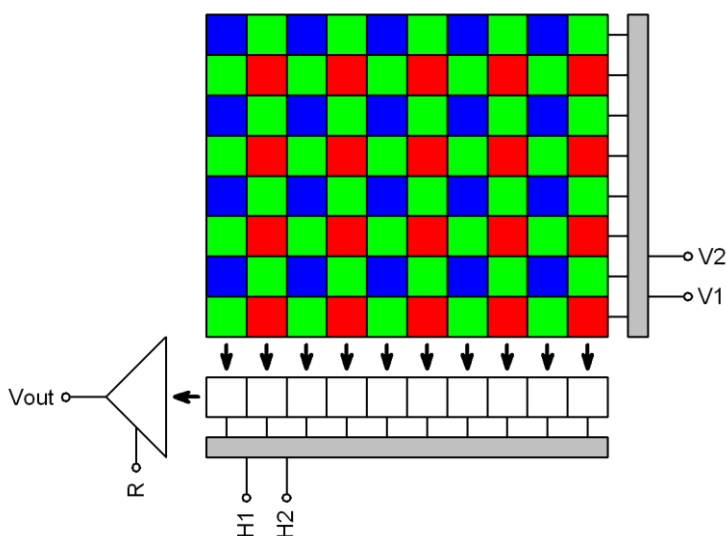
Výčet se provádí různě podle konstrukce snímáče. Jedna z možností je horizontální výčet řádku, poté následuje vertikální posun a operace se opakuje (**Obr. 3**). Dále je z těchto hodnot vytvořena matice úrovní šedé, která reprezentuje výsledný obrázek.

Při tvorbě barevného snímku je potřeba snímat záření o vlnové délce cca 400-700 nm. V normálním lidském oku existují 3 druhy čípků, které se liší barevnými pigmenty a citlivostí k vlnovým délkám, které určují jednotlivé barvy. Vnímají tedy červenou, zelenou a modrou barvu. Podobně je potřeba snímat záření i na CCD čipu, obvykle je tedy snímána červená, zelená a modrá barva. CCD čip je ale citlivý na všechny barvy a zasahuje i do

blízkých IR oblastí, proto je nutné požadované barvy nějakým způsobem odfiltrovat. Používají se k tomu v podstatě 2 způsoby:

- Je možné exponovat samostatné snímky s monochromním čipem přes červený, zelený a modrý filtr. Expozice barevného obrazu tímto způsobem chvíli trvá (je nezbytné měnit mezi expozicemi filtry), takže tento princip nelze použít u rychle se pohybujících objektů.
- Je také možné aplikovat filtry přímo na CCD pixely. Barevný obraz je pak možné získat jedinou expozicí. Nevýhodou je, že rozlišení a citlivost takového CCD čipu je ve srovnání s monochromním nižší (u použití jednoho CCD čipu).

Dnešní barevné CCD čipy používají tzv. Bayerovy masky (**Obr. 3**). Tato maska kryje jednotlivé pixely různými filtry ve vzoru šachovnice. Zpracování obrazů z barevného čipu spoléhá na skutečnost, že lidské oko je mnohem citlivější na změnu jasu než na změnu barvy (stejně jako běžný televizní signál, který přenáší barevnou informaci s pouhou 1/4 šířky pásma ve srovnání s jasovou informací)...“[5]

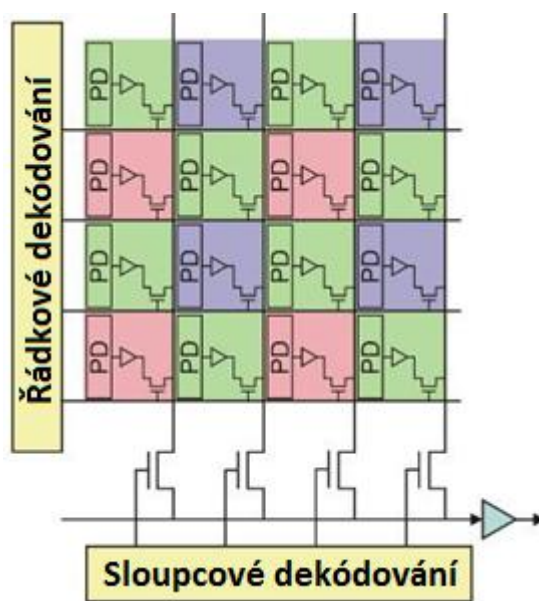


Obr. 3 Rozmístění barevných filtrů v Bayerově uspořádání a způsob vyčtení obrazu z CCD [5]

„...Je možné použít i jiné filtry, např. filtr CMY (Cyan-Magenta-Yellow), které propustí oproti RGB (ty propustí cca 1/3 viditelného spektra) cca 2/3 viditelného spektra. Každý pixel CMY tedy propustí až 2x více viditelného spektra, než filtr RGB...“[5]

B.2.1.b CMOS

Tento senzor se od CCD snímače liší jednou velice podstatnou věcí - každý obrazový bod je možné vyčíst separátně. Při pohledu na CMOS čip na **Obr. 6** je vidět adresovací vodiče pro každý řádek a sloupec. Díky tomu je možné číst jen tu buňku, která je potřebná a není nutno např. kvůli výřezu načítat celý obraz jako u CCD čipu. [11]



Obr. 4 Struktura CMOS čipu [13]

Výrobní technologie je také odlišná, CMOS čipy se vyrábějí podobně jako procesory, takže na výstupu výrobní linky je k dispozici v podstatě téměř kompletní „fotoaparát“. CMOS čipy jsou také podstatně náchylnější na šum, protože každý obrazový bod je tvořen fotodiódou a je samostatně adresován. Další důvod, proč mají CMOS čipy větší šum je v tom, že ony zesilovače jsou velmi blízko samotné fotodiody. U CCD jsou zesilovače mimo samotný snímací čip, tedy vzniká menší rušení i šum. Dalším problémem CMOS je ve srovnání s CCD větší přetékání náboje do sousedních buněk - další zdroj šumu, se kterým je nutno bojovat. [11]

Malá citlivost CMOS čipů je způsobená právě obvody u každého obrazového bodu, díky čemuž může být u horších čipů činná plocha dokonce jen kolem 30 %, zbytek jsou obvody. U moderních čipů je situace lepší a další zefektivnění přináší malinké mikročočky před každým pixelem, které se snaží nasměrovat více světla do snímací části pixelu a poměr činné plochy čipu k celkové ploše (tzv. *fill faktor*) pak vzroste zhruba na 60 až 70 %, což už odpovídá běžným ITL CCD čipům. [11]

CMOS čipy se dělí na pasivní (*Passive Pixel Sensor*) a aktivní (*Active Pixel Sensor*). Pasivní čipy jsou tvořeny pouze fotodiodami, aktivní čipy mají u každé buňky zesilovač a obvod odstraňující šum. Mají méně šumu než pasivní čipy, na druhou stranu, každý tento zesilovač může trochu jinak zesilovat, čímž dosahují pořád vyššího šumu než CCD. [11]

Vylepšenou verzí CMOS čipů je verze BSI (*Back Side Illumination*), kdy jsou zaměněny vrstvy samotného čipu. V běžném čipu je elektronika (převážně tranzistory) umístěna na světlocitlivé křemíkové ploše, zatímco u čipů BSI jsou vrstvy obráceně. Tím se vyřešila hlavní nevýhoda čipů CMOS – nedostatečné osvětlení hlavní plochy. Čipy BSI zvyšují osvětlení aktivní plochy o 60 – 90%. [13]

Tvorba barevného snímku probíhá obdobně, jak je tomu u CCD čipů.

B.2.1.c CCD vs CMOS

Snímací čip	CCD	CMOS
Cena	vysoká	nízká
Rozměry řešení	vyšší	nízké
Spotřeba	vysoká	nízká
Kvalita obrazu	vysoká	nižší až nízká
Rozlišení	vysoké	střední
Komplexnost čipu	vysoká	nižší až nízká
Fill faktor (činná plocha)	vysoký	nízký až střední
Digitální šum	nízký	vysoký
Rychlost	nižší až vysoká	vysoká
Dynamický rozsah	vysoký	nižší
Možnost výřezu	nativně žádná	ano

Tab. 2. Rozdíly CCD vs CMOS [11]

CMOS senzory se tedy hojně používají v mobilních telefonech, pro jejich malou spotřebu, rozměry a nízkou cenu. Nehodí se ovšem na focení s dlouhou dobou expozice z důvodu náchylnosti na šum. Citlivost u klasických CMOS čipů je taky malá, proto dosahují menší kvality snímků.

CCD čipy prošly dlouhým vývojem a mají značně propracovanou technologii. Z důvodu jejich nesporné kvality obrazu se používají především u fotoaparátů, u kterých není spotřeba a cena čipu tolik zásadní. Nejsou ovšem vhodné pro rychlé snímkování, což přímo vyplývá z principu vyčtení dat.

B.3 3D modelování

Jedná se o zobrazení 3D objektů na 2D zobrazovací plochu (monitor). 3D grafika se může dělit na:

- **rastrovou (bitmapovou)** – obraz je tvořen konečným počtem pixelů, který udává rozlišení obrazu
- **vektorovou** – obraz je tvořen z objektů, které jsou popsány matematickými rovnicemi (křivky, přímky, tělesa,...)

Vektorová grafika má oproti **rastrové grafice** tu výhodu, že již vytvořené objekty lze opětovně upravovat (jednotlivě) a nejsou omezeny rozlišením, v jakém byly sestrojeny. Je to z toho důvodu, že obraz není uložen jako rastr pixelů, ale je popsán matematickými rovnicemi. Proto je také základním stavebním kamenem 3D modelování. [14]

B.3.1 SolidWorks

SolidWorks je programové vybavení pro automatizaci strojírenského designu. Jeho hlavní silou je rychlé skicování a parametrické modelování součástí a sestav ve 3D. Další výhodou je zajištěná návaznost na CAM technologie. Základními jeho částmi jsou díly, sestavy a výkresy. [15]

B.3.1.a Díl

Je základním stavebním kamenem programu SolidWorks. Dílem se rozumí model jedné součástky (z jednoho kusu materiálu). Informace, které vznikají při vytváření dílu, se ukládají do dokumentu s příponou .sldprt. [15]

B.3.1.b Sestava

Je soubor součástí, které spolu vytvářejí logický celek a kde jsou definovány vazby mezi těmito součástmi. Součásti sestavy mohou být jak samostatné díly, tak i další sestavy, které se nazývají *podsestavy*. U většiny operací se součásti obou typů chovají stejně. Jsou připojeny k souboru sestavy (což znamená, že dokument sestavy nemůže existovat bez dokumentů dílů, ze kterých se skládá). Dokumenty sestav mají příponu .sldasm. [15]

B.3.1.c Výkres

Je grafickou prezentací modelu. Může být v tištěné nebo elektronické podobě. Tvoří základní součást výrobní dokumentace. Dokumenty výkresů mají příponu .slddrw. [15]

B.3.1.d Vazba

Je to druh geometrického spojení dílů v sestavě. Při jejich vkládání je definován povolený směr pohybu. Vazba může být stejnolehá, soustředná, rovnoběžná, kolmá, tečná apod. Je možné definovat také rozšířené vazby, kterými jsou např. vazby strojní. Těmito vazbami jsou myšleny např. vazby převodu, šroubu, či vačky. [16]

B.3.1.e Pohybová studie

Pohybové studie jsou grafickými simulacemi pohybu modelů sestavy. Do pohybové studie je možné také zahrnout vizuální vlastnosti, jako například osvětlení a perspektivu kamery. Pohybové studie nemění model sestavy, ani jeho vlastnosti. Simulují a animují nařízený pohyb modelu. Pomocí vazeb je možné při modelování pohybu omezit pohyb součástí v sestavě. [16]

B.4 Krokový motor

Krokový motor (dále jen „KM“) je speciální druh mnohápólového synchronního stroje s nekonstantní vzduchovou mezerou. Existují v podstatě 3 typy KM:

- ***S pasivním motorem (reluktanční)*** - rotor tvořen vyniklými póly z měkkého železa
- ***S aktivním rotorem*** - tvořen radiálně/axiálně polarizovanými permanent. magnety
- ***Hybridní*** - slučují rysy reluktančních motorů a permanentně buzených motorů (malé úhly kroku reluktančních motorů spolu s blokovacím točivým momentem permanentně buzeného motoru)

Rozsah používaného výkonu je od 10 μ W (v hodinkách řízených krystaly) do 500 W. Frekvence krokování může být až několik kHz. [2]

B.4.1 Základní princip

V dnešní době se nejčastěji používají hybridní KM, proto se zde uvedený princip vztahuje právě k nim (**Obr. 5**).

Střed rotoru je složený z axiálně uloženého permanentního magnetu, vrstveného mezi dvěma deskami měkkého železa. Desky mají v sobě drážky jako u reluktančního motoru. Jsou natočeny navzájem tak, že zub jedné desky je nad drážkou druhé. Tak jsou póly elek-

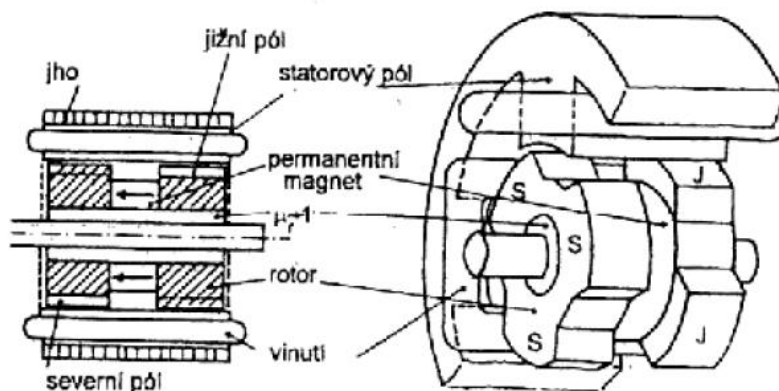
tricky posunuty o 180° . Každý pól je přidružený k jednomu vinutí. Rotorové zuby se seřadí k zubům statoru podle fáze proudu. Mechanický úhel otočení rotoru φ_m se vypočítá jako:

$$\varphi_m = \frac{\varphi}{z_r} \quad (11)$$

kde z_r je počet zubů (pólových párů) rotoru a φ je elektrický úhel otočení rotoru. [2]

Rozlišení je možné ještě zmenšit tzv. metodou dělení kroku. Tato metoda je založena na skutečnosti, že KM je speciálním typem asynchronního stroje, proto není pravidlem, řídit jej pouze maximální a minimální hodnotou protékajícího proudu. Pro poloviční krok toto řízení postačuje (obě cívky jsou v určitý okamžik protékány proudem současně), ale pro $1/4$, $1/8$ krok apod. je nutné zvolit jiný přístup.

Řízení KM je založeno na vzorkované sinusové funkci (i v případě impulzního řízení jde o vzorkovanou sinusovou funkci v $\pi/2$). Pokud je tato harmonická funkce navzorkována jemněji, je zajištěno menší rozlišení, tedy menší mechanický úhel otočení rotoru.



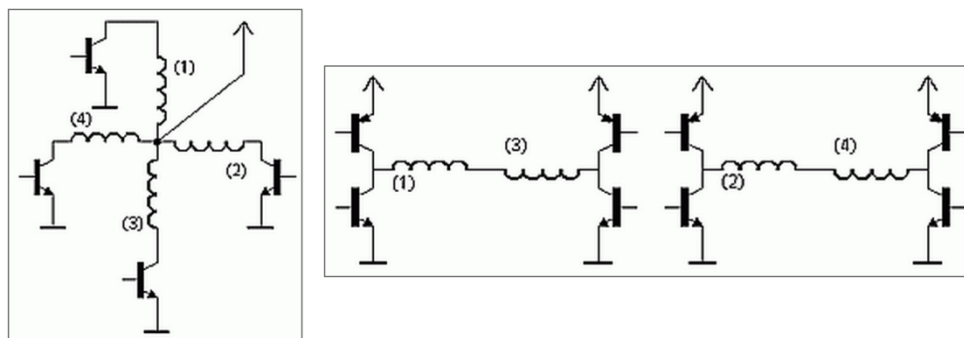
Obr. 5 Princip konstrukce hybridního krokového motoru [2]

B.4.2 Způsoby řízení

B.4.2.a Unipolární vs. bipolární

Unipolární - proud prochází v jednom okamžiku právě jednou cívkou. Motor s tímto buzením má nejmenší odběr, ale také poskytuje nejmenší kroutící moment. Výhodou tohoto řešení je jednoduché zapojení řídicí elektroniky - v podstatě stačí jeden tranzistor na každou cívku. [17]

Bipolární - proud prochází vždy dvěma protilehlými cívkami. Ty jsou zapojeny tak, že mají navzájem opačně orientované magnetické pole. Motor v tomto režimu poskytuje větší kroutící moment, ovšem za cenu vyšší spotřeby. Pro řízení jsou zapotřebí 2 H-můstky: pro každou větev jeden. To ve výsledku znamená větší složitost zapojení. [17]



*Obr. 6 Bipolární (vlevo) vs unipolární (vpravo) zapojení statorových cívek
krokového motoru [17]*

B.4.2.b Jednofázové vs. dvoufázové

Jednofázové - magnetické pole generuje pouze jedna cívka (případně dvojice cívek při bipolárním buzení). [17]

Dvoufázové - shodně orientované magnetické pole generují vždy dvě sousední cívky. Daní za vyšší kroutící moment je dvojnásobná spotřeba oproti řízení jedno fázovému. [17]

B.4.2.c S plným vs. děleným krokem

Řízení s plným krokem - znamená, že na jednu otáčku je potřeba přesně tolik kroků, kolik zubů má stator daného motoru. Je dosažitelný použitím kterékoliv doposud uvedené metody řízení. [17]

Řízení s polovičním krokem - dosahuje n -násobné přesnosti. Způsoby možné realizace jsou uvedeny v kapitole **B.4.1** [17]

B.4.3 Model krokového motoru

K matematickému popisu KM lze přistoupit stejně jako k popisu synchronního motoru s vyjádřenými póly a konstantním buzením. Za předpokladu lineárního magnetického obvodu, je magnetický tok, spřažený s fázovým vinutím, daný součtem dvou složek. První je dána proudy ve fázových vinutích, druhá je dána příspěvkem magnetického toku perma-

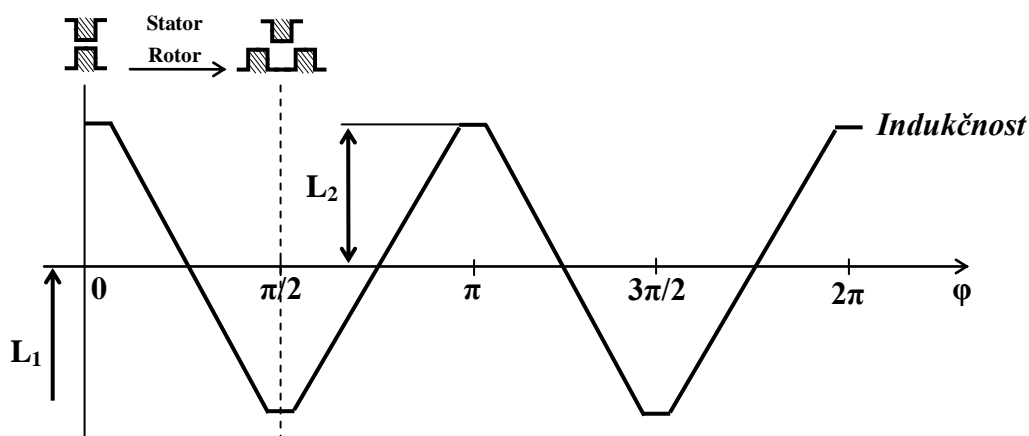
mentního magnetu. Obě složky jsou funkcí tzv. elektrického úhlu otočení rotoru - rovnice (14). [2]

Pro spřažené magnetické toky platí vztah:

$$\underline{\Psi}(t) = \underline{L}[\varphi(t)] \cdot \underline{i}(t) + \underline{c}[\varphi(t)] \quad (12)$$

Pro separátní výpočet magnetických toků od statorového vinutí a od permanentního magnetu je výhodné si celek rozdělit. K určení matice vlastních a vzájemných indukčností statorového vinutí nebudou brány v potaz účinky permanentního magnetu. Ten bude sloužit pouze jako kus magneticky vodivého materiálu, ovlivňující velikost vzduchové mezery, a tedy vodivost mezi jednotlivými vinutími.

S ohledem na konstrukci a uložení rotoru je průběh indukčnosti periodický s dvojnásobnou frekvencí oproti frekvenci otáčení rotoru - **Obr. 7**.



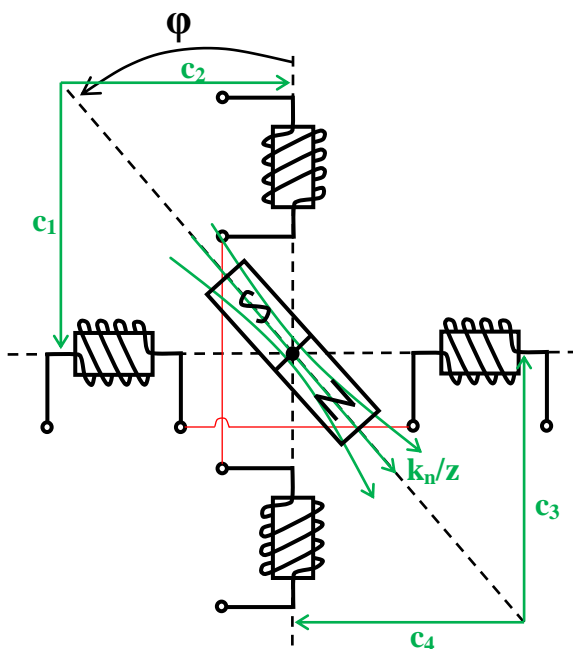
Obr. 7 Průběh indukčnosti 2-fázového krokového motoru bez účinků permanentního magnetu

L_1 ... konstantní složka hlavní indukčnosti (nezávislá na poloze rotoru)

L_2 ... amplituda proměnné složky hlavní indukčnosti (závislá pouze na poloze rotoru).

Minimum indukčnosti v průběhu na obrázku (**Obr. 7**) odpovídá nejhorší vodivosti (největší vzduchové mezeře) mezi vinutími, maximum indukčnosti naopak nejlepší vodivosti (nejmenší vzduchové mezeře) mezi vinutími. Periodickou funkci uvedenou na obrázku je pro ulehčení výpočtu výhodné aproximovat známou funkcí. V tomto případě je zvolena funkce $\cos(2\varphi)$.

Pro určení průmětů vektoru magnetického toku permanentního magnetu do os fází jednotlivých vinutí, je možné zjednodušený náčrtek sestavit následovně (statorová vinutí jsou bez proudu):



Obr. 8 Účinky permanentního magnetu na jednotlivá vinutí

$$c_1 = \frac{k_n}{z_r} \cdot \cos \varphi; \quad c_2 = \frac{k_n}{z_r} \cdot \sin \varphi; \quad c_3 = -\frac{k_n}{z_r} \cdot \cos \varphi; \quad c_4 = -\frac{k_n}{z_r} \cdot \sin \varphi \quad (13)$$

$$\underline{c}^T[\varphi(t)] = \frac{k_n}{z_r} \cdot [\cos \varphi \quad \sin \varphi \quad -\cos \varphi \quad -\sin \varphi] \quad (14)$$

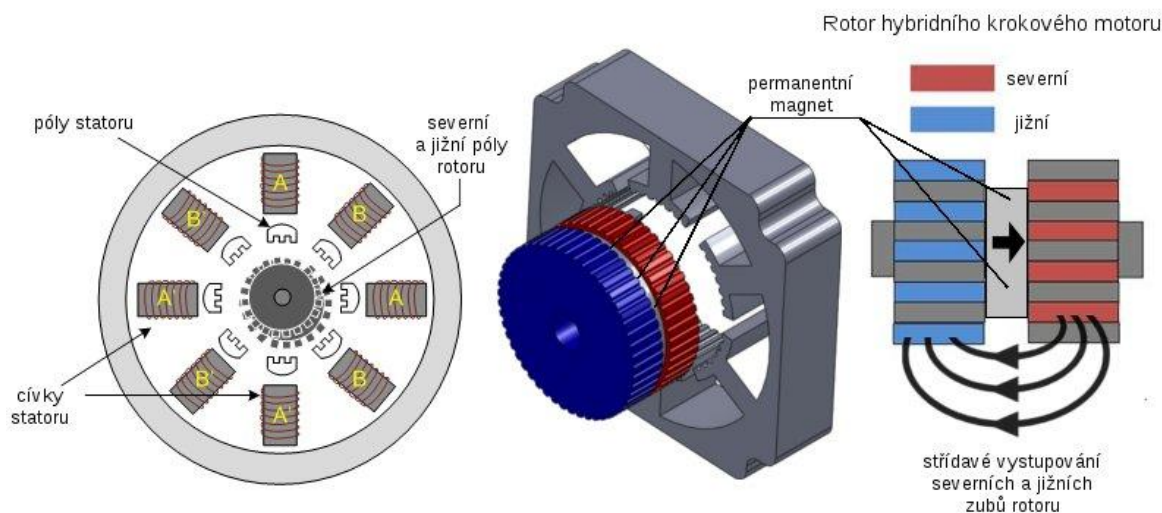
k_n ... konstanta závislá na vlastnostech permanentního magnetu

z_r ... počet zubů (pólových párů) rotoru

Základní představa, která je uvedena na obrázku (**Obr. 8**), je ale pouze zjednodušující. Reálné uspořádání je odlišné, je ovšem založené na podobném postupu výpočtu dílčích magnetických toků.

Pro splnění základního požadavku, kterým je totožnost (reálně co největší podobnost) matematicko-fyzikálního modelu s reálným objektem, je tedy nutné rozvinout ony zjednodušující předpoklady do reálného uspořádání. Bude zde odvozen hybridní dvojfázový KM s

axiálně polarizovaným permanentním magnetem, který je v současné době nejrozšířenější (**Obr. 9**).



Obr. 9 Konstrukce dvojfázového hybridního krokového motoru [12]

Při axiálním umístění permanentního magnetu je rotor rozdělen na dvě části. Stator má vyniklé póly, na kterých jsou navinuté cívky. Na oblině pólových nástavců jsou zuby a drážky, povrch rotoru je rovněž drážkovaný (**Obr. 9**).

Drážkování statoru a rotoru eventuelně i s počtem cívek statoru musí splnit podmínku zobrazenou na obrázku (**Obr. 7**), tedy magnetická vodivost prostoru vzduchové mezery pod jednotlivými pólovými nástavci se musí lišit tak, aby se otočením rotoru o čtvrtinu zubové rozteče přesunulo pásmo s maximální magnetickou vodivostí pod následující pólový nástavec. [10]

Existuje několik způsobů, jak tento požadavek splnit. Nejjednodušší způsob spočívá v odlišné volbě počtu statorových a rotorových zubů s doplňující podmínkou celistvého počtu statorových zubů připadajících na jednu rozteč pólu. [10]

Typicky používaným příkladem je 48 zubů na obvodu statoru, 50 zubů na obvodu rotoru a 8 cívek s pólovými nástavci na statoru. Pak připadá na jednu rozteč cívek 6 drážkových roztečí, z nichž je na pólovém nástavci realizováno 4 a půl drážkových roztečí (5 zubů a 4 drážky) a prostor mezi pólovými nástavci vznikl vynecháním 1 zubu a 2 drážek. [10]

Z výše uvedených skutečností lze odvodit matici vlastních a vzájemných indukčností statorových vinutí:

$$\underline{L}[\varphi(t)] = \begin{bmatrix} L_\sigma + L_1 - L_2 \cdot \cos 2\varphi & -L_2 \cdot \sin 2\varphi & L_1 + L_2 \cdot \cos 2\varphi & L_2 \cdot \sin 2\varphi \\ -L_2 \cdot \sin 2\varphi & L_\sigma + L_1 + L_2 \cdot \cos 2\varphi & L_2 \cdot \sin 2\varphi & -L_1 - L_2 \cdot \cos 2\varphi \\ -L_1 + L_2 \cdot \cos 2\varphi & L_2 \cdot \sin 2\varphi & L_\sigma + L_1 - L_2 \cdot \cos 2\varphi & -L_2 \cdot \sin 2\varphi \\ L_2 \cdot \sin 2\varphi & -L_1 - L_2 \cdot \cos 2\varphi & -L_2 \cdot \sin 2\varphi & L_\sigma + L_1 + L_2 \cdot \cos 2\varphi \end{bmatrix}_{[10]} \quad (15)$$

L_σ ... rozptylová indukčnost fázového vinutí

Elektrická rovnováha systému je vyjádřena jako:

$$\underline{u}(t) = \underline{R} \cdot \underline{i}(t) + \frac{d\Psi[\varphi(t)]}{dt} \quad (16)$$

$$\underline{u}(t) = \underline{R} \cdot \underline{i}(t) + \frac{d\underline{L}[\varphi(t)]}{d\varphi} \cdot \underbrace{\frac{d\varphi(t)}{dt}}_{\omega(t)} \cdot \underline{i}(t) + \underline{L}[\varphi(t)] \cdot \frac{d\underline{i}(t)}{dt} + \frac{d\underline{c}[\varphi(t)]}{d\varphi} \cdot \underbrace{\frac{d\varphi(t)}{dt}}_{\omega(t)} \quad (17)$$

$$\underline{u}(t) = \underline{R} \cdot \underline{i}(t) + \underline{L}[\varphi(t)] \cdot \frac{d\underline{i}(t)}{dt} + \underbrace{\left\{ \frac{d\underline{L}[\varphi(t)]}{d\varphi} \cdot \underline{i}(t) + \frac{d\underline{c}[\varphi(t)]}{d\varphi} \right\}}_{\frac{d\Psi[\varphi(t)]}{d\varphi}} \cdot \omega(t)$$

$$\underline{u}(t) = \underline{R} \cdot \underline{i}(t) + \underline{L}[\varphi(t)] \cdot \frac{d\underline{i}(t)}{dt} + \underbrace{z_r \cdot \left\{ \frac{d\underline{L}[\varphi(t)]}{d\varphi} \cdot \underline{i}(t) + \frac{d\underline{c}[\varphi(t)]}{d\varphi} \right\}}_{\underline{K}[\varphi(t), i(t)]} \cdot \omega_m(t)$$

ω_m ... mechanická úhlová rychlost rotoru

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R \end{bmatrix}; \quad \frac{d\underline{L}[\varphi(t)]}{d\varphi} = 2 \cdot L_2 \begin{bmatrix} \sin 2\varphi & -\cos 2\varphi & -\sin 2\varphi & \cos 2\varphi \\ -\cos 2\varphi & -\sin 2\varphi & \cos 2\varphi & \sin 2\varphi \\ -\sin 2\varphi & \cos 2\varphi & \sin 2\varphi & -\cos 2\varphi \\ \cos 2\varphi & \sin 2\varphi & -\cos 2\varphi & -\sin 2\varphi \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\frac{d\underline{c}^T[\varphi(t)]}{d\varphi} = \frac{k_n}{z_r} \cdot [-\sin \varphi \quad \cos \varphi \quad \sin \varphi \quad -\cos \varphi]; \quad \underline{i}(t) = \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \\ i_3(t) \\ i_4(t) \end{bmatrix}; \quad \underline{u}(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \\ u_4(t) \end{bmatrix} \quad (19)$$

Pro vnitřní elektromagnetický moment platí:

$$m_{\text{int}} = \frac{1}{2} \cdot \underline{i}^T(t) \cdot \frac{d\Psi[\varphi(t)]}{d\varphi_m} = \frac{1}{2} \cdot z_r \cdot \underline{i}^T(t) \cdot \frac{d\Psi[\varphi(t)]}{d\varphi} = \frac{1}{2} \cdot \underline{i}^T(t) \cdot \underbrace{z_r \cdot \left\{ \frac{d\underline{L}[\varphi(t)]}{d\varphi} \cdot \underline{i}(t) + \frac{d\underline{c}[\varphi(t)]}{d\varphi} \right\}}_{\underline{K}[\varphi(t), i(t)]} \quad (20)$$

Jsou-li označeny (s ohledem na orientaci veličin) proudy, napětí a magnetické toky pro náhradní dvojfázové vinutí s fázemi **a** a **b** takto:

$$\begin{aligned} u_a(t) &= u_1(t) - u_3(t) & \underline{\Psi}_a(t) &= \Psi_1(t) - \Psi_3(t) \\ u_b(t) &= u_2(t) - u_4(t) & \underline{\Psi}_b(t) &= \Psi_2(t) - \Psi_4(t) \\ i_a(t) &= i_1(t) - i_3(t) & c_a(t) &= c_1(t) - c_3(t) \\ i_b(t) &= i_2(t) - i_4(t) & c_b(t) &= c_2(t) - c_4(t) \end{aligned} \quad (21)$$

Pak lze psát pro výsledný spřažený magnetický tok rovnici:

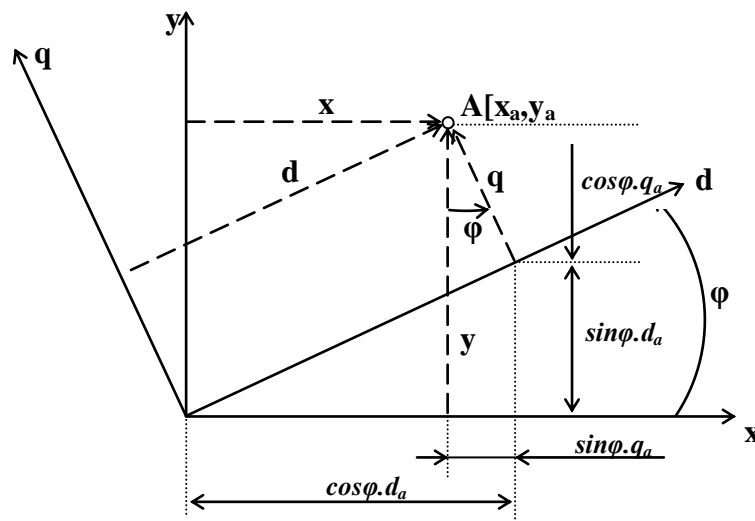
$$\underline{\Psi}[\varphi(t)] = \begin{bmatrix} \underline{\Psi}_a(t) \\ \underline{\Psi}_b(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_\sigma + 2 \cdot L_1 - 2 \cdot L_2 \cdot \cos 2\varphi & -2 \cdot L_2 \cdot \sin 2\varphi \\ -2 \cdot L_2 \cdot \sin 2\varphi & L_\sigma + 2 \cdot L_1 + 2 \cdot L_2 \cdot \cos 2\varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \end{bmatrix} + 2 \cdot \frac{k_n}{z_r} \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\underline{K}[\varphi(t), i(t)] = z_r \cdot \frac{d\underline{\Psi}[\varphi(t)]}{d\varphi} = 2 \cdot z_r \cdot \left\{ 2 \cdot L_2 \cdot \begin{bmatrix} \sin 2\varphi & -\cos 2\varphi \\ -\cos 2\varphi & -\sin 2\varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \end{bmatrix} + \frac{k_n}{z_r} \cdot \begin{bmatrix} -\sin \varphi \\ \cos \varphi \end{bmatrix} \right\} \quad (23)$$

Popis v tzv. absolutní soustavě souřadnic x, y je komplikovaný a vede na závislost koeficientů diferenciálních rovnic na úhlu otočení rotoru. Proto bude transformována do ortogonální souřadné soustavy d, q pevně spojené s pohybujícím se rotorem. Pro pozorovatele a popisovatele soustavy bude tedy rotor nehybnou částí, pohybovat se bude stator.

Pro popis tohoto typu jsou zvolena následující pravidla:

- osa x je osa referenční, od které je definován úhel natočení rotoru
- osa y je zvolena tak, aby výsledná souřadná soustava odpovídala soustavě pravotočivé
- osa d je pootočena o úhel φ , který je orientován od osy x v pravotočivém směru
- osa q je pootočena o úhel φ , který je orientován od osy y v pravotočivém směru



Obr. 10 Transformace soustavy do d, q os

Z obrázku (**Obr. 10**) je zřejmé, že pro souřadnice bodu $A[d_a, q_a]$ v souřadné soustavě d, q platí pro určení bodu $A[x_a, y_a]$ v souřadné soustavě x, y následující rovnice:

$$x_a = d_a \cdot \cos \varphi - q_a \cdot \sin \varphi \quad y_a = d_a \cdot \sin \varphi + q_a \cdot \cos \varphi \quad (24)$$

Po úpravě:

$$d_a = x_d \quad q_a = x_q \quad y_a = x_b \quad (25)$$

$$x_a = x_d \cdot \cos \varphi - x_q \cdot \sin \varphi \quad x_b = x_d \cdot \sin \varphi + x_q \cdot \cos \varphi \quad (26)$$

$$\underline{x}(t) = \begin{bmatrix} x_a(t) \\ x_b(t) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}}_{\underline{T}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} x_d(t) \\ x_q(t) \end{bmatrix}}_{\underline{x}_{dq}(t)} \quad (27)$$

$$\underline{x}(t) = \underline{T}[\varphi(t)] \cdot \underline{x}_{dq}(t) \quad (28)$$

Tyto transformační vztahy budou použity pro určení napětí, proudů, magnetických toků a koeficientů K_i .

Zásadní podmínkou použitelnosti transformace pro bránový model tohoto systému je to, aby se transformací neměnila časová změna energie procházející přes energetickou obálku systému \rightarrow podmínka tzv. **výkonové invariantnosti transformace**, tedy:

$$u_a(t) \cdot i_a(t) + u_b(t) \cdot i_b(t) = u_d(t) \cdot i_d(t) + u_q(t) \cdot i_q(t) \quad (29)$$

$$\underline{u}^T(t) \cdot \underline{i}(t) = \underline{u}_{dq}^T(t) \cdot \underline{i}_{dq}(t) \quad (30)$$

Aplikací rovnice (28) pro $\underline{u}^T(t)$ na rovnici (30) je možné psát:

$$\{\underline{T}[\varphi(t)] \cdot \underline{u}_{dq}(t)\}^T \cdot \underline{i}(t) = \underline{u}_{dq}^T(t) \cdot \underline{i}_{dq}(t) \Rightarrow \underline{u}_{dq}^T(t) \cdot \underline{T}^T[\varphi(t)] \cdot \underline{i}(t) = \underline{u}_{dq}^T(t) \cdot \underline{i}_{dq}(t) \quad (31)$$

Jestliže existuje pseudoinvertní matice $[\underline{u}_{dq}^T(t)]^{-1}$, pak:

$$\underline{i}_{dq}(t) = \underline{T}^T[\varphi(t)] \cdot \underline{i}(t) \quad (32)$$

Porovnáním s maticovým zápisem transformace v rovnici (28), z kterého vyplývá:

$$\underline{x}(t) = \underline{T}[\varphi(t)] \cdot \underline{x}_{dq}(t) \Rightarrow \underline{x}_{dq}(t) = \{\underline{T}[\varphi(t)]\}^{-1} \cdot \underline{x}(t) \quad (33)$$

je možné odvodit podmínku výkonové invariance transformace:

$$\{T[\varphi(t)]\}^{-1} = \{T[\varphi(t)]\}^T \quad (34)$$

Tedy pro ověření zde odvozené transformace lze psát:

$$\{T[\varphi(t)]\}^T = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$\{T[\varphi(t)]\}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}^{-1} = \underbrace{\frac{1}{\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi}}_1 \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (36)$$

Transponovaná matice se rovná matici inverzní, podmínka tzv. **výkonové invariantnosti transformace** je tedy splněna a platí:

$$\underline{x}_{dq}(t) = \{T[\varphi(t)]\}^{-1} \cdot \underline{x}(t) \Rightarrow \begin{bmatrix} x_d(t) \\ x_q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a(t) \\ x_b(t) \end{bmatrix} \quad (37)$$

Aplikací rovnice (37) na rovnici (22) lze pro transformované magnetické toky Ψ_d a Ψ_q psát:

$$\begin{aligned} \Psi_d[\varphi(t)] &= \left(L_\sigma + 2 \cdot L_1 - 2 \cdot L_2 \cdot \overbrace{\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi}^{\cos 2\varphi} \right) \cdot i_a(t) \cdot \cos(\varphi) - 2 \cdot L_2 \cdot \overbrace{\sin 2\varphi}^{2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi} \cdot i_b(t) \cdot \cos(\varphi) + \\ &+ 2 \frac{k_n}{z_r} \cdot \cos^2 \varphi - 2 \cdot L_2 \cdot \overbrace{\sin 2\varphi}^{2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi} \cdot i_a(t) \cdot \sin(\varphi) + \left(L_\sigma + 2 \cdot L_1 + 2 \cdot L_2 \cdot \overbrace{\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi}^{\cos 2\varphi} \right) \cdot i_b(t) \cdot \sin(\varphi) + \\ &+ 2 \frac{k_n}{z_r} \cdot \sin^2 \varphi = i_a(t) \cdot \cos(\varphi) \cdot \left(L_\sigma + 2 \cdot L_1 - 2 \cdot L_2 \cdot \underbrace{\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi}_1 \right) + \\ &\quad \underbrace{-2 \cdot L_2}_{-2 \cdot L_2} \cdot \left(\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi \right) + i_b(t) \cdot \sin(\varphi) \cdot \left(L_\sigma + 2 \cdot L_1 + 2 \cdot L_2 \cdot \underbrace{\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi}_1 \right) + \\ &\quad \underbrace{-2 \cdot L_2}_{-2 \cdot L_2} \cdot \left(\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi \right) + 2 \frac{k_n}{z_r} \cdot \underbrace{(\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi)}_1 = \\ &= i_a(t) \cdot \cos(\varphi) \cdot (L_\sigma + 2 \cdot L_1 - 2 \cdot L_2) + i_b(t) \cdot \sin(\varphi) \cdot (L_\sigma + 2 \cdot L_1 - 2 \cdot L_2) + 2 \frac{k_n}{z_r} \\ \Psi_d[\varphi(t)] &= \underbrace{(L_\sigma + 2 \cdot L_1 - 2 \cdot L_2)}_{L_d} \cdot \underbrace{[i_a(t) \cdot \cos(\varphi) + i_b(t) \cdot \sin(\varphi)]}_{i_d(t)} + 2 \frac{k_n}{z_r} = L_d \cdot i_d(t) + 2 \frac{k_n}{z_r} \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned}
\Psi_q[\varphi(t)] &= - \left(L_\sigma + 2 \cdot L_1 - 2 \cdot L_2 \cdot \overbrace{\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi}^{\cos 2\varphi} \right) \cdot i_a(t) \cdot \sin(\varphi) + 2 \cdot L_2 \cdot \overbrace{\sin 2\varphi}^{2 \sin \varphi \cos \varphi} \cdot i_b(t) \cdot \sin(\varphi) + \\
&- 2 \frac{k_n}{z_r} \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi - 2 \cdot L_2 \cdot \overbrace{\sin 2\varphi}^{2 \sin \varphi \cos \varphi} \cdot i_a(t) \cdot \cos(\varphi) + \left(L_\sigma + 2 \cdot L_1 + 2 \cdot L_2 \cdot \overbrace{\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi}^{\cos 2\varphi} \right) \cdot i_b(t) \cdot \cos(\varphi) + \\
&+ 2 \frac{k_n}{z_r} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi = -i_a(t) \cdot \sin(\varphi) \cdot \left(L_\sigma + 2 \cdot L_1 - 2 \cdot L_2 \cdot \underbrace{\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi}_{\substack{2 \cdot L_2 (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) \\ 1 \\ 2 \cdot L_2}} \right) + \\
&+ i_b(t) \cdot \cos(\varphi) \cdot \left(L_\sigma + 2 \cdot L_1 + 2 \cdot L_2 \cdot \underbrace{\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi + \sin^2 \varphi}_{\substack{2 \cdot L_2 (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) \\ 1 \\ 2 \cdot L_2}} \right) = \\
&= -i_a(t) \cdot \sin(\varphi) \cdot (L_\sigma + 2 \cdot L_1 + 2 \cdot L_2) + i_b(t) \cdot \cos(\varphi) \cdot (L_\sigma + 2 \cdot L_1 + 2 \cdot L_2) \\
\Psi_q[\varphi(t)] &= \underbrace{(L_\sigma + 2 \cdot L_1 + 2 \cdot L_2)}_{L_q} \cdot \underbrace{[-i_a(t) \cdot \sin(\varphi) + i_b(t) \cdot \cos(\varphi)]}_{i_q(t)} = L_q \cdot i_q(t)
\end{aligned} \tag{40}$$

Rovnice elektrické rovnováhy se transformuje na

$$\begin{aligned}
\underline{T}[\varphi(t)] \cdot \underline{u}_{dq}(t) &= \underline{R} \cdot \underline{T}[\varphi(t)] \cdot \underline{i}_{dq}(t) + \frac{d[\underline{T}[\varphi(t)] \cdot \underline{\Psi}_{dq}(t)]}{dt} \Rightarrow \\
\Rightarrow \underline{u}_{dq}(t) &= \underline{T}^{-1}[\varphi(t)] \cdot \underline{R} \cdot \underline{T}[\varphi(t)] \cdot \underline{i}_{dq}(t) + \underline{T}^{-1}[\varphi(t)] \cdot \left\{ \frac{d\underline{T}[\varphi(t)]}{d\varphi} \cdot \underbrace{\varphi(t)}_{\omega(t)} \cdot \underline{\Psi}_{dq}(t) + \underline{T}[\varphi(t)] \cdot \frac{d\underline{\Psi}_{dq}(t)}{dt} \right\} = \\
&= \underbrace{\underline{T}^{-1}[\varphi(t)] \cdot \underline{E} \cdot \underline{T}[\varphi(t)]}_{\underline{E}} \cdot \underline{R} \cdot \underline{i}_{dq}(t) + z_r \cdot \omega_m(t) \cdot \underbrace{\left\{ \underline{T}^{-1}[\varphi(t)] \cdot \frac{d\underline{T}[\varphi(t)]}{d\varphi} \right\}}_{\substack{\begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin \varphi & -\cos \varphi \\ \cos \varphi & -\sin \varphi \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}}} \cdot \underline{\Psi}_{dq}(t) + \underbrace{\underline{T}^{-1}[\varphi(t)] \cdot \underline{T}[\varphi(t)]}_{\underline{E}} \cdot \frac{d\underline{\Psi}_{dq}(t)}{dt}
\end{aligned} \tag{42}$$

$$\begin{aligned}
\underline{u}_{dq}(t) &= \underline{R} \cdot \underline{i}_{dq}(t) + z_r \cdot \omega_m(t) \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \underline{\Psi}_{dq}(t) + \frac{d\underline{\Psi}_{dq}(t)}{dt} \\
\begin{bmatrix} u_d(t) \\ u_q(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R \cdot i_d(t) \\ R \cdot i_q(t) \end{bmatrix} + z_r \cdot \omega_m(t) \cdot \begin{bmatrix} -\Psi_q(t) \\ \Psi_d(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d\Psi_d(t)}{dt} \\ \frac{d\Psi_q(t)}{dt} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{43}$$

Výsledné rovnice elektrické rovnováhy jsou tedy následující:

$$u_d(t) = R \cdot i_d(t) + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} - z_r \cdot \underbrace{L_q \cdot i_q(t)}_{\Psi_q(t)} \cdot \omega_m(t) \quad (44)$$

$$u_q(t) = R \cdot i_q(t) + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + z_r \cdot \underbrace{\left[L_d \cdot i_d(t) + 2 \frac{k_n}{z_r} \right]}_{\Psi_d(t)} \cdot \omega_m(t) \quad (45)$$

Je vidět, že výkonově invariantní transformací se ztratila z elektrických rovnic **závislost indukčností na úhlu otočení rotoru**.

Pro magnetickou energii platí (transformace je výkonově invariantní):

$$W_{mag} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \Psi_i \cdot i_i \quad (46)$$

$$W_{mag} [i_d(t), i_q(t)] = \frac{1}{2} [\Psi_d(t) \cdot i_d(t) + \Psi_q(t) \cdot i_q(t)] = \frac{1}{2} \left[L_d \cdot i_d^2(t) + 2 \frac{k_n}{z_r} \cdot i_d(t) + L_q \cdot i_q^2(t) \right] \quad (47)$$

A tedy:

$$dW_{mag} = \frac{\partial W_{mag}}{\partial i_d} \cdot di_d + \frac{\partial W_{mag}}{\partial i_q} \cdot di_q = L_d \cdot i_d(t) \cdot di_d + \frac{k_n}{z_r} \cdot di_d + L_q \cdot i_q(t) \cdot di_q \quad (48)$$

Potom je celkový přírůstek elektrické energie následující:

$$\begin{aligned} u_d(t) \cdot i_d(t) \cdot dt + u_q(t) \cdot i_q(t) \cdot dt &= \underbrace{R \cdot i_d^2(t) \cdot dt + R \cdot i_q^2(t) \cdot dt}_{dW_{Joule}} + \\ &+ \underbrace{L_d \cdot i_d(t) \cdot di_d - z_r \cdot L_q \cdot i_q(t) \cdot i_d(t) \cdot d\varphi_m + L_q \cdot i_q(t) \cdot di_q + z_r \cdot L_d \cdot i_d(t) \cdot i_q(t) \cdot d\varphi_m + z_r \cdot 2 \frac{k_n}{z_r} \cdot i_q(t) \cdot d\varphi_m}_{dW_{mag} + dW_{mech}} \end{aligned} \quad (49)$$

Část energie se nevratně přemění v rezistorech na teplo, zbylá část tvoří přírůstek **energie magnetické a mechanické**. Pro přírůstek mechanické energie platí:

$$dW_{mech} = m_{int}(t) \cdot d\varphi_m \quad (50)$$

$$\begin{aligned} dW_{mech} &= dW_{mag} + dW_{mech} - dW_{mech} = L_d \cdot i_d(t) \cdot di_d - z_r \cdot L_q \cdot i_q(t) \cdot i_d(t) \cdot d\varphi_m + L_q \cdot i_q(t) \cdot di_q + \\ &+ z_r \cdot L_d \cdot i_d(t) \cdot i_q(t) \cdot d\varphi_m + z_r \cdot \frac{k_n}{z_r} \cdot i_q(t) \cdot d\varphi_m - \left[L_d \cdot i_d(t) \cdot di_d + \frac{k_n}{z_r} \cdot di_d + L_q \cdot i_q(t) \cdot di_q \right] = \\ &= z_r \cdot \left[L_d \cdot i_d(t) + 2 \frac{k_n}{z_r} \right] \cdot i_q(t) \cdot d\varphi_m - z_r \cdot L_q \cdot i_q(t) \cdot i_d(t) \cdot d\varphi_m - \frac{k_n}{z_r} \cdot di_d \end{aligned} \quad (51)$$

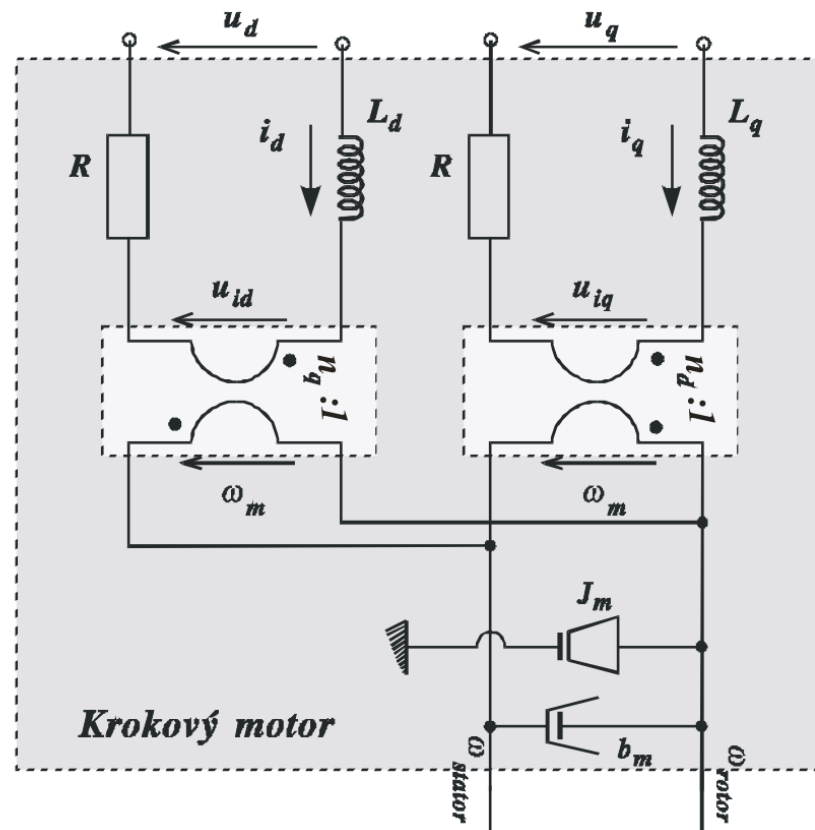
Z rovnice (51) přímo vyplývá vztah pro vnitřní elektromagnetický moment v nové soustavě souřadnic:

$$m_{\text{int}}(t) = \frac{dW_{\text{mech}}}{d\varphi_m} = \frac{z_r \cdot \left[L_d \cdot i_d(t) + 2 \frac{k_n}{z_r} \right] \cdot i_q(t) \cdot d\varphi_m - z_r \cdot L_q \cdot i_q(t) \cdot i_d(t) \cdot d\varphi_m - \frac{k_n}{z_r} \cdot di_d}{d\varphi_m} = \quad (52)$$

$$= z_r \cdot \underbrace{\left[L_d \cdot i_d(t) + 2 \frac{k_n}{z_r} \right] \cdot i_q(t)}_{n_q} - \underbrace{z_r \cdot L_q \cdot i_q(t) \cdot i_d(t)}_{n_d} - \underbrace{\frac{k_n}{z_r} \cdot \frac{di_d}{d\varphi_m}}_0$$

$$\underline{\underline{m_{\text{int}}(t) = z_r \cdot \Psi_d[\varphi(t)] \cdot i_q(t) - z_r \cdot \Psi_q[\varphi(t)] \cdot i_d(t) = n_q - n_d}} \quad (53)$$

Bránové schéma odpovídající výše uvedeným rovnicím je následující:



Obr. 11 Bránové schéma 2 fázového krokového motoru [2]

B.4.4 Model krokového motoru ve stavovém prostoru

Zde jsou již uvažovány výše odvozené rovnice KM. Nechť je zátěžný mechanismus připojen přes převod $i = I:I$, vstupní veličinou jsou napětí u_d a u_q a zátěžný moment je porucha.

Popis elektrické části systému je uveden v rovnicích (44) a (45), vnitřního momentu stroje v rovnici (53). Tyto rovnice lze převést na stavový (kanonický) tvar úpravou [2]:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{u_d(t)}{L_d} - \frac{R \cdot i_d(t)}{L_d} + z_r \cdot \frac{L_q}{L_d} \cdot i_q(t) \cdot \omega_m(t) = \frac{u_d(t)}{\tau_d \cdot R} - \frac{i_d(t)}{\tau_d} + z_r \cdot \frac{\tau_q}{\tau_d} \cdot i_q(t) \cdot \omega_m(t) \quad (54)$$

$$kde \quad \tau_d = \frac{L_d}{R}; \quad \tau_q = \frac{L_q}{R};$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{u_q(t)}{L_q} - \frac{R \cdot i_q(t)}{L_q} - z_r \cdot \frac{L_d}{L_q} \cdot i_d(t) \cdot \omega_m(t) - 2 \frac{k_n}{L_q} \cdot \omega_m(t) = \frac{u_q(t)}{\tau_q \cdot R} - \frac{i_q(t)}{\tau_q} - z_r \cdot \frac{\tau_d}{\tau_q} \cdot i_d(t) \cdot \omega_m(t) - 2 \frac{k_n}{\tau_q \cdot R} \cdot \omega_m(t) \quad (55)$$

Další rovnice odpovídá pohybové rovnici systému:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} \cdot [m_{int}(t) - m_z(t)] = \frac{1}{J} \cdot [z_r \cdot (L_d - L_q) \cdot i_d(t) \cdot i_q(t) + 2k_n \cdot i_q(t) - m_z(t)] \quad (56)$$

J ... výsledný moment setrvačnosti na hřídeli motoru

$m_z(t)$... zátěžný moment

Také je nutné přidat definiční rovnici pro úhel otočení hřídele:

$$\frac{d\varphi_m}{dt} = \omega_m(t) \quad (57)$$

Jsou-li označeny vektory takto:

$$f[x(t)] = \begin{bmatrix} \omega_m(t) \\ \frac{1}{J} \cdot [z_r \cdot (L_d - L_q) \cdot i_d(t) \cdot i_q(t) + 2k_n \cdot i_q(t)] \\ -\frac{i_d(t)}{\tau_d} + z_r \cdot \frac{\tau_q}{\tau_d} \cdot i_q(t) \cdot \omega_m(t) \\ -\frac{i_q(t)}{\tau_q} - z_r \cdot \frac{\tau_d}{\tau_q} \cdot i_d(t) \cdot \omega_m(t) - \frac{2k_n}{\tau_q \cdot R} \cdot \omega_m(t) \end{bmatrix}; \quad x(t) = \begin{bmatrix} \varphi_m(t) \\ \omega_m(t) \\ i_d(t) \\ i_q(t) \end{bmatrix}; \quad u(t) = \begin{bmatrix} u_d(t) \\ u_q(t) \end{bmatrix}; \quad (58)$$

pak lze předchozí rovnice zapsat ve tvaru:

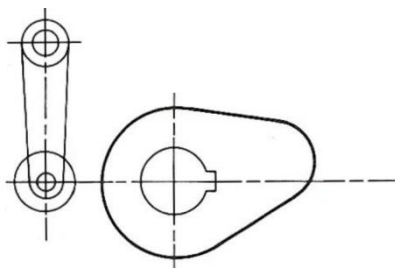
$$\frac{dx(t)}{dt} = f[x(t)] + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{\tau_d \cdot R} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau_q \cdot R} \end{bmatrix} \cdot u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot m_z(t) \quad (59)$$

Z výše uvedených rovnic je na první pohled zřejmé, že se jedná o **nelineární systém**.

B.5 Vačka

Vačkovým mechanismem je nazýván mechanismus s jedním stupněm volnosti, obsahující alespoň jednu vačku, spojenou s ostatními členy minimálně jednou obecnou kinematickou dvojicí. Vačkou je nazýván člen mechanismu, který pohybem své činné plochy vyvozuje prostřednictvím obecné kinematické dvojice pohyb hnaného členu. Vačka je obvykle hnacím členem mechanismu. [18]

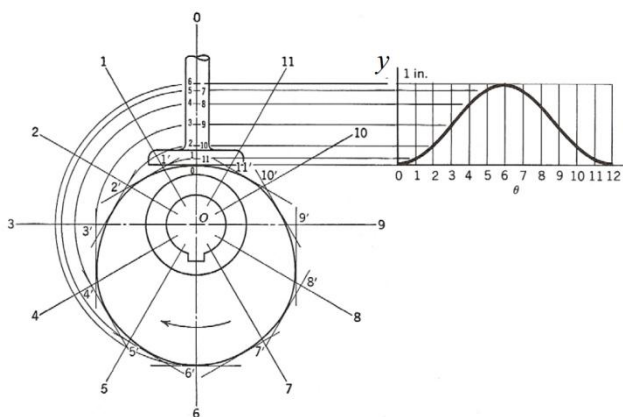
Mezi typické vačkové mechanismy patří vačka se **zdvihátkem**, přičemž vačka pracuje jako hnací člen a zdvihátko jako člen hnaný. Hnaný člen vačkového mechanismu (zdvihátko) je s vačkou spojen obecnou kinematickou dvojicí. Zdvihátko s rotačním pohybem je označováno jako **vahadlo**. [18]



Obr. 12 Vačka s vahadlem
a kladkou [18]

B.5.1 Zdvihová závislost

Podle tvaru a umístění vačky vůči hnanému členu se určí zdvihová závislost (je to závislost polohy vahadla/zdvihátka na úhlu pootočení vačky). Jedním z předpokladů správné funkce vačkového mechanismu je neustálý styk hnaného členu s vačkou během pohybu. To je zajištěno buď silově (direkční pružina, tíhové síly), nebo nuceně (drážková vačka). [18]



Obr. 13 Zdvihová závislost vačky [18]

B.6 PLC

PLC (programovatelný logický automat) je uživatelsky programovatelný řídicí systém navržený do průmyslových podmínek pro řízení v reálném čase. Původně navrženo pro nespojitě sekvenční a logické řízení, nyní se nasazuje do úloh spojitých procesů s analogovými vstupy a výstupy. Zvládá i složitější matematické operace, pracuje s různými datovými typy a má nespočet rozšiřujících modulů. [19]

B.6.1 Vykonávání programu

Od mikropočítačů se PLC odlišuje cyklickým sériovým zpracováním programu. Naprogramovaná úloha se plní postupným zpracováním instrukcí, které nelze přerušit. Tato cyklická činnost se děje na 4 úseky. V režijní části jsou nejprve na výstupy vyslány aktuálně vyčíslené hodnoty obrazů výstupů Y, pak jsou provedeny režijní operace systému, aktualizace systémových a časových proměnných, naplánována aktivace procesů pro další cyklus, apod. Na závěr jsou sejmuty aktuální hodnoty fyzických vstupů, které jsou pro celý následující cyklus konzervovány, jako obrazy vstupů X. [19]



Obr. 14 Otočka cyklu PLC [19]

B.6.2 Dělení PLC

PLC se dělí podle velikosti (s čímž souvisí výkonnost a počet I/O) na 3 základní skupiny.

B.6.2.a Mikro PLC

Nejmenší a nejlevnější kompaktní PLC systémy nabízejí uživateli pevnou sestavu vstupů a výstupů, obvykle jen binárních, například 6 binárních vstupů/výstupů pro nejmenší systém. Uživatel se v tomto případě může rozhodnout pro jeden typ systému, který již nemůže do datečně rozšiřovat. [19]

B.6.2.b Kompaktní PLC

Nabízejí určitou, i když omezenou, variabilitu ve volbě konfigurace. Uživatel může k základnímu modulu připojit jeden nebo několik přídatných modulů z omezeného sortimentu s pevnou kombinací vstupů a výstupů, např. modul s 8 binárními vstupy/výstupy (tranzistorovými nebo reléovými), modul rychlých čítačů, analogový vstupní nebo výstupní modul, modul regulátoru apod. [19]

B.6.2.c Modulární PLC

Nesrovnatelně větší volnost ve volbě konfigurace poskytují modulární programovatelné automaty. Do různých variant plochého zadního rámu lze zasouvat libovolné moduly. U některých variant může být jeden systém tvořen několika rámy. Rozšiřovací moduly mohou být připojeny na vzdálenosti stovek metrů. Místo rozšiřujících modulů mohou být připojeny podsystémy tvořené kteroukoliv z předchozích variant. Tak lze vytvářet různé strukturované distribuované systémy. [19]



Obr. 15 Mikro PLC (vlevo), kompaktní PLC (uprostřed) a modulární PLC (vpravo)
[20]

B.6.3 Způsoby programování PLC

K programování nabízejí PLC způsoby původně navržené pro snadnou, názornou a účinnou realizaci logických funkcí. Jazyky systémů různých výrobců jsou podobné, nikoliv však stejné. Přenositelnost programů mezi PLC různých výrobců není možná. Obecně existují pro PLC 4 typy programovacích jazyků. [19]

B.6.3.a Jazyk mnemokódů

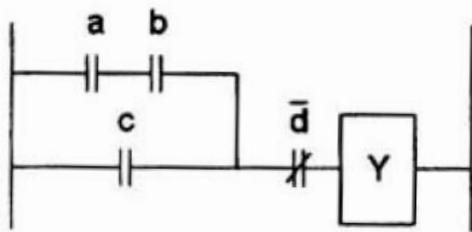
Označován jako **IL**, v německé terminologii AWL. Je obdobou assembleru u počítačů, a je také strojově orientován. To znamená, že každé instrukci PLC systému odpovídá stejně

pojmenovaný příkaz jazyka. Jazyky mnemokódů poskytují i obvyklý aparát symbolického označení návěští pro cíle skoků a volání, symbolická jména pro číselné hodnoty, pro pojmenování vstupních, výstupních a vnitřních proměnných a jiných objektů programu. [19]

B.6.3.b Jazyk kontaktních (reléových) schémat

Označován jako **LD**, německy KOP - je grafický. Program se základními logickými operacemi zobrazuje schéma, ve formě obvyklé pro kreslení schémat při práci s reléovými a kontaktními prvky. Pouze symboly pro kontakty a cívky jsou zjednodušeny, aby mohly být vytvářeny semigraficky: spínací kontakty jako dvojice svislých čar, rozpínací kontakt je navíc „přeškrtnut“ lomítkem, cívky jsou označovány dvojicí závorek. [19]

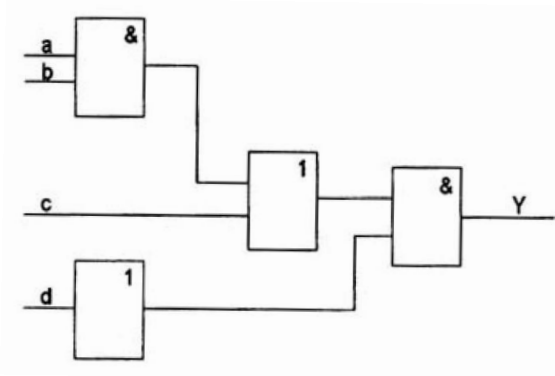
Funkční bloky (např. čítače, časovače) jsou kresleny jako obdélníkové značky. Instrukce, které nemají svou analogii v kontaktní symbolice (a těch bývá většina) se obvykle zobrazují jako dvojice závorek nebo obdélníková značka s vepsaným mnemokódem instrukce. Jazyk reléových schémat je názorný, ale při složitější struktuře programu svou názornost postrádá. [19]



Obr. 16 Jazyk reléových schémat [19]

B.6.3.c Jazyk logických schémat (funkčních bloků)

Označován jako **FBD**, německy FUP - je opět grafický. Základní logické operace jsou reprezentovány obdélníkovými značkami. Výška značky je přizpůsobena počtu vstupů. Své značky mají i ucelené funkční bloky, např. čítače, časovače, posuvné registry, paměťové členy, ale i aritmetické a paralelní logické instrukce. Vychází vstříc uživatelům zvyklým na kreslení logických schémat pro zařízení s integrovanými obvody. [19]



Obr. 17 Jazyk funkčních bloků [19]

B.6.3.d Jazyk sekvenčního programování

Označován jako **SFC**, německy AS. Je nadstavbou nad popsanými jazyky - tvoří grafický jazyk pro sekvenční programování. Dovoluje stavový popis sekvenčních úloh v symbolice přechodového grafu konečných automatů a určité třídy Petriho sítí. K popisu struktury používá značky stavů, přechodů a větvení. Chování v jednotlivých stavech nebo definování podmínek přechodů lze obvykle popsat prostředky kteréhokoliv z dříve popsaných jazyků nebo dalším vnořeným sekvenčním grafem (podgrafem). Jazyk sekvenčního programování je velmi názorný a podporuje systémový přístup k programování. Programátor má malý prostor k vytváření chaoticky neuspořádaných programů, je nucen zamyslet se nad podstatou problému, má možnost systematicky ji popsat a realizovat. Většina řízených technologií je svou podstatou sekvenční. [19]

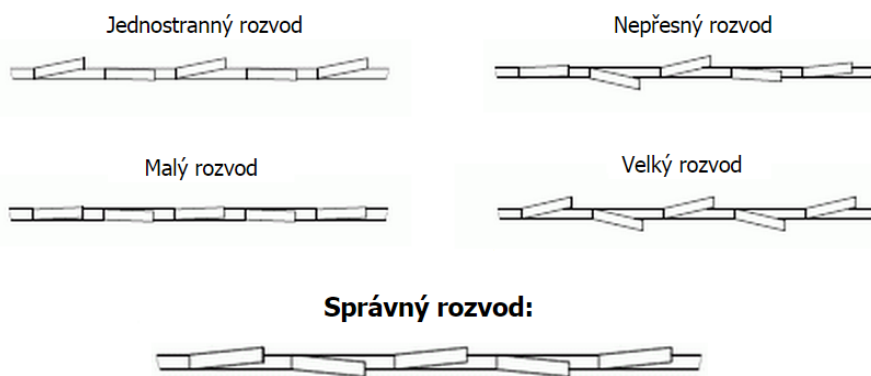


Obr. 18 Jazyk sekvenčního programování [19]

C. ROZVADĚČE ZUBŮ PILOVÝCH PÁSŮ

Rozvaděče zubů pilových pásů (dále jen „ROZ“), také známé pod lidovým názvem „šraňkovačky“, jsou zařízení, která zajišťují požadovaný stejnoměrný rozvod řezných částí (zubů) pilového pásu, za účelem dosažení optimálního řezného efektu. [21]

Správný rozvod zubů má velký vliv na výslednou drsnost řezné plochy a zejména na geometrickou přesnost rozměrů. Na jeho hodnotě a stejnoměrnosti totiž závisí množství odebraného materiálu na jeden zub. Hodnota drsnosti řezaného povrchu se zvětšuje s velikostí rozvodu (velikostí úhlu vychýlení). Podstata dosažení správného rozvodu rámových pil spočívá ve střídavém vyhýbání zubů do strany o hodnotu, která bude odpovídat požadavkům řezných vlastností. [21]



Obr. 19 Některé z možností rozvodů zubů pilových pásů [21]

C.1 Manuální

První ryze manuální přípravky pro rozvod zubů pilových pásů. Vhodné zejména pro vlastní potřebu. Měření rozvodu probíhá ve většině případů ručně, samostatným měřidlem. Rozvod je pomalý a ne moc přesný. Vyrábí se např. ve stojanovém a klešťovém provedení.



Obr. 20 Manuální ROZ [21]

C.2 Poloautomatické

Často nazývané automatické, avšak automatický je pouze režim ohybu a posuvu, bez jakékoli kontroly rozvodu. Obsluha nastaví požadovaný rozvod, rozteč a šířku pilového pásu (vše zpravidla ručně/manuálně) a spustí stroj. Ten poté začne samostatně posunovat pás a nastavovat rozvod. Měření rozvodu provádí obsluha a za běhu nastavuje míru ohybu pro zajištění co nejmenší výchylky od požadovaného stavu (opět ručně/manuálně). Každý pilový pás má rozdílné vlastnosti - profily a tloušťku zubů, míru zakalení zubů apod., proto není možné určit nastavení míry rozvodu přímo (pouze přibližně), ale až v průběhu, po zjištění, jak pilový pás reaguje.



Obr. 21 Poloautomatické ROZ [21]

C.3 Automatické

Tento typ zařízení se vyskytuje na trhu jen zřídka, protože doposud neexistuje vhodná koncepce řešící potřebu přesného měření a posuzování rozvodu zubů pilových pásů. Stávající zařízení nesplňují požadavky stejnoměrného rozvodu zubů v závislosti na odlišnostech profilu. Ani nejmodernější stroje nejsou schopny nastavovat a měřit ohyb zubů s dostatečnou přesností. Toto měření se provádí zpravidla kontaktně.



Obr. 22 Automatický ROZ [23]

C.4 Reprezentanti na trhu

Firem zabývajících se výrobou a prodejem strojů tohoto typu je velice málo. Většina vyrábí pouze manuální a poloautomatická zařízení, plně automatické stroje jsou stále ve vývoji - hledá se řešení již zmíněného problému přesného měření rozvodu. Níže jsou uvedeni nejvýznamnější reprezentanti, zabývající se výrobou a prodejem zařízení podobného typu.

C.4.1 Wood-Mizer

Společnost zabývající se moderními metodami zpracování dřeva. Je nesporným lídrem v této oblasti. Mimo jiné nabízí i plně automatizovaný rozvaděč zubů pilových pásů **BMT300** (*Obr. 22*). Samotný ohyb je řešený pneumaticky, měření ohybu je kontaktní.

Výhodou tohoto řešení je automatické snímání ohybu zubu pilového pásu a regulované nastavování síly samotného ohybu, s možností volby odchylky. Nevýhodou je princip metody měření ohybu (kontaktní), který je značně závislý na opotřebení pilového pásu. Také je nutné pilový pás vždy otáčet, pro zhotovení kompletního rozvodu - ohyb je realizován pouze jedním směrem. [23]

C.4.2 VISCAT FULGOR

Je lídrem v oblasti výroby strojů pro údržbu nástrojů v mnoha různých odvětvích - zpracování dřeva, kovů, plastů, textilu, potravin, apod. V nabídce má rozvaděč zubů **SV 80 ATV** (*Obr. 21 - vlevo*) s automatickým pracovním cyklem a volbou režimů ohybu. Ohyb je realizován elektromotorem. Výhodou je současný rozvod zubů všemi směry, vysoká rychlost a možnost rozvodu pilového kotouče. Nevýhodou je absence měření míry ohybu zubů a mechanické nastavování zdvihu pásu i rozvodu zubů. [24]

C.4.3 Streitlein GmbH

Je partnerem mnoha světových firem zabývajících se zpracováním dřeva. Podílí se na vývoji, testování, posuzování a prodeji těchto typů zařízení. Nabízí rozvaděč zubů **SV-250** (*Obr. 21 - vpravo*) s podobnou konstrukcí a funkcemi, jako je **SV 80 ATV**, ovšem pro větší rozměry pilových pásů. Výhody i nevýhody jsou podobné stroji předchozímu, zde je ovšem rozvod zubů pomalejší a nepodporuje ohyb zubů pilového kotouče. Má ale vyšší výkon, což dovoluje rozvod širších a hrubších pilových pásů. [22]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

D. 3D MODEL REÁLNÉ ZÁKLADNÍ FUNKČNÍ ČÁSTI ZAŘÍZENÍ

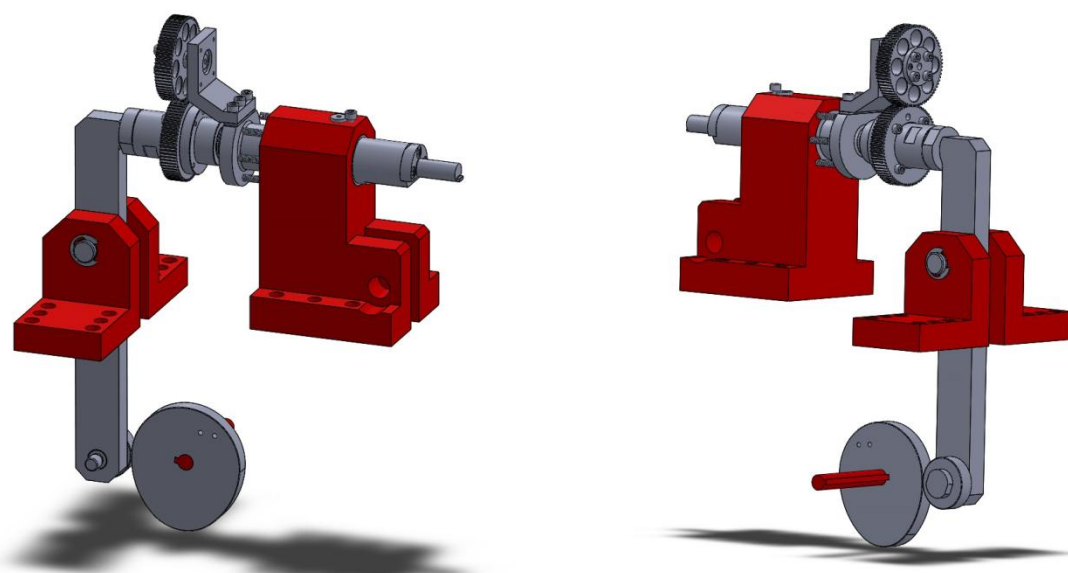
Pro návrh základní funkční části zařízení byl použit 3D návrhový software SolidWorks.

D.1 Hlavní díly

Zde jsou uvedeny hlavní díly, ze kterých se sestava skládá. Popisovaný díl je vyznačen na obrázku červenou barvou.

D.1.1 Pevné části

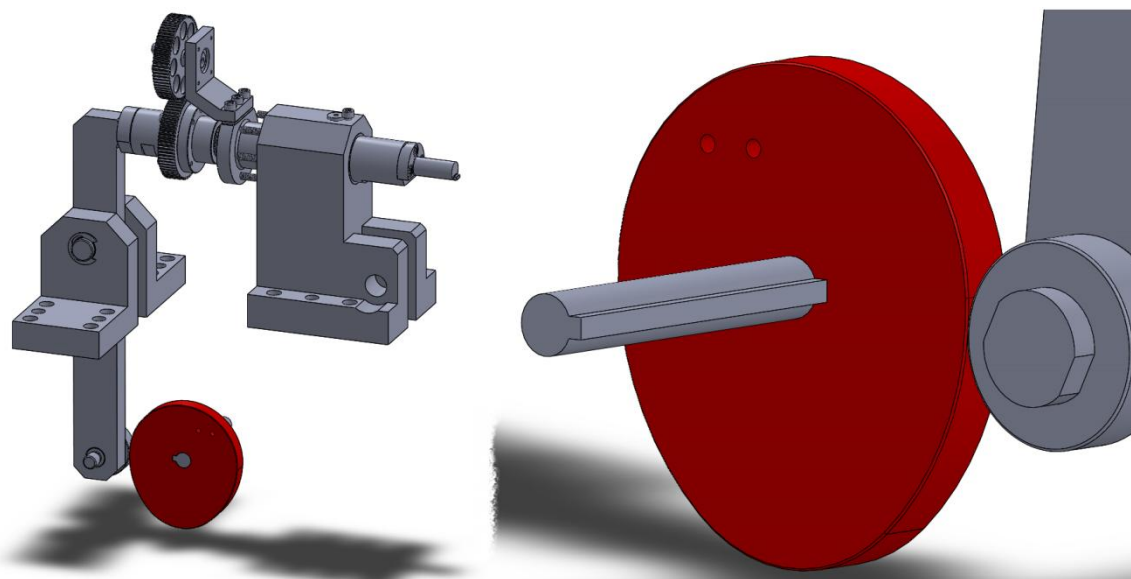
Díly uvedené na obrázku (*Obr. 23*) jsou pevně ukotveny vůči rámu zařízení - nejsou schopny pohybu. Pouze vačková hřídel je schopna rotace okolo své osy, samotná je ovšem připojena na převodovku DC motoru, který je pevně ukotven k rámu. Zbylé 3 části jsou přišroubovány k pracovní desce stroje.



Obr. 23 Pevné části

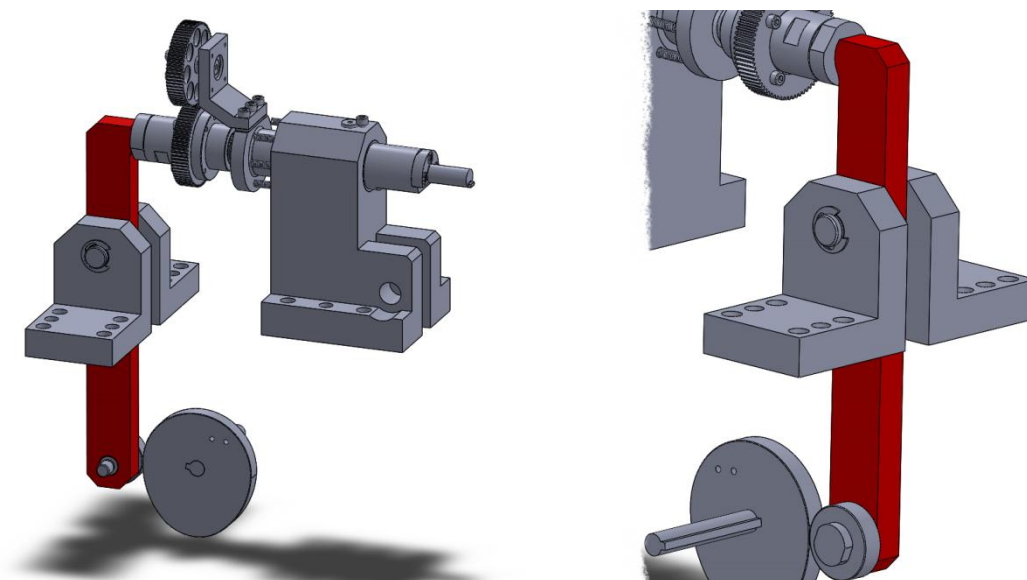
D.1.2 Vačka

Váčkový mechanismus přenáší sílu na boční profil zubu pilového pásu, prostřednictvím DC motoru, vahadla a úderníku, ke kterému je připojen ohýbací palec. Tím způsobí jeho vychýlení z roviny pilového pásu. Přenos síly mezi vačkou a vahadlem je z důvodu minimalizace tření styčných ploch, realizován pomocí ložiskového uložení.

*Obr. 24 Vačka*

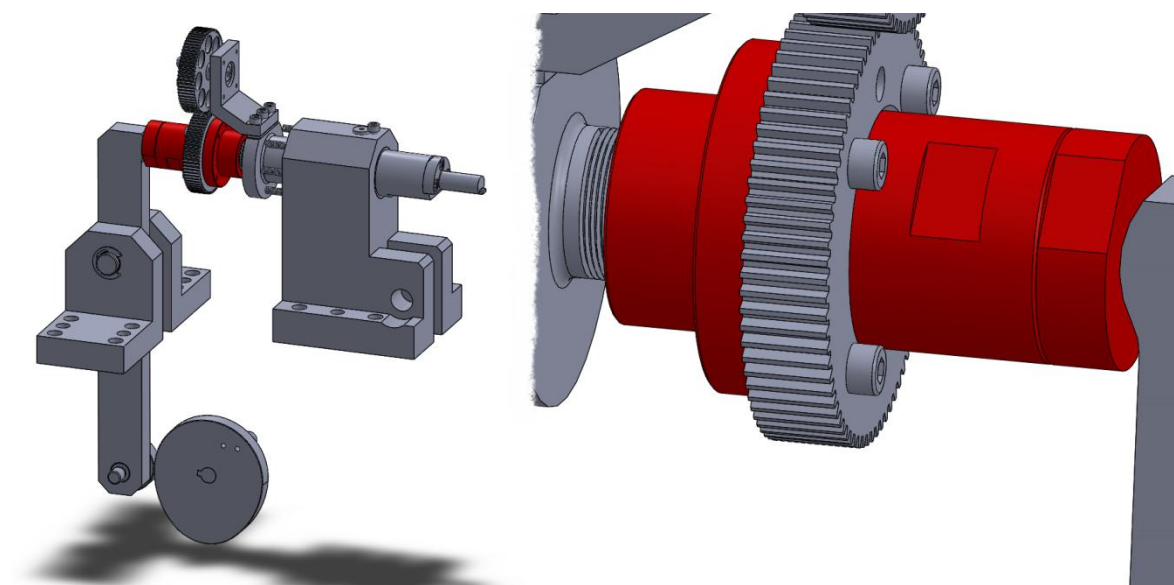
D.1.3 Vahadlo

Vahadlem je nazývaná část, zajišťující přenos síly mezi vačkou a úderníkem. Je uloženo v držáku, pevně připevněnému k rámu pomocí čepu. Pohyb je tedy možný pouze rotační, osa rotace je osa čepu. Přenášená síla na úderník, se násobí poměrem zvoleného pákového uložení.

*Obr. 25 Vahadlo*

D.1.4 Úderník

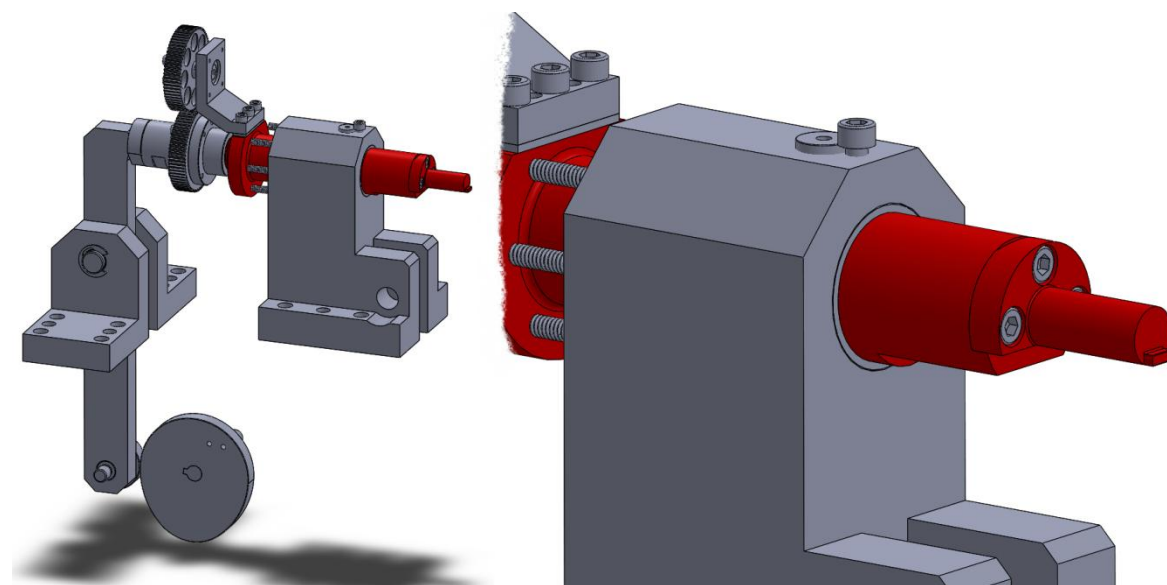
Úderníkem je nazývaná část, zajišťující přenos síly mezi vahadlem a ohýbacím palcem. Ohýbací palec a úderník je v podstatě jedna část, úderník má ovšem oproti ohýbacímu palci možnost rotace okolo své osy v závitovém uložení. Tímto se nastavuje míra ohybu zubu pilového pásu, vahadlo totiž vykonává stále stejný pohyb daný geometrií vačky.



Obr. 26 Úderník

D.1.5 Ohýbací palec

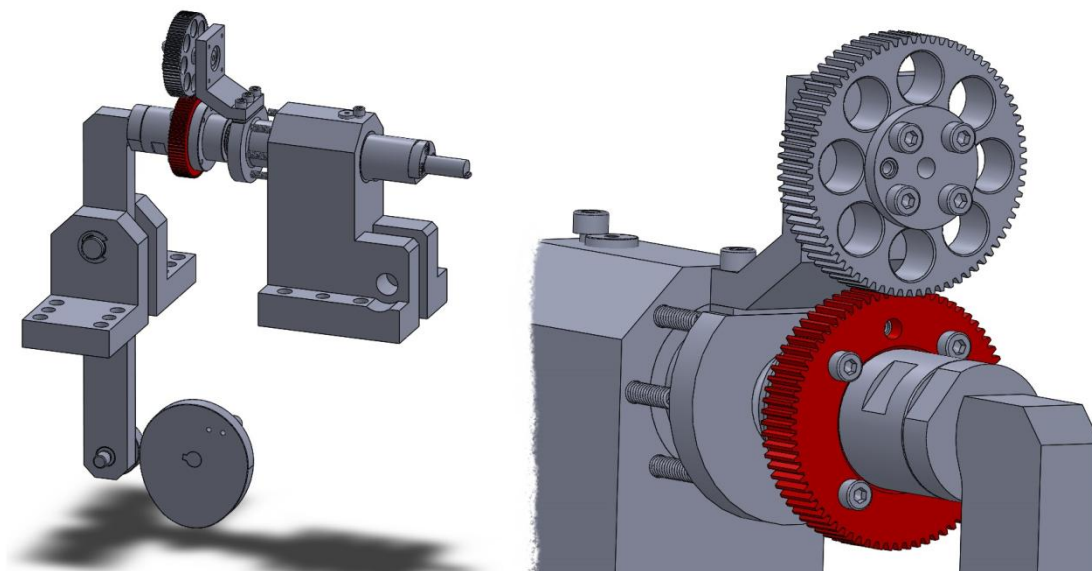
Ohýbacím palcem je nazývaná část, zajišťující přenos síly mezi úderníkem a samotným zubem pilového pásu. Návrat do původní polohy je zajištěn směrovými pružinami.



Obr. 27 Ohýbací palec

D.1.6 Hnané ozubené kolo

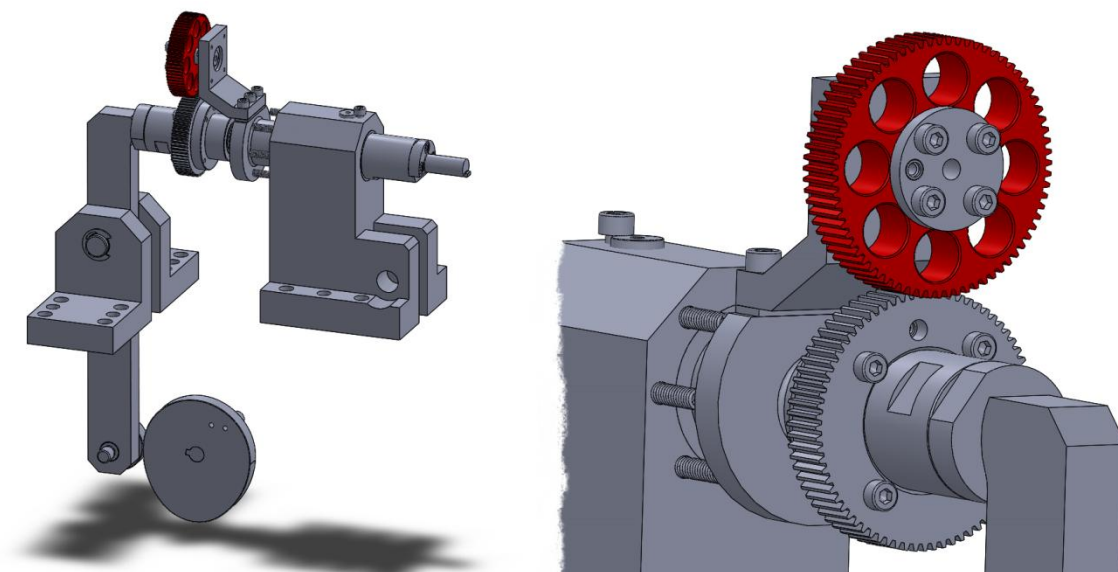
Toto ozubené kolo je pevně spojeno s úderníkem a zprostředkovává jeho horizontální posuv - nastavení míry ohybu zubu pilového pásu. Převodový poměr mezi kolem hnaným a hnacím je 1:1, má 72 zubů a jedna rotace o 2π provede posun úderníku o 1 mm (závitové uložení má stoupání 1 mm/otáčku).



Obr. 28 Hnané ozubené kolo

D.1.7 Hnací ozubené kolo

Toto ozubené kolo je připojeno na hřídel KM a je pevně spojeno s částmi ohýbacího palce. Přímou nastavuje míru ohybu zubu pilového pásu prostřednictvím hnaného kola.

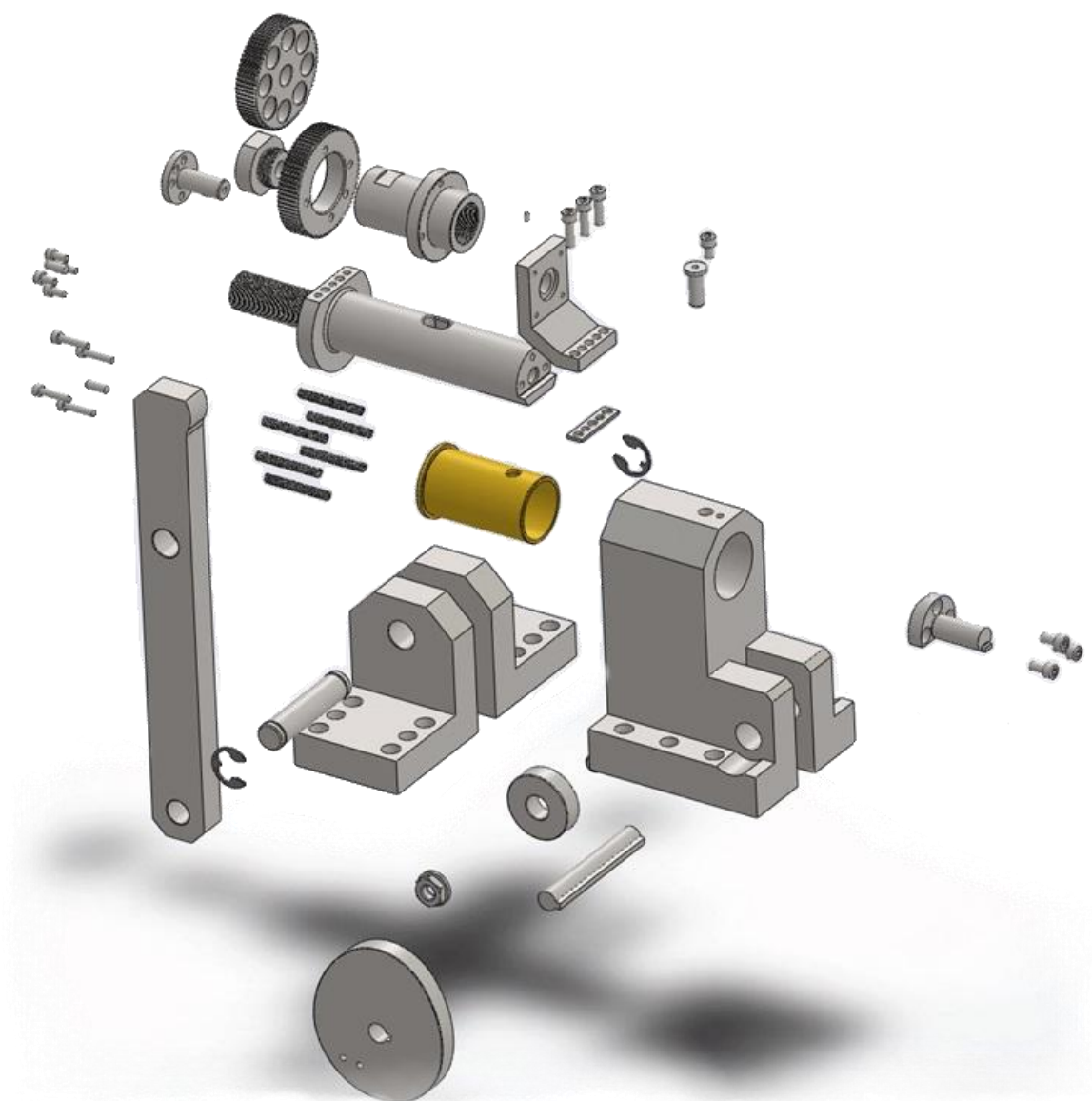


Obr. 29 Hnací ozubené kolo

D.2 Kompletní rozložená sestava

Výše jsou uvedeny pouze základní funkční části. Celková sestava se skládá z následujících dílů (*Obr. 30*). Všechny díly jsou vyvazbeny, aby byl přípustný pohyb plně definován a bylo tak možné provést pohybovou analýzu.

Díly také nesou informaci o materiálu, z kterého jsou vyrobeny, což je částečně vidět i na barvách a odstínech jednotlivých součástí. Tyto informace definují např. hustotu, modul pružnosti, pevnost, poměr tlumení, různé materiálové konstanty apod., což je užitečné při simulacích probíhajících dějů.



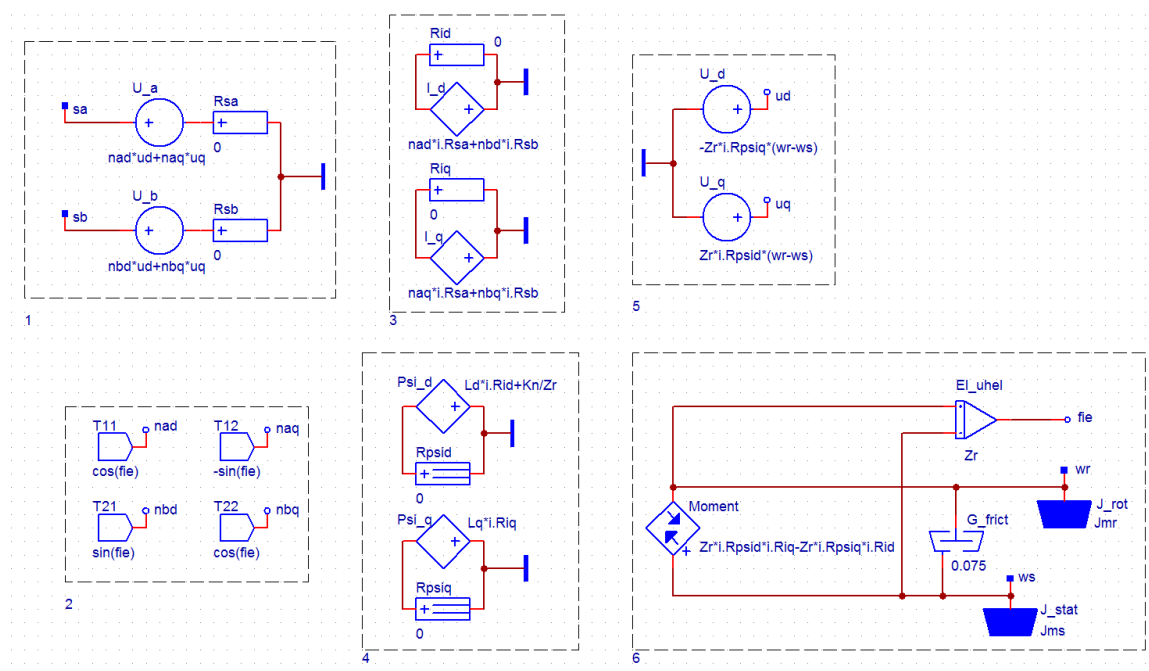
Obr. 30 Kompletní rozložená sestava

E. FYZIKÁLNÍ SIMULAČNÍ MODEL

Zde je uveden fyzikální simulační model sestavený v prostředí DYNAST.

E.1 Krokový motor

Podle závěrů odvozených v kapitole **B.4.3** byl sestaven fyzikální model KM.

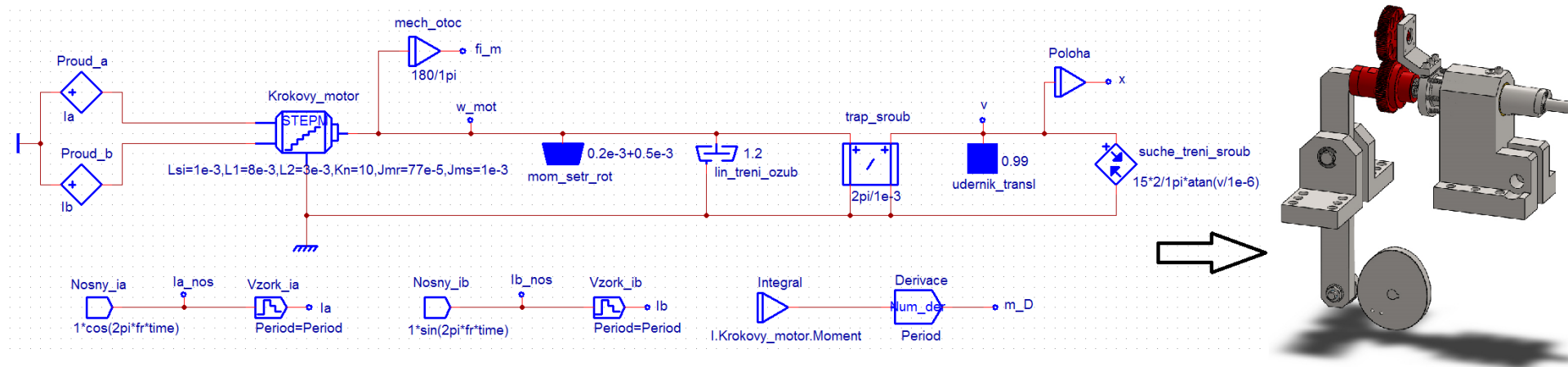


Obr. 31 Model krokového motoru v prostředí DYNAST

Orámované, číselně označené části, definují:

- 1) Napěťové rovnice obou vinutí podle **rovnice (26)**.
- 2) Transformační matice **T** pro výpočty v části **1** a **3**.
- 3) Stanovení proudů v d, q osách pomocí zpětné transformace uvedené v **rovnici (37)**.
- 4) Realizace výpočtu magnetických toků v d, q osách podle **rovnice (39) a (41)**.
- 5) Výsledné rovnice elektrické rovnováhy (sestavené z **rovnice (44) a (45)**), udávající transformované indukované napětí.
- 6) Výpočet vnitřního elektromagnetického momentu (**rovnice (53)**) včetně definice momentů setrvačností, tření a určení elektrického úhlu pootočení rotoru.

E.2 Posuvná část



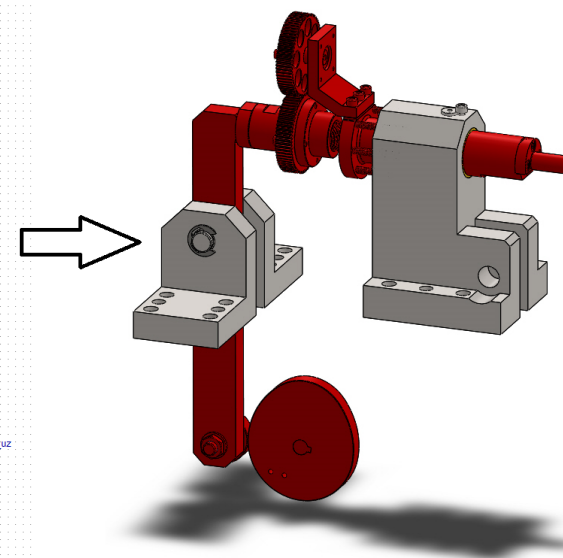
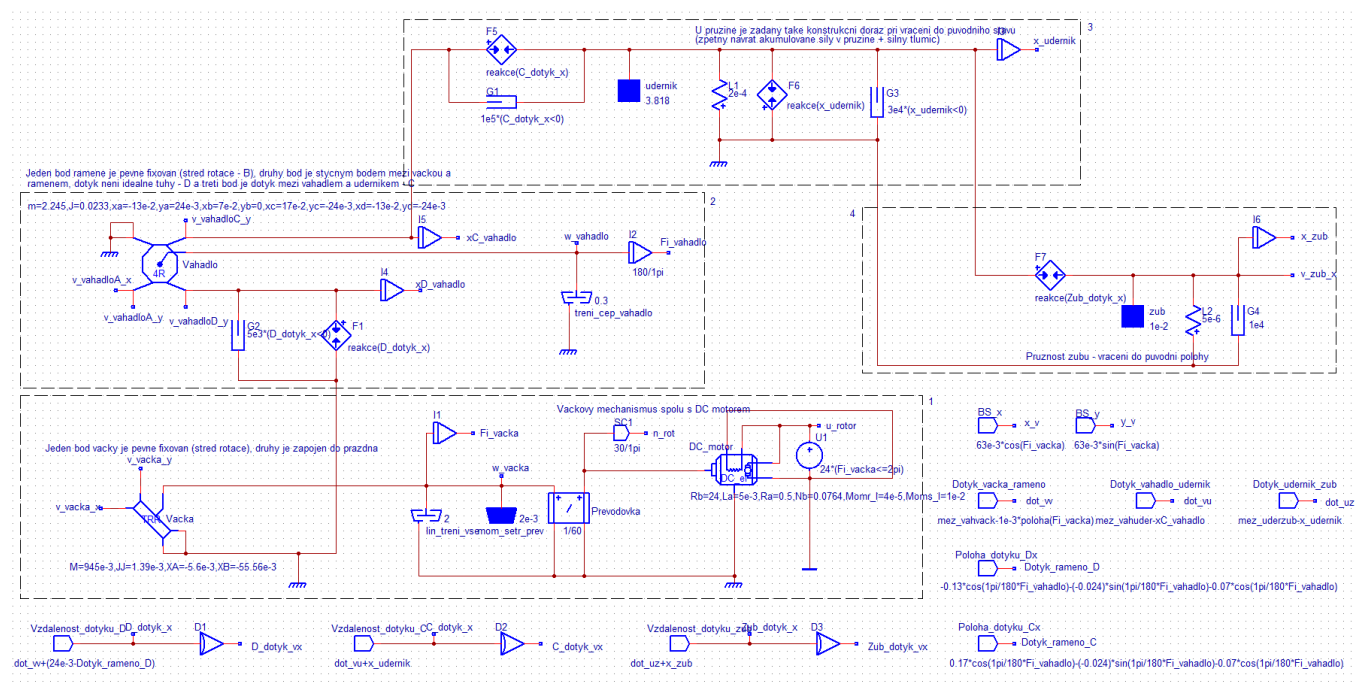
Obr. 32 Model části zařízení zajišťující nastavení míry ohybu zubu pilového pásu

Tento model reprezentuje část zařízení, vyznačenou červenou barvou na přiloženém obrázku (**Obr. 32**). Samotný KM zde není ve 3D grafice vymodelován, jeho parametry jsou totiž k dispozici v datasheetu. Tyto parametry jsou nastaveny v bloku s názvem **Krokovy_motor** reprezentující model na obrázku **Obr. 31**.

Jako vstupy KM jsou zde dva ideální proudové zdroje (**Proud_a** a **Proud_b**), s žádaným průběhem proudu (hodnoty na svorkách **Ia** a **Ib**). Stator krokového motoru je ukotven k rámu, rotor je připojen na hnací ozubené kolo, pohánějící hnané ozubené kolo, spojené s úderníkem. Lineární tření **lin_treni_ozub** je mezi zuby hnacího a hnaného ozubeného kola. Všechny červeně vyznačené části mají moment setrvačnosti **mom_setr_rot**.

Posuv úderníku ve směru ohybu je realizován trapézovým šroubem se stoupáním 1 mm na otáčku (převod pohybu rotačního na translační - blok *trap_sroub*). Úderníková část včetně hnaného ozubeného kola má hmotu *udernik_transl* a suché tření *such_treni_sroub*. Poloha i rychlost před i za převodem je snímána pomocí integrátoru *mech_otoc* a *Poloha* a dostupná na svorkách *w_mot* a *v*.

E.3 Ohýbací část



Obr. 33 Model části zařízení provádějící samotný ohyb zubu pilového pásu

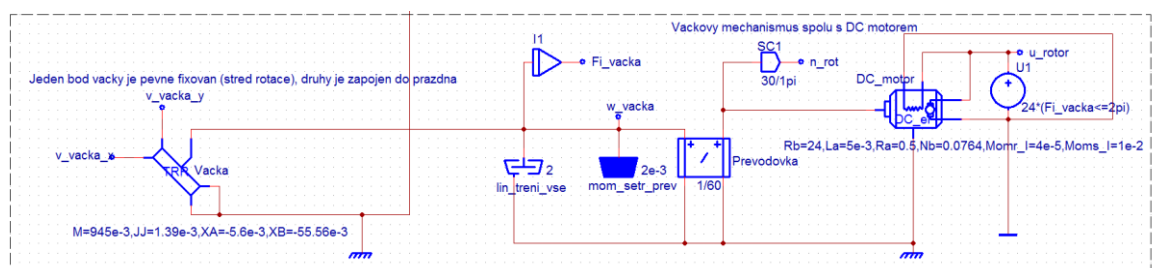
Část zařízení vyznačená červenou barvou na přiloženém obrázku (**Obr. 33**) odpovídá uvedenému modelu. Samotný DC motor zde není ve 3D grafice vymodelován, jeho parametry jsou totiž k dispozici v datasheetu. Tyto parametry jsou nastaveny v bloku s názvem **DC_motor**.

Parametry počátečních vzdáleností, tření, pružin, reakčních sil, tlumičů apod. jsou zde zadány pouze typově, pro zobrazení základních průběhů a chování celé sestavy. Pro detailní určení parametrů celé sestavy by bylo nutné provést měření pevnosti a pružnosti celého zařízení a každého pilového pásu, což není cílem této práce.

Orámované, číselně označené části, definují:

- 1) Vačkový mechanismus - DC motor, převodovka a samotná vačka
- 2) Vahadlo
- 3) Úderníková část se zpětným mechanickým dorazem
- 4) Zub pilového pásu určený k ohybu

Bloky mimo orámované oblasti jsou výpočty nutné k úspěšnému provedení simulace a k zobrazení dílčích výsledků.

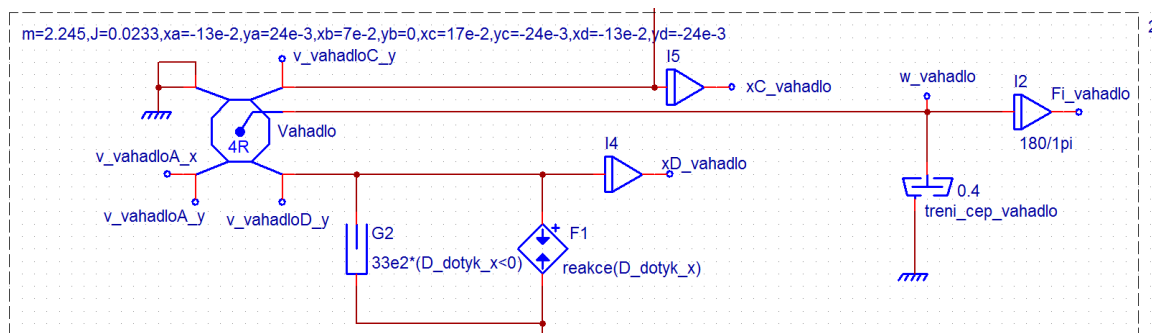


Obr. 34 Model části zařízení pro ohyb zubu pilového pásu - část 1

Tato část se týká vačkového mechanismu. Samotná vačka (blok **Vacka**) je poháněna DC motorem **DC_motor** přes převodovku **Prevodovka** s převodovým poměrem 1:60 „do pomala“. Je použit 24V DC motor s jmenovitým výkonem 250W. Tento motor je napájen po dobu jedné otáčky vačky.

Veškeré tření a momenty setrvačnosti související s přenosem síly z rotoru DC motoru na těleso vačky jsou reprezentovány bloky **lin_treni_vse** a **mom_setr_prev**. Úhel otočení vačky (**Fi_vacka**), tedy úhel otočení rotoru za převodovkou, je snímán integrátorem **I1** (spá-

dová veličina vystupující z převodovky je rychlost, při rotačním pohybu úhlová rychlost a integrál úhlové rychlosti je úhel otočení). Výstup z převodovky je napojen na uzel úhlové rychlosti vačky a tím je střed rotace vačky spojen s rotorem DC motoru.

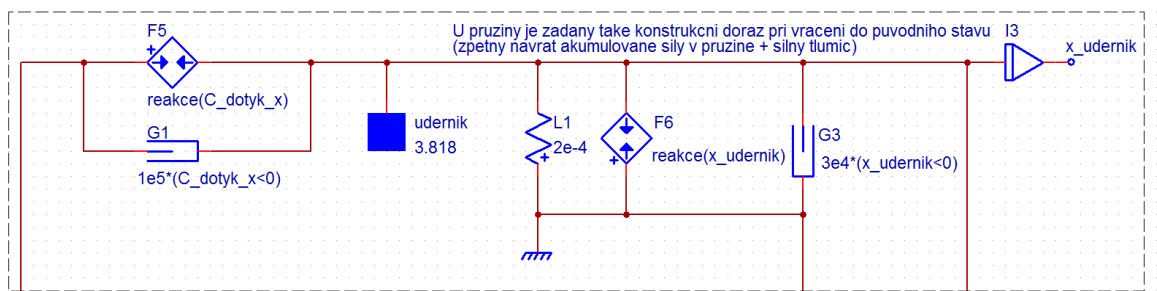


Obr. 35 Model části zařízení pro ohyb zubu pilového pásu - část 2

Model této části odpovídá vahadlu. Je reprezentováno modelem tuhého tělesa v rovině, se čtyřmi rotačními kinematickými dvojicemi. První dvojice označená jako **A** je zapojena do prázdná a je osově souměrná s dvojicí **D** podle osy vahadla. Dvojice **B** je ukotvena k rámu, je to tedy střed rotace. X-tá složka dvojice **C** je styčným bodem mezi vahadlem a úderníkem, y-tý složka je volná. Poslední dvojice **D** má opět y-tou složku volnou a x-tá složka je styčným bodem mezi vahadlem a vačkou.

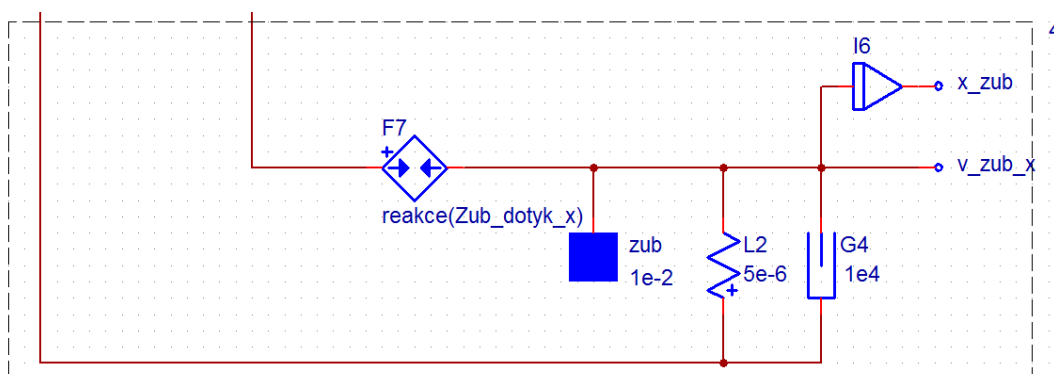
Vačka není s vahadlem spojena přímo, ale prostřednictvím síly produkované zdrojem **F1**. Tato síla závisí na poloze vačky, která je zadána tabelárně (závislost poloměru vačky na jejím natočení).

Po dotyku styčných ploch začne zdroj síly **F1** zmenšovat hodnotu **xD_vahadlo** a tím vahadlem pohybovat. Tlumič **G2** brání odrazům styčných ploch. Integrátor **I5** snímá polohu bodu **C** vahadla (**xC_vahadlo**), **I2** zase úhel natočení vahadla (**Fi_vahadlo**). Tlumič **treni_cep_vahadlo** nahrazuje tření mezi čepem a vahadlem, viditelné při návratu do stabilní polohy (pouze vlivem gravitace, bez ostatních silových účinků).



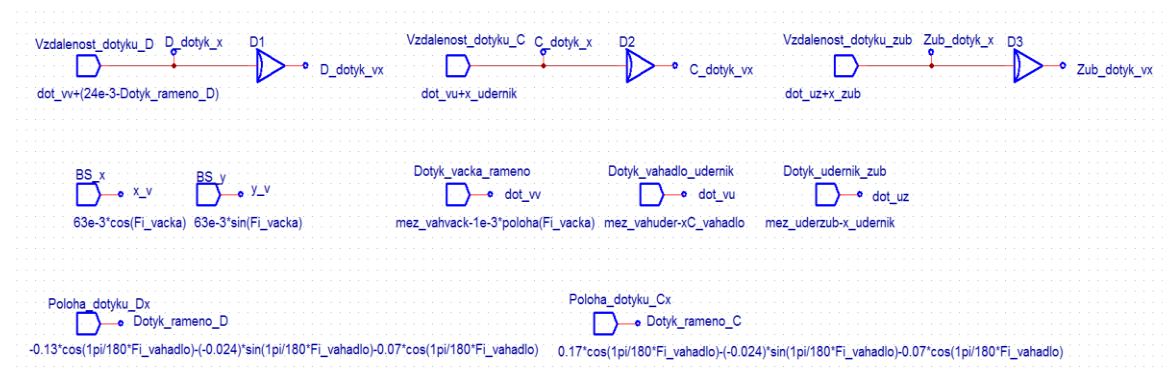
Obr. 36 Model části zařízení pro ohyb zubu pilového pásu - část 3

Model zobrazený na obrázku **Obr. 36** odpovídá úderníkové části, tedy celé části vykonávající pohyb se samotným úderníkem a ohýbacím palcem (včetně KM a ozubeného soukolí). Celá tato část je reprezentovaná hmotou **udernik**. Reakční síla (zdroj síly **F5**) začíná působit po dotyku vahadla a úderníku a odraz je zatlumen tlumičem **G1**. Celá část vykoná pohyb daný geometrií vačky a při návratu do původní polohy (návrat je proveden pomocí směrné pružiny **L1**) narazí na konstrukční doraz, kde se předá veškerá kinetická energie pružiny - tato je zpětně se silným tlumením (tlumič **G3**) předána úderníku (zdroj síly **F6**) a postupně zanikne. Skutečná poloha úderníku je snímána integrátorem **I3** a dostupná v uzlu **x_udernik**.



Obr. 37 Model části zařízení pro ohyb zubu pilového pásu - část 4

Zde vyobrazený model znázorňuje zub určený k ohybu. Reakční síla působící ve směru vychýlení zubu (zdroj síly **F7**), začne působit při dotyku ohýbacího palce (který je spojen s úderníkem) a zubu samotného. Zub pilového pásu je znázorněn pomocí hmoty **zub**. Pružnost zubu je realizována jako pružina s tlumičem (**L2** a **G4**). Míra vychýlení je k dispozici v uzlu **x_zub** za integrátorem **I6**.



Obr. 38 Výpočty používané v dynamickém modelu

Na obrázku **Obr. 38** v uzlech x_v a y_v je zachycena poloha bodu vačky v největší vzdálenosti od středu rotace, tedy v místě dotyku vačky a vahadla při jeho největším vychýlení.

Dotyk_rameno_D a **Dotyk_rameno_C** jsou polohy styčných bodů vahadlo/vačka a vahadlo/úderník v globální souřadné soustavě v ose x, jejíž počátek je umístěn v ose rotace vahadla (v místě ukotvení k rámu). Tyto vztahy byly získány pomocí D-H notace a určují kinematickou polohu v závislosti na úhlu natočení vahadla.

Parametry **dot_vv**, **dot_vu** a **dot_uz** jsou pomocné hodnoty pro výpočet vzdálenosti dvou styčných bodů. Jsou spojené s počáteční vzdáleností styčných bodů a určují okamžik dotyku, či jejich oddělení.

Většina výpočtů vede k určení parametrů **D_dotyk_x**, **C_dotyk_x** a **Zub_dotyk_x**. Ty určují reálnou vzdálenost mezi styčnými body jednotlivých objektů. Na základě těchto hodnot se aktivují reakční síly a tlumiče. Za derivačními členy jsou na příslušných uzlech dostupné rychlosti v ose x - **D_dotyk_vx**, **C_dotyk_vx** a **Zub_dotyk_vx**.

F. SIMULAČNÍ EXPERIMENTY

Zde jsou separátně uvedeny výstupy simulačních experimentů na posuvné a ohýbací části zařízení, pro představení chování celého procesu nastavení míry ohybu, či samotného ohybu zubu pilového pásu.

F.1 Posuvná část

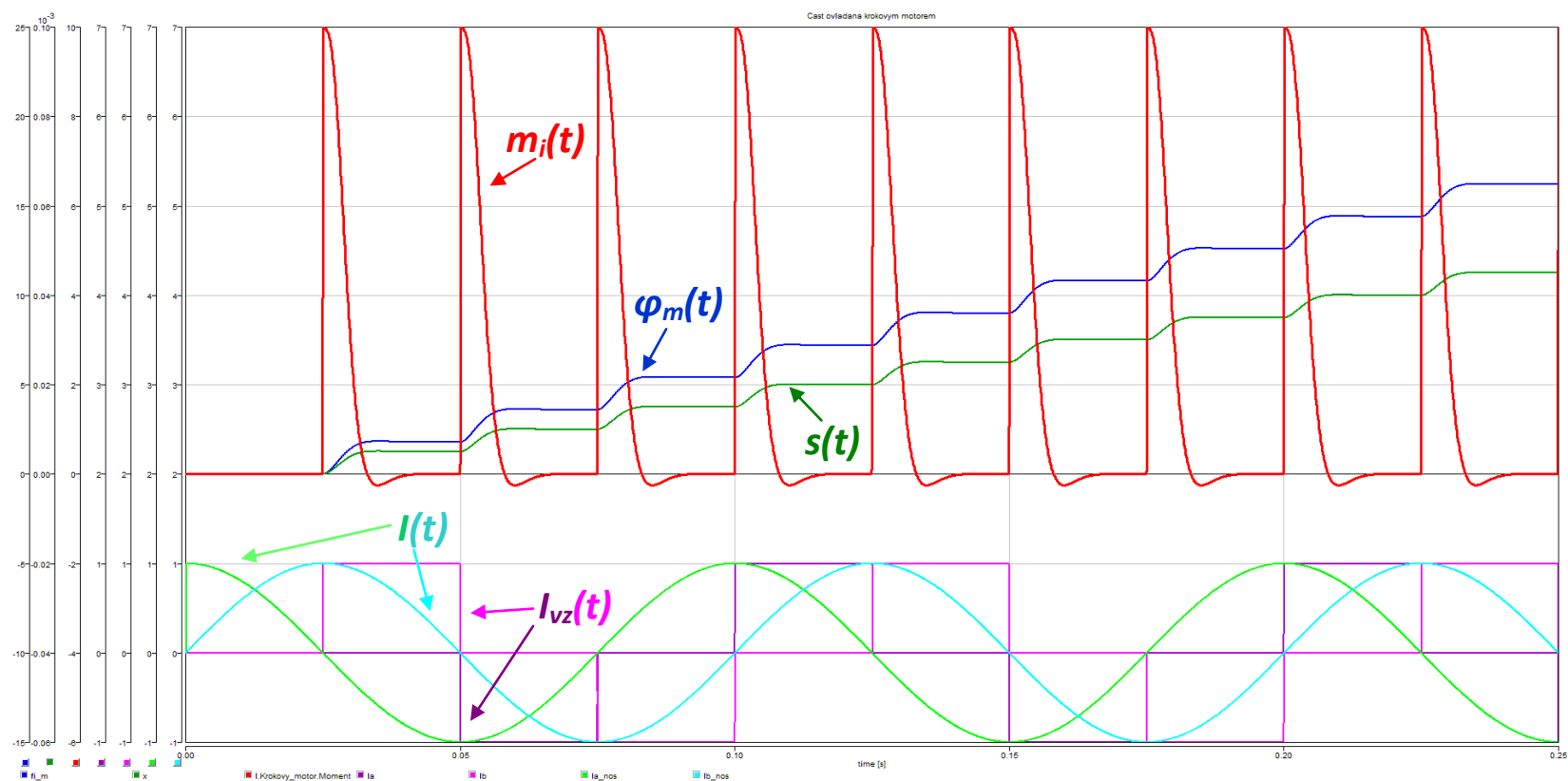
Počet zubů rotoru KM je konstrukčně daný (50 zubů). Počet pólů rotoru je také pevně dán použitím axiálně polarizovaného neodymového permanentního magnetu (2 póly - severní a jižní), stejně jako je pevně daný počet fází statorového vinutí (2 fáze). Tyto parametry jednoznačně určují mechanický úhel natočení rotoru při plném kroku - při otočení o 360° elektrických (statorové vinutí) se rotor pootočí o $1,8^\circ$ mechanických ($360/(50 \cdot 2 \cdot 2)$). Toto tvrzení je dokázáno na následujícím obrázku (**Obr. 39**). Průběh je vždy zobrazen po dobu čtvrtiny sekundy.

Pomocí $\varphi_m(t)$ je označen mechanický úhel natočení rotoru KM. Jak je vidět, jeden krok činí již zmíněných $1,8^\circ$. Stejný trend má průběh s označením $s(t)$, který znázorňuje reálné nastavení míry ohybu (převod rotační na posuvný přes šroubovici). Tento posuv, při pootočení rotoru o $1,8^\circ$, je roven $5 \mu\text{m}$. Průběh $m_i(t)$ představuje moment na hřídeli KM.

Průběhy $I(t)$ znázorňují nosné sinusové proudy vzájemně posunuté o $\pi/2$, které se déle vzorkují s periodou určenou režimem krokování (plný krok činí 1/4 periody nosného signálu, poloviční 1/8 atd.). Tento fakt je dán počtem fází a pólů. Navzorkované průběhy $I_{vz}(t)$ jsou již proudy, které jsou připojeny na statorová vinutí.

Při plném kroku je vidět, že výstupní proudy nabývají pouze maximálních, minimálních a nulových hodnot nosného sinusového průběhu. Jeví se tedy jako impulzy stejné amplitudy, což je dáno režimem krokování. Tento fakt se změní při režimu dělení kroku.

Rychlost krokování je možné měnit pouze frekvencí. Je nutné ovšem brát v potaz konstrukční parametry a zátěž připojenou na rotoru. Při volbě nepřiměřené frekvence vůči zmíněným parametrům, může dojít ke ztrátě kroku, případně zastavení (popř. chvění) rotoru. Je to způsobeno tím, že rotor není schopen včas ztotožnit svou polohu s vektorem magnetického pole statorového vinutí, a to vlivem velkého momentu setrvačnosti.



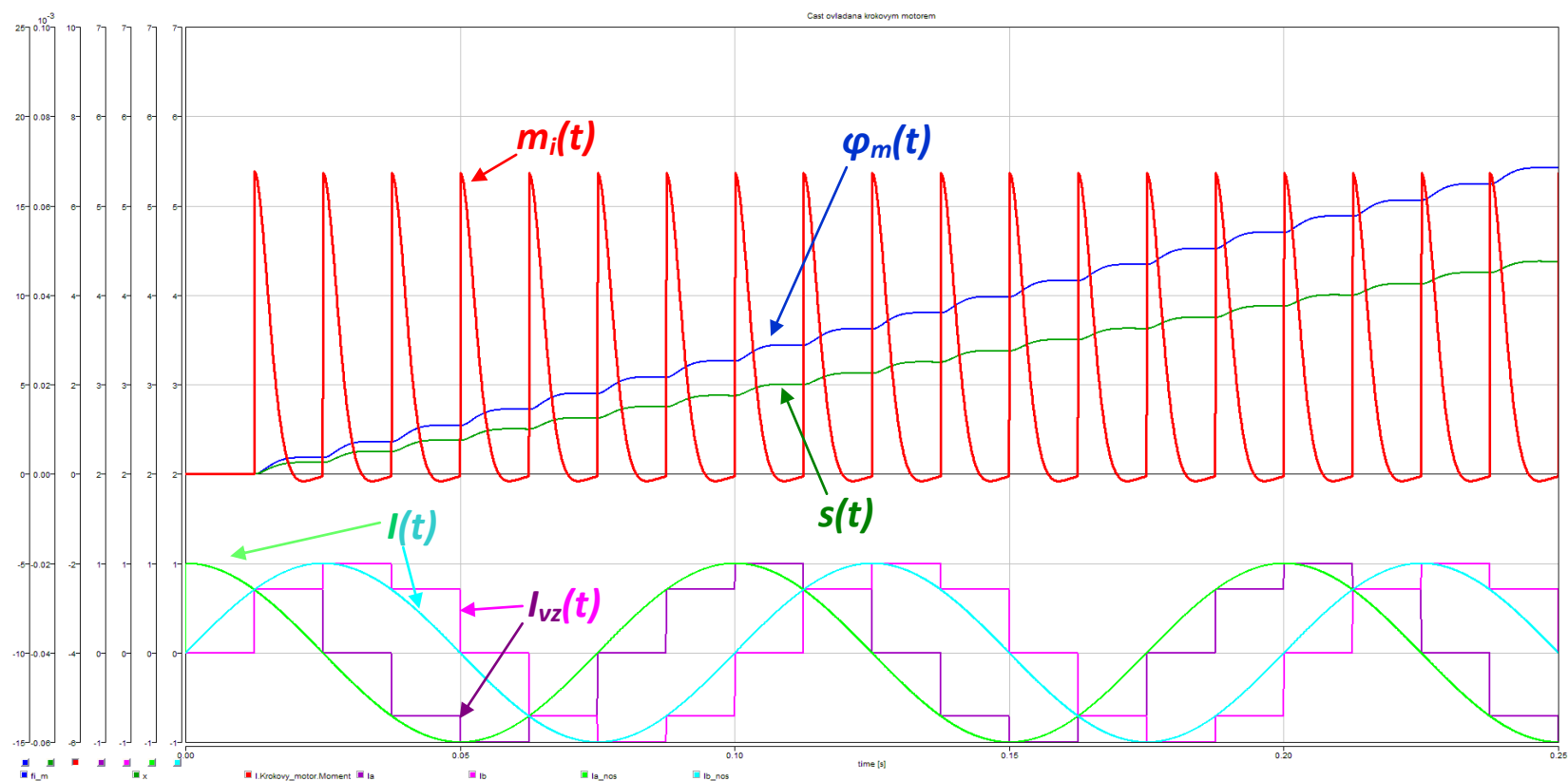
Obr. 39 Proces nastavení míry ohybu zubu pilového pásu krokovým motorem - simulace 1

Nastavení:

Režim krokování: **plný krok**

Frekvence nosného proudu: **10 Hz**

Amplituda nosného proudu je ve všech simulacích této kategorie zvolena stejně a rovná se 1 A. Čas simulace je taktéž stejný a je vymezen na čtvrtinu sekundy.



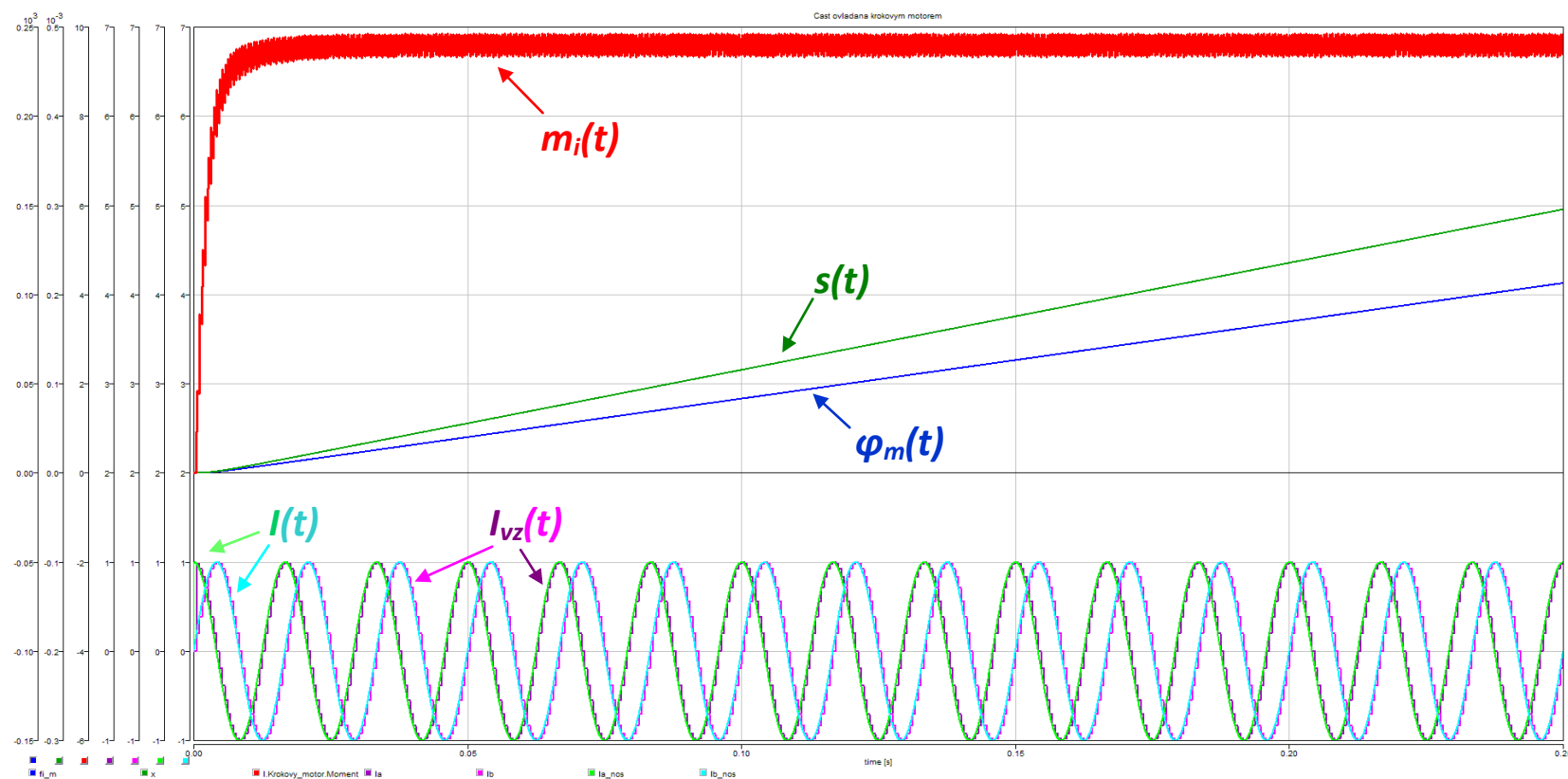
Obr. 40 Proces nastavení míry ohybu zubu pilového pásu krokovým motorem - simulace 2

Nastavení:

Režim krokování: **půlený krok**

Frekvence nosného proudu: **10 Hz**

Frekvence nosného proudu zůstává stejná, režim krokování je půlený krok. Je patrné, že je perioda vzorkování proudového sinusového signálu poloviční. Mechanické pootočení rotoru na jeden krok je $0,9^\circ$, výsledný posun $2,5 \mu\text{m}$ a pro dosažení stejného posuvu jako při plném kroku je potřeba 2x více kroků. Krouticí moment také poklesl. Krokování je stále velice dobře patrné.



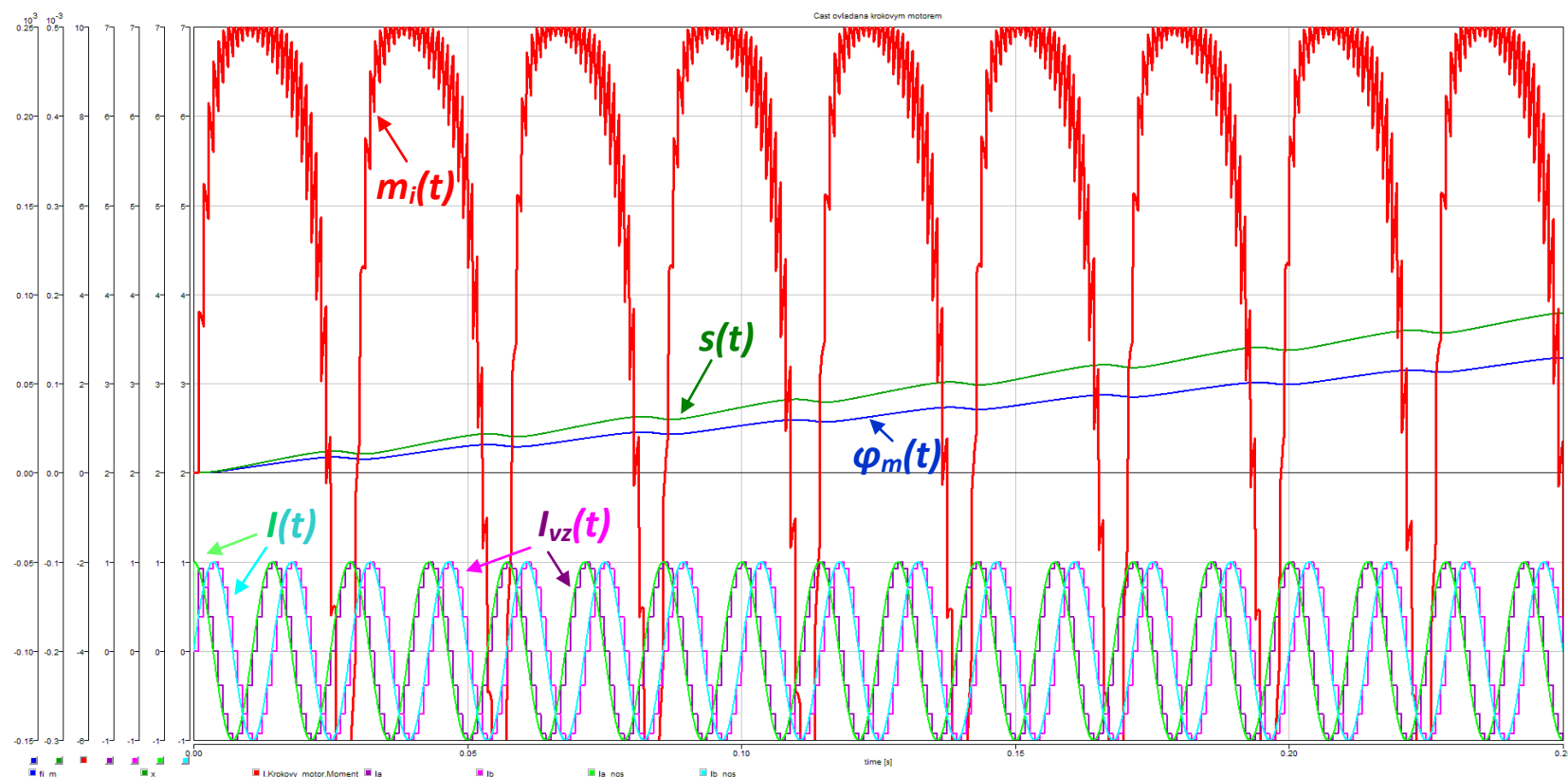
Obr. 41 Proces nastavení míry ohybu zubu pilového pásu krokovým motorem - simulace 3

Nastavení:

Režim krokování: **osminový krok**

Frekvence nosného proudu: **60 Hz**

Frekvence nosného proudu je navýšená na hodnotu 60 Hz, což je v této sestavě hraniční případ, režim krokování je 1/8 plného kroku. Jeden krok odpovídá pootočení rotoru o 13,5 úhlové minuty, výsledný posuv činí 0,625 μm . Mechanické otočení rotoru o 360° se vykoná za 0,85 sekundy, krokování již není patrné. Jak je také vidět, zjemňováním kroku klesá rezonance momentu.



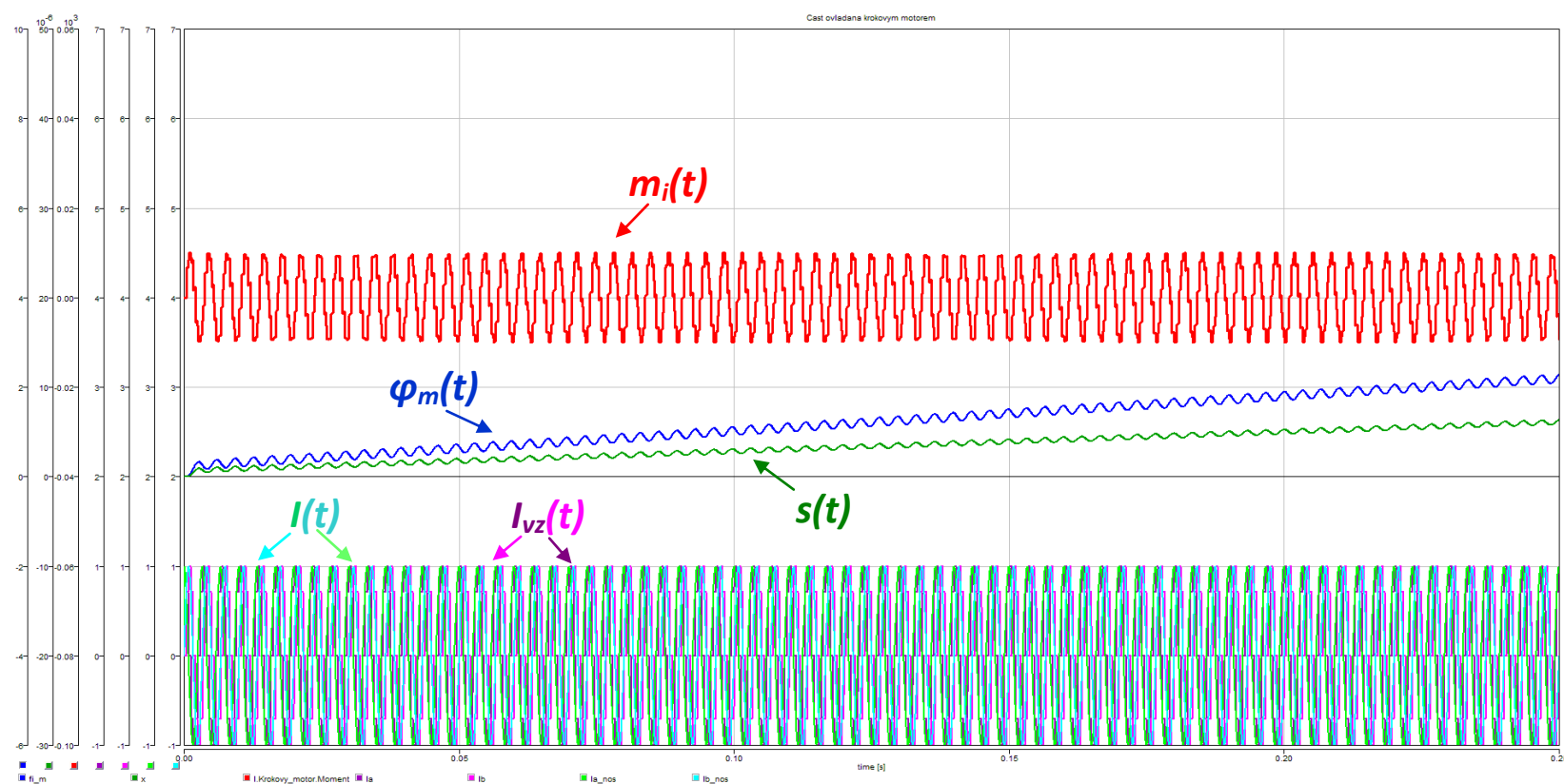
Obr. 42 Proces nastavení míry ohybu zubu pilového pásu krokovým motorem - simulace 4

Nastavení:

Režim krokování: **čtvrtinový krok**

Frekvence nosného proudu: **70 Hz**

Frekvence nosného proudu je navýšená na hodnotu 70 Hz, režim krokování je 1/4 plného kroku. Z průběhů je jasně patrná ztráta kroku, z důvodu příliš vysoké frekvence. Rotor se stále otáčí, ale pomaleji než na **Obr. 41** (360° se vykoná za 1,4 sekundy) i při zvýšené frekvenci. Z momentu je patrné, že je vektor magnetického pole statoru příliš rychlý - střídavě rotor zrychluje a brzdí.



Obr. 43 Proces nastavení míry ohybu zubu pilového pásu krokovým motorem - simulace 5

Nastavení:

Režim krokování: **poloviční krok**

Frekvence nosného proudu: **300 Hz**

Frekvence nosného proudu je navýšená na hodnotu 300 Hz, režim krokování je poloviční krok. V tomto případě se již rotor pouze chvěje (rezonuje) téměř bez pohybu, z důvodu příliš vysoké frekvence. Momentové rázy sahají do maximálních hodnot v rozběhu i brzdění. Zde je zobrazen typově nejhorší možný případ, který může nastat. Vzhledem k momentu motoru záleží primárně na zátěži spojené s rotorem.

F.1.1 Shrnutí

Z výše uvedených simulací (*Obr. 39 - Obr. 43*) vyplývají následující závěry:

- v režimu plného kroku odpovídá 1 krok mechanickému otočení rotoru o $1,8^\circ$
- vzhledem k vůlím v trapézovém šroubu a ozubeném soukolí je rozlišovací schopnost KM (i při plném kroku) více než dostačující
- maximální možná rychlost otáčení motoru bez ztráty kroku je cca 50 RPM
- dělením kroku se zvyšuje vzorkovací frekvence nosného proudu a z rádooby impulzního průběhu se stává zjevně vzorkovaný sinusový průběh, náležící statorovému vinutí
- dělením kroku se snižují momentové rázy, tedy klesá rezonance rotoru a chod motoru je pak hladší, tišší a má větší rozlišovací schopnost
- ztráta kroku nemusí být na první pohled patrná, mnohdy je zjištělná pouze pomocí zpětné vazby z enkodéru

F.2 Ohýbací část

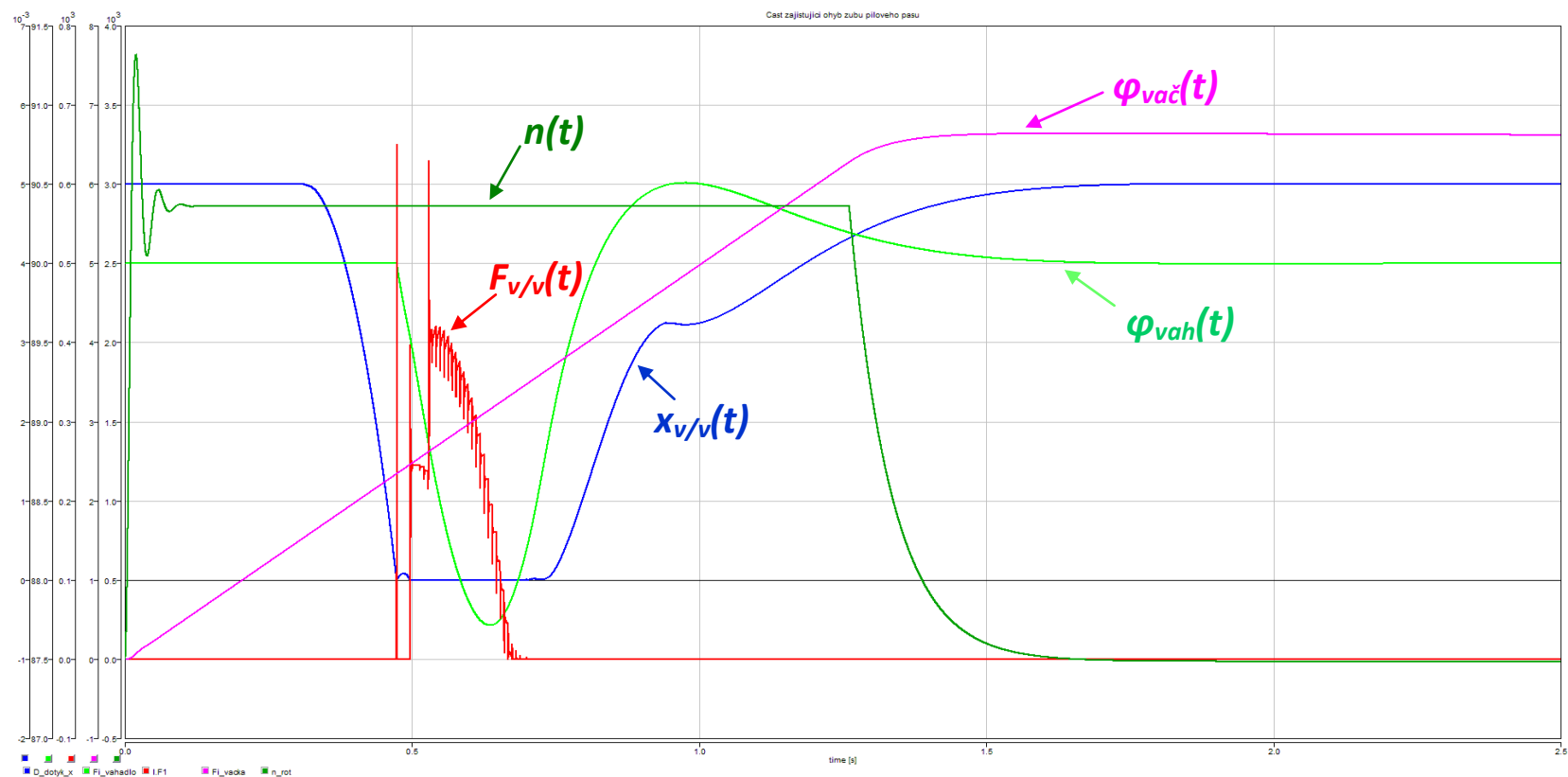
Jak je zobrazeno na obrázku *Obr. 33*, ohýbací část se skládá z vačky, vahadla, úderníku, ohýbacího palce a všech součástí s nimi pevně spojených. Uvedené základní 4 části jsou vyznačeny i ve schématu v DYNASTu.

Počáteční vzdálenost mezi dolním styčným bodem vahadla a styčnou plochou vačky je 5 mm, mezi horním styčným bodem vahadla a úderníkem 1 mm a mezi ohýbacím palcem a samotným zubem pilového pásu 2 mm. Tyto hodnoty jsou definovány v ustáleném stavu.

Závislost úhlu pootočení na poloměru vačky v ose x je dána tabelárně. Tyto hodnoty byly získány z 3D modelu v prostředí SolidWorks a jsou normovány na nulovou hodnotu pro část s konstantním poloměrem. Počáteční orientace vačky je 180° od styčné plochy s vahadlem pro bod s největší vzdáleností od osy rotace.

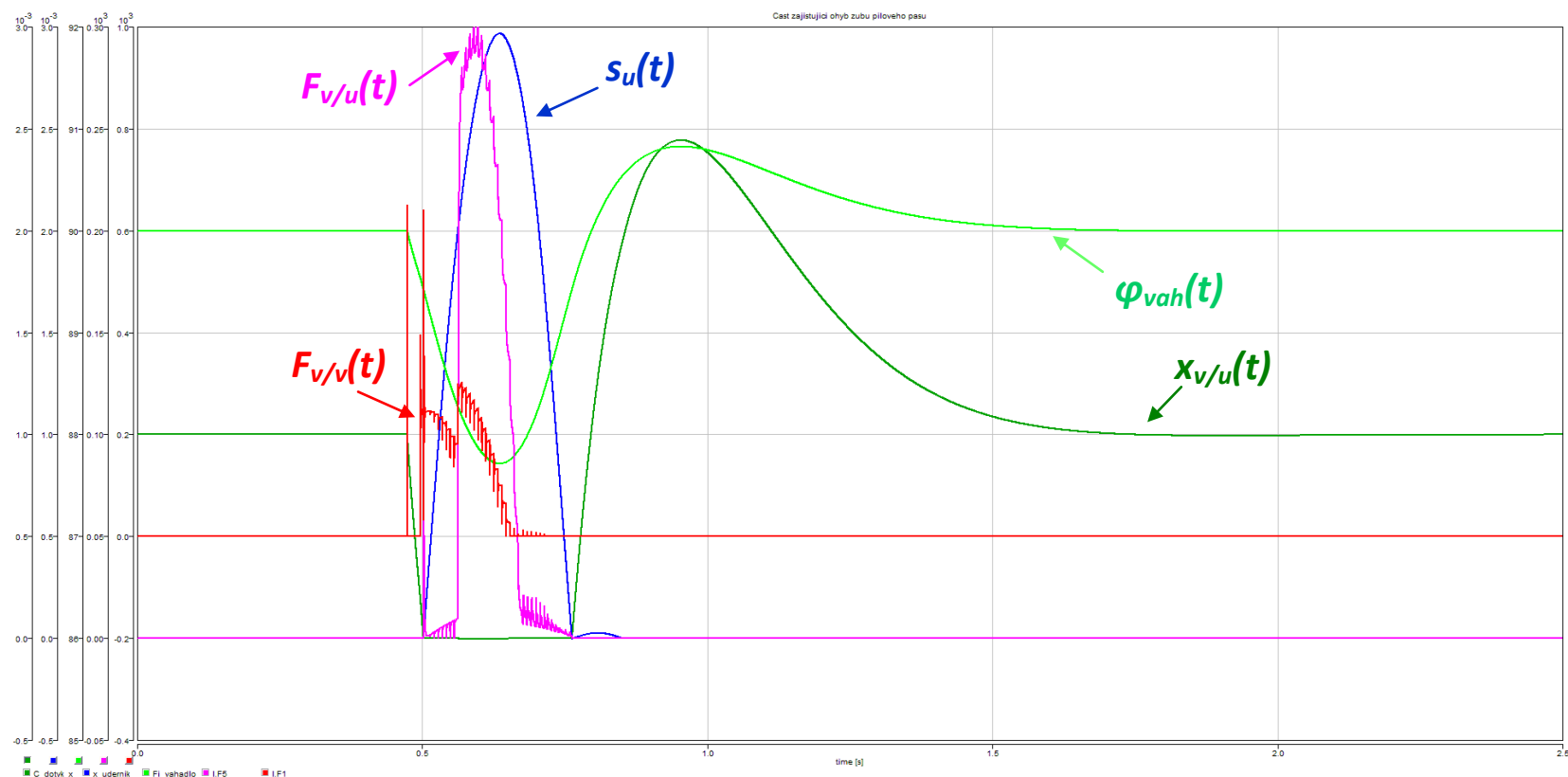
Počáteční orientace vahadla je shodná s ustáleným stavem, tedy osa vahadla je ve směru vektoru gravitace.

Nejprve jsou vidět na obrázku *Obr. 45* průběhy mezi vačkovým mechanismem s DC motorem a vahadlem.



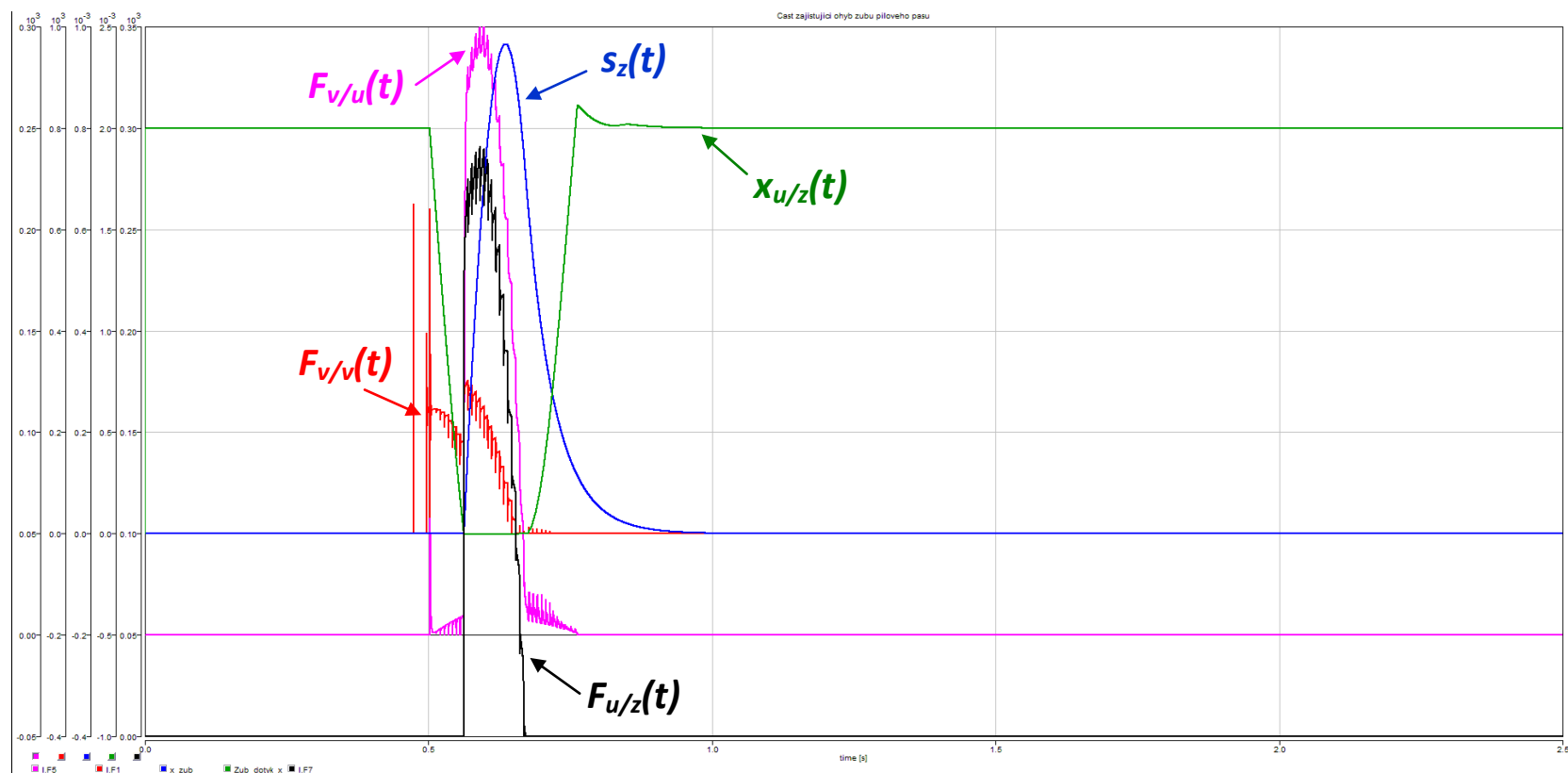
Obr. 44 Proces ohybu zubu pilového pásu - vačka/vahadlo

Průběh s označením $x_{v/v}(t)$ udává vzdálenost mezi styčným bodem vahadla a styčnou plochou vačky. Průběh $n(t)$ znázorňuje otáčky rotoru DC motoru (otáčky vačky jsou 60 krát menší - díky převodovce). Průběh $\varphi_{vac}(t)$ je úhel pootočení vačky, $\varphi_{vah}(t)$ úhlové vychýlení vahadla a $F_{v/v}(t)$ udává silový účinek mezi vačkou a vahadlem. Při dotyku obou součástí vahadlo mírně odskočí, což se projeví jako silová špička, která po přerušení dotyku zanikne a po obnovení dotyku začne opět působit. Po dokončení jedné otáčky rotoru se indukčním snímačem přeruší napájení a vlivem setrvačnosti hmoty rotor vykoná více, než jednu otočku. Vahadlo se vlivem gravitačních sil dostane s překmitem opět do ustálené polohy (těžiště je pod osou rotace).



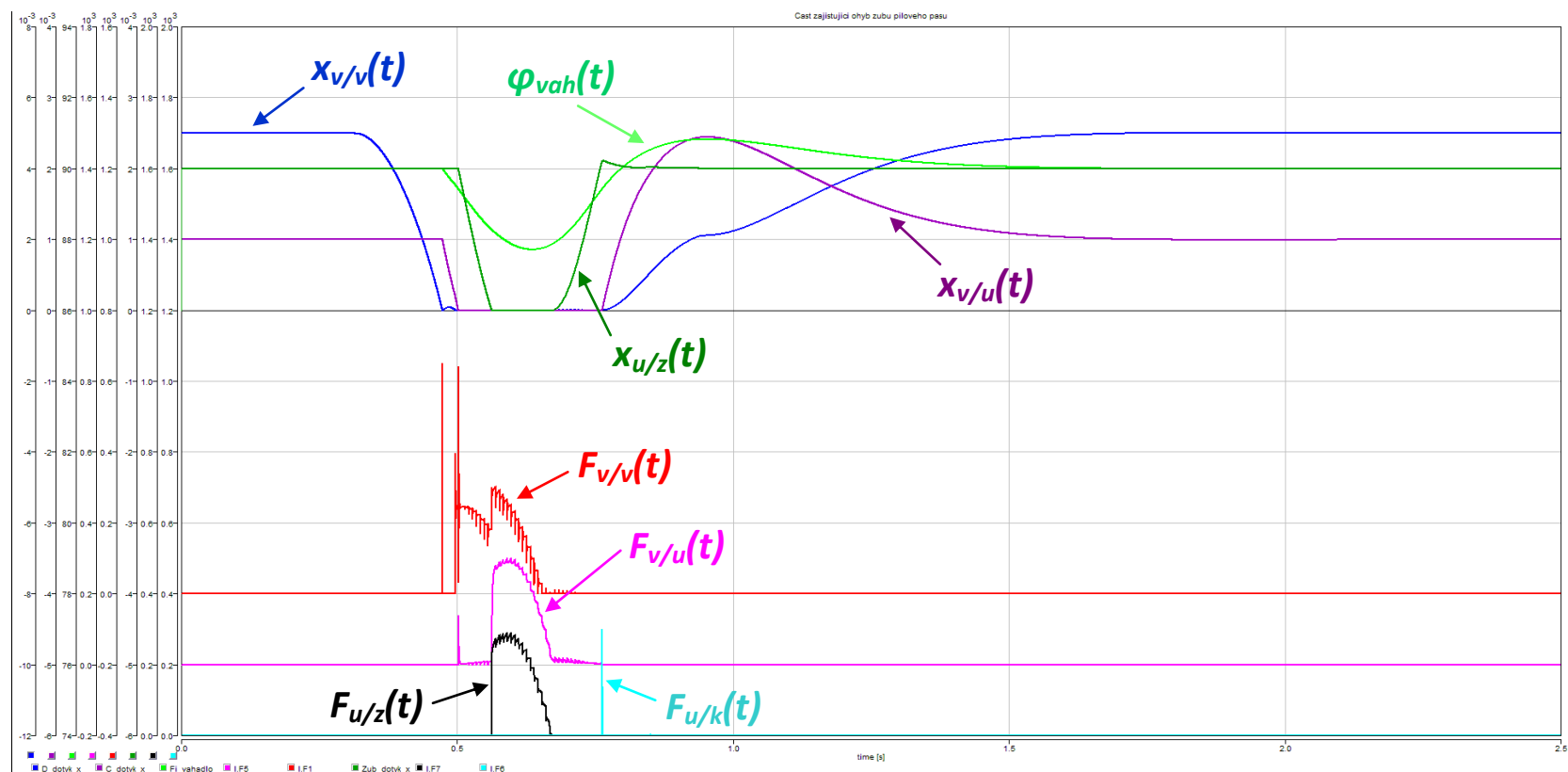
Obr. 45 Proces ohybu zubu pilového pásu - vahadlo/úderník

Průběh s označením $x_{v/u}(t)$ udává vzdálenost mezi styčným bodem vahadla a styčnou plochou úderníku. Průběh $s_u(t)$ znázorňuje posuv úderníku v jediné možné ose (má 1 DOF) - v ose x. Průběh $F_{v/u}(t)$ je silový účinek mezi vahadlem a úderníkem, $\varphi_{vah}(t)$ úhlové vychýlení vahadla a $F_{v/v}(t)$ udává silový účinek mezi vačkou a vahadlem. Při dotyku vahadla a úderníku se silový účinek projeví v průběhu $F_{v/u}(t)$ jako špička, tato se přes vahadlo dostane i do $F_{v/v}(t)$, protože jsou spolu ve vazbě. Tyto silové špičky se překrývají. Po návratu úderníku do výchozí polohy pomocí směrových pružin, dochází k odrazu od konstrukčního dorazu (2). Tento odraz se na silových účincích nijak neprojeví, protože již došlo k přerušení dotyku vahadlo/úderník.



Obr. 46 Proces ohybu zubu pilového pásu - úderník/zub pilového pásu

Průběh s označením $x_{u/z}(t)$ udává vzdálenost mezi styčným bodem ohýbacího palce a zubem pilového pásu. Průběh $s_z(t)$ znázorňuje ohyb zubu pilového pásu v ose x. Průběh $F_{v/u}(t)$ je silový účinek mezi vahadlem a úderníkem, $F_{u/z}(t)$ silový účinek mezi ohýbacím palcem a zubem pilového pásu a $F_{v/v}(t)$ udává silový účinek mezi vačkou a vahadlem. Při dotyku ohýbacího palce a zubu se silová špička projeví ve všech silových účincích. Není zde zahrnuto trvalé vychýlení zubu pilového pásu, proto se vždy vrátí zpět do původní polohy. Také je možné říci, že je zub dokonale pružný, nebo že nebyla překonána jeho mez pružnosti. Na zobrazené silové účinky to nemá pochopitelně valný vliv, protože při návratu zubu se již zub nedotýká ohýbacího palce.



Obr. 47 Proces ohybu zubu pilového pásu - souhrn

Zde jsou přehledně uvedeny silové účinky se vzdálenostmi dotyku jednotlivých funkčních částí. Vzdálenosti a síly mezi vačkou a vahadlem ($x_{v/v}(t)$, $F_{v/v}(t)$), vahadlem a úderníkem ($x_{v/u}(t)$, $F_{v/u}(t)$), ohýbacím palcem a zubem pilového pásu ($x_{u/z}(t)$, $F_{u/z}(t)$), úhel mezi osou vahadla a kladnou osou x globální souřadné soustavy (φ_{vah}) a silový účinek při zpětném nárazu úderníku do konstrukčního dorazu ($F_{u/k}(t)$). Tyto silové účinky vždy vznikají při dotyku odpovídajících částí zařízení a projevují se ve všech podřízených částech sestavy, které jsou v dotyku. Vlivem gravitační síly, směrových pružin a tření, jsou všechny části sestavy po ustálení v původní pozici (až na vačkový mechanismus, který překmitl - pouze pro první otáčku, další budou $k \cdot 2\pi$).

G. ANALÝZA A NÁVRH ŘÍZENÍ

Technologickým postupem ohybu zubu pilového pásu a konstrukčním řešením, je dáno separátní řízení posuvné a ohýbací části stroje.

G.1 Ohýbací část

Řízení této části je velice jednoduché, protože úkolem je vykonat pouze jednu otáčku vačky. Konstantní část poloměru vačky je v rozmezí 180° stejná, tudíž při rovnovážné poloze v polovině tohoto rozmezí (v 90°) nezáleží na tom, jestli se vačka od této polohy mírně vychýlí.

Na základě tohoto tvrzení je DC motor pohánějící vačku řízen dvoustavově (zapnut/vypnut). Pro snímání polohy (pootočení o 2π) je zvolen indukční senzor, na základě kterého dojde k přerušení napájení motoru. Vlivem setrvačnosti hmoty připojené na rotor, má vačka určitý překmit oproti počáteční poloze. To platí ovšem jen při první otáčce, dále se již vačka otáčí o 2π oproti startovní pozici (při stejné dynamice bude mít stále stejný překmit/doběh).



Obr. 48 Použitý DC motor Transtecno s převodovkou [4]

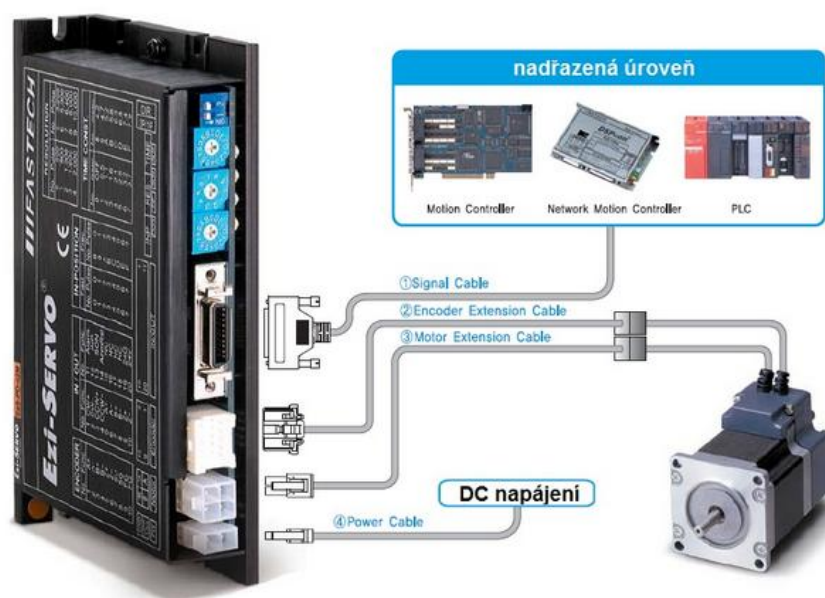
G.2 Posuvná část

Pohyb této části je realizován pomocí KM. Jeho součástí je již externí řídicí jednotka, která zajišťuje polohovou zpětnou vazbu s rychlostí $25 \mu s$. Tento driver je nutné řídit nadřazenou

úrovni (PLC). Řízení je realizováno pomocí PWM, kterým se určuje rychlost krokování. PWM je využito pouze ke generování pulzů (střída nejlépe 0,1-0,9, aby byly pulzy rozeznatelné) s určitou frekvencí, principy popsané v kapitole F.1 řeší již řídicí jednotka. Zde je možnost pomocí potenciometru nastavit rozlišení (počet pulzů/otáčku), tedy přesnost polohování - režim krokování - dělení kroku.

Přesnost polohování je také dána optickým enkodérem a rychlostí otočky PLC (z důvodu včasného zastavení KM - zastavení pulzace). Polohová zpětná vazba pouze hlídá, aby nedošlo ke ztrátě kroku, tedy aby vykonaný počet kroků odpovídal skutečnému počtu provedených kroků na základě údaje z enkodéru a nedošlo tak ke ztrátě synchronizace. Toto je užitečné např. při náhlé změně zatížení.

Řízení bude tedy probíhat v PLC, které bude generovat pulzy do řídicí jednotky KM a vysokorychlostní čítač na vstupu PLC bude odchyťvat počet vykonaných kroků z driveru KM. Po provedení požadovaného počtu kroků, přepočítaného na posuv, se pulzace zastaví (zde je vidět závislost rychlosti otočky PLC - vysání obrazů výstupu vždy až na konci otočky PLC). Ztrátu synchronizace bude již obstarávat řídicí jednotka KM, jak bylo řečeno. V čítači PLC bude tedy skutečný provedený počet kroků, pokud řídicí jednotka nenahlásí chybu.



Obr. 49 Použitý KM Ezi-Servo ST [4]

H. ZPRACOVÁNÍ OBRAZU

Zpracování obrazu probíhá na dvou kamerách zároveň, které podle jejich uložení nesou označení jako *čelní kamera* a *boční kamera*. Zde bude popisována pouze čelní kamera, která měří primárně ohyb zubu pilového pásu. Využívá se některých funkcí z multiplatformní knihovny pro manipulaci s obrazem *OpenCV*, které jsou již optimalizované a tedy lépe použitelné pro zpracování obrazu v reálném čase, což je zde nutností. Algoritmus je více méně intuitivní a využívá jednoho fixního bodu, daného pevným uložením kamery vzhledem k upevněnému pilovému pásu.

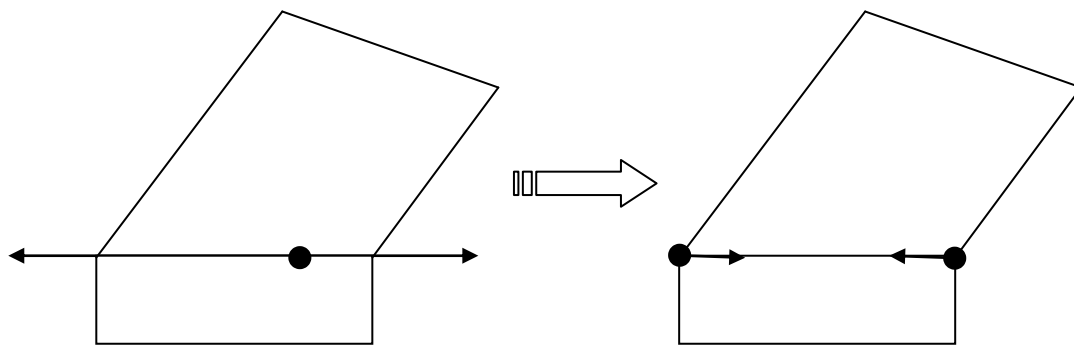
H.1 Čelní kamera

Úkolem této kamery je určit sklon zubu (LEVÝ, PRAVÝ, STŘEDNÍ), jeho šířku (px, μm), velikost aktuálního ohybu ($^\circ$, px a μm) a jeho opotřebení (px, μm).

Převodový poměr z pixelů na μm je určen pomocí kalibračního obrazce a závisí na vzdálenosti, náklonu kamery a typu použitého objektivu. Kalibrace probíhá vždy jen jednou, po změně některého z uvedených parametrů. Podmínkou funkčnosti je správné nasvícení reflektorem, z důvodu dosažení stálých světelných podmínek, zvýraznění obrazové disparity zubu a okolních částí stroje, či eliminace stínů.

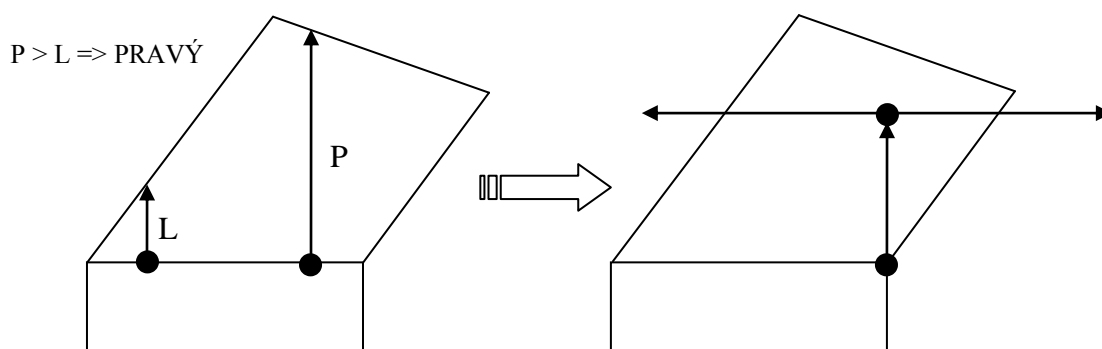
H.1.1 Průběh funkce pro analýzu zubu pilového pásu čelní kamerou

- Nastavení startovního bodu do prostoru spodní části zubu (části, kde je zub sevřen čelistmi svěráku, tedy ve spodní části, kde již není možný ohyb)
- Vyprahování snímku na základě výpočtu průměrné složky úrovně šedé v okolí startovní pozice se zvolenou tolerancí
- Horizontální procházení snímku od zvoleného fixního bodu (*Obr. 50,a*), dokud není nalezena hrana, tedy přechod z černé na bílou (po vyprahování je snímek černobílý), se zvolenou tolerancí (ošetření proti zašumění či přesvícení částí). Při nalezení levé i pravé hrany jsou tyto souřadnice uloženy
- Po nalezení krajních bodů se určuje *směr sklonu zubu* - přesun o zvolenou vzdálenost do středu zubu, z důvodu eliminace zašuměných krajních oblastí a stínů, mezi svěrákem a pilovým pásem (*Obr. 50,b*)



Obr. 50 Analýza zubu - část a (vlevo), část b (vpravo)

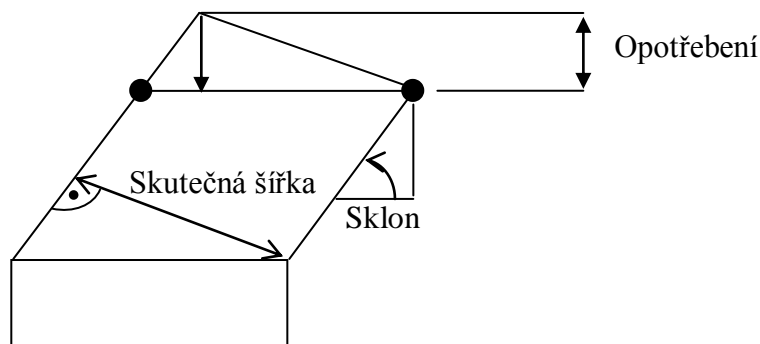
- Nyní se vykonává posun směrem vzhůru (**Obr. 51,a**), pro určení velikosti souvislé oblasti nad oběma body (zub je vyplněn po vyprahování černě - je osvětlen ze zadní strany, tudíž je ve stínu reflektoru). Souvislá oblast je opět určována s definovanou tolerancí, některé části zubu mohou být totiž přesvíceny odrazem, mít různou strukturu povrchu apod. Větší souvislá oblast nad pravým bodem znamená, že sklon zubu pilového pásu je PRAVÝ, v opačném případě je sklon zubu LEVÝ a pokud jsou velikosti souvislých oblastí na obou stranách shodné (opět s tolerancí), zub žádný sklon nemá (sklon = STŘEDNÍ).



Obr. 51 Analýza zubu - část a (vlevo), část b (vpravo)

- Nyní už je známý směr sklonu zubu a na řadě je výpočet jeho **šířky**. Je možné ji vypočítat ze znalosti krajních bodů na spodní straně zubu, ale jak již bylo řečeno, jsou zde započítány i odstíny přechodu svěráku a zubu samotného. Nejlepší variantou je vypočítat šířku zubu ve $\frac{3}{4}$ jeho velikosti, zde bývá ze statistického hlediska nejméně šumů, při stále dobré ostrosti snímku. Po přesunu, se obdobně jako ve spodní části zubu, spočítá jeho šířka. Podle směru ohybu je vybrán startovní bod (**Obr. 51,b**)

- Dalším požadavkem na čelní kameru je zjištění, v jakém místě se bude zub brousit a jaký bude po jeho sbroušení sklon. Postupuje se z horní části směrem dolů a hledá se (s tolerancí), kdy bude souvislá oblast shodná s vypočtenou šířkou zubu. Po nalezení úrovně, která bude podmínku splňovat, se souřadnice uloží. Nyní je známo vše, co je k dalším výpočtům potřebné. **Opotřebení** se spočítá z rozdílu nalezené hranice broušení a nejvyššího bodu zubu (v souřadnici y), **sklon** z nalezené hranice broušení a hrany v polovině zubu (opět z důvodu eliminace nežádoucích vlivů) v souřadnici x a podle směru ohybu. Také šířka je počítána nepřesně, skutečná šířka zubu je vyznačena na obrázku **Obr. 52**, jako všechny ostatní parametry a vše pro její výpočet je k dispozici.



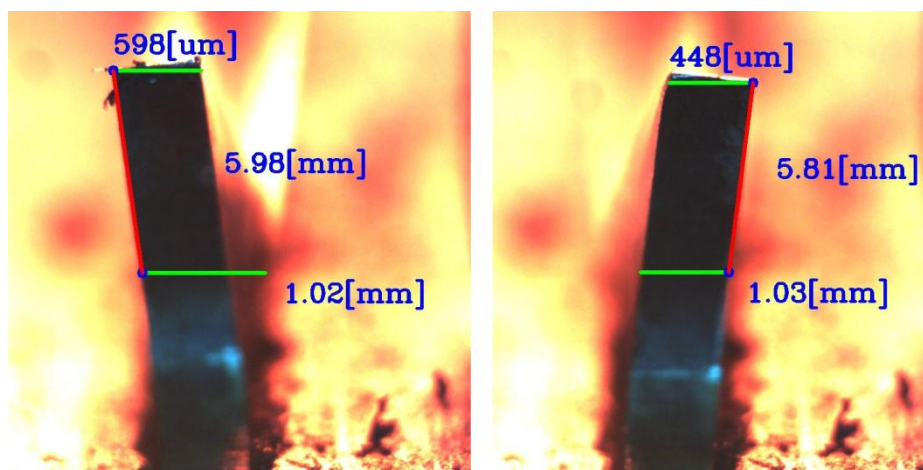
Obr. 52 Analýza zubu - finální výpočty

H.1.2 Reálné výstupy

Zde jsou uvedeny reálné výstupy, které jsou zobrazeny obsluze a uloženy pro zpětnou kontrolu. Spodní číslo je reálná šířka zubu, horní číslo ohyb a boční číslo výška zubu.

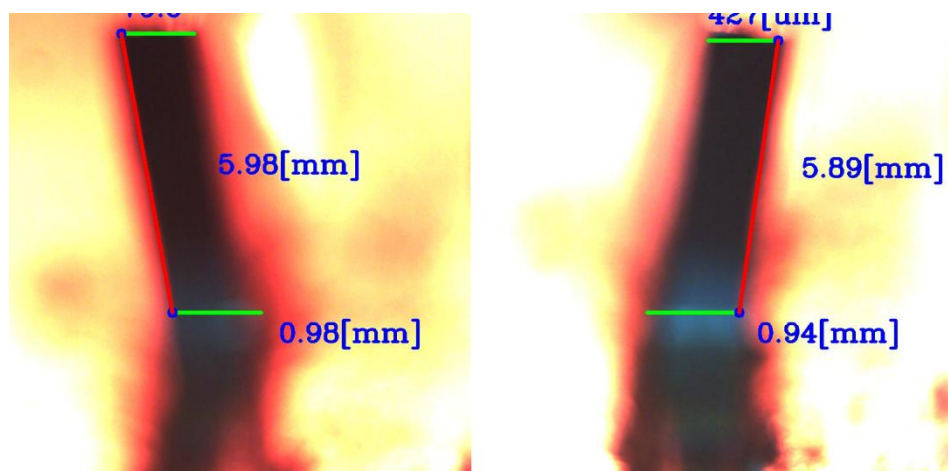
Výška zubu je naměřena boční kamerou, protože čelní kamerou to není možné (ta je na zub namířena z úhlu a posuv pilového pásu není vždy úplně stejný). Sklon je přepočítán na velikost vychýlení od roviny pilového pásu. Opotřebení na obrázku **Obr. 53** zobrazeno není, to je dostupné v textovém výstupu po dokončení rozvodu celého pilového pásu.

Na obrázku je také vidět úspěšné odfiltrování kovových pilin, které jsou na zub pilového pásu nalepeny, okolních odrazů a stínů. Je zvolen objektiv s větší ohniskovou vzdáleností, takže je zub přiblížen téměř na celou plochu snímacího čipu. Zaostřeno je na horní část zubu, protože ta je pro analýzu klíčová. Vzdálenější (spodní) část zubu je tedy mírně rozostřena.



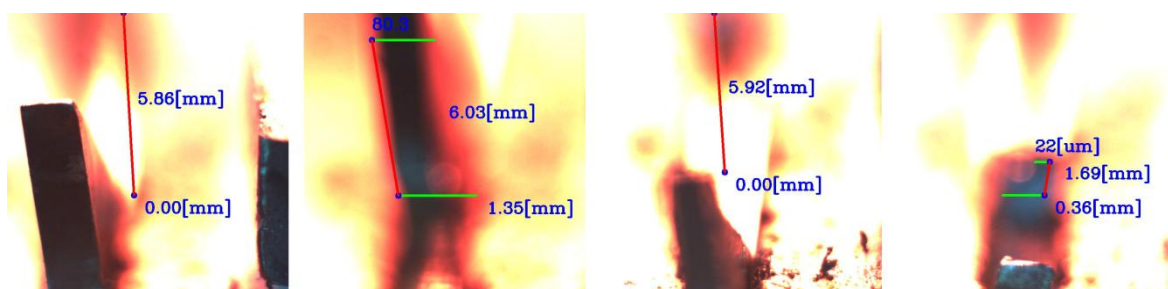
Obr. 53 Analýza zubu - reálný výstup 1

Na **Obr. 53** jsou zobrazeny výstupy při ideálních podmínkách. Ty nejsou ovšem vždy splněny a software musí být schopen reagovat i na méně příznivé okolnosti. Na **Obr. 54** jsou zobrazeny jiné zuby pilového pásu při rozostření scény. Výsledky jsou stále přijatelné.



Obr. 54 Analýza zubu - reálný výstup 2

Při hrubém nesplnění požadavků samozřejmě nastanou i stavy, kdy software není schopen zajistit úspěšné provedení vyhodnocení parametrů měřeného zubu pilového pásu (**Obr. 55**).

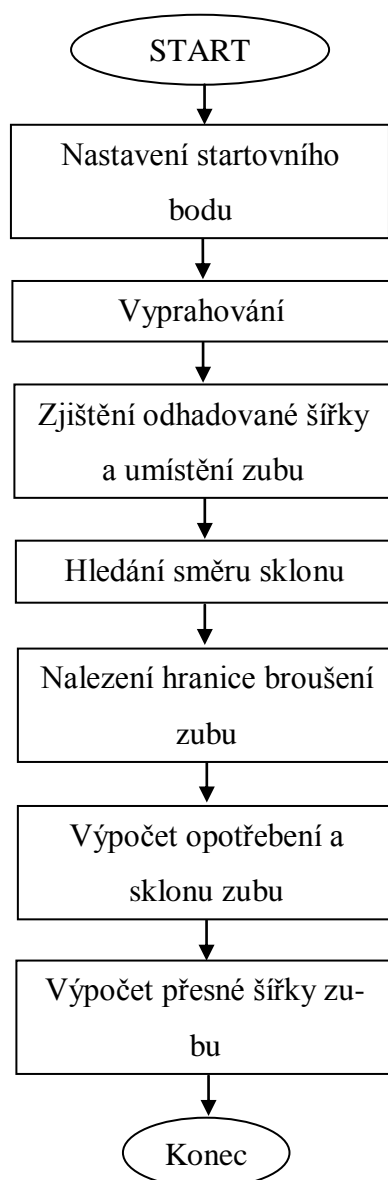


Obr. 55 Analýza zubu - reálný výstup 3

Úspěšné vyhodnocení prvního snímku zleva na **Obr. 55** selhalo z důvodu vychýlení kamery mimo přednastavený fixní bod (je dokonce viditelný i ohýbací palec - objekt vpravo). Na druhém snímku v tomtéž obrázku byl zub příliš posunut dostal se tedy mimo oblast kamery. Zbývající dva snímky zobrazují chybějící (ulomený) zub. Tento defekt odhalí boční kamera a bude zub ignorovat.

H.1.3 Vývojový diagram

Průběh vykonávání funkce pro analýzu zubu pilového pásu, je znázorněn v níže uvedeném zjednodušeném vývojovém diagramu. Primárním výstupem je pochopitelně naměřený sklon/ohyb zubu, který se v PLC použije pro nastavení míry ohybu, pomocí krokového motoru v *posuvné části*.



I. REALIZACE ŘÍZENÍ POHYBU EFEKTORU

Jak již bylo řečeno, samotný pohyb efektoru (ohýbacího palce) je realizován pomocí DC motoru přes vačkový mechanismus. Nastavení míry ohybu pak KM. Nadřazenou úroveň těchto motorů je PLC, které je ovládáno z PC, nebo z HMI panelu. Vizualizace kamerových měření je zobrazeno na PC v GUI, tak jako ostatní ovládací prvky a výsledky analýzy pilového pásu.

I.1 Specifikace jednotlivých částí zařízení

Zde jsou stručně popsány hlavní technické prostředky použité u rozebírané části ROZ.

I.1.1 Průmyslová USB kamera IDS 1240ML

Zvolená průmyslová kamera od firmy IDS je ideální volbou. Nabízí ovladače pro Windows i Linux, přijatelné API a bohaté možnosti nastavení. Její CMOS čip s rozlišením 1280x1024 v kombinaci s kvalitním objektivem dosahuje vysoké přesnosti měření (až 2 μm). Rozhraní USB 2.0, stupeň krytí IP30, snímkovácí frekvence 25,8 fps, barevná hloubka 8 bitů, dvojitě stíněný šroubovací USB kabel.



Obr. 56 CMOS kamera UI-1240ML-C-HQ [25]

I.1.2 Programovatelný logický automat SIMATIC S7-1200, CPU 1214C

Pro logické řízení motorů bylo zvoleno PLC SIMATIC S7-1200, CPU 1214C, DC/DC/DC. Obsahuje 14 digitálních vstupů 24V DC, 10 digitálních výstupů 24V DC a 2 analogové vstupy 0-10V DC. Programová/datová paměť 75 kB, možnost volby 6 vysokorychlostních vstupů (3...100kHz + 3...30kHz) a 4 vysokorychlostních výstupů (100kHz). Instalace na DIN lištu, pracovní teplota -20°C ~ 50°C, stupeň krytí IP20. Sběrnice PROFINET, podporující komunikace jako server i klient, protokoly TCP/IP, ISO-on-TCP (RFC1006), UDP.



Obr. 57 PLC SIMATIC S7-1200, CPU 1214C, DC/DC/DC [26]

I.1.3 Stabilizovaný zdroj S7-1200, PM 1207

Stabilizovaný zdroj 24V DC/2,5A pro PLC. Vstupní napětí 120/230V AC. Pracovní teplota 0 ~ 60°C, stupeň krytí IP20.



Obr. 58 Zdroj S7-1200, PM 1207 [26]

I.1.4 HMI panel

HMI panel KTP400 Basic Color PN s 4" TFT displejem, 256 barvami a sběrnici PROFINET. Rozlišení dotykového rezistivního displeje je 480 x 272 pixelů, obsahuje 4 funkční klávesy a čelní strana má stupeň krytí IP65 (zadní strana pouze IP20 - určeno pro montáž do rozvaděče). Napájení panelu 24V DC, pracovní teplota 0 ~ 50°C.



Obr. 59 HMI panel KTP400 [26]

I.1.5 Krokový motor s řídicí jednotkou Ezi-SERVO-ST

Ezi-SERVO-42L-A zahrnuje spojení optického enkodéru, krokového motoru a inteligentního řízení ve zpětné vazbě s rychlostí 25 μ s. Tento systém brání ztrátě synchronizace a s rozlišením 10 000 pulzů/otáčku při zvolené rychlosti otáčení je schopen polohovat s přesností 2 μ m. Přídržný moment činí u tohoto typu 0,5 N.m. Inteligentní řízení brání vibracím po zastavení motoru a plynulý rotační pohyb je možný již od 0,2 ot/min. Maximální vstupní frekvence pulsů 500 kHz, odolnost proti vibracím 0,5G, pracovní teplota 0 ~ 50°C. Se-stava se zobrazena na **Obr. 49**.

I.1.6 Stejnosměrný motor EC180.240 se šnekovou převodovkou CM030

Tento DC motor typu 56B14 otáčející vačkovým mechanismem má výkon 250W. Napájení 24V DC, kroutící moment 0,8 N.m, rychlost otáčení cca 3000 ot/min, stupeň krytí IP44.

Zvolená převodovka typu CM030060U-9 má převodový poměr 60. Po její instalaci se tedy bude vačkový mechanismus otáčet rychlostí cca 50 ot/min, což je z technologického hlediska pro ohýbací proces ideální. Převodovka obsahuje vysoce viskózní mazivo, které vydrží po celou dobu její životnosti - je tedy bezúdržbová. Použitá převodovka s DC motorem je zobrazena na **Obr. 48**.

I.1.7 Obousměrný převodník signálních 24/5V

Převodník byl navržen a vyroben pro nutnost převodu signálních 24V DC I/O PLC, na 5V DC I/O řídicí jednotky krokového motoru Ezi-SERVO, při využití kabelu určeného pro komunikaci s driverem krokového motoru.

I.2 PLC program

Program je napsán v jazyku reléových schémat (LD), které jsou uzavřené ve funkcích (FC). V hlavní smyčce (Main) jsou tyto funkce volány a dle potřeby vykonávány. V PLC jsou naprogramovány tři základní režimy, kterými je možné řídit celý ROZ (*Obr. 65,a*). Jsou to:

- Manuální - možnost ovládání každé části ROZ zvlášť, včetně těch nejelementárnějších úkonů bez jakéhokoli omezení
- Poloautomatický - ovládání jednotlivých částí technologického procesu separátně, s ošetřením nežádoucích stavů a kooperací dílčích elementárních úkonů
- Automatický - po nastavení žádaných parametrů se spustí automatický rozvod celého pilového pásu, do kterého je možno v průběhu vykonávání zasahovat

Zde bude popsán pouze úsek spojený s částí zařízení, která zajišťuje nastavení míry ohybu a ohyb samotný. Jednotlivé režimy se kromě režimu manuálního, odkazují na níže popsané funkce.

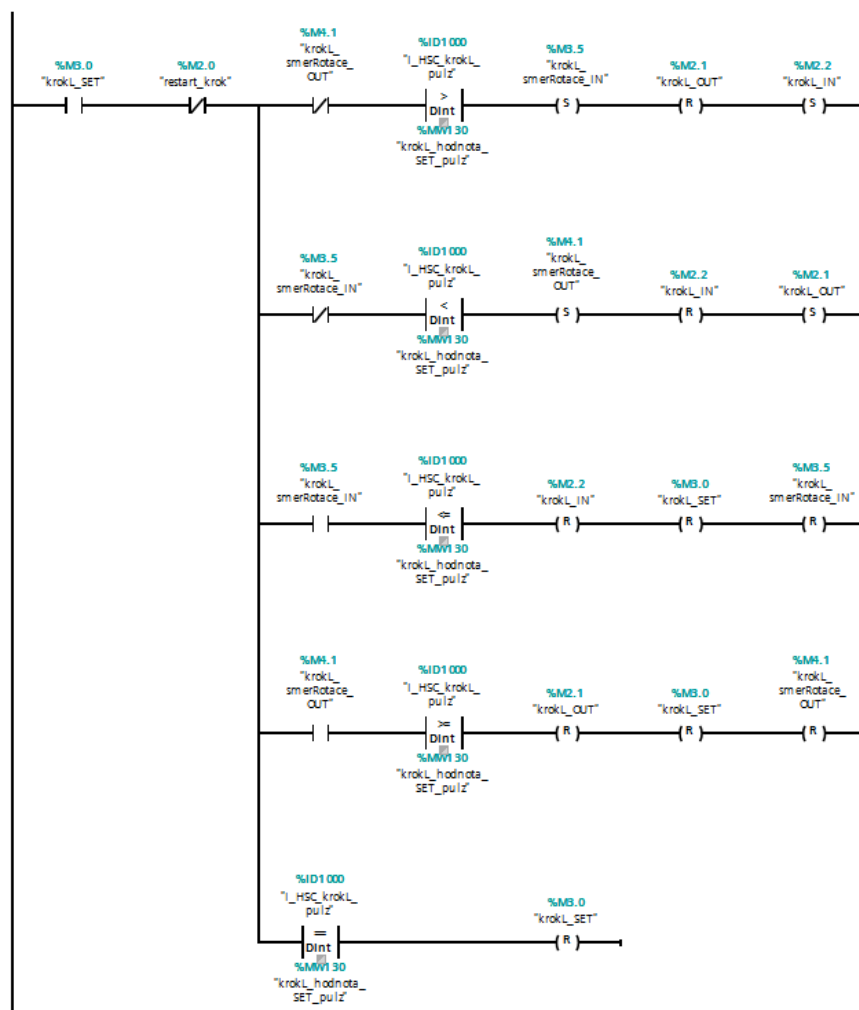
I.2.1 Posuvná část - krokový motor

Tato část se v PLC programu skládá ze 3 funkcí.

První funkce obstarává generování pulzů na vysokorychlostní výstupy PLC, pomocí PWM bloků. Jeden krokový motor je řízen dvěma výstupy PLC (směr otáčení po a proti směru hodinových ručiček) a tyto výstupy nejsou závislé na otočce cyklu PLC.

Druhá funkce řeší odchyťávání počtu provedených kroků, z řídicí jednotky KM. To je realizováno pomocí čítačů, připojených na vysokorychlostní vstupy PLC (HSC). Tyto čítače opět nejsou závislé na otočce cyklu PLC.

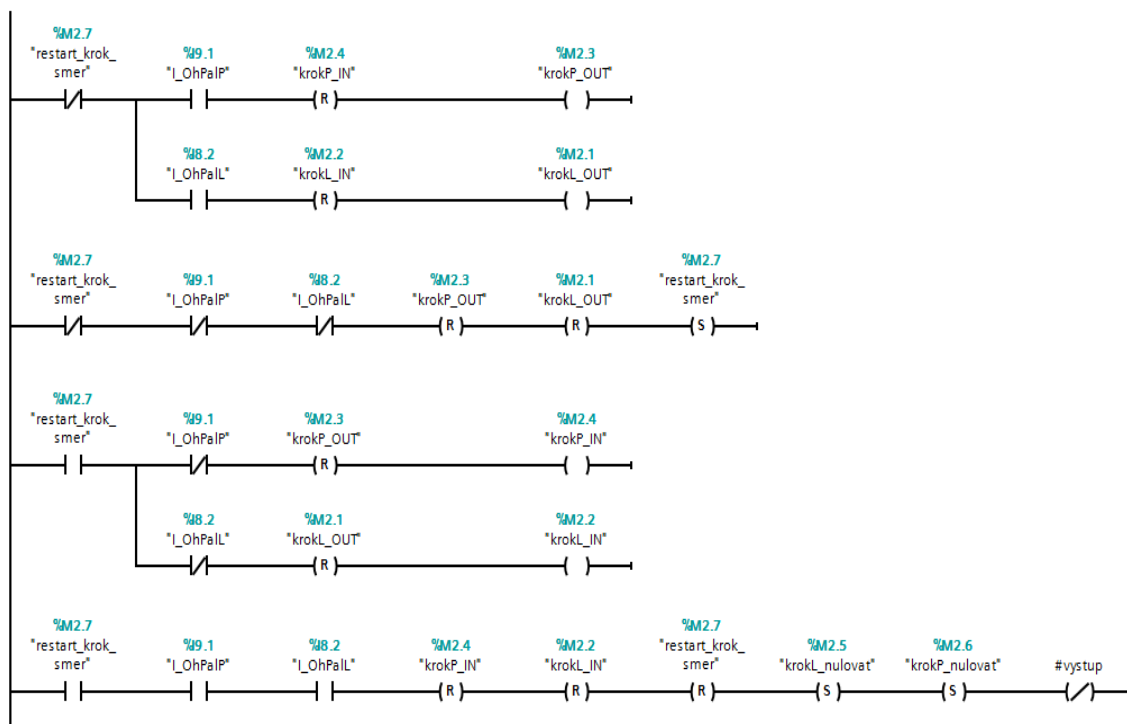
Třetí funkce řídí samotné krokové motory, tedy ovládá PWM bloky a kontroluje paměť HSC (*Obr. 60*). Díky rychlosti HSC je k dispozici vždy shodná hodnota s driverem KM, celá třetí funkce je ovšem závislá na otočce cyklu PLC (takže i zastavení generování PWM). Proto je zde možný překmit o jednotky kroků, oproti žádané hodnotě. Tento překmit je ovšem menší, než vůle v ozubení nebo v závitovém převodu, proto není důležité se jím zabývat. Tuto situaci by šlo vyřešit pouze výrazným zkrácením otočky cyklu PLC, což vede k výraznému zkrácení celého programu a to není možné.



Obr. 60 Řízení krokových motorů

Z **Obr. 60** je patrné, že na základě porovnání skutečných a žádaných hodnot čítačů krokových motorů je rozhodnuto, jakým směrem se bude motor otáčet, aby dosáhl požadované polohy. Z důvodů velké přesnosti krokových motorů a odpovídající rychlosti časové změny hodnot při vysoké frekvenci PWM, je zavedeno ošetření, aby se motor vždy otáčel jen směrem, který byl na začátku zvolen, tedy aby se při přesahu (překmitu) žádané hodnoty nesnažil vrátit směrem opačným. Při větší rychlosti pulzace, delší otočce cyklu PLC apod., by se motor dostal do fáze oscilace okolo žádané hodnoty (neustále by se přepínal směr otáčení a vlivem setrvačnosti hmoty a dříve uvedených skutečností, by se rotor nikdy neustálil).

Pro nastavení KM do nulové pozice je použit indukční snímač (po vypnutí napájení se totiž paměťové registry vynulují a skutečná pozice KM je tedy ztracena). Algoritmus je navržen tak, aby nezáleželo na umístění KM a po jeho dokončení se KM nastavily do nulové pozice. Toto nastavení obou KM (ohyb zleva a zprava) probíhá zároveň (**Obr. 61**).



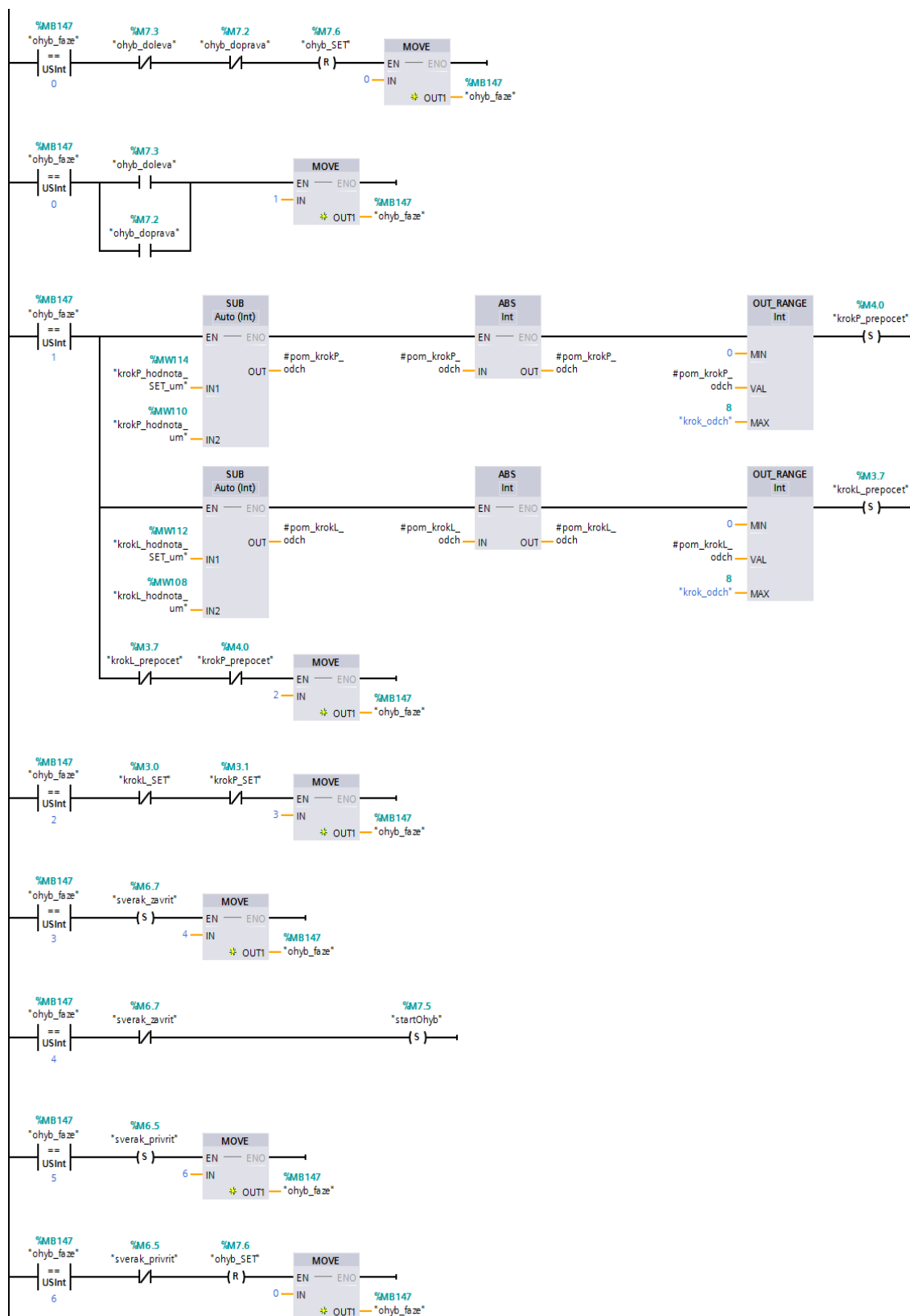
Obr. 61 Nastavení KM do nulové pozice - restart

Nejprve se vždy začnou otáčet krokové motory směrem ven, dokud indukční snímače nenahlásí logickou 0. Poté se spustí otáčení opačným směrem, dokud indukční snímač nenahlásí opět logickou 1. Po sepnutí obou indukčních snímačů je restart dokončen.

I.2.2 Ohýbací část - DC motor

Celé řízení této části spočívá v připojení napětí na statorové vinutí DC motoru, po dobu jedné otáčky vačky (snímáno indukčním snímačem). Je ovšem více režimů ohybu (typ rozvodu zubů pilového pásu) a musí být splněny určité předpoklady. Jsou jimi např. sevřené čelisti svěráku fixujícího pilový pás, dokončení nastavení míry ohybu apod.

Je patrné (**Obr. 62**), že funkce ohybu je nadřazenou funkcí nastavení míry ohybu KM. Ve fázi 0 se zjišťuje, zda je nastavený směr ohybu. Pokud není, režim ohybu končí, jinak pokračuje. Ve fázi 1 probíhá kontrola, zda-li jsou KM nastaveny ve správné poloze (v závislosti na mechanických vůlích, aby se při sebemenší odchylce zbytečně nepřenastavovaly). Pokud jsou nastaveny správně, pokračuje se k další fázi, jinak se přenastaví. Ve fázi 2 se čeká na nastavení požadované míry ohybu zubu pilového pásu krokovými motory. V 3. fázi se zavře svěrák, ve 4. fázi ohne zub do požadovaného směru, fáze 5 přivře svěrák a ve fázi 6 režim ohybu končí (**Obr. 62**).



Obr. 62 Provedení ohybu zubu pilového pásu

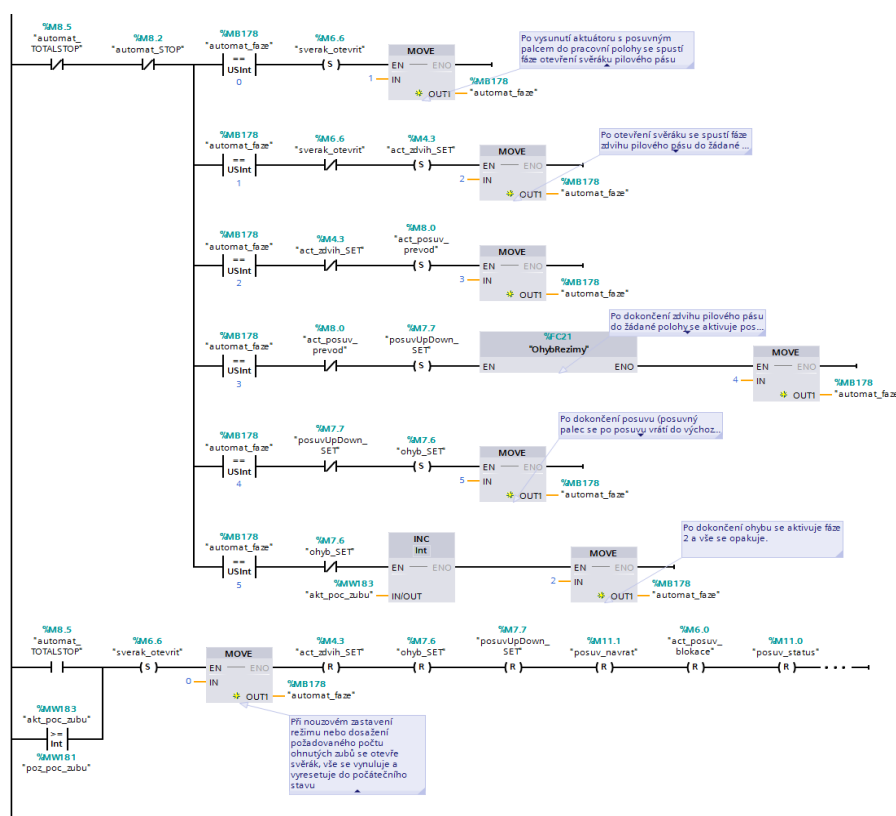
Aktuální směr ohybu je při automatickém režimu nutné cíleně měnit, na základě zvoleného režimu ohybu. Jeho určování je realizováno na Obr. 63.

volají funkce, které obstarávají vykonávání odladěných a funkčních celků (ohyb zubu, nastavení míry ohybu, zdvih pásu, posuv pásu, apod.). Po vykonání požadované operace, čeká PLC na další požadavek. V tomto režimu je tedy možné celý technologický proces provést po částech a zjistit tak potřebné parametry pro režim automatický, pokud doposud nejsou známy. Náhled GUI tohoto režimu v HMI je na **Obr. 66,a**.

I.2.5 Automatický režim

V tomto režimu probíhá celý technologický proces ohybu pilového pásu automaticky. Stará se o to funkce rozdělená na jednotlivé fáze, které se podle zvoleného technologického postupu vykonávají. Tato funkce běží ve smyčce, dokud není proveden rozvod zadaného počtu zubů pilového pásu.

Nejprve se otevřou čelisti svěráku. Poté se provede zdvih pilového pásu do žádané polohy. Následuje posuv pásu o jeden zub a po jeho provedení konečně samotný ohyb. Při stisku tlačítka *POZASTAVIT*, se dokončí probíhající fáze režimu a vše se pozastaví. Po opětovném stisku se pokračuje v místě, kde byl režim přerušen. Při stisku tlačítka *TOTALSTOP*, se veškeré probíhající operace zastaví, vše se vynuluje a ukončí se automatický režim. Postup je zobrazen na **Obr. 64**, náhled GUI v HMI na **Obr. 66,b**.

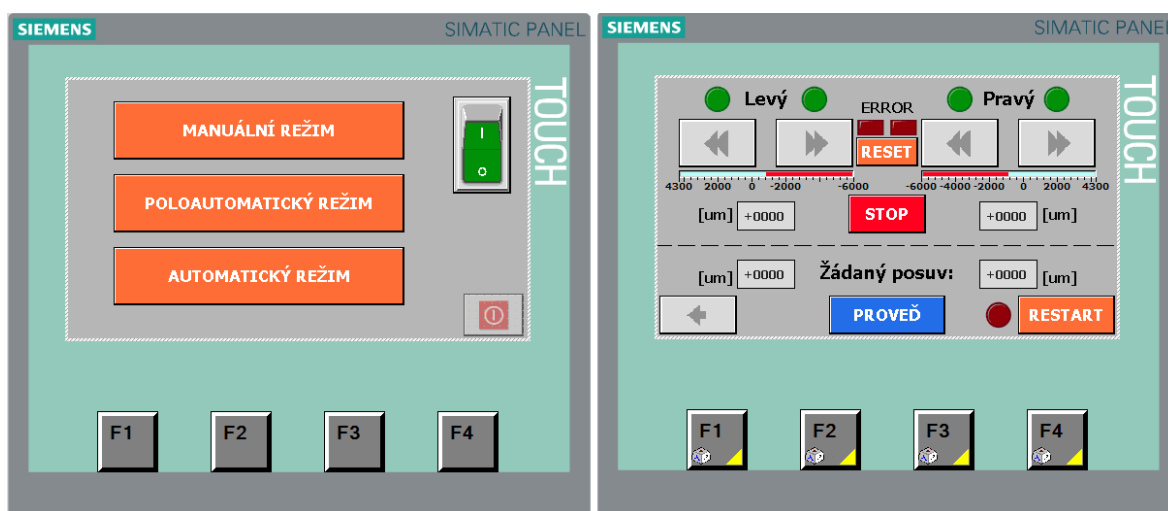


Obr. 64 Postup vykonávání automatického režimu

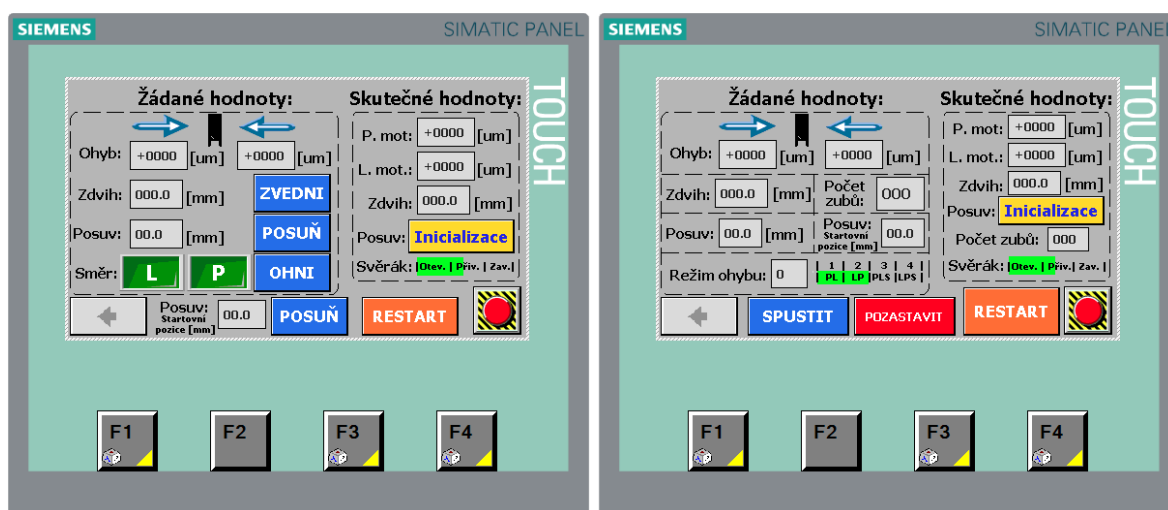
I.3 HMI panel

Jak již bylo řečeno, PLC program je ovládán nadřazenou úrovní, která je realizována pomocí PC nebo HMI panelu. U HMI panelu není možné měřit rozvod zubu pilového pásu pomocí kamerového systému, protože zpracování obrazu vykonává PC. Zde je nastavení požadovaného rozvodu a vyhodnocení jeho úspěšného provedení na obsluze ROZ. Toto je jediný funkční rozdíl oproti ovládání PLC programu z PC.

Zde jsou uvedeny náhledy GUI pro rozebíranou část stroje:

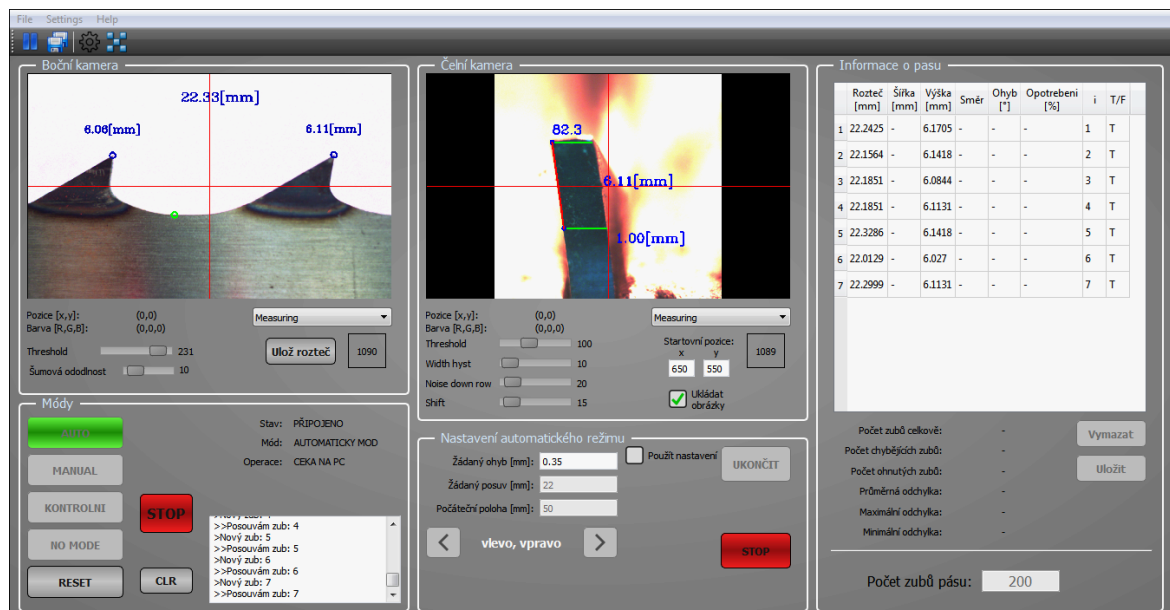


Obr. 65 Náhled GUI pro volbu režimu (vlevo - a) a manuální režim KM (vpravo - b)



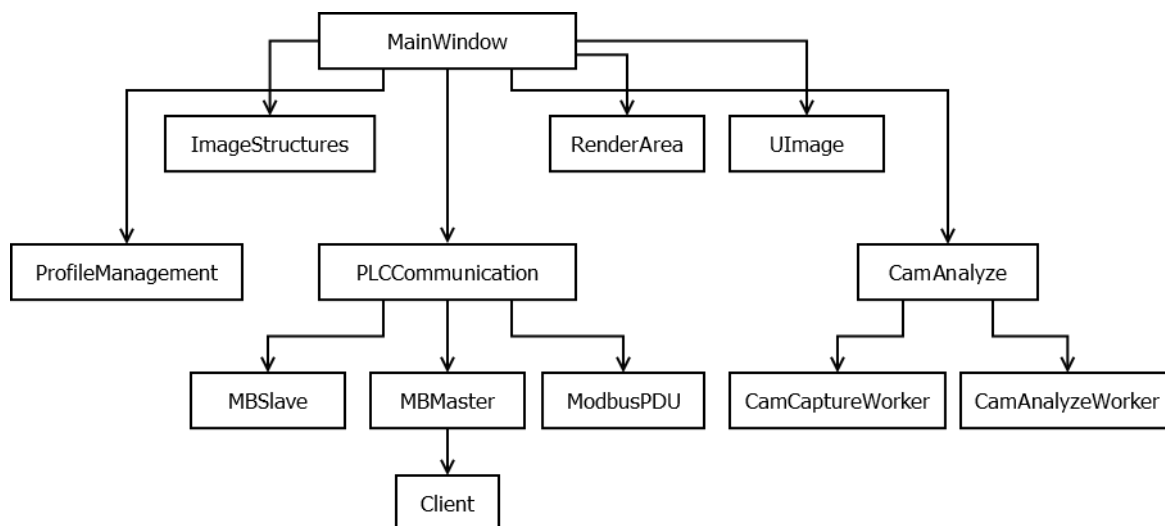
Obr. 66 Náhled GUI pro poloautomatický (vlevo - a) a automatický (vpravo - b) režim

HMI je spojeno s PLC pomocí patch kabelu STP cat. 5 a komunikují přes PROFINET. Oběma stanicím je přidělena statická IP adresa ve stejné síťové doméně. Sesíťování má plně v režii vývojové prostředí Simatic Step7 (TIA Portal).



Obr. 68 Náhled GUI pro PC program

Po ukončení technologického procesu rozvodu celého pilového pásu, je uložen výstup se záznamy o průběhu do textového souboru. Třídní vývojový diagram programu je zobrazen na Obr. 69.



Obr. 69 Vývojový diagram tříd použitých v PC

- **MainWindow** je hlavní třída zastřešující všechny ostatní, stará se o vykreslování, ukládání, načítání apod.
- **ImageStructures** definuje strukturu zubů, profilů, ohybů apod. - pro analýzu.
- **RenderArea** se stará o vykreslování obrázků a snímků.
- **UImage** obsahuje metody na zpracování obrazu.

- **ProfileManagement** obsahuje metody ke čtení, zápisu a ukládání informací o pilovém pásu.
- **PLCCommunication** zastřešuje komunikaci mezi PC a PLC.
- **CamAnalyze** řídí dvě další třídy běžící v samostatných vláknech na analýzu obrazu.
- **MBSlave** je záložní třída pro Modbus – TCP slave. Přijímá a odpovídá na požadavky od PLC - není zde využito, možno využít pro přidělení master práv pro PLC (multi-master komunikace).
- **MBMaster** zajišťuje komunikaci s Modbus - TCP slave. Vytváří požadavky a vrací odpovědi.
- **ModbusPDU** je třída definující strukturu Modbus PDU protokolu.
- **CamCaptureWorker** se stará se o sejmutí snímků z obou kamer a předání jejich ukazatelů.
- **CamAnalyzeWorker** aplikuje metody zpracování obrazu (využívá algoritmy na zpracování obrazu popsané v kapitole H).
- **Client** je podtřída **MBMaster** a vytváří správu TCP socketu.

Na PC probíhá ve smyčce zpracování obrazu z kamerového systému, při současné kontrole stavu tlačítek. Po nastavení požadovaných hodnot a spuštění procesu, se parametry nastavené v PC, zapíší do patřičných paměťových registrů PLC a spustí se vykonávání PLC programu. Jakmile dojde program do místa nastavení míry ohybu, přečte se z PC odpovídající hodnota proměnné (vypočtená na základě kamerového vyhodnocení), provede se nastavení míry ohybu KM a technologický proces pokračuje.

Z technologického hlediska se zub pilového pásu nesmí ohýbat zpět (provádět ohyb z opačné strany - proti směru prováděného ohybu), při přesažení žádané hodnoty. Je tedy požadavek provést ohyb v původním směru a na co možná nejmenší počet pokusů s dosažením minimální regulační odchylky. Nastavení míry ohybu se tedy počítá na základě velikosti regulační odchylky, podle experimentálně určené funkce.

Tato funkce je určena na základě zkušeností pracovníků obsluhující podobná zařízení a liší se v závislosti na tloušťce, profilu, materiálu zubu, jeho zakalení a počtu již provedených rozvodů. Je tedy velice problematické určit optimální strategii.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo od základu navrhnout a realizovat řízení stěžejní části technologického zařízení, určeného k rozvodu zubů pilového pásu. Jako softwarové prostředky pro řešení tohoto technického problému byly využity SolidWorks, DYNAST, SIMATIC Step7 a QT Creator.

Nejprve byly jednotlivé díly stroje nakresleny, poté poskládány do sestavy a vyvazbeny. Vše v prostředí SolidWorks. Tímto bylo zajištěno jednoduché a přesné určení těžiště a matice setrvačnosti každého dílu. Taktéž bylo umožněno zjistit funkční závislost poloměru vačky na jejím pootočení a pomocí pohybové analýzy, která vyžaduje přesné vyvazbení a návaznost ploch, chování celé sestavy.

Po získání uvedených parametrů, byl sestaven zjednodušený fyzikální model v prostředí DYNAST, včetně modelu použitého krokového motoru. Tento model byl rozdělen na dvě části. První část řeší simulaci pohybových dějů nastavení míry ohybu zubu pilového pásu, druhá část simuluje ohyb samotný.

Z výsledků simulace první části lze určit, jak rychle je možné krokovým motorem pohybovat bez ztráty synchronizace. Také je z této části velice dobře pochopitelné, jak ve své podstatě kokový motor funguje. V části druhé jsou naopak vidět silové účinky, působící na jednotlivé díly zařízení, ve styčných bodech. Také je možné pozorovat průběhy i okamžiky dotyků, či velikosti posuvů.

V PLC je poté navrženo řízení krokového i DC motoru a sestaveny režimy pro jejich ovládání, na základě obecného technologického postupu. Jako primární nadřazený systém pro PLC program bylo zvoleno PC, druhá alternativa v podobě HMI panelu je záložní a pracuje bez kamerového systému.

PC komunikuje s PLC pomocí Modbus PDU. Řeší zpracování obrazu, vyhodnocení odchylky a výpočet míry ohybu pro PLC. Vše je možné číst i zadávat v GUI, kde jsou k dispozici také výstupy z kamerového systému po algoritmech zpracování obrazu, pro zpětnou kontrolu správnosti vyhodnocení.

Zařízení je prototyp a jako celek je testováno v průmyslovém provozu. Stále jsou prováděny konstrukční zásahy a dojde i k úpravám technického rázu. Z tohoto důvodu bude tedy nutné modifikovat i softwarovou část, která je ovšem na tyto případy přizpůsobena.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ÚŘEDNÍČEK, Z. Robotika. 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2012. ISBN 978-80-7454-223-7.
- [2] ÚŘEDNÍČEK, Z. Elektromechanické akční členy. 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009. ISBN 978-807-3188-351.
- [3] ÚŘEDNÍČEK, Z. *Přednášky z předmětu Mechatronické systémy*. [cit. 2015-03-07]. FAI UTB ve Zlíně, 2012.
- [4] Raveo: world of motion. *Ezi-SERVO ST* [online]. 2014 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.raveo.cz/krokove-motory-zpetna-vazba-driver-fastech>
- [5] ZÁTOPEK, J. *Systém automatického vizuálního sledování cíle v prostoru pomocí termovizního systému vidění*. Zlín, 2013. Bakalářská. UTB FAI ve Zlíně. Vedoucí práce doc. RNDr. Ing. Zdeněk Úředníček, CSc.
- [6] DOLEŽAL, I. Fyzikální, matematické a počítačové modely v elektrotechnice. *Department of Theory of Electrical Engineering* [online]. 2009 [cit. 2015-03-08]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~karban/teaching/mmem/dolezel/course_1/LECT01.pdf
- [7] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 - 2015 [cit. 2015-03-07]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- [8] SEIFERT, Robert. *Vybrané fyzikální demonstrace z mechaniky*. Ústí nad Labem, 2004. Dostupné z: <http://physics.ujep.cz/~rseifert/oldweb/dipl/diplomka.html>. Diplomová. Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem.
- [9] *E-konstruktor: Portál pro strojní konstruktéry* [online]. 2013 [cit. 2015-03-07]. Dostupné z: <http://e-konstrukter.cz/>
- [10] KŘEMEN, P. a S. NAVRÁTIL. Elektrotechnický časopis: časopis Elektrotechnického ústavu SAV. *Matematický model krokového motoru s axiálním permanentním magnetem*. Bratislava: Veda, 1977, č. 9.
- [11] ŠURKALA, M. Fotomobily: snímací čipy CMOS vs. CCD. *Digimanie* [online]. 2009 [cit. 2015-03-08]. Dostupné z: <http://www.digimanie.cz/fotomobily-snimaci-cipy-cmos-vs-ccd/2885>
- [12] Speciální krokové motory na míru. *Servo-Drive* [online]. 2010 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: http://www.servo-drive.com/specialni-krokove-motory-krokove-motory_na_miru.php

- [13] CMOS čipy. *POPULAR: Populárně naučný portál* [online]. 2014 [cit. 2015-03-08]. Dostupné z: <http://popular.fbmi.cvut.cz/optoel/Stranky/CMOS-%C4%8Dipy.aspx>
- [14] PC Life: Žijme (s) počítači a programy. *Základy počítačového 3D modelování* [online]. 2012 [cit. 2015-03-08]. Dostupné z: <http://www.pclife.cz/503-zaklady-pocitacoveho-3d-modelovani/>
- [15] PŠENČÍKOVÁ, J. *SolidWorks: Základy modelování*. ISS - COP Brno, 2005.
- [16] *Dassault Systems* [online]. © 1995-2015 [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: <http://help.solidworks.com/HelpProducts.aspx>
- [17] Krokové motory. *Robotika.cz* [online]. 2012 [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: <http://robotika.cz/articles/steppers/cs>
- [18] Vačkové mechanismy. FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ VUT V BRNĚ. *KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ: mechanismy* [online]. Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2012 [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/6C3/prednasky/prednaska6_6km.pdf
- [19] SYSALA, T. FAI UTB VE ZLÍNĚ. *Programovatelné automaty: Přednášky z předmětu Programovatelné automaty*. Zlín, 2012.
- [20] *SIEMENS* [online]. © 1996 – 2015 [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: <http://www.siemens.com/>
- [21] Údržba a správné používání pilových listů. *Pilana* [online]. © 2006-2015 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://www.pilana.cz/cz/udrzba-a-spravne-pouzivani-pilovych-listu>
- [22] Streitlein GmbH. *Setting Machines* [online]. [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: http://www.streitlein.com/gamasioX/e/e_downloads.php?action=e_setter&link=machines
- [23] Wood-Mizer. *Tooth setters* [online]. [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://www.woodmizer-europe.com/Products/Blades/Tooth-Setters>
- [24] Viscat Fulgor. *Wood industry* [online]. [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://www.viscatfulgor.com/en/product-category/wood-industry/>
- [25] IDS. *UI-1240ML* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <https://en.ids-imaging.com/store/ui-1240ml.html>
- [26] *SIEMENS* [online]. © 1996 – 2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.siemens.com/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PLC	Programmable Logic Controller (Programovatelný logický automat)
DOF	Degree of Freedom (Stupeň volnosti)
CCD	Charge Coupled Devices (Nábojově vázané prvky)
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
BSI	Back Side Illumination
IL	Instructions List
AWL	Anweisungslist
LD	Ladder Diagram
KOP	Kontaktplan
FBD	Function Block Diagram
FBS	Funktionbausteinsprache
SFC	Sequential Function Chart
AS	Ablaufsprache
ROZ	Rozvaděč zubů pilových pásů
RPM	Revolutions per minute (otáčky za minutu)
KM	Krokový motor
HMI	Human Machine Interface (rozhraní mezi člověkem a strojem)
GUI	Graphical User Interface (grafické uživatelské rozhraní)
PWM	Pulse Width Modulation (pulzně šířková modulace)
HSC	High Speed Counter (vysokorychlostní čítač)
PPC	Panel PC (panelové PC)
IR	Infrared (infračervené)

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBR. 1	URČENÍ TĚŽIŠTĚ TĚLESA ZAVĚŠOVÁNÍM [8]	13
OBR. 2	KINEMATICKÉ USPOŘÁDÁNÍ PRO VYSVĚTLENÍ D-H NOTACE [1]	16
OBR. 3	ROZMÍSTĚNÍ BAREVNÝCH FILTRŮ V BAYEROVĚ USPOŘÁDÁNÍ A ZPŮSOB VYČTENÍ OBRAZU Z CCD [5]	19
OBR. 4	STRUKTURA CMOS ČIPU [13]	20
OBR. 5	PRINCIP KONSTRUKCE HYBRIDNÍHO KROKOVÉHO MOTORU [2]	24
OBR. 6	BIPOLÁRNÍ (VLEVO) VS UNIPOLÁRNÍ (VPRAVO) ZAPOJENÍ STATOROVÝCH CÍVEK KROKOVÉHO MOTORU [17]	25
OBR. 7	PRŮBĚH INDUKČNOSTI 2-FÁZOVÉHO KROKOVÉHO MOTORU BEZ ÚČINKŮ PERMANENTNÍHO MAGNETU	26
OBR. 8	ÚČINKY PERMANENTNÍHO MAGNETU NA JEDNOTLIVÁ VINUTÍ	27
OBR. 9	KONSTRUKCE DVOJFÁZOVÉHO HYBRIDNÍHO KROKOVÉHO MOTORU [12]	28
OBR. 10	TRANSFORMACE SOUSTAVY DO D,Q OS	30
OBR. 11	BRÁNOVÉ SCHÉMA 2 FÁZOVÉHO KROKOVÉHO MOTORU [2]	35
OBR. 12	VAČKA S VAHADLEM A KLADKOU [18]	37
OBR. 13	ZDVIHOVÁ ZÁVISLOST VAČKY [18]	37
OBR. 14	OTOČKA CYKLU PLC [19]	38
OBR. 15	MIKRO PLC (VLEVO), KOMPAKTNÍ PLC (UPROSTŘED) A MODULÁRNÍ PLC (VPRAVO) [20]	39
OBR. 16	JAZYK RELÉOVÝCH SCHÉMAT [19]	40
OBR. 17	JAZYK FUNKČNÍCH BLOKŮ [19]	41
OBR. 18	JAZYK SEKVENČNÍHO PROGRAMOVÁNÍ [19]	41
OBR. 19	NĚKTERÉ Z MOŽNOSTÍ ROZVODŮ ZUBŮ PILOVÝCH PÁSŮ [21]	42
OBR. 20	MANUÁLNÍ ROZ [21]	42
OBR. 21	POLOAUTOMATICKÉ ROZ [21]	43
OBR. 22	AUTOMATICKÝ ROZ [23]	43
OBR. 23	PEVNÉ ČÁSTI	46
OBR. 24	VAČKA	47
OBR. 25	VAHADLO	47
OBR. 26	ÚDERNÍK	48
OBR. 27	OHÝBACÍ PALEC	48
OBR. 28	HNANÉ OZUBENÉ KOLO	49
OBR. 29	HNACÍ OZUBENÉ KOLO	49
OBR. 30	KOMPLETNÍ ROZLOŽENÁ SESTAVA	50
OBR. 31	MODEL KROKOVÉHO MOTORU V PROSTŘEDÍ DYNAST	51
OBR. 32	MODEL ČÁSTI ZAŘÍZENÍ ZAJIŠŤUJÍCÍ NASTAVENÍ MÍRY OHYBU ZUBU PILOVÉHO PÁSU	52
OBR. 33	MODEL ČÁSTI ZAŘÍZENÍ PROVÁDĚJÍCÍ SAMOTNÝ OHYB ZUBU PILOVÉHO PÁSU	53
OBR. 34	MODEL ČÁSTI ZAŘÍZENÍ PRO OHYB ZUBU PILOVÉHO PÁSU - ČÁST 1	54
OBR. 35	MODEL ČÁSTI ZAŘÍZENÍ PRO OHYB ZUBU PILOVÉHO PÁSU - ČÁST 2	55
OBR. 36	MODEL ČÁSTI ZAŘÍZENÍ PRO OHYB ZUBU PILOVÉHO PÁSU - ČÁST 3	56

OBR. 37	MODEL ČÁSTI ZAŘÍZENÍ PRO OHYB ZUBU PILOVÉHO PÁSU - ČÁST 4	56
OBR. 38	VÝPOČTY POUŽÍVANÉ V DYNAMICKÉM MODELU	57
OBR. 39	PROCES NASTAVENÍ MÍRY OHYBU ZUBU PILOVÉHO PÁSU KROKOVÝM MOTOREM - SIMULACE 1	59
OBR. 40	PROCES NASTAVENÍ MÍRY OHYBU ZUBU PILOVÉHO PÁSU KROKOVÝM MOTOREM - SIMULACE 2	60
OBR. 41	PROCES NASTAVENÍ MÍRY OHYBU ZUBU PILOVÉHO PÁSU KROKOVÝM MOTOREM - SIMULACE 3	61
OBR. 42	PROCES NASTAVENÍ MÍRY OHYBU ZUBU PILOVÉHO PÁSU KROKOVÝM MOTOREM - SIMULACE 4	62
OBR. 43	PROCES NASTAVENÍ MÍRY OHYBU ZUBU PILOVÉHO PÁSU KROKOVÝM MOTOREM - SIMULACE 5	63
OBR. 44	PROCES OHYBU ZUBU PILOVÉHO PÁSU - VAČKA/VAHADLO	65
OBR. 45	PROCES OHYBU ZUBU PILOVÉHO PÁSU - VAHADLO/ÚDERNÍK.....	66
OBR. 46	PROCES OHYBU ZUBU PILOVÉHO PÁSU - ÚDERNÍK/ZUB PILOVÉHO PÁSU	67
OBR. 47	PROCES OHYBU ZUBU PILOVÉHO PÁSU - SOUHRN.....	68
OBR. 48	POUŽITÝ DC MOTOR TRANSTECNO S PŘEVODOVKOU [4].....	69
OBR. 49	POUŽITÝ KM EZI-SERVO ST [4]	70
OBR. 50	ANALÝZA ZUBU - ČÁST A (VLEVO), ČÁST B (VPRAVO).....	72
OBR. 51	ANALÝZA ZUBU - ČÁST A (VLEVO), ČÁST B (VPRAVO).....	72
OBR. 52	ANALÝZA ZUBU - FINÁLNÍ VÝPOČTY	73
OBR. 53	ANALÝZA ZUBU - REÁLNÝ VÝSTUP 1.....	74
OBR. 54	ANALÝZA ZUBU - REÁLNÝ VÝSTUP 2.....	74
OBR. 55	ANALÝZA ZUBU - REÁLNÝ VÝSTUP 3.....	74
OBR. 56	CMOS KAMERA UI-1240ML-C-HQ [25]	76
OBR. 57	PLC SIMATIC S7-1200, CPU 1214C, DC/DC/DC [26]	77
OBR. 58	ZDROJ S7-1200, PM 1207 [26].....	77
OBR. 59	HMI PANEL KTP400 [26].....	78
OBR. 60	ŘÍZENÍ KROKOVÝCH MOTORŮ	80
OBR. 61	NASTAVENÍ KM DO NULOVÉ POZICE - RESTART	81
OBR. 62	PROVEDENÍ OHYBU ZUBU PILOVÉHO PÁSU	82
OBR. 63	VOLBA SMĚRU OHYBU ZUBU PILOVÉHO PÁSU.....	83
OBR. 64	POSTUP VYKONÁVÁNÍ AUTOMATICKÉHO REŽIMU	84
OBR. 65	NÁHLED GUI PRO VOLBU REŽIMU (VLEVO - A) A MANUÁLNÍ REŽIM KM (VPRAVO - B).....	85
OBR. 66	NÁHLED GUI PRO POLOAUTOMATICKÝ (VLEVO - A) A AUTOMATICKÝ (VPRAVO - B) REŽIM	85
OBR. 67	BLOKY URČENÉ PRO KOMUNIKACI TYPU CLIENT/SERVER.....	86
OBR. 68	NÁHLED GUI PRO PC PROGRAM.....	87
OBR. 69	VÝVOJOVÝ DIAGRAM TŘÍD POUŽITÝCH V PC	87

SEZNAM TABULEK

TAB. 1.	D-H PARAMETRY PRO ZAVEDENÍ ČLÁNKOVÝCH SOUSTAV SOUŘADNIC.....	17
TAB. 2.	ROZDÍLY CCD VS CMOS [11]	21