



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**ENERGETICKÝ MODEL LINEÁRNÍ OSY S KULIČKOVÝM
ŠROUBEM A SERVOPOHONEM**

ENERGETIC MODEL OF LINEAR AXIS WITH BALL SCREW AND SERVODRIVE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Sládek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Bc. Vojtěch Sládek
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce:	Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

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

Energetický model lineární osy s kuličkovým šroubem a servopohonem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je vytvoření energetického modelu lineární osy s kuličkovým šroubem a servopohonem (dále jen osa), který bude zahrnovat jak mechanickou část tak elektrickou část. Samotný model by mohl sloužit k výpočtu energetických toků v rámci osy v celém rozsahu rychlostí osy.

Cíle diplomové práce:

Literární rešerše na téma energetické modely lineárních os s kuličkovým šroubem a servopohonem.
Rozbor jednotlivých součástí osy vzhledem ke ztrátám.
Metodika výpočtu ztrát na elektrické části pohonu.
Metodika výpočtu ztrát na mechanické části pohonu.
Vytvoření komplexního energetického modelu osy.

Seznam doporučené literatury:

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, s.r.o., 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.

DRURY, Bill. Control techniques drives and controls handbook, 2nd edition. IET, 2001. ISBN 978--84919-013-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Cílem práce bylo studium o Energetických modelech lineárních os s kuličkovými šrouby a servopohonu, rozbor jednotlivých součástí osy vzhledem ke ztrátám, metodika výpočtu ztrát na elektrické části a mechanické části pohonu a vytvoření komplexního algoritmu, který pro zadaný pohyb vypočítá spotřebovanou energii. Práce je rozdělena na část teoretickou a praktický výpočet, kdy teoretická je rozdělena na pojednání o elektrické části osy a o jejich ztrátách a na část, která pojednává o mechanické části a jejich ztrátách. Výpočet je rozdělen na základní ověřovací algoritmus a na výpočet na zadaném příkladu. Každý tento výpočet je počítán jak pro lineární zrychlení, tak pro zrychlení s S-křivkami. Pro oba typy zrychlení je výsledkem energie a její průběh v čase, také průběhy polohy, rychlostí, zrychlení, úhlového zrychlení, momentů, výkonů, příkonů, otáček a proudů v čase.

ABSTRACT

The aim of the thesis was to study the Energy Models of Linear Axes with Ball Screws and Servo Drives, to analyze the individual parts of the axis with respect to losses, the methodology of calculating the losses on the electrical part and the mechanical part of the drive and creating a complex algorithm that calculates the energy consumed for the specified motion. The thesis is divided into a theoretical and practical part, where the theoretical part is divided into the treatise on the electrical part of the axis and its losses and the part that deals with the mechanical part and its losses. The calculation is divided into the basic verification algorithm and the calculation on the given example. Each calculation is calculated for both linear acceleration and S-curve acceleration. For both types of acceleration, the result of energy and its course over time is also the waveforms of position, velocity, acceleration, angular acceleration, moments, powers, power, speed and currents over time.

KLÍČOVÁ SLOVA

Účinnost, ztráty, energie, lineární osa, kuličkový šroub, servopohon, měnič, lineární vedení

KEYWORDS

Efficiency, Loss, Energy, Linear Axis, Ball Screw, Actuator, Inverter, Linear Guide

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SLÁDEK, V. *Energetický model lineární osy s kuličkovým šroubem a servopohonem*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2019, 75 s., Vedoucí diplomové práce Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Rostislavu Huzlíkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace ke studované problematice a rady v průběhu práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Rostislava Huzlíka a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24.5.2019

.....

Vojtěch Sládek

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	ENERGETICKÉ MODELY LINEÁRNÍCH OS S KULIČKOVÝM ŠROUBEM A SERVOPOHONEM	17
2.1	Posuvové lineární soustavy-lineární osy.....	17
2.2	Rozbor jednotlivých součástí osy vzhledem ke ztrátám.....	17
2.3	Úvod do problematiky energetický model lineární osy s kuličkovým šroubem	18
3	METODIKA VÝPOČTU ZTRÁT NA ELEKTRICKÉ ČÁSTI POHONU	19
3.1	Princip fungování elektrických strojů-elektromechanické přeměny energie.....	19
3.2	Možnosti pohonu.....	19
3.3	Servopohon posuvu.....	21
3.4	Synchronní motor.....	21
3.4.1	Ztráty na synchronním motoru.....	22
3.5	Frekvenční měniče synchronního motoru.....	24
3.5.1	Ztráty v měniči.....	25
3.5.2	Závislost ztrát na vstupních veličinách.....	27
4	METODIKA VÝPOČTU ZTRÁT NA MECHANICKÉ ČÁSTI POHONU ...	29
4.1	Lineární vedení.....	29
4.1.1	Ztráty ve vedení.....	30
4.2	Kuličkový šroub a matice.....	30
4.2.1	Ztráty v kuličkovém šroubu.....	32
4.3	Ložiska.....	32
4.3.1	Ztráty v ložiskách.....	33
4.3.2	Závislost ztrát na vstupních veličinách.....	34
5	PRAKTICKÁ ČÁST-ENERGETICKÝ MODEL LINEÁRNÍ OSY	37
5.1	Ověření-vytvoření základního algoritmu.....	37
5.1.1	Definice vstupních parametrů.....	37
5.1.2	Definice pohybu.....	38
5.1.3	Pohyb s lineárním zrychlením a S-křivkami.....	38
5.1.4	Výpočet momentu a výkonu motoru.....	41
5.2	Upravení základního algoritmu dle zadání.....	48
5.2.1	Zadání.....	48
5.2.2	Definice vstupních parametrů a definice pohybu.....	49
5.2.3	Vektor času, rychlosti, zrychlení, vektor polohy pomocí numerické integrace- obdélníková formule.....	50
5.2.4	Výpočet momentu a výkonu motoru.....	53
5.2.5	Výpočet momentu a výkonu motoru.....	53
5.2.6	Výsledky výpočtu.....	56
5.2.7	Závislosti.....	63
6	ZÁVĚR	65
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	67
8	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK	69
8.1	Seznam tabulek.....	69
8.2	Seznam obrázků.....	69
8.3	Seznam symbolů.....	71

9	SEZNAM PŘÍLOH	75
---	---------------------	----

1 ÚVOD

Primární funkcí obráběcího stroje je zpracovávat polotovary do potřebného tvaru, rozměru, jakosti povrchu, a to odebráním třísek z povrchu materiálu. Tento technologický proces se nazývá obrábění.

Během tohoto procesu se transformuje energie pohonu na energii spotřebovanou k obrábění, tedy odvodu třísky obráběného materiálu. Je v ní zahrnuta práce, která je vykonávána při odebrání třísky, tzv. deformační energie pružných a plastických deformací a práce, kterou spotřebovává odvod třísky z místa řezu, tedy energie tření. Tato transformace probíhá mezi obrobkem a nástrojem stroje.

V dnešní době jsou pro výrobce i pro uživatele obráběcích strojů důležité vlastnosti stroje, jako je ekonomičnost výroby, ekonomičnost montáže a provozu stroje, jeho spolehlivost, ekologičnost, vysoká produktivita a kvalita práce zařízení, zkrácení celkového času výroby apod. S tím souvisí i energetické a tepelné ztráty na zařízení, jeho částech a redukce těchto ztrát.

Obráběcí stroj je složen z mnoha částí, které potřebují energii pro svou funkci. Jsou to vřetena, stoly, kryty, čerpadla, osvětlení, řídicí systém apod. Jedním z hlavních částí stroje, který spotřebovává energii je soustava členů provádějící pohyb částí stroje. Ty musí buď zabezpečovat, nebo vykonávat určitý relativní pohyb mezi statickým a dynamickým uzlem stroje a přenášet zatížení z jednoho dílu na druhý. Tento pohyb je vykonán spojením pohonů a funkčních částí zařízení jako jsou stoly apod.

Cílem práce je shrnutí veškerých ztrát, které vznikají na lineární ose s kuličkovým šroubem a servopohonem a vytvoření algoritmu k výpočtu energie spotřebované při zadaném pohybu osy.

2 ENERGETICKÉ MODELY LINEÁRNÍCH OS S KULIČKOVÝM ŠROUBEM A SERVOPOHONEM

Takové modely ještě nikdo nepublikoval nebo nebyly nalezeny. Jednotlivé součásti a jejich ztráty sice řešeny jsou, ale jako energetický model, ve kterém by byly zahrnuty veškeré ztráty, publikovány práce nejsou. Proto je následující rešerše rozdělena na ztráty na jednotlivých částech lineární osy a energetický model jako takový, byl vytvořen v praktické části této práce.

2.1 Posuvové lineární soustavy-lineární osy

Základním pohybem obráběcího stroje je pohyb lineární, tedy pohyb přímočarý. Jsou to například hlavní řezné pohyby nástroje nebo obrobku, posuvy nebo přísuvy ve směru kolmém k řezné rychlosti nebo pohyby pomocné, jako je přisunutí nástroje k obráběné součásti přemístění částí stroje apod. Tyto pohyby vykonává posuvová lineární soustava, která se dělí dle způsobu vedení, odměřování polohy, krytování a přívodu médií, mazání a dle způsobu náhonu [1,2].

Soustava je složena z hnacího členu-motoru, dále může mít převodový mechanismus sloužící k přeměně otáček a z mechanismu, který přeměňuje rotační pohyb na lineární. Náhon může být rotační servopohon nebo lineární motor a jednotlivé části stroje se musí pohybovat jen po určitých druzích vedení a jejich pohyby musí být přesně odměřovány a kontrolovány [1,2].

V současnosti se pro vykonávání posuvu při stavbě obráběcích center využívá náhon lineárními servomotory nebo elektromechanická posuvová soustava [2].

Lineární motory se využívají pro HSC obrábění (High Speed Cutting) a jejich konstrukce umožňuje absenci převodu, jelikož posuvovou sílu vyvozují přímo působením elektromagnetických sil na suport stroje. Mezi pohyblivou primární částí, která je smontována ke stolu, a sekundárním stacionárním dílem, který je přimontován k loži stroje vzniká elektromagnetická síla. Pokud je potřeba tuto sílu zvýšit, tak se znásobí počet motorů, které mají jeden zdroj a jedno odměřování polohy. Pro HPC (High Performance Cutting) se využívá elektromechanické posuvové soustavy, která je popsána v následujících kapitolách [1,2].

2.2 Rozbor jednotlivých součástí osy vzhledem ke ztrátám

Teoretický rozbor ztrát na lineární ose je v této práci rozdělen kvůli přehlednosti na dvě části. Na část, kde se teoreticky popisují ztráty na elektrických částech lineární osy, jako je pohon a měnič a na část, kde se teoreticky popisují ztráty na mechanických částech pohonu, tedy ztráty na kuličkovém šroubu, v ložiskách a ve vedení.

2.3 Úvod do problematiky energetický model lineární osy s kuličkovým šroubem

V dalších kapitolách práce jsou popsány energetické ztráty osy a v praktické části je sestaven energetický model, který je praktikován na reálném příkladu. Práce by měla posloužit konstruktérům, kteří se budou zabývat konstrukcí osy a jejích částech a budou se zabývat energetickou náročností vytvářeného modelu osy.

3 METODIKA VÝPOČTU ZTRÁT NA ELEKTRICKÉ ČÁSTI POHONU

V následujících kapitolách jsou popsány elektrické části osy, a to pohon a frekvenční měnič, jejich ztráty a výpočet těchto ztrát.

3.1 Princip fungování elektrických strojů-elektromechanické přeměny energie

Na začátku si musíme definovat pojmy a uvést základní definice, o kterých budou následující kapitoly. Stroj je zařízení určené k transformaci energie, který je určený různou formou vstupujících a vystupujících energií. Při transformaci každé energie dochází ke vzniku nežádoucí energie (např. teplo), nazýváme ji ztracená energie, nebo jinak ztrátová energie. Pro stálé, resp. ustálené stavy platí zákon o zachování energie a základní energetická rovnice:

$$\text{Vstupní energie} = \text{vstupní energie} + \text{ztrátová energie}$$

Další pojem je účinnost stroje, tedy účinnost transformace energie. Značí se η a je dána vzorcem:

$$\eta = \frac{\text{Výstupní energie}}{\text{Vstupní energie}} = \frac{\text{Výstupní výkon}}{\text{Vstupní výkon}}$$

Elektrické stroje dělíme na motory, které mění elektrickou energii na mechanickou, na generátory, které pracují na opačném principu a na transformátory neboli měniče, které mění elektrickou energii na elektrickou energii jiné formy [4,6].

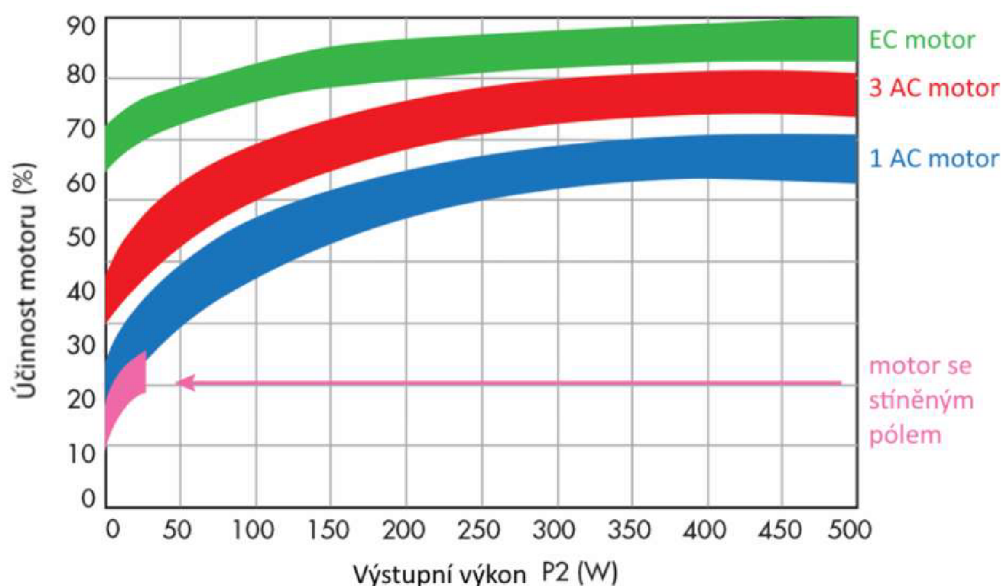
3.2 Možnosti pohonu

Při volbě elektrického pohonu si konstruktéři vybírají mezi několika typy motorů, stejnosměrnými motory DC (Direct current), střídavými motory AC (Alternate current) a elektronicky komutovanými motory EC (electronically commutated), které mají vyšší účinnost než předem zmiňované motory a představují pokrok při jejich nahrazování. Porovnání účinností je zobrazeno na obrázku 1) [5,7].

Jednou z mnoha částí DC stejnosměrných motorů jsou uhlíkové kartáče a komutační kroužek, který slouží k přepínání směru proudu a polarity magnetického pole v rotující kotvě. Popsaná interakce mezi vnitřním motorem a pevnými permanentními magnety vyvolává otáčení motoru. Tyto motory mají specifické ztráty. Přichází o účinnost kvůli počátečnímu odporu ve vinutí, třením kartáčů a kvůli ztrátám způsobenými vířivými proudy [5,7].

AC střídavé asynchronní motory aplikují řadu cívek, která je napájena a řízena vstupním napětím. Vstupní napětí vytváří pole statoru, a to indikuje pole rotoru. Druhý typ motoru je synchronní, který umožňuje pracovat s přesným napájecím kmitočtem. Sběrací kroužky dodávají proud, který vytváří magnetické pole [8].

EC motory mají na rotoru permanentní magnety a používají elektroniku k řízení napětí a proudu aplikovaného na motor. Nemají žádné kartáče, aby se zabránilo jiskření a zkrácení životnosti kvůli jejich opotřebení. Jelikož mají elektronikou ovládaný stator, tak neztrácejí energii, která indikuje rotorové pole a umožňuje lepší výkon a ovladatelnost [5,7].



Obr. 1) Porovnání účinností motorů [5]

Krokový motor je definován jako elektromotor s jedním budicím motorem impulsy do diskretních úhlů. Na statoru a rotoru má vystupující póly, ale pouze jedno vícenásobné vinutí. Stator normálně nese vinutí, které se někdy nazývá řídicím vinutím. Vstupní signál (puls) se přemění přímo na požadovanou pozici hřídele bez jakýchkoli senzorů polohy zpětné vazby nebo zpětné vazby. Střídavé motory jsou kompatibilní s moderními digitálními zařízeními. Krokové motory nacházejí uplatnění v systémech řízení rychlosti a polohy bez nákladných zpětných smyček. Typický řídicí obvod krokového motoru se skládá ze vstupního regulátoru, logického sekvenátoru a ovladače výkonu. Výstupní signály (obdélníkové impulsy) a logické sekvenátory se přenášejí na vstupní svorky pohonu, který je rozděljuje na každé z fázových vinutí (komutace). Krokování motoru lze třídit třemi způsoby:

- S aktivním rotorem
- S reaktivním rotorem
- Hybridní motory

Krokový motor by měl splňovat následující požadavky: velmi malý krok, obousměrná operace, nekumulativní chyba polohování (méně než 5% krokového úhlu), provoz bez chybějících kroků, malé elektrické a mechanické časové konstanty] lze zablokovat bez poškození motoru. Střídavé motory poskytují velmi vysoký točivý moment při nízkých rychlostech, až 5-ti násobek kontinuálního krouťícího momentu d.c. motoru komutátoru stejné velikosti nebo dvojnásobek točivého momentu ekvivalentního střídavého motoru. To často

eliminuje potřebu převodovky. Nejdůležitějšími výhodami krokových motorů jsou rychlost otáčení úměrná frekvenci vstupních impulzů, digitální regulace otáček a polohy, regulace otevřené smyčky (s výjimkou speciálních aplikací), vynikající odezva na krokové příkazy, zrychlení a zpomalení, vynikající vlastnosti s nízkou rychlostí a vysokým točivým momentem, mechanické převodovky (lze získat jeden krok za 24 hodin), jednoduchá synchronizace skupiny motorů, dlouhá bezporuchová životnost [5,7].

3.3 Servopohon posuvu

Servopohon funguje v polohové smyčce v úplném rozpětí otáček s konstantním momentem na hřídeli. Reálná poloha se odměřuje například pomocí inkrementálního čidla, absolutním fotoelektrickým snímačem atd. Signál z čidla je posléze srovnáván s požadovanou hodnotou. Odchyłka od této hodnoty dále směřuje do regulátoru polohy. Pokud je však aplikován krokový motor, tak řízení polohy může pracovat bez zpětné vazby polohy [8].

Jako regulace posuvu se používá rotačních (případně s převodem) a lineárních motorů. Z hlediska mechanických problémů je lepší volbou lineární motor, protože při použití převodu u rotačního motoru, tedy spojení matice s posuvovým šroubem vznikají vyšší ztráty, existuje možnost vzniku nelinearity a taky působení nepřímé zpětné vazby na přesnost [8].

V současnosti se už nepoužívají stejnosměrné motory jako pohon posuvu. Přechází se na motory synchronního a asynchronního typu [8].

Charakterizují vlastnosti servomotorů OS jsou vyšší otáčky, malý moment setrvačnosti, uzavřená konstrukce, jsou napájeny z tranzistorových měničů a mají konstrukci bez komutátoru [8].

3.4 Synchronní motor

Synchronní stroje tvoří celou řadu elektrických strojů. Hlavní typy řady elektrických strojů jsou samostatně buzené synchronní stroje (SM), synchronní stroje s reluktancí (SyRM) a permanentní magnetové synchronní stroje (PMSM). Synchronní stroj a stroj s permanentními magnety se v podstatě liší od asynchronního stroje skutečností, že jejich výsledná složka pro proudovou vazbu vytvořená rotorem je generována buď přímým proudem ve vinutí nebo permanentními magnety, které v ustáleném stavu pracují nezávisle na statoru. V asynchronních motorech jsou rotorové proudy indukovány proudem statoru přes vzduchovou mezeru se skluzem [3,9].

Stator synchronního a asynchronního motoru je konstrukčně stejný a je na něm situován systém třífázového vinutí. Jinak je to s rotorem, jehož konstrukce je u obou typů motoru jiná. Statorové vinutí je ze tří cívek neboli fází s plným krokem, které jsou vůči sobě pootočené o 120° elektrických. Stejnosměrný proud ze sítě nebo z vlastního budiče napájí budící vinutí na statoru. Při otáčení rotoru se v cívkách statorového vinutí indukují střídavá napětí, která jsou při sinusovém průběhu magnetického pole taky sinusová a navzájem časově posunutá o 120° [9].

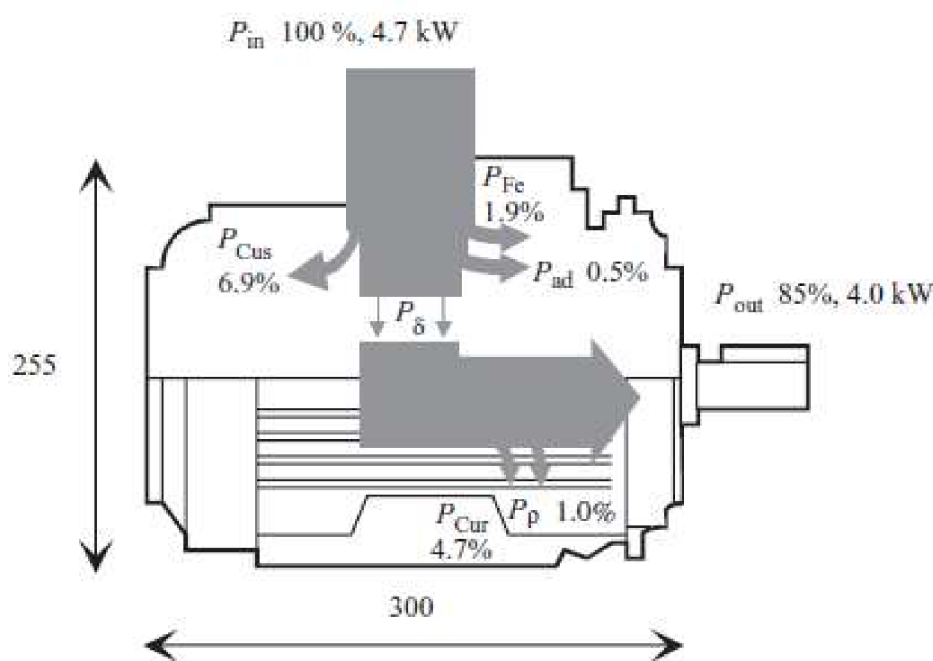
Název synchronní je podle magnetického pole vytvořeného statorovými proudy, které se otáčí stejně rychle jako rotor (synchronně s rotorem) a protože je vůči poli rotoru ve stejné poloze [9,10].

3.4.1 Ztráty na synchronním motoru

Ztráty výkonu v elektrických strojích se skládají z následujících prvků:

- odporové ztráty ve statorových vodičích;
- ztráty v železe v magnetickém obvodu;
- dodatečné ztráty
- mechanické ztráty

Odporové ztráty ve vodičích se někdy nazývají ztráty joule nebo ztráty mědi, a proto se indexy „Cu“ používají v následujících případech pro odporové ztráty. Zmíněné ztráty zobrazuje Sankeyův diagram asynchronního motoru (na Obrázku 2)) o výkonu 4 kW) [3,7,9].



Obr. 2) Sankeyův diagram asynchronního motoru, P_{Fe} ztráty železa, P_{Cus} odporové ztráty statoru, P_{Ad} další ztráty, P_{δ} výkonová mezera, P_{Cur} odporové ztráty rotoru, P_p třecí ztráty [3]

Odporové ztráty.

Odporové ztráty ve vinutí s fázemi m a proudem I jsou:

$$P_{Cu} = m_F \cdot I^2 \cdot R_{AC} \quad (1)$$

kde R_{AC} je AC odpor fázového vinutí, m_F je počet fází, I je proud. Odpor AC se vypočítá:

$$R_{AC} = k_R \cdot \frac{Nl_{av}}{\sigma S_C} \quad (2)$$

kde k_R je koeficient skin efektu pro rovnici odporu (3), N je počet otáček, l_{av} je průměrná délka otáčení, S_C je plocha průřezu vodiče a σ je specifická vodivost vodiče [3,9].

Odpor vinutí je závislý na teplotě:

$$R_{AC} = R_0 \cdot (1 + \alpha \Delta t) \quad (3)$$

kde R_0 značí odpor při teplotě t_0 , α je teplotní součinitel elektrického odporu a Δt je změna teploty.

Pro odporové ztráty tedy platí:

$$P_{Cu} = m \cdot I^2 \cdot R_{AC} = \frac{k_R}{\rho \sigma} \cdot \frac{I^2}{S_C^2} \cdot m_{Cu} = \frac{k_R}{\rho \sigma} \cdot J^2 \cdot m_{Cu} \quad (4)$$

kde $J=I/S_C$ je proudová hustota ve vodičích a m_{Cu} je hmotnost mědi [3,9].

Ztráty v železe.

Při ručních výpočtech jsou ztráty železa zjištěny dělením magnetického obvodu stroje do n úseků, kde je hustota fluktuace přibližně konstantní. Jakmile jsou vypočteny hmotnosti $m_{Fe,n}$, z různých oblastí n , lze ztráty $P_{Fe,n}$ různých částí stroje aproximovat následovně:

$$P_{Fe,n} = P_{10} \cdot \left(\frac{\widehat{B}_n}{1T} \right)^2 \cdot m_{Fe,n} \quad (5)$$

nebo

$$P_{Fe,n} = P_{15} \cdot \left(\frac{\widehat{B}_n}{1,5T} \right)^2 \cdot m_{Fe,n} \quad (6)$$

kde B_n je radiální hustota toku, P_{10} a P_{15} jsou takzvaná ztrátová čísla, je to v podstatě ztráta v plechu při 1, respektive 1,5 Tesle a typicky při 50 Hz [3,9].

Dodatečné ztráty

Dodatečné ztráty spojují všechny elektromagnetické ztráty, které nejsou zahrnuty v odporových ztrátách a ztrátách železa. Dodatečné ztráty jsou pro výpočet a měření velmi obtížné. Proto se v normách IEC předpokládá, že dodatečné ztráty činí 0,5 % vstupního výkonu v asynchronních motorech, pokud je účinnost motoru vypočtena nepřímou z měření ztrát. Odporové ztráty jsou vypočteny z DC odporu vinutí ve výpočtech účinku, takže 0,5 % vstupního výkonu zahrnuje další ztráty způsobené skin efektem ve vodičích. Ztráty železa jsou stanoveny z testu bez zátěže a následně zahrnují další ztráty bez zatížení; proto ztráta 0,5 % vstupního výkonu pokrývá ztráty, které zátěžový proud a jeho harmonické způsobují ve vinutí, laminaci, rámu a jiném konstrukčním dílu. Dodatečné ztráty jsou úměrné druhé mocnině zatěžovacího proudu I a výkonu 1,5 frekvence tj. [3,9]:

$$P_{ad} = I^2 \cdot f^{1.5} \quad (7)$$

Mechanické ztráty

Mechanické ztráty jsou důsledkem tření ložisek a vzduchu. Ztráty v ložiscích závisí na rychlosti hřídele, typu ložiska, vlastnostech maziva a zatížení ložiska. Výrobci ložisek poskytují pokyny pro výpočet ztrát ložisek. Podle SKF jsou ztráty na třecích ztrátách:

$$P_{\rho, bearing} = 0.5 \cdot \Omega \cdot \mu \cdot F \cdot D_{bearing} \quad (8)$$

kde Ω je úhlová frekvence hřídele podírající se ložiskem, μ je koeficient tření (obvykle 0.0010-0050), F zatížení ložiska a $D_{bearing}$ vnitřní průměr ložiska.

Odpor vzduchu do výpočtu nebudeme zahrnovat, jelikož jsou ztráty velmi malé [3,10].

Koncové plochy rotoru rovněž vytvářejí ztráty třením. Tyto součásti lze modelovat jako disky, které se otáčejí ve volném prostoru:

$$P_{\rho, w2} = \frac{1}{64} \cdot C_M \cdot \rho \cdot \Omega^3 \cdot (D_r^5 - D_{ri}^5) \quad (9)$$

kde D_r je vnější průměr rotoru, D_{ri} průměr hřídele a C_M točivý moment, který se spočítá:

$$C_M = \frac{3.87}{Re_r^{0.5}}, \quad Re_r < 3 \times 10^5 \quad (10)$$

$$C_M = \frac{0.146}{Re_r^{0.2}}, \quad Re_r > 3 \times 10^5 \quad (11)$$

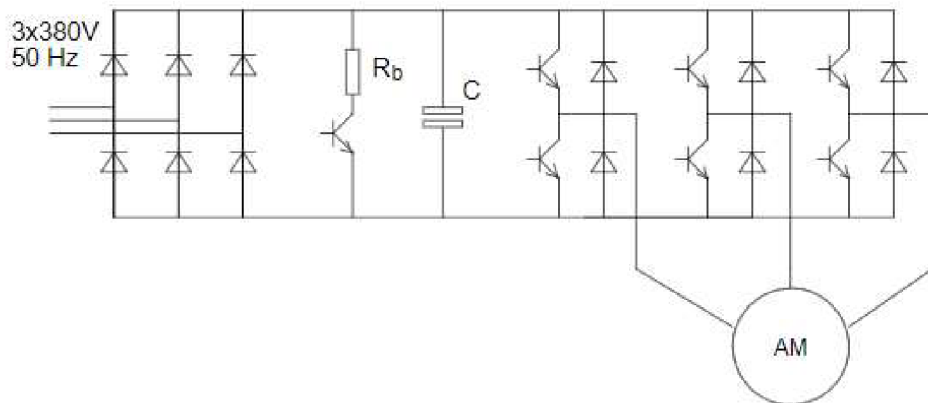
kde Re_r je známý jako typ Reynoldsova čísla [3,9]:

$$Re_r = \frac{\rho \Omega D_r^2}{4\mu} \quad (12)$$

3.5 Frekvenční měniče synchronního motoru

Frekvenční měniče jednak slouží k rozběhu, ale i k řízení rychlosti synchronního motoru. Fungují tak, že rychlost otáček rotoru synchronního motoru je přímo úměrná napájecí frekvenci. Změna napájecí frekvence tedy usměrňuje otáčivou rychlost rotoru. Existuje více metod, kterými měnič řídí rychlost a liší se zdrojem proměnné frekvence. Frekvenční měniče se používají hlavně kvůli velkému rozsahu regulace otáček při konstantním momentu. Dále je to značná úspora energie a omezení hluchnosti [9,14,15].

Jedním z typů měničů je nepřímý, což značí, že se zde mění energie dvakrát a jehož nejpoužívanějším typem je napěťový měnič frekvence (viz Obr. 3)), kde je znázorněn tento měnič s diodovým napáječem). Tento druh nepřímého měniče funguje tak, že se usměrní střídavá elektrická energie a vytvoří se stejnosměrný meziobvod, který je tvořen kondenzátorem. Následně je vytvořeno střídavé napětí měničem (střídačem), které má požadovanou frekvenci (většinou se pohybuje mezi 0-200 Hz, někdy i více) [9,14,15].



Obr. 3) Napěťový měnič frekvence s diodovým napáječem [14]

Rezonanční měnič je dalším typem nepřímého měniče, který má diodový vstupní usměrňovač a jehož proud nebo napětí na meziobvodu kmitá vysokou frekvencí (asi 100kHz). Z něho se pak generuje požadovaná frekvence a střídavé napětí. Výhodou těchto měničů je, že snižují ztráty spínáním výkonových tranzistorů pouze při nulovém napětí nebo proudu [9,14,15].

3.5.1 Ztráty v měniči

V měniči vznikají hlavně dva druhy ztrát, a to ztráty spínací a ve vedení [16].

Předpokládejme, že je do zátěže typu RL spínáno tranzistorovým spínačem stejnosměrné napětí U_d a za předpokladu $T \ll \tau$ zátěží teče téměř hladký málo zvlněný proud I_z , kdy $T = 1/f$ je pracovní opakovací perioda spínání a τ představuje časovou konstantu zátěže. Za těchto podmínek bude okamžitý ztrátový výkon přeměňovaný v čipu na teplo:

$$p_C(t) = u_{CE}(t) \cdot i_C(t) \quad (13)$$

kde $i_C(t)$ je kolektorový proud a $u_{CE}(t)$ je kolektorové napětí. Abychom zjistili velikost ztrát energie při jednom vypnutí, tak musí být použit vzorec:

$$W_{off} = \int_0^{t_{off}} u_{CE}(t) \cdot i_C(t) dt \quad (14)$$

Podobný je i vzorec pro výpočet ztrátové energie jednoho zapnutí:

$$W_{on} = \int_0^{t_{on}} u_{CE}(t) \cdot i_C(t) dt \quad (15)$$

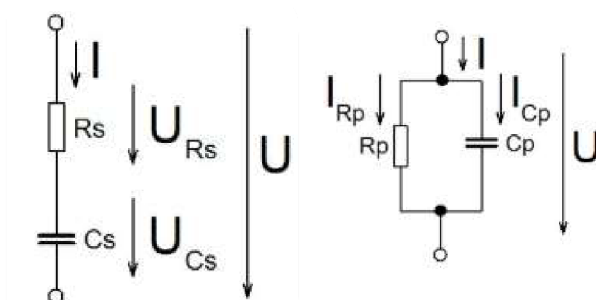
Ztrátový přepínací (střední) výkon bude mít velikost za předpokladu, že pracuje tranzistor s pracovním kmitočtem $f = 1/T$ a obě energie se uplatní f-krát za sekundu:

$$P_{pu} = f(W_{off} + W_{on}) \quad (16)$$

Velikost přenosových ztrát, které jsou způsobeny nenulovým elektrickým odporem vodiče a jeho závislostí na teplotě, se pro stejnosměrný proud vypočítá:

$$P_Z = R \cdot I^2 \quad (17)$$

Energetické ztráty v měniči vznikají také v kondenzátoru a jsou prezentovány dvěma členy. Jednak to jsou dielektrické ztráty, které jsou závislé na kmitočtu a pak to jsou ztráty způsobené svodem, nebo jinak svodovým proudem. Tento proud vzniká mezi elektrodami a je určen konečnou hodnotou izolačního odporu, tj. stejnosměrný odpor, který je složen z odporu dielektrika a izolace, která obklopuje elektrody kondenzátoru. Je udáván jako svodový proud u elektrických kondenzátorů [21].



Obr. 4) Vlevo na obrázku sériové spojení prvků RC a vpravo paralelní [21]

Obvod si lze nahradit spojením ztrátového rezistoru, který obsahuje všechny ztráty a ideální bezztrátový kondenzátor. Toto spojení je možné paralelně nebo sériově (viz obrázek 4) [21].

Ztráty v kondenzátoru se vypočítají pomocí vzorce:

$$tg\delta = \frac{U_{R_s}}{U_{C_s}} = \frac{R_s I}{X_{C_s} I} = \frac{R_s}{X_{C_s}} = \omega \cdot C_s \cdot R_s \quad (18)$$

kde $tg\delta$ je ztrátový činitel, U_{R_s} je napětí na rezistoru, U_{C_s} je napětí na kondenzátoru, R_s odpor rezistoru, X_{C_s} je kapacitance a C_s kapacita kondenzátoru [21].

Podobně je to s paralelním obvodem:

$$tg\delta = \frac{1}{\omega \cdot C_p \cdot R_p} \quad (19)$$

U kondenzátorů s malými ztrátami platí:

$$C_s \cong C_p = C \quad (20)$$

$$R_s = R_p \cdot tg^2\delta \quad (21)$$

Ztrátové činitele jsou většinou uvedeny v katalozích u jednotlivých typů kondenzátorů. Například ztrátový činitel elektrolytických kondenzátorů nabývá hodnot 0,1 - 0,3, keramické

kondenzátory 10^{-4} , s plastovou fólií 10^{-3} a papírové 10^{-2} . Vzduchové kondenzátory mají nejmenší ztrátový činitel a to řádově 10^{-5} až 10^{-6} [21].

3.5.2 Závislost ztrát na vstupních veličinách

Kvůli přehlednosti byla vytvořena tabulka závislostí elektrických ztrát na vstupních veličinách do výpočtu, která svojí změnou ovlivňují její velikost, a to je buď zvyšuje (šipka nahoru), snižuje (šipka dolů), nebo na ně nemá vliv (viz Tabulka 1)).

Tab 1) Závislost elektrických ztrát na vstupních veličinách

	I proud (mění se s momentem)	Δt změna teploty	f frekvence	Ω úhlová frekvence hřídele	F zatižení ložiska	C_M točivý moment	číslo vzorce
Ztráty na synchronním motoru:							
odporové ztráty	↑	↑	---	---	---	---	(1)
ztráty v železe	---	---	---	---	---	---	(6) nebo (7)
dodatečné ztráty	↑	---	↑	---	---	---	(8)
mechanické ztráty	---	---	---	↑	↑	↑	(9),(10)
Ztráty na frekvenčním měniči:							
spínací ztráty	---	---	---	---	---	---	(14)
ztráty ve vedení	---	---	---	---	---	---	(18)

legenda:	
↑	zvyšuje ztráty
↓	snižuje ztráty
---	neovlivňuje ztráty

4 METODIKA VÝPOČTU ZTRÁT NA MECHANICKÉ ČÁSTI POHONU

Do ztrát mechanických částí lineární osy uvažujeme spojení, tedy konstrukční prvek na obráběcím stroji, který plní spojovací funkci dílů stroje. Toto spojení se dělí na spojení pohyblivé a pevné. Dále se budeme zabývat pouze spojením pohyblivým, protože v pevném spojení nevznikají ztráty. Pohyblivé spojení se ještě dělí na rovinné vedení a rotační uložení částí stroje.

V mechanických ztrátách budou ještě zahrnuty mechanické ztráty na kuličkovém šroubu.

4.1 Lineární vedení

Lineární neboli rovinné vedení je soustava vodících ploch, na kterých dochází ke kontaktu mezi pohyblivými a nepohyblivými díly stroje. Musí zajistit pohyb dílů po geometricky přesných trajektoriích, nebo zajistit jejich polohu a převést zatížení z jedné části na druhou [1,2,11].

Existuje velká řada vedení, která pracují na různých principech. Jsou to vedení kluzná, kdy se dvě plochy po sobě pohybují za přítomnosti maziva, během tohoto pohybu vzniká tření a materiály se rychle opotřebovávají. Kvůli lepším kluzným vlastnostem se plochy obkládají, a to běžně plastem. Tímto opatřením se sníží tření až na polovinu [1,2,11].

Aby se zapříčinilo opotřebovávání ploch, tak se používá vedení hydrostatické. Mezi dvěma kluznými plochami je pod tlakem mazivo, které vytváří tenký film, díky němuž se plochy nestýkají ani za klidu. Další výhodou jsou dobré tlumicí vlastnosti oleje. Handicapem hydrostatického vedení je obtížná výroba a drahý provoz [1,2,11].

Dalším typem vedení je valivé, které se vyznačuje vysokou pracovní přesností, nízkým třením, které je navíc neovlivňuje rychlost pohybu, vysokou tuhost, ale hůře tlumí chvění [1,2,11].

Z hlediska energetických ztrát nás zajímá základní rozdělení vedení na vedení kluzná a vedení valivá. Vedení kluzné je využíváno ve dvou variantách, a to dle třecích poměrů. Jednak je to již zmíněné hydrostatické vedení, a druhé je hydrodynamické. Kluzné vedení má různé varianty provedení vodících ploch, jsou to plochy rybinovité, prizmatické, ploché a válcové (kruhové). Jakost práce při použití kluzného vedení negativně ovlivňuje nestabilita pohybu, která se projevuje především u hydrodynamického vedení. Tato nestabilita má dvě formy: za prvé je to necitlivost neboli neumožnění nastavení nástroje vůči obrobku a je to nerovnoměrný trhavý pohyb, jenž má nežádoucí vliv na jakost povrchu. Při uvedení do pohybu musí saně překonat odpor tření za klidu, při pohybu je součinitel tření poté roven součiniteli tření v pohybu. Poskoky vznikají kvůli přebytku hnačí síly a nedostatečně tuhému posuvovému mechanismu. Hydrodynamické vedení se od hydrostatického liší tím, že u hydrodynamického je přiváděn olej a je vytvořen mazací film až ve chvíli, kdy je realizován pohyb [1,2,11].

Aby se docílilo počáteční přesnosti vedení tak musí být zvolena vhodná technologie obrábění a aby byla tato přesnost zachována, tak musí být použit vhodný materiál, ale taky mazání a ochrana vodících ploch [2].

Tab 2) Materiály pro základní kinematickou dvojici pracovní stůl-lože [2]:

Materiál vodících ploch		Největší dovolený měrný tlak p [MPa]	Součinitel tření f	Oblast využití
Kratší plochy-stůl	Delší plochy-lože			
Šedá litina	Šedá litina (+20 HB)	2 až 3	0,1 ... 0,15	Stoly a suporty soustruhů, frézek apod.
		0,15 až 0,8	0,06 ... 0,1	Stoly hoblovek
		0,005 až 0,1	0,06 ... 0,1	Stoly brusek apod.
	Litina povrchově kalená (48-53 HRC)	2,5 ... 3,5	0,1 ... 0,15	Stoly a suporty os s vyšší odolností proti opotřebení
Ocelové kalené lišty (60-63 HRC)				
Umělá hmota	Šedá litina	0,35 ... 0,8	0,02 ... 0,06	Stoly a suporty os s menším třením

Jak již bylo vysvětleno v předchozích odstavcích, u hydrostatické vedení se využívá kapalinného tření. To se vyznačuje značně malým součinitelem tření (přibližně 0,000 005) a to při poměrně velkém rozsahu rychlostí [2].

4.1.1 Ztráty ve vedení

Pro výpočet tření valivého vedení platí vztahy:

$$F_t = f_n \cdot \frac{F_n}{R} \quad (22)$$

kde F_t je třecí síla, F_n kolmá tlaková síla mezi tělesy a R je poloměr průřezu valeného tělesa a f_n je třecí koeficient [22].

4.2 Kuličkový šroub a matice

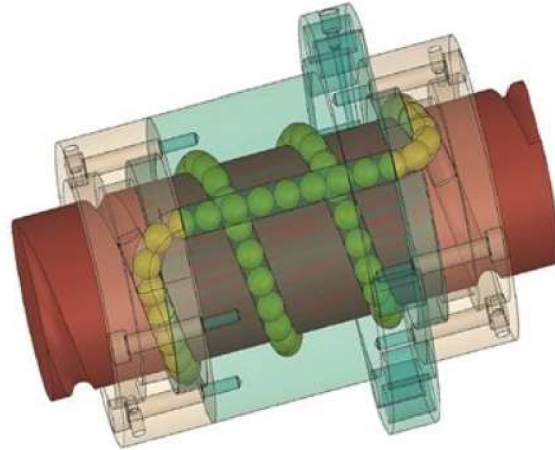
Během obrábění se na výrobním stroji uskutečňuje mnoho pohybů po pohybových osách a pro posuv na těchto osách slouží zařízení, která přemění rotační energii elektromotoru na přímý pohyb pohyblivého dílu rámu. K této transformaci slouží kuličkový šroub [12].

S účinností minimálně 90 % jsou kuličkové šrouby jedním z neekonomičtějších způsobů přeměny rotačního pohybu na přesný lineární pohyb. Jsou schopné přenášet těžké náklady s vysokou rychlostí s vynikající přesností. Navíc kuličkové šrouby mohou být nákladově efektivní alternativy pneumatických a hydraulických pohonů [12,19,20].

Jestli má konstruktér zvolit správný kuličkový šroub a matici pro konkrétní aplikaci, musí zvážit konstrukční faktory, jako jsou zatížení, délka života, rychlost, délka a montáž [16].

Kuličkový šroub se skládá ze závitového hřídele a matice (viz. Obr. 5)) a jeden z nich může působit jako posuvná součást. Kuličkové šrouby pracují podobně jako kuličková ložiska, kde se kuličky z tvrzené oceli pohybují podél sklopně vytvrzeného vnitřního a vnějšího záběru. Výrobci běžně používají dva druhy profilu drážky, a to gotický a kruhový [19,20].

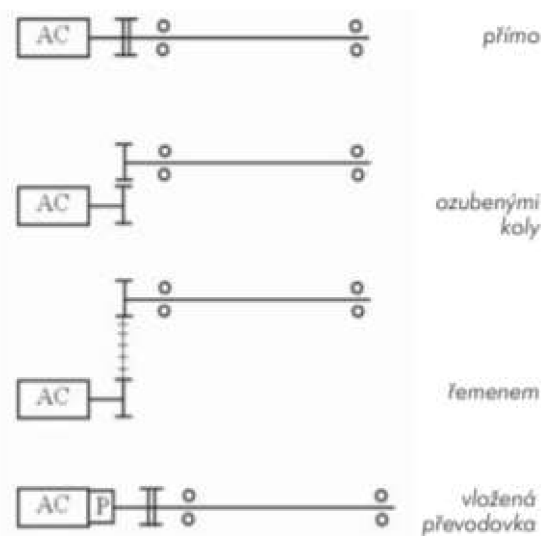
V těle kuličkové matice je převod a oběh kuliček. Do matice je dodáván mazací prostředek, většinou tuk nebo olej, a těsnění je zajištěno plastovou ucpávkou.



Obr. 5) Pohled na matici kuličkového šroubu s uspořádáním kuliček [17]

Matice mají více funkcí, zajišťují vymezení vůlí, jejich úkolem je šíření maziva a částečně odvádět teplo z převodu, přenášet axiální síly a umožňuje nepřetržitý oběh kuliček ve vložených převodnicích [18,19,20].

Účinnost je ovlivňována součinitelem mezi hřídelí, kuličkou a maticí a je vyšší s vyšším úhlem stoupání [19,20].



Obr. 6) Způsoby napojení AC servopohonu na kuličkový šroub [2]

Převody mezi kuličkovým šroubem a servopohonem jsou realizovány buď přímo, ozubenými koly, pomocí řemenu nebo vložené převodovky (schematicky vyznačeno na Obrázku 6)) [2].

4.2.1 Ztráty v kuličkovém šroubu

V matici kuličkového šroubu a v ložiskách uložení kuličkového šroubu vznikají pasivní odpory vlivem axiální třecí síly ve vedení. Díky této axiální třecí síle ve vedení vzniká v ose šroubu ztrátový moment, který se spočítá pomocí vzorce:

$$M_{GT} = \frac{m \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i_p \cdot i_l \cdot \eta_p \cdot \eta_l} \quad (23)$$

$$M_{KSM} = \frac{F_p \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i_p \cdot i_l \cdot \eta_p \cdot \eta_l} \cdot (1 - \eta_s^2) + \frac{0,5 \cdot m \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha \cdot d_s \cdot f_2}{i_p \cdot i_l \cdot \eta_p \cdot \eta_l} \quad (24)$$

jestliže je přímý náhon, kdy není použita převodovka ani převod, tedy je i_p , což je převodový poměr vložené převodovky, a i_l , což je převodový poměr vloženého převodu, rovno jedné, stejně tak jako jejich účinnost η_p a η_l . Pokud je k tomu ještě úhel sklonu alfa nula, pak se tyto vztahy dají upravit do tvaru:

$$M_{GT} = \frac{m \cdot g \cdot f_1 \cdot s}{2 \cdot \pi} \quad (25)$$

$$M_{KSM} = \frac{F_p \cdot s}{2 \cdot \pi} \cdot (1 - \eta_s^2) + 0,5 \cdot (F_A + m \cdot g \cdot f_1) \cdot d_s \cdot f_2 \quad (26)$$

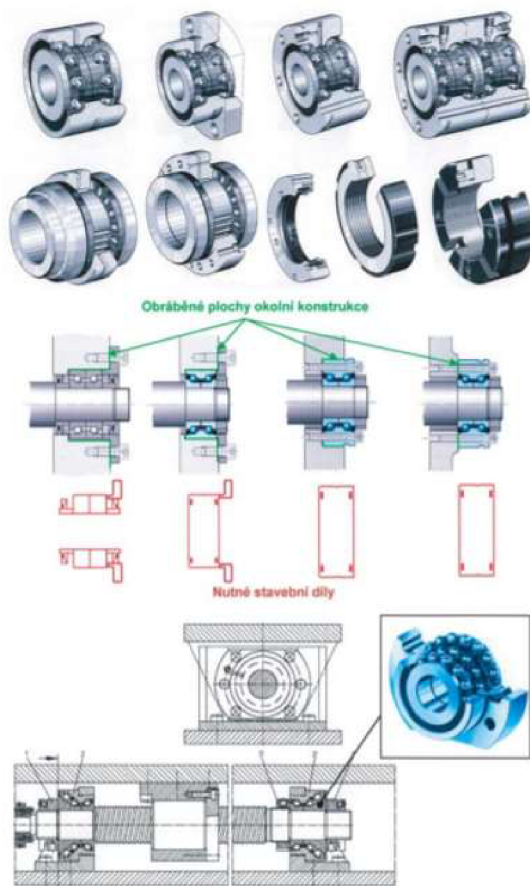
kde F_p je předepnutí kuličkového šroubu, s je jeho stoupání, f_1 součinitel tření ve vodících plochách, f_2 ekvivalentní součinitel tření v KŠM redukováný na poloměr šroubu, η_s účinnost KŠM, F_A požadovaná axiální síla a d_s střední průměr [2].

4.3 Ložiska

Tření ve valivém ložisku určuje množství tepla generovaného ložiskem. Množství tření závisí na zatížení a několika dalších faktorech, včetně:

- typ a velikost ložisek
- provozní rychlost
- vlastnosti a množství maziva

Celkový odpor rotace v ložisku je výsledkem valivého a kluzného tření v kontaktních oblastech mezi válčovacími prvky a dráhami mezi válčovacími prvky a klece a mezi válčovacími prvky a dalších vodících ploch. Tření je také generované mazivem a kontaktní těsnění, je-li to možné (příklady ložisek pro použití pro kuličkový šroub jsou na Obrázku 7)) [13].



Obr. 7) Druhy ložisek pro použití pro kuličkový šroub [2]

4.3.1 Ztráty v ložiskách

Podle SKF lze třecí moment vypočítat dvěma způsoby. První jednodušší je pomocí odhadního vzorce. Druhý je dle komplexního vzorce, který řeší jednotlivé zdroje ztrát v ložisku. Abychom mohli použít první jednodušší odhadní vzorec, tak SKF doporučuje, aby byly splněny následující podmínky:

- normální provozní podmínky
- zatížení ložiska $P \approx 0,1C$
- dobré mazání

$$M_{lt} = 0.5 \cdot \mu \cdot P \cdot d \quad (27)$$

kde μ je již zmíněný konstantní součinitel tření ložiska (doporučená hodnota je pro klasická kuličková ložiska 0,0015), d je průměr ložiska a P je ekvivalentní dynamické zatížení ložiska [13].

Druhý způsob sčítá jednotlivé ztráty v každé části ložiska:

$$M = M_{rr} + M_{sl} + M_{seal} + M_{drag} \quad (28)$$

kde M je celkový třecí moment, M_{rr} valivý třecí odpor, ve kterém je zahrnut účinek následného nezalítí stopy a redukce od vířivého ohřevu, M_{sl} moment smykového tření, ve kterém je zahrnut vliv kvality podmínek mazání, M_{seal} třecí moment těsnění (integrováných) a v případě, že je ložisko vybaveno kontaktním těsněním, tak mohou být ztráty způsobené tímto těsněním vyšší, jak ztráty vznikající v samotném ložisku, M_{drag} třecí moment způsobený odporem brodění, hnětením, rozstříkovaním atd. v olejové lázni [13].

Valivý třecí odpor se vypočítá jako:

$$M_{rr} = \phi_{ish} \cdot \phi_{rs} \cdot G_{rr} \cdot (vn)^{0,6} \quad (29)$$

kde ϕ_{ish} je redukční faktor zahřívání na vstupu, ϕ_{rs} redukční faktor kinematického doplňování, n je rotační rychlost, v skutečná provozní viskozita oleje nebo základový olej maziva a G_{rr} valivá frikční proměnná, která je u každého typu ložiska jiná a lze ji dohledat v tabulkách SKF [13].

Moment smykového tření se vypočítá dle vzorce:

$$M_{sl} = G_{sl} \cdot \mu_{sl} \quad (30)$$

kde G_{sl} je posuvná frikční proměnná a stejně jako u valivé frikční proměnné je u každého typu ložiska jiná a najdeme je v tabulkách SKF. μ_{sl} je kluzný třecí koeficient [13].

Třecí moment těsnění se počítá:

$$M_{seal} = K_{S1} \cdot d_s^\beta + K_{S2} \quad (31)$$

kde K_{S1} je konstanta závisující na typu těsnění a na typu ložiska a jeho velikosti, d_s průměr protikusu těsnění, β exponent, který závisí na typu těsnění a typu ložiska a K_{S2} je konstanta závisující na stejných parametrech jako K_{S1} [13].

Třecí moment způsobený odporem brodění, hnětením, rozstříkovaním atd. v olejové lázni. Lze odhadnout pomocí:

$$M_{drag} = 0,4 \cdot V_M \cdot K_{roll} \cdot C_W \cdot B \cdot d_m^4 \cdot n^2 + \\ + 1,093 \times 10^{-7} \cdot n^2 \cdot d_m^3 \cdot \left(\frac{nd_m^2 f t}{v}\right)^{-1,379} \cdot R_S \quad (32)$$

kde V_M je faktor tahové ztráty, B šířka ložiska, d_m hlavní průměr ložiska, průměr vyvrtání ložiska, K_{roll} konstanta související s valivým elementem [13].

4.3.2 Závislost ztrát na vstupních veličinách

Kvůli přehlednosti byla vytvořena tabulka závislostí elektrických ztrát na vstupních veličinách do výpočtu, která svojí změnou ovlivňuje její velikost, a to je buď zvyšuje (šipka nahoru), snižuje (šipka dolů), nebo na ně nemá vliv (viz Tabulka 3).

Tab 3) Závislost mechanických ztrát na vstupních veličinách

	F_n	m	F_n	P	číslo vzorce
	kolmá tlaková síla	hmotnost	kuličkového šroubu	zatížení ložiska	
Ztráty ve vedení:					
tření valivého vedení	↑	↑	---	---	(24)
Ztráty v kuličkovém šroubu a matici:					
pasivní odpory	---	↑	↑	---	(25),(26)
Ztráty v ložiskách:					
ztrátový moment	---	---	---	↑	(29)

legenda:	
↑	zvyšuje ztráty
↓	snižuje ztráty
---	neovlivňuje ztráty

5 PRAKTICKÁ ČÁST-ENERGETICKÝ MODEL LINEÁRNÍ OSY

5.1 Ověření-vytvoření základního algoritmu

Na začátku výpočtu byl vytvořen algoritmus, který sloužil pro ověření správnosti postupu a zadaných vzorců. Tento postup byl nadále upraven pro zadání, kdy do výpočtu byly dosazeny hodnoty dle zadané osy a byla dopočítána energie a proud závislé na čase.

5.1.1 Definice vstupních parametrů

Na začátku výpočtu bylo potřeba definovat parametry, které vstupují do výpočtu.

```

S.m = 16;           %[kg]           - hmotnost
S.g = 9.81;        %[m*s^-2]       - tíhové zrychlení
S.alfa = 0*pi/180; %[rad]         - úhel sklonu
S.s = 0.01;        %[mm]          - stoupání šroubu
S.i_p = 1;         %[-]           - převod 1
S.i_l = 1;         %[-]           - převod 2
S.ucinnost_p = 1;  %[-]           - účinnost 1
S.ucinnost_l = 1;  %[-]           - účinnost 2
S.ucinnost_s = 0.9; %[-]          - účinnost KSM
S.b = 0.015;       %[m]           - rameno působíště tíhové síly
S.f_1 = 0.0015;   %[-]           - součinitel tření 1
S.f_2 = 0.002;    %[-]           - součinitel tření 2
S.L = 0.1;         %[m]           - délka stolu
S.d_s = 0.05;     %[m]           - průměr kuličkového šroubu

S.F_A = zeros(1,N); %[N]          - axiální síla

```

Kdy byla zadána hmotnost, úhel sklonu, stoupání stolu a délka souhlasí s rozměry osy, na které byl počítán výstupní algoritmus, hodnoty převodů a jejich účinností dosazujeme 1, protože zadaná soustava převod nemá. Pro další výpočet bude zapotřebí znát hodnotu momentu setrvačnosti, a protože zadaná sestava má motor bez kotvy rotoru AC servomotoru, motor nemá ani brzdu, převodovku, hnací řemenici ani hnanou řemenici, tak můžeme za jednotlivé momenty setrvačnosti dosadit 0. Účinnosti byly zadány dle zdroje [2].

```

ro = 7850;          %[]           - hustota kuličkového šroubu
b = 1.458;          %[m]          - jeho délka
d = S.d_s;          %[m]          - jeho průměr

J_mot = 0;
J_br = 0;
J_p = 0;
J_1 = 0;
J_2 = 0;
J_s = 1/2*pi*ro*b*(d/2)^4;
J_m = S.m*(S.s/(2*pi))^2;

```

```

% moment setrvačnosti redukováný na moment motoru
S.J_rhm = J_mot + J_br + J_p + J_1 + J_2/(S.i_p^2*S.i_l^2) + ...
          J_s/(S.i_p^2*S.i_l^2) + J_m/(S.i_p^2*S.i_l^2); %[kg*m^2]

```

5.1.2 Definice pohybu

Pohyb byl definován třemi veličinami, a to rovnoměrnou rychlostí při běhu, časem délky rozběhu a doběhu, tedy časem, za jak dlouho má stroj dosáhnout požadované rychlosti a časem délka běhu, který určuje dobu, po kterou se má pohybovat určenou rychlostí.

```

v_s = 1;      %[mm/s]      - rovnoměrná rychlost při běhu
T     = 5;      %[s]        - délka rozběhu a doběhu
T_s  = 6;      %[s]        - délka běhu

```

5.1.3 Pohyb s lineárním zrychlením a S-křivkami

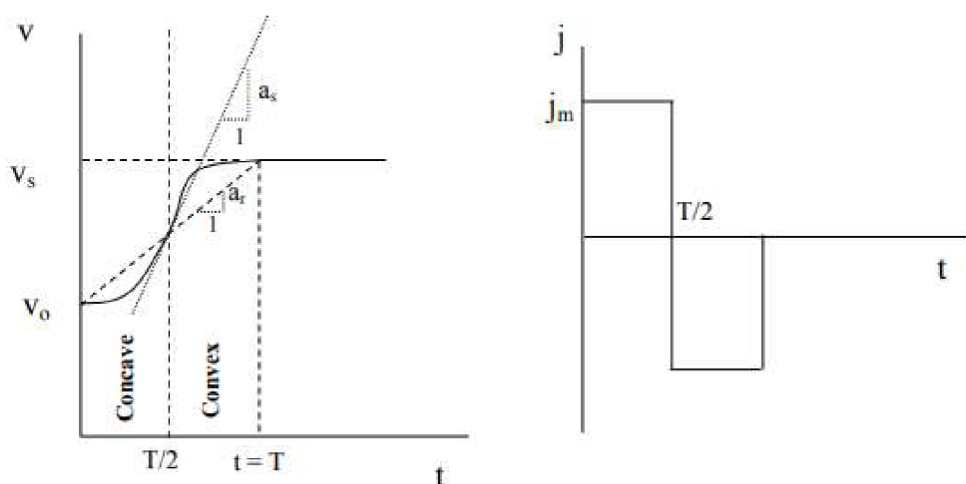
Existují dvě verze výpočtu, a to pro pohyb lineární a pohyb, který je definovaný pomocí S-křivek.

Pohyb s lineárním zrychlením se vypočítá pomocí vzorce:

$$a_s = v_s/T;$$

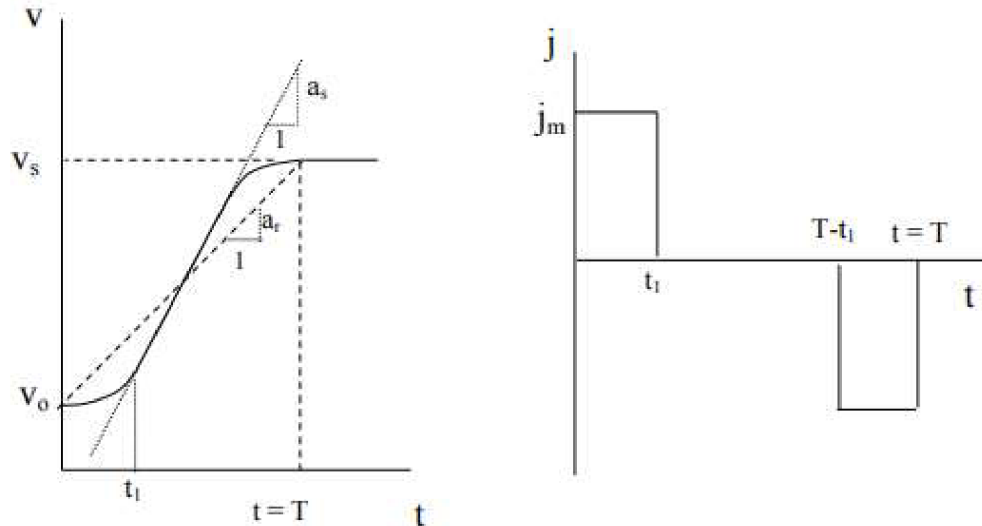
S-křivky se středně konstantním zrychlením se často používají ke zkrácení doby potřebné pro velké změny rychlosti. Konstantní jerky S-křivek se používají k přechodným pohybům stroje, používá se k eliminaci nespojitostí zrychlení, které jsou škodlivé pro výkon stroje. Nejčastější typ pohybu zahrnuje konvexní a konkávní S-křivky, lineární zrychlení (nebo zpomalení) neboli oblast, kde je jerk nulový a oblast, kde je zrychlení nulové, tedy oblast s konstantní rychlostí, kde se uskutečňuje většina pohybu [23].

Ideální S-křivka je zobrazena na Obrázku 8), jedná se o S-křivku bez lineární přechodové části. Plocha pod konkávní a konvexní částí křivky S je stejná jako plocha pod konstantní zrychlovací rampou (a_r). Konstantní profil rampy tak může být použit pro pomoc při rozhodování o trajektorii profilu S-křivky, jako je předvídání času T pro pohyb na nastavenou rychlost [23].



Obr. 8) Ideální S-křivka [23]

V případě velké změny rychlosti se aplikuje S křivka s lineárním zrychlením mezi konvexní a konklávní částí. Tento případ platí i pro zadaný příklad. Na obrázku 9 je zobrazený průběh rychlosti na čase, který je proložený křivkou s popisovanými vlastnostmi, tedy v oblasti do t_1 je konvexní, poté je zrychlení lineární a následuje konklávní přechod do zrychlení rovno nule, kdy je konstantní rychlost [23].



Obr. 9) S-křivka s lineárním zrychlením [23]

Abychom mohli tento příklad zapsat pomocí vzorců, tak si musíme tuto oblast rozdělit na tři fáze. Na konvexní, lineární a konklávní [23].

Fáze 1 - konklávní ($0 \geq t \geq t_1$)

Pro konklávní platí tyto rovnice pro dráhu, rychlost a zrychlení:

$$s(t) = v_0 \cdot t + j_m \cdot \frac{t^3}{6} \quad (33)$$

$$v(t) = v_0 + j_m \cdot \frac{t^2}{2} \quad (34)$$

$$a(t) = j_m \cdot t_1 \quad (35)$$

kde j_m je jerk, který se spočítá:

$$j_m = \frac{a_s}{t_1} \quad (36)$$

Fáze 2 - lineární ($0 \geq t \geq T - 2t_1$)

Pro lineární platí rovnice:

$$s(t) = v_1 \cdot t + a_s \cdot \frac{t^2}{2} \quad (37)$$

$$v(t) = v_1 + a_s \cdot t \quad (38)$$

Fáze 3 - konvexní ($0 \geq t \geq t_1$)

Pro konvexní platí rovnice:

$$s(t) = v_2 \cdot t + a_s \cdot \frac{t^2}{2} - j_m \cdot \frac{t^3}{6} \quad (39)$$

$$v(t) = v_0 + j_m \cdot \frac{t^2}{2} + a_s \cdot t - j_m \cdot \frac{t^2}{2} \quad (40)$$

$$a(t) = a_s - j_m \cdot t \quad (41)$$

Postup výpočtu v Matlabu vypadal tak, že bylo nadefinováno zrychlení pro všechny tři fáze.

```
a_s_max = (2*v_s)/T;
a_s_min = v_s/T;
a_s = a_s_min + (0.5)*(a_s_max-a_s_min);    %[mm*s^-2] - ustalene
zrychlení při rozběhu
```

Následně byl definován jerk a vektory časů, rychlostí, zrychlení a byl vypočítán vektor polohy pomocí numerické integrace.

```
%% Výpočet časové délky t_1
T_1 = T-v_s/a_s;

%% Výpočet jerku
j_m = a_s/T_1; %

%% Vektor času
T_all = 2*T+T_s; % celková časová délka (rozběh +běh +doběh)
t = linspace(0,T_all,N);

N_1 = floor(T_1/T_all*N);
N_2 = floor((T-T_1)/T_all*N);
N_3 = floor(T/T_all*N);
N_4 = floor((T+T_s)/T_all*N);
N_5 = floor((T+T_s+T_1)/T_all*N);
N_6 = floor((T_all-T_1)/T_all*N);

t_1 = linspace(0, T_1, N_1);
t_2 = linspace(0, T-2*T_1, N_2-N_1);
t_3 = linspace(0, T_1, N_3-N_2);
t_4 = linspace(0, T_s, N_4-N_3);
t_5 = linspace(0, T_1, N_5-N_4);
t_6 = linspace(0, T-2*T_1, N_6-N_5);
t_7 = linspace(0, T_1, N-N_6);

%% Vytvoření vektoru rychlosti
```



```
v_1 = j_m*(t_1.^2)/2;
v_2 = (a_s^2)/(2*j_m) + a_s*t_2;
v_3 = v_s-a_s^2/(2*j_m) + a_s*t_3 - j_m*(t_3.^2)/2;
v_4 = 0*t_4+v_s;
v_5 = v_s - j_m*(t_5.^2)/2;
v_6 = v_s - j_m*(T_1^2)/2 - a_s*t_6;
v_7 = (a_s^2)/(2*j_m) - a_s*t_7 + j_m*(t_7.^2)/2;
```

```
rychlost = [v_1 v_2 v_3 v_4 v_5 v_6 v_7];
```

```
%% Vytvoření vektoru zrychlení
```

```
a_1 = j_m*t_1;
a_2 = 0*t_2+a_s;
a_3 = a_s-j_m*t_3;
a_4 = 0*t_4;
a_5 = -j_m*t_5;
a_6 = 0*t_6-a_s;
a_7 = -a_s+j_m*t_7;
```

```
zrychleni = [a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6 a_7];
```

```
%% Výpočet vektoru polohy (pomocí numerické integrace)
```

```
dt = T_all/(N-1);
for k = 1:N
poloha(k) = sum(dt*rychlost(1:k));
end
```

Pro další výpočet bylo potřeba vypočítat úhlové zrychlení šroubu a otáčky.

```
%% Prepočet zrychlení na úhlové zrychlení šroubu
```

```
epsilon = zrychleni*2*pi/S.s;
```

```
%% Přepočet rychlosti na otáčky
```

```
omega = rychlost*2*pi/S.s;
RPM_m = 60*omega/(2*pi);
```

5.1.4 Výpočet momentu a výkonu motoru

Protože je počítán zjednodušený pohyb, rozběh, běh a doběh, tak musíme vypočítat každý moment pro jednotlivé cykly zvlášť, protože při každém cyklu působí jiné síly, které pohybu buď pomáhají, nebo naopak zpomalují, a to ovlivňuje i ztráty na motoru a měniči [2].

Pro všechny tři pohyby platí rovnice 42., jenom se liší vstupní veličiny:

$$M_m = J_{rhm} \cdot \varepsilon_m + M_{zdrhm} \quad (42)$$

kde M_m je potřebná velikost momentu, J_{rhm} moment setrvačnosti, ε_m úhlové zrychlení motoru a M_{zdrhm} moment zátěže motoru. Ten se skládá ze dvou složek, momentů vznikajících pasivními odpory v matici kuličkového šroubu a ložiskách jeho uložení, které jsou tvořeny působením axiální třecí síly ve vedení, která způsobuje ztrátový moment v ose šroubu a

v případě skloněné posuvové souřadnice vzniká díky gravitačním silám zatížení pohonu vlivem složek momentů od přesouvaných hmot. Moment zátěže tedy vypočteme ze vztahu:

$$M_{zdrhm} = M_G + M_{GT} + M_{KSM} \quad (43)$$

kde M_G je moment od přesouvaných hmot, M_{GT} a M_{KSM} zastupují momenty pasivních odporů. Tyto momenty se vypočítají pomocí vzorců:

$$M_G = \frac{m \cdot g \cdot \sin\alpha \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i_p \cdot i_l \cdot \eta_p \cdot \eta_l} \quad (44)$$

který platí pro úhel skloněné posuvové souřadnice = $\{0^\circ, <90^\circ\}$, pro úhel skloněné posuvové souřadnice = 90° je tento vztah upraven:

$$M_G = \frac{3 \cdot m \cdot g \cdot b \cdot f_1 \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i_p \cdot i_l \cdot \eta_p \cdot \eta_l \cdot L} \quad (45)$$

kde m je hmotnost přesouvaných hmot, b je rameno působíště tíhové síly, f_1 součinitel tření ve vodících plochách, s je stoupání kuličkového šroubu, i_p a i_l převodové poměry vložené převodovky a vloženého převodu, η_p účinnost převodové skříně a η_l je účinnost vloženého převodu a L je délka stolu [2].

V našem případě použijeme vzorec, ve kterém počítáme s úhlem sklonu posuvové souřadnice 90° , dále nemusíme uvažovat i_p ani i_l , protože budeme počítat lineární osu se servopohonem bez převodovky a vloženého převodu, a proto nepočítáme i s jejich účinností η_p a η_l [2].

$$M_{GT} = \frac{m \cdot g \cdot f_1 \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i_p \cdot i_l \cdot \eta_p \cdot \eta_l} \quad (46)$$

$$M_{KSM} = \frac{F_p \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i_p \cdot i_l \cdot \eta_p \cdot \eta_l} \cdot (1 - \eta_s^2) + \frac{0,5 \cdot m \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos\alpha \cdot s \cdot d_s \cdot f_2}{i_p \cdot i_l \cdot \eta_p \cdot \eta_l} \quad (47)$$

kde η_s je účinnost kuličkového šroubu matice (dále KŠM), d_s střední průměr KŠM, f_2 ekvivalentní součinitel tření v KŠM redukováný na poloměr šroubu a F_p předeprnutí kuličkového šroubu, které se spočítá:

$$F_p = 0,35 \cdot F_A \quad (48)$$

kde F_A je axiální síla. Ještě je potřeba dopočítat celkový moment setrvačnosti redukováný na hřídel motoru:

$$J_{rhm} = J_{mot} + J_{br} + J_p + J_1 + \frac{J_2}{i_p^2 \cdot i_l^2} + \frac{J_s}{i_p^2 \cdot i_l^2} + \frac{J_m}{i_p^2 \cdot i_l^2} \quad (49)$$

kde J_{mot} je moment setrvačnosti kotvy rotoru AC servomotoru, J_{br} moment setrvačnosti brzdy AC servomotoru, J_p moment setrvačnosti převodovky na motoru, J_1 moment setrvačnosti hnací řemenice (pastorku), J_2 moment setrvačnosti hnané řemenice (kola), J_s moment setrvačnosti kuličkového šroubu, J_m redukovaný moment setrvačnosti posuvných hmot [2].

Moment setrvačnosti kuličkového šroubu se počítá pomocí vzorce:

$$J_s = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho \cdot b_\xi \cdot \left(\frac{d_\xi}{2}\right)^4 \quad (50)$$

kde ρ je hustota kuličkového šroubu, b_ξ je jeho délka a d_ξ jeho průměr. Redukovaný moment setrvačnosti posuvných hmot se počítá ze vzorce:

$$J_m = m \cdot \left(\frac{s}{2 \cdot \pi}\right)^2 \quad (51)$$

kde m je celková přesouvaná hmotnost [2].

Cyklus-rozběh

V cyklu rozběh musíme uvažovat, že potřebujeme zrychlit na požadovanou provozní rychlost, překonat při tomto pohybu tření a moment od přesouvaných hodnot. Velikost požadovaného momentu tedy bude rovna:

$$M_{mrozběh} = J_{rhm} \cdot \varepsilon_m + M_{zdrhm} = J_{rhm} \cdot \varepsilon_m + M_G + M_{GT} + M_{KSM} \quad (52)$$

Cyklus-běh

V cyklu běh musíme uvažovat, že jsme dosáhli požadované provozní rychlosti a proto bude ε_m rovno nule, musíme proto překonat při tomto pohybu pouze tření a moment od přesouvaných hodnot. Velikost požadovaného momentu tedy bude rovna:

$$M_{mběh} = J_{rhm} \cdot \varepsilon_m + M_{zdrhm} = M_G + M_{GT} + M_{KSM} \quad (53)$$

Cyklus-doběh

Situace se mění při pracovním cyklu doběh, kdy se motorem brzdí a bude ponížěn o velikost momentu od třecích sil, proto vzorec bude vypadat následovně:

$$M_{mrozběh} = J_{rhm} \cdot \varepsilon_m + M_{zdrhm} = J_{rhm} \cdot \varepsilon_m + M_G - M_{GT} - M_{KSM} \quad (54)$$

Nakonec byl vypočítán výkon motoru, který je důležitý pro další výpočet, a to výpočet příkonu a energie:

$$P_M = M_m \cdot \omega \quad (55)$$

kde ω je úhlová rychlost. V Matlabu tento výpočet vypadal následovně:

```

function [M_m, M_m_real] = Moment_motoru(epsilon, S)
%MOMENT_MOTORU
% Funkce pro výpočet momentu motoru pohánějícího kuličkový šroub

%% Výpočet momentu přesouvaných hmot M_G
if (S.alfa<pi/2)&(S.alfa>=0)
    M_G = S.m*S.g*sin(S.alfa)*S.s/...
        (2*pi*S.i_p*S.i_l*S.ucinnost_p*S.ucinnost_l)
elseif (S.alfa==pi/2)
    M_G = 3*S.m*S.g*S.b*S.f_1*S.s/...
        (2*pi*S.i_p*S.i_l*S.ucinnost_p*S.ucinnost_l*S.L)
else
    disp('CHYBA - alfa nelezi mezi <0°,90°> !!!!')
    return
end

%% Výpočet prvního momentu pasivních odporu M_GT
M_GT = S.m*S.g*S.f_1*S.s/(2*pi*S.i_p*S.i_l*S.ucinnost_p*S.ucinnost_l)

%% Výpočet druhého momentu pasivních odporů M_KSM
zlomek1 = (0.35*S.F_A*S.s/...
    (2*pi*S.i_p*S.i_l*S.ucinnost_p*S.ucinnost_l))*(1-S.ucinnost_S^2);

zlomek2 = 0.5*S.m*S.g*S.f_1*cos(S.alfa)*S.s*S.d_s*S.f_2/...
    (S.i_p*S.i_l*S.ucinnost_p*S.ucinnost_l);

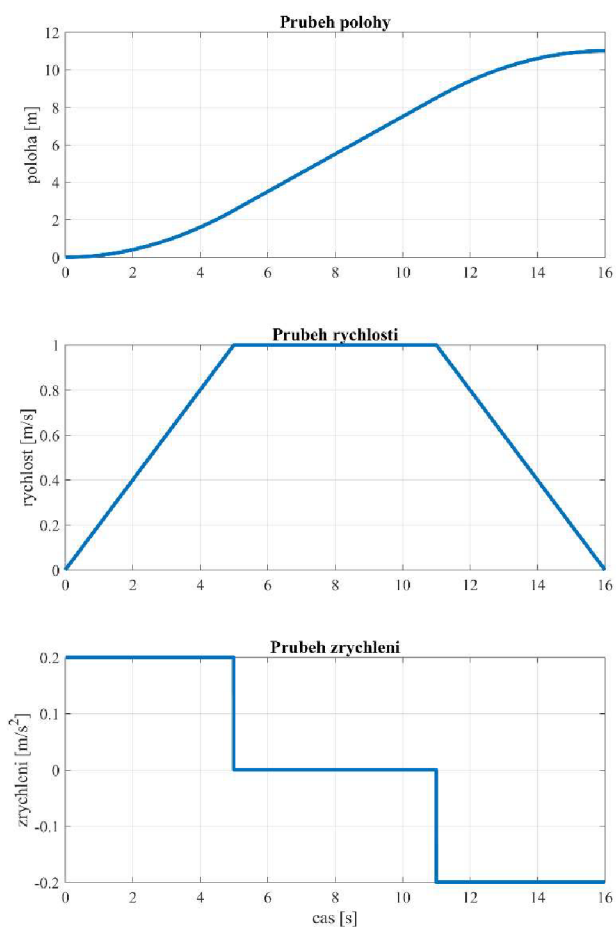
M_KSM = zlomek1 + zlomek2;

%% Výpočet momentu motoru M_m
for k = 1:length(epsilon)
    if epsilon(k)>0
        M_zdrhm = M_G + M_GT + M_KSM(k);
        M_m(k) = S.J_rhm*epsilon(k)+M_zdrhm;
        M_m_real(k) = M_m(k);

    elseif epsilon(k)==0
        M_zdrhm = M_G + M_GT + M_KSM(k);
        M_m(k) = M_zdrhm;
        M_m_real(k) = M_m(k);
    elseif epsilon(k)<0
        M_zdrhm = M_G - M_GT - M_KSM(k);
        M_m(k) = abs(S.J_rhm*abs(epsilon(k))+M_zdrhm);
        M_m_real(k) = S.J_rhm*epsilon(k)-M_zdrhm;
    end
end
end

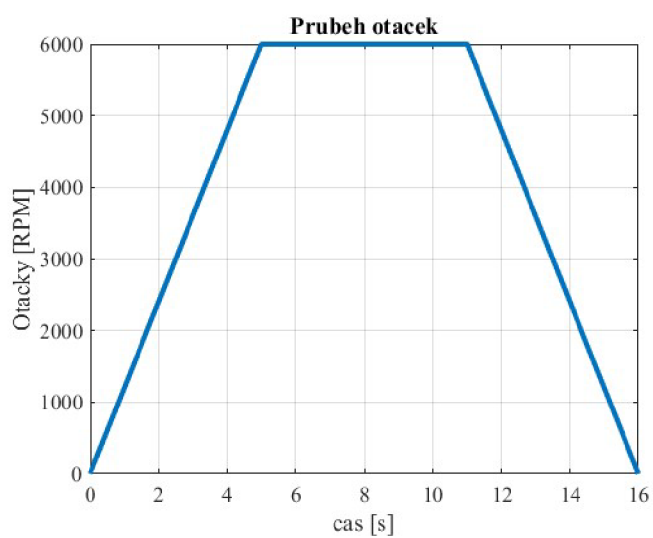
```

Následně se z tohoto momentu vypočítal výkon a byly vykresleny průběhy dráhy, rychlosti, zrychlení (viz Obrázek 10)).



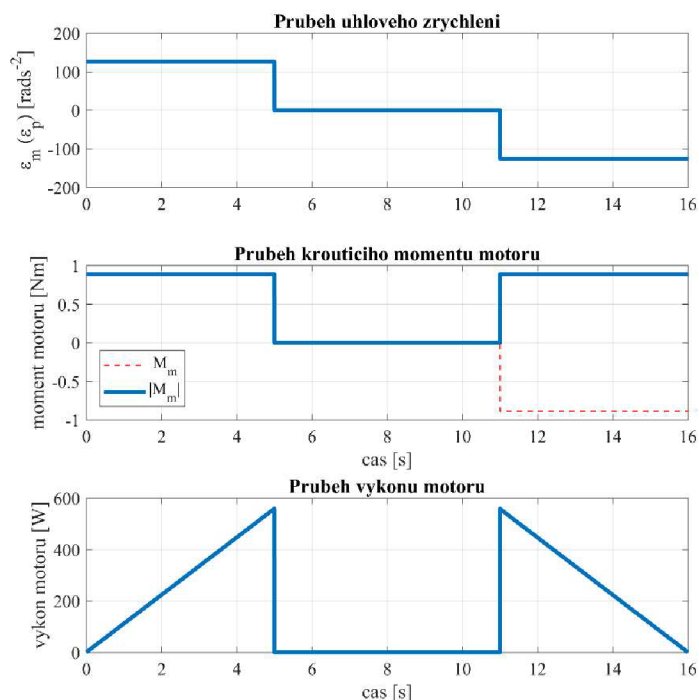
Obr. 10) Graf průběhu polohy, rychlosti a zrychlení v závislosti na čase pro lineární zrychlení

Průběh otáček v závislosti na čase je zobrazen na Obrázku 11).



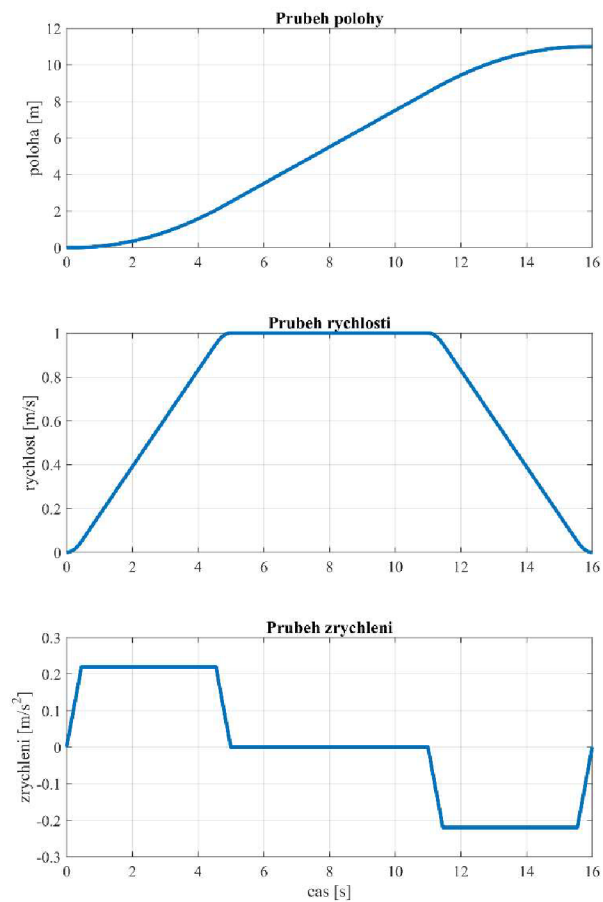
Obr. 11) Graf průběhu otáček v závislosti na čase pro lineární zrychlení

Průběhy úhlového zrychlení, momentu motoru a jeho výkonu v závislosti na čase jsou zobrazeny na Obrázku 12). V první části rozběhu musí moment motoru zrychlit na hodnotu rovnoměrné rychlosti, poté se jeho hodnota rovná při běhu pouze momentu vyvolaných od odporových momentů a následně musí brzdit, tento moment se ovšem nerovná momentu potřebným při rozběhu, protože motoru pomáhají ztráty-odpor proti pohybu. Protože není v tomto ověřovacím výpočtu zadána síla od obrábění, tak moment doběhu vychází téměř stejný, jako při rozběhu, protože by moment, který se počítá z rovnice 4), byl větší.



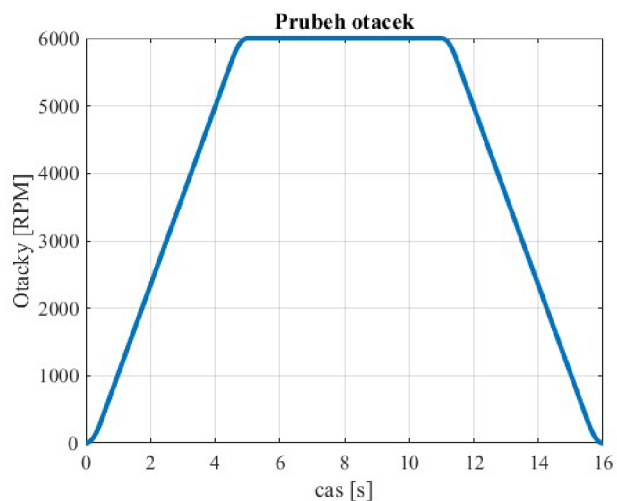
Obr. 12) Graf průběhu úhlového zrychlení, momentu a výkonu v závislosti na čase pro lineární zrychlení

Stejně byly vykresleny grafy pro dráhu, rychlost a zrychlení v závislosti na čase pro S-křivky viz obrázek 13).



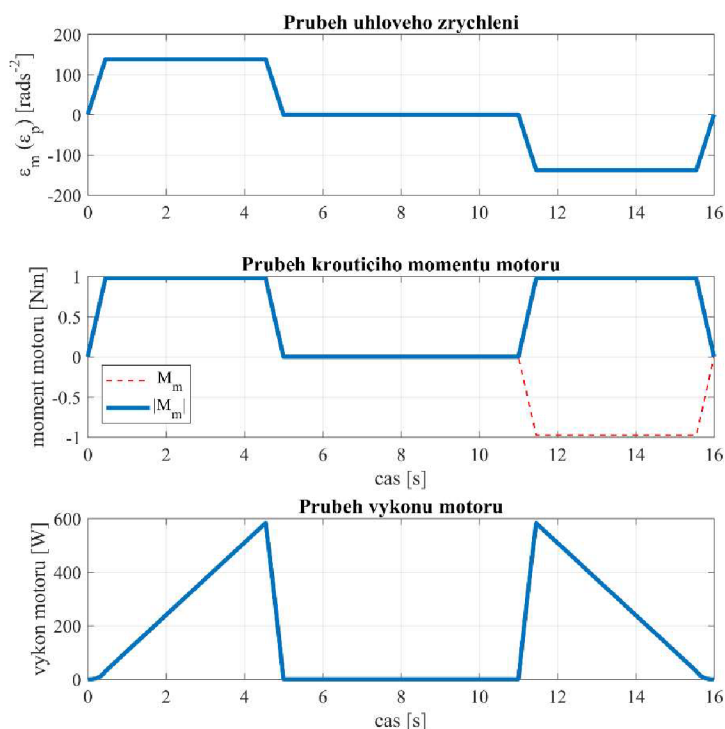
Obr. 13) Graf průběhu dráhy, rychlosti a zrychlení v závislosti na čase, kdy byl výpočet přepsán na situaci s S-křivkami

Průběh otáček v závislosti na čase je zobrazen na Obrázku 14).



Obr. 14) Graf průběhu otáček v závislosti na čase, kdy byl výpočet přepsán na situaci s S-křivkami

Průběhy úhlového zrychlení, momentu motoru a jeho výkonu v závislosti na čase, kdy byl výpočet přepsán na situaci s S-křivkami, jsou zobrazeny na Obrázku 15). Moment při rozběhu a doběhu vychází téměř stejný, protože se v ověřovacím výpočtu počítá s nulovou silou od obrábění.



Obr. 15) Graf průběhu úhlového zrychlení, momentu a výkonu v závislosti na čase pro lineární zrychlení, kdy byl výpočet přepsán na situaci s S-křivkami

5.2 Upravení základního algoritmu dle zadání

Model byl v programu Matlab vytvořen pro konkrétní osu a pro konkrétní pohyb viz obrázek 16, ale byl vytvořen tak, aby mohl kdokoliv měnit vstupní parametry a jednotlivé pracovní procesy byly transformovatelné.

5.2.1 Zadání

Vstupní parametry a popis osy:

KŠM: D02080

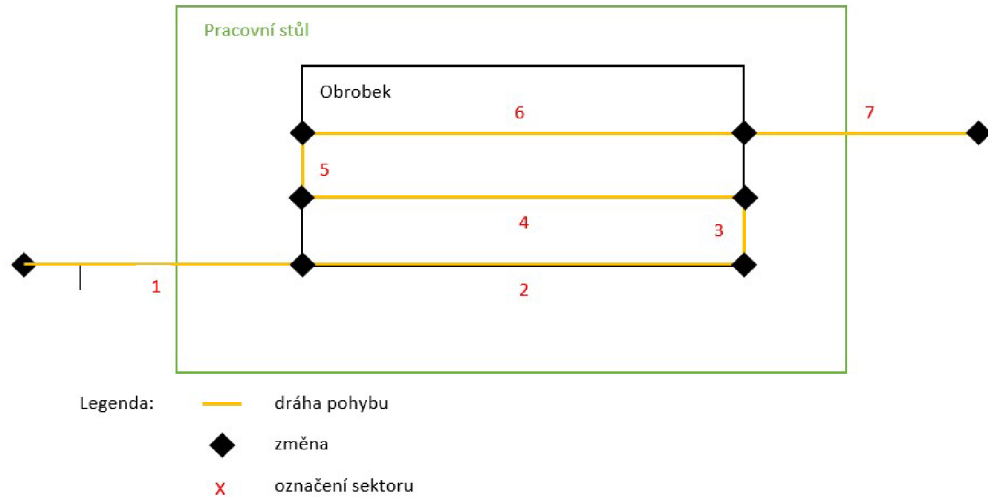
Vedení: Kolejnice HRG20R, Vozík HGH20CA

Ložiska: 6203-2RS, ZKLF1762.2RS

Motor: byl zvolen pro zadaný pohyb 1FK7040-2AK71-1BG1

Zadaný pohyb je schematicky označen viz Obrázek 16). V 1. sektoru se přemístí nástroj pomocí lineární sestavy z nulového bodu do místa, kde začne působit axiální síla, tedy řezná síla. Na konci sektoru dva je proces pozastaven na dobu 10 vteřin a následuje stejný proces,

jako v sektoru 2, ale v opačném směru. Následuje sektor 5, ve kterém stroj opět stojí po dobu 10 vteřin. V šestém sektoru je stejná situace jako ve 2 a 4 a následuje sektor 7, ve kterém nástroj odjede od obrobku.



Obr. 16) Schematicky zaznačený zadaný pohyb

Zadaná je rychlost běhu, čas běhu a čas rozběhu/doběhu.

Cílem výpočtu je vypočítat ze zadaných parametrů pro tuto konkrétní osu energii pro celý zadaný pohyb.

5.2.2 Definice vstupních parametrů a definice pohybu

Vstupní parametry nejsou rozdílné od vstupních parametrů, které byly definovány v ověřovacím základním algoritmu. Rozdíl je ve veličinách definujících pohyb, který je zadán jako matice, kdy první sloupec je velikost rovnoměrné rychlosti v daném sektoru (řádků je 7), ve druhém čas rozběhu a doběhu, ve třetím je čas běhu a v posledním definice, zda působí nebo nepůsobí v daném sektoru síla (1 pravda=působí, 0 nepravda=nepůsobí) a je zadaná síla od obrábění a příbyla momentová konstanta, se kterou se počítá proud.

```
%% Nadefinování zadaných hodnot do vstupní struktury S
S.M_konst=0.68;           %[Nm/A] - momentová konstanta

%% Velikost obráběcí síly
F_A = 1000;               %[N] - axiální síla

%% Nadefinování požadovaného průběhu rychlostí pro sektory

MATICE_V = [1 7 6 0;...
            1 7 6 1;...
            0 0 10 0;...
            1 7 20 1;...
            0 0 10 0;...
            1 7 6 1;...
            1 7 6 0]...
```

5.2.3 Vektor času, rychlosti, zrychlení, vektor polohy pomocí numerické integrace-obdélníková formule

Následuje definování vektorů potřebných pro nadefinování pohybu v čase, tedy vektorů času, rychlosti, zrychlení a vektoru polohy. Nejdříve byl definován cyklus jednotlivých sektorů.

Cyklus jednotlivých sektorů pro pohyb s lineárním zrychlením:

```
%% Cyklus jednotlivých sektorů
for k = 1:m
    v_s = MATICE_V(k,1); %[m/s]      - rovnoměrná rychlost při běhu
    T   = MATICE_V(k,2); %[s]      - délka rozběhu a doběhu
    T_s = MATICE_V(k,3); %[s]      - délka běhu
    F   = MATICE_V(k,4); %         - síla je nebo není

    a_s = v_s/T;

    %% Vektor času
    T_all = 2*T + T_s; % celková časová délka (rozběh+běh+doběh)

    t_k(k,:) = linspace(0,T_all,N);

    N_1 = floor(T/T_all*N);
    N_2 = floor((T+T_s)/T_all*N);

    t_1 = linspace(0, T, N_1);
    t_2 = linspace(0, T_s, N_2-N_1);
    t_3 = linspace(0, T, N-N_2);

    %% Vytvoření vektoru rychlostí
    v_1 = a_s*t_1;
    v_2 = 0*t_2 + v_s;
    v_3 = -a_s*t_3 + v_s;

    rychlost_k(k,:) = [v_1 v_2 v_3];

    %% Průběh síly
    sila_k(k,:) = t_k(k,:)*0 + (F*F_A);

    %% Vytvoření vektoru zrychlení
    a_1 = 0*t_1+a_s;
    a_2 = 0*t_2;
    a_3 = 0*t_3-a_s;

    zrychleni_k(k,:) = [a_1 a_2 a_3];

    %% Výpočet vektoru polohy (pomocí numerické integrace -
    Obdélníková formule)
    dt = T_all/(N-1);
    for r = 1:N
```

```

poloha_k(k,r) = sum(dt*rychlost_k(k,1:r));
end
end

```

Cyklus jednotlivých sektorů pro pohyb s S-křivkami:

```

%% Cyklus jednotlivých sektorů
for k = 1:m
    v_s = MATICE_V(k,1); %[m/s] - rovnoměrná rychlost při běhu
    T = MATICE_V(k,2); %[s] - délka rozběhu a doběhu
    T_s = MATICE_V(k,3); %[s] - délka běhu
    F = MATICE_V(k,4); % sila je nebo není

    a_s_max = (2*v_s)/T;
    a_s_min = v_s/T;
    a_s = a_s_min + (0.5)*(a_s_max-a_s_min); %[mm*s^-2] - ustálené
    zrychlení při rozběhu

    %% Výpočet časové délky t_1
    T_1 = T-v_s/a_s;
    if isnan(T_1)
        T_1=0;
    end

    %% Výpočet jerku
    j_m = a_s/T_1;

    %% Vektor času
    T_all = 2*T + T_s; % celková časová délka (rozběh+běh+doběh)

    t_k(k,:) = linspace(0,T_all,N);

    N_1 = floor(T_1/T_all*N);
    N_2 = floor((T-T_1)/T_all*N);
    N_3 = floor(T/T_all*N);
    N_4 = floor((T+T_s)/T_all*N);
    N_5 = floor((T+T_s+T_1)/T_all*N);
    N_6 = floor((T_all-T_1)/T_all*N);

    t_1 = linspace(0, T_1, N_1);
    t_2 = linspace((T-2*T_1)/(N_2-N_1-1), T-2*T_1, N_2-N_1);
    t_3 = linspace(T_1/(N_3-N_2-1), T_1, N_3-N_2);
    t_4 = linspace(T_s/(N_4-N_3-1), T_s, N_4-N_3);
    t_5 = linspace(T_1/(N_5-N_4-1), T_1, N_5-N_4);
    t_6 = linspace((T-2*T_1)/(N_6-N_5-1), T-2*T_1, N_6-N_5);
    t_7 = linspace(T_1/(N-N_6-1), T_1, N-N_6);

    t_pokus = [t_1 t_2 t_3 t_4 t_5 t_6 t_7];

```

```

%% Vytvoření vektoru rychlostí
v_1 = j_m*(t_1.^2)/2;
v_2 = (a_s^2)/(2*j_m) + a_s*t_2;
v_3 = v_s-a_s^2/(2*j_m) + a_s*t_3 - j_m*(t_3.^2)/2;
v_4 = 0*t_4+v_s;
v_5 = v_s - j_m*(t_5.^2)/2;
v_6 = v_s - j_m*(T_1^2)/2 - a_s*t_6;
v_7 = (a_s^2)/(2*j_m) - a_s*t_7 + j_m*(t_7.^2)/2;

rychlost_k(k,:) = [v_1 v_2 v_3 v_4 v_5 v_6 v_7];

%% Průběh síly
sila_k(k,:) = t_k(k,:)*0 + (F*F_A);

%% Vytvoření vektoru zrychlení
a_1 = j_m*t_1;
a_2 = 0*t_2+a_s;
a_3 = a_s-j_m*t_3;
a_4 = 0*t_4;
a_5 = -j_m*t_5;
a_6 = 0*t_6-a_s;
a_7 = -a_s+j_m*t_7;

zrychleni_k(k,:) = [a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6 a_7];

%% Výpočet vektoru polohy (pomocí numerické integrace -
Obdélníková formule)
dt = T_all/(N-1);
for r = 1:N
    poloha_k(k,r) = sum(dt*rychlost_k(k,1:r));
end
end

```

Vektor polohy byl spočítán pomocí numerické integrace a obdélníkové metody. Následuje spojení sektorů a dopočítání úhlového zrychlení a výpočet otáček potřebných do dalších výpočtů momentu a výkonu.

```

%% Cyklus 'spojení' sektoru

t = t_k(1,:);
rychlost = rychlost_k(1,:);
sila = sila_k(1,:);
zrychleni = zrychleni_k(1,:);
poloha = poloha_k(1,:);

for k = 2:m
    t = [t, t_k(k, 2:end)+t(end)];
    rychlost = [rychlost, rychlost_k(k,2:end)];
    sila = [sila, sila_k(k,2:end)];
    zrychleni = [zrychleni, zrychleni_k(k,2:end)];
    poloha = [poloha, poloha_k(k,2:end)+poloha(end)];
end

```

```

end

%% Konečný čas (oříznutí grafu)
T_all = t(end);

%% Počet prvků časového vektoru
N = length(t);

%% Přepočítání zrychlení na úhlové zrychlení šroubu
epsilon = zrychleni*2*pi/S.s;

%% Přepočítání rychlosti na otáčky
omega = rychlost*2*pi/S.s;
RPM_m = 60*omega/(2*pi);

```

5.2.4 Výpočet momentu a výkonu motoru

Výpočet momentu a výkonu je stejný jako v ověřovacím základním algoritmu.

5.2.5 Výpočet momentu a výkonu motoru

Účinnost sestavy motor měnič závisí na Momentu motoru a otáčkách. Proto bylo zapotřebí využít interpolace plochy. V programu Sizer od firmy Siemens byla nadefinována osa o daných parametrech, s tím že motor byl zvolen, aby vyhovoval zadanému pohybu, aby vytvářel dostatečný moment a byl zvolen vhodný měnič. Po nadefinování všech parametrů byl z programu extrahován soubor se všemi potřebnými veličinami, které nám vstupují do výpočtu, tedy závislost účinnosti sestavy motor-měnič na otáčkách a momentu motoru viz Tab. 4.

Tab 4) Závislost ztrát na vstupních veličinách z programu Sizer

Moment [Nm]	0,44	0,66	0,88	1,1
RPM				
1200,00	0,532	0,588	0,606	0,606
1500,00	0,578	0,634	0,653	0,654
1980,00	0,629	0,684	0,704	0,707
3000,00	0,683	0,739	0,762	0,769
4020,00	0,703	0,761	0,787	0,798
6000,00	0,680	0,750	0,787	

Nejdřív byla tato závislost přepsána do programu Matlab a vykreslena (viz Obrázek 17)) a pomocí funkce fit byl po zadání momentu a otáček závislých na čase vypočítán příkon.

```

max_M_m = 1.1;

%% Nadefinování bodu
M_m_b = [0 0.4 0.6 0.8 1]*max_M_m
RPM_b = [0 1200 1500 1980 3000 4020 6000]'

```

```

Z = [0, 0 0 0 0;...
     0, 0.532 0.588 0.606 0.606;...
     0, 0.578 0.634 0.653 0.654;...
     0, 0.629 0.684 0.704 0.707;...
     0, 0.683 0.739 0.762 0.769;...
     0, 0.703 0.761 0.787 0.798;...
     0, 0.680 0.750 0.787, (0.798+0.787)/2]

[m,n] = size(Z);

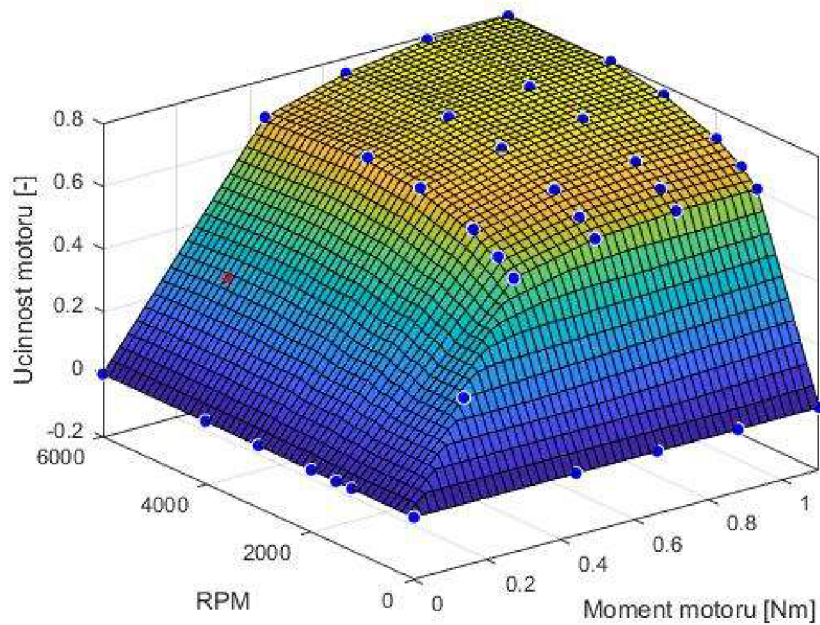
p=0;
for k = 1:n
    for r = 1:m
        p=p+1;

        x(p,1) = M_m_b(k);
        y(p,1) = RPM_b(r);
        z(p,1) = Z(r,k);

    end
end
x(p+1,1) = 0.2*max_M_m;
y(p+1,1) = 600;
z(p+1,1) = 0.532/2;

sf = fit([x, y],z, 'linearinterp' );

```



Obr. 17) Vygenerovaná plocha závislosti účinnosti a momentu a otáček soustavy motor-měnič

Protože bylo potřeba dosadit do výpočtu moment a otáčky v závislosti na čase, tak byla vytvořena funkce účinnosti.

```
function [ Ucinnost_BOD ] = Ucinnost_mot_menic_fce_OLD(RPM_m,
moment_motoru)

%% Nadefinování bodu
[X,Y] = meshgrid([0.4 0.6 0.8 1]*2.5, [1200 1500 1980 3000 4020
6000]);

Z = [0.532 0.588 0.606 0.606;...
     0.578 0.634 0.653 0.654;...
     0.629 0.684 0.704 0.707;...
     0.683 0.739 0.762 0.769;...
     0.703 0.761 0.787 0.798;...
     0.680 0.750 0.787,0.8];

%% Polynomy
n = 2; % stupeň polynomu
for k = 1:4

    if k~=4
        a(k,:) = polyfit(Y(:,k), Z(:,k), n);
    elseif k==4
        a(k,:) = polyfit(Y([1:5],k), Z([1:5],k), n);
    end

    Ucinnost_RPM(k) = polyval(a(k,:),RPM_m);

end

%% Polynom - účinnost na zatížení motoru
polynom_RPM = polyfit(X(1,:), Ucinnost_RPM, n);
Ucinnost_BOD = polyval(polynom_RPM, moment_motoru);

end
```

Tato funkce se volala v hlavním výpočtovém skriptu a byl z ní vypočítán příkon a energie.

```
for k = 1:N

    Ucinnost(k) = Ucinnost_mot_menic_fce_OLD(RPM_m(k), M_m(k));

end

%% Vypočet příkonu motoru

P_0=20; %Příkon řídicí elektroniky

for k = 1:N
```

```

if epsilon(k)<0
    Prikon(k)=0+P_0;
else
    if Ucinnost(k)==0
        Prikon(k) = 0+P_0;
    else
        Prikon(k) = P_m(k)/Ucinnost(k)+P_0;
    end
end
end
end

%% Výpočet energie
Energie = 0;

for k = 2:N
    dt = t(k)-t(k-1);

    if dt<0
        disp('POZOR')
    end

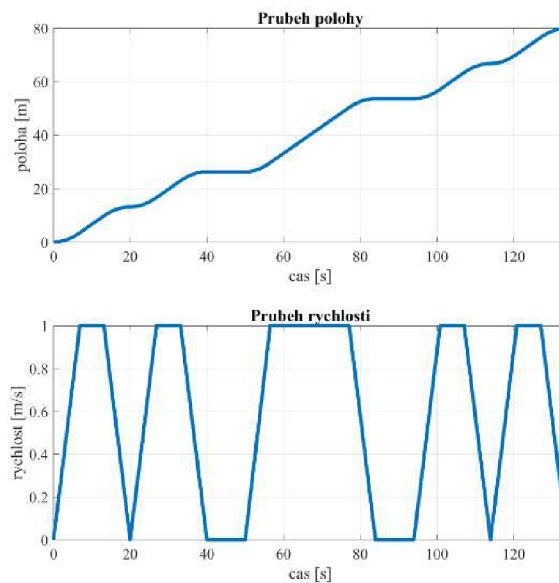
    Energie(k) = Prikon(k-1)*dt + Energie(k-1);
End

    Nakonec byl vypočítán proud závislý na momentu a momentové konstantě.
%% Výpočet proudu
proud=M_m*S.M_konst;

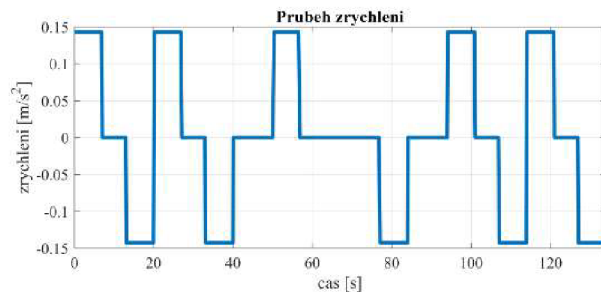
```

5.2.6 Výsledky výpočtu

Jako první budou interpretovány průběhy a výsledná energie pro lineární zrychlení. Průběh polohy, rychlosti a zrychlení závislé na čase je na Obrázku 18) a 19).

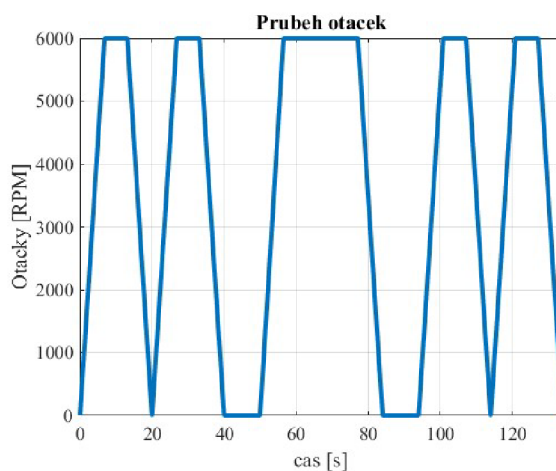


Obr. 18) Průběhy polohy a rychlosti v závislosti na čase pro lineární zrychlení



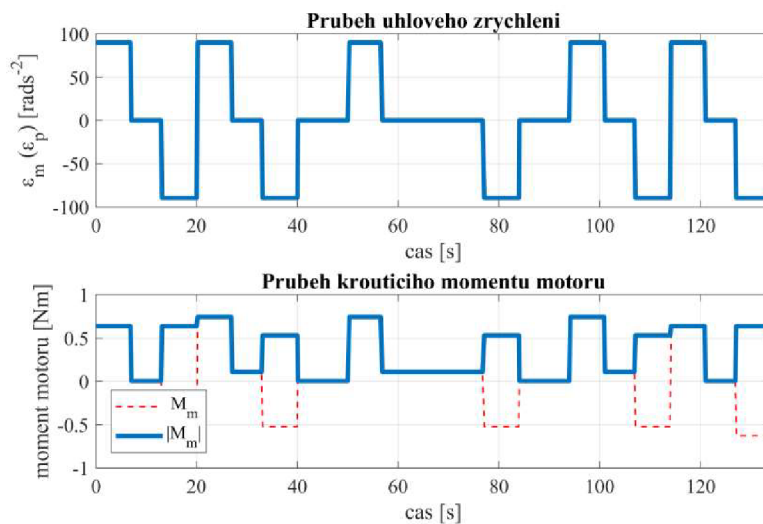
Obr. 19) Průběhy zrychlení v závislosti na čase pro lineární zrychlení

Průběh otáček v závislosti na čase je zobrazen na Obrázku 20).

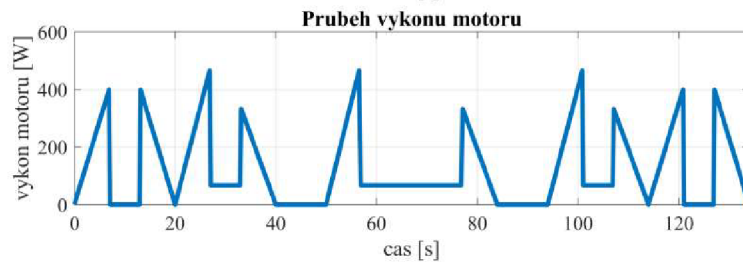


Obr. 20) Graf průběhu otáček v závislosti na čase pro lineární zrychlení

Průběh úhlového zrychlení, momentu a výkonu motoru je zobrazeno na Obrázku 21) a 22).

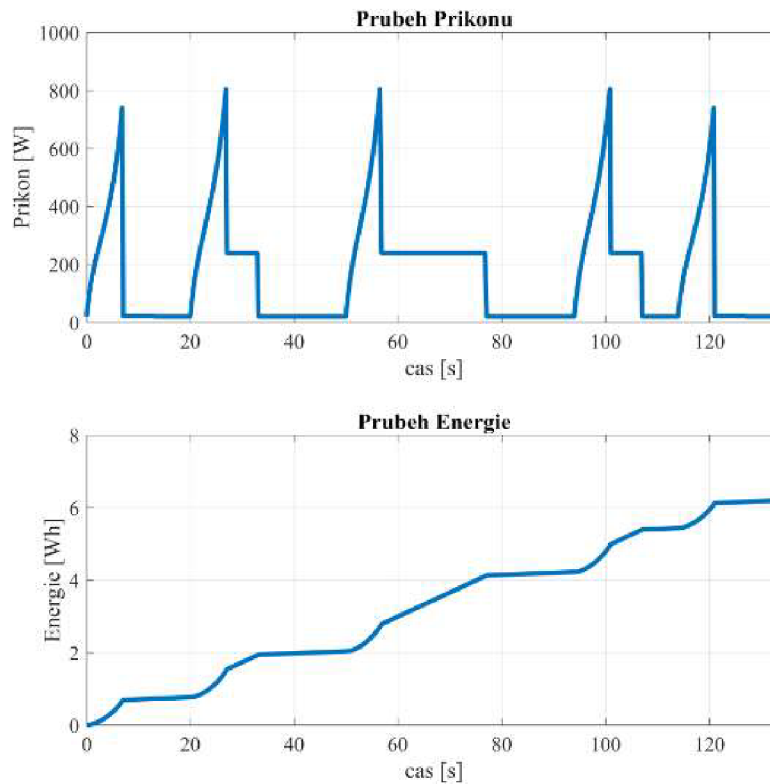


Obr. 21) Průběhy úhlového zrychlení a momentu motoru v závislosti na čase pro lineární zrychlení



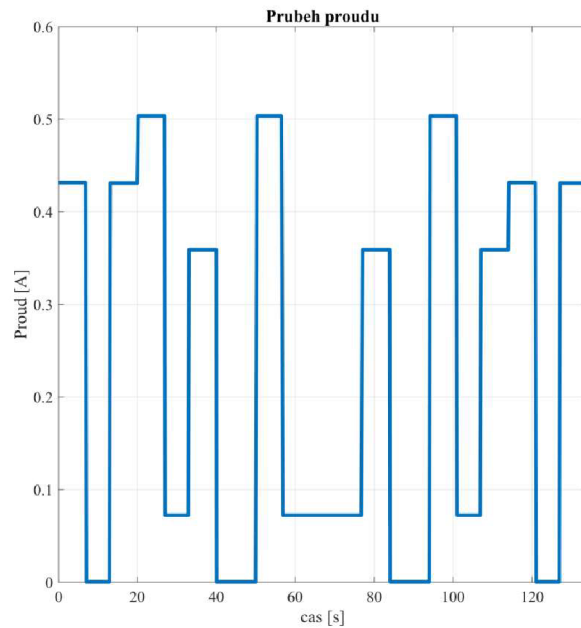
Obr. 22) Průběh výkonu motoru v závislosti na čase pro lineární zrychlení

Průběh příkonu a energie na čase je zobrazeno na Obrázku 23).



Obr. 23) Průběhy úhlového zrychlení, momentu a výkonu motoru v závislosti na čase pro lineární zrychlení

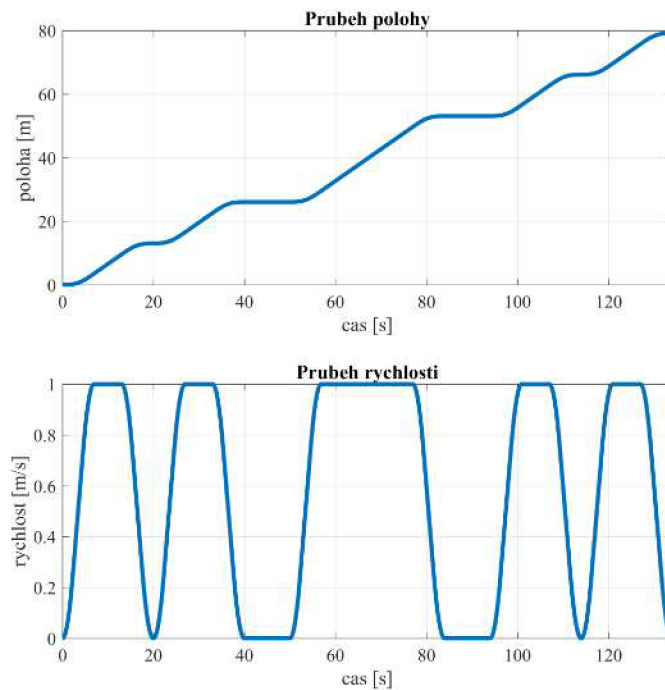
Průběh proudu v závislosti na čase je zobrazen na Obrázku 24).



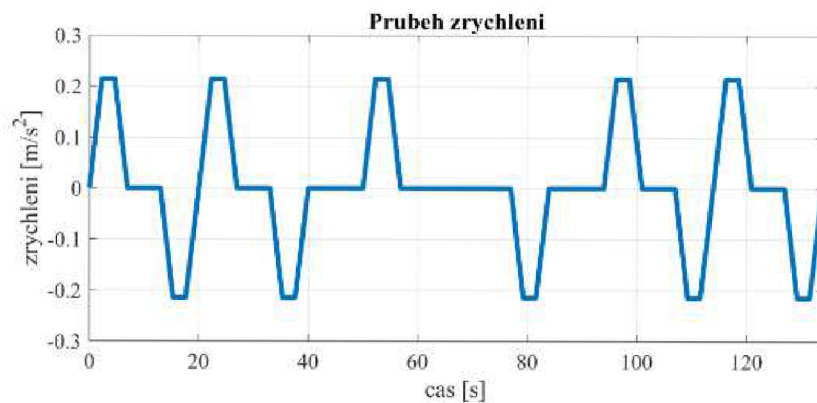
Obr. 24) Průběh proudu v závislosti na čase pro lineární zrychlení

Hodnota energie pro zadaný pohyb pro lineární zrychlení vyšla 6,19703 Wh.

Pro pohyb s S-křivkami jsou průběhy dráhy, rychlosti a zrychlení zobrazeny na Obrázku 25) a 26).

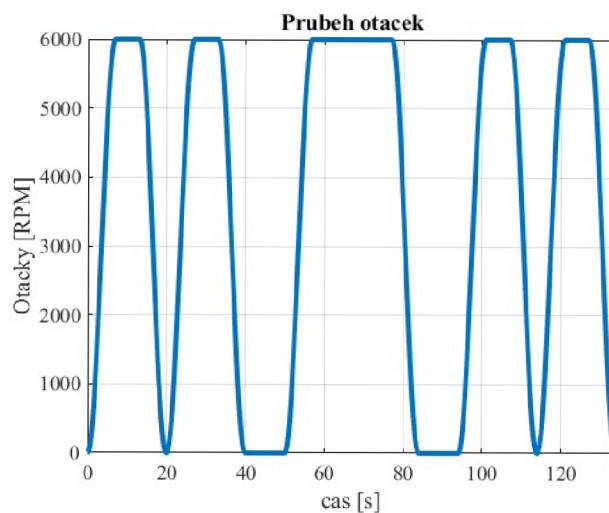


Obr. 25) Průběh dráhy a rychlosti v závislosti na čase pro pohyb s S-křivkami



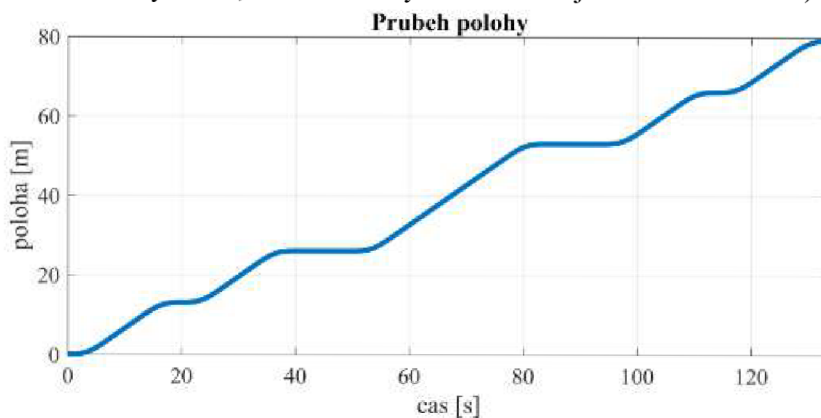
Obr. 26) Průběh zrychlení v závislosti na čase pro pohyb s S-křivkami

Průběh otáček v závislosti na čase je zobrazen na Obrázku 27).

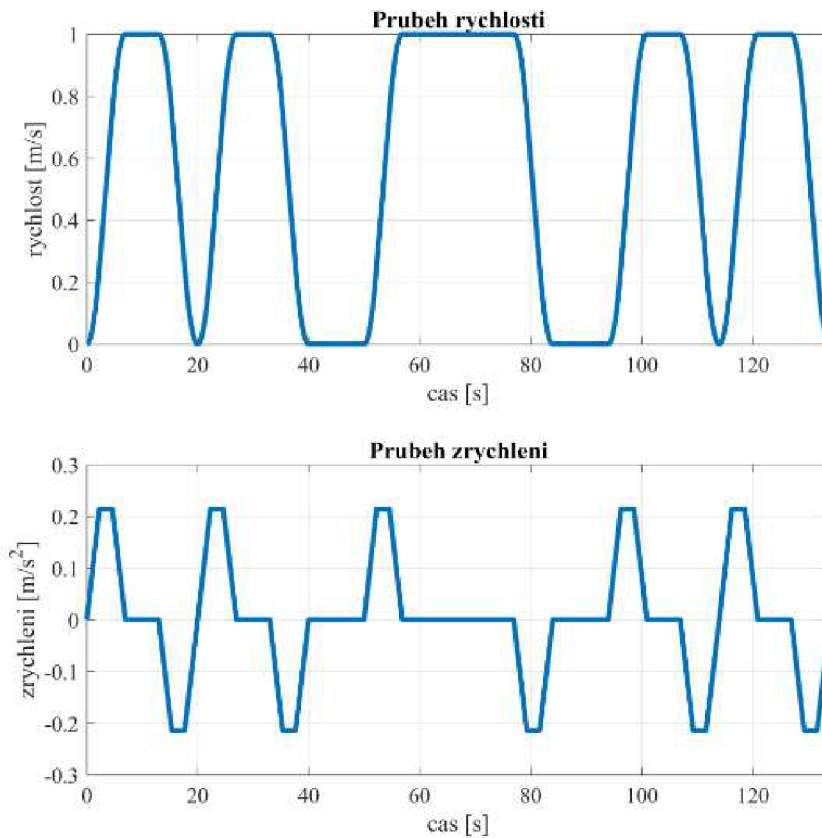


Obr. 27) Graf průběhu otáček v závislosti na čase pro lineární zrychlení

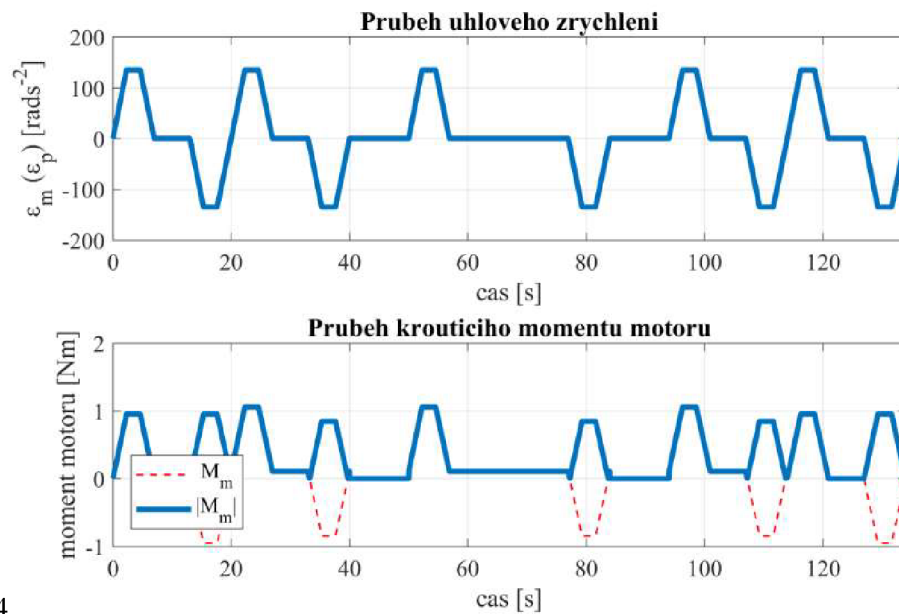
Průběhy úhlového zrychlení, momentu a výkonu motoru jsou na Obrázku 28) a 29).



Obr. 28) Průběh dráhy v závislosti na čase pro pohyb s S-křivkami

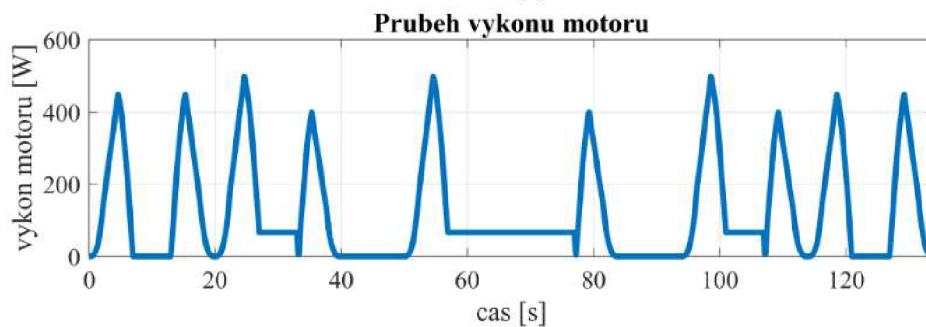


Obr. 29) Průběh rychlosti a zrychlení v závislosti na čase pro pohyb s S-křivkami
 Průběhy úhlového zrychlení, momentu a výkonu motoru jsou na Obrázku 30) a 31).



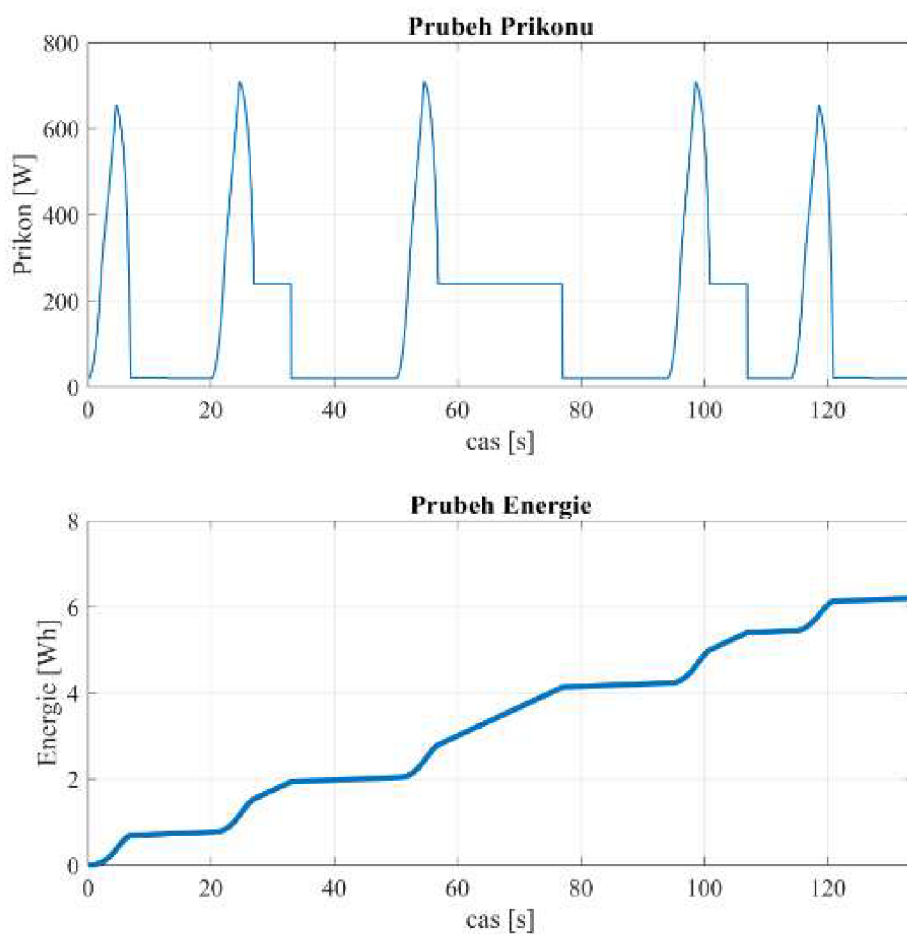
624

Obr. 30) Graf průběhu úhlového zrychlení a momentu motoru v závislosti na čase pro pohyb s S-křivkami



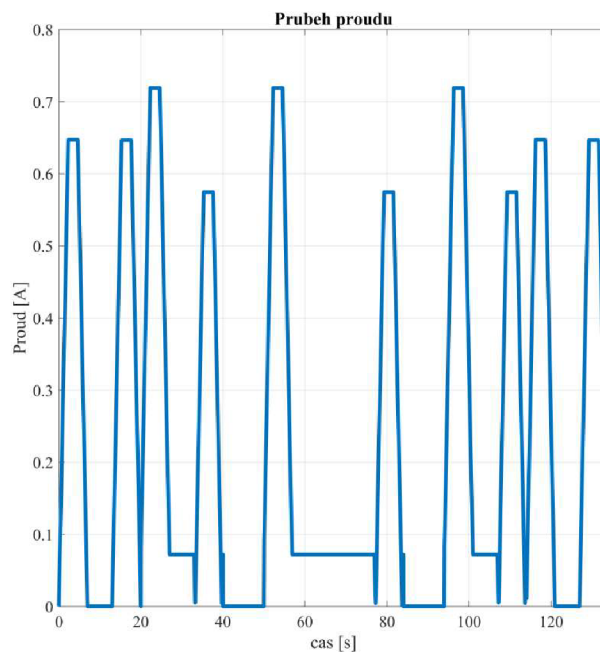
Obr. 31) Graf průběhu výkonu v závislosti na čase pro pohyb s S-křivkami

Průběhy příkonu a energie pro pohyb s S-křivkami jsou na Obrázku 32).



Obr. 32) Průběhy příkonu a energie v závislosti na čase pro pohyb s S-křivkami

Průběh proudu pro pohyb s S-křivkami je na Obrázku 33).



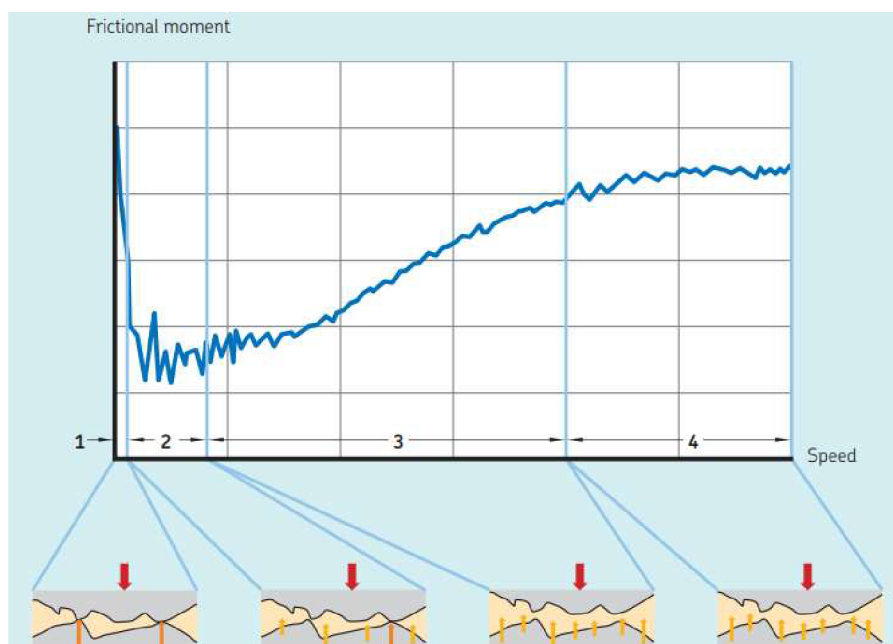
Obr. 33) Průběh proudu v závislosti na čase pro pohyb s S-křivkami

Hodnota energie pro zadaný pohyb pro lineární zrychlení vyšla 6,19753 Wh.

5.2.7 Závislosti

Ve výpočtu je několik zjednodušení, která ovlivňují výpočet. Výpis veličin ovlivňujících ztráty jsou zobrazeny v tabulce 1), ve které jsou zobrazeny veličiny a jejich vliv na ztráty na elektrické části osy, jako je proud, změna teploty, frekvence, zatížení a točivý moment a tabulka 3), ve které je to stejné, jen pro mechanickou část osy a jsou v ní veličiny, jako je kolmá tlaková síla, hmotnost, zatížení ložiska a předeptnutí kuličkového šroubu. Ve výpočtu není zahrnuta změna teploty, která má vliv hned na několik parametrů, které ovlivňují výpočet. Jsou to například viskozita oleje v ložiskách, která jsou na kuličkovém šroubu, ale i v motoru, viskozita oleje v matici kuličkového šroubu, dále je to závislost odporu na teplotě, kdy s rostoucí teplotou roste odpor atd. Dalším zanedbaným parametrem je odpor vzduchu.

Teplota a rychlost mají vliv na viskozitu oleje, která má vliv na třecí moment. Na ložiskách je tato závislost zobrazena na obrázku 34).



Obr. 34) Třecí moment ložiska jako funkce rychlosti a viskozity [20]

Dále byly v programu Sizer vygenerovány hodnoty účinnosti v závislosti na momentu a otáčkách. U těchto hodnot ovšem uvádí, že jsou s přesností 10 %.

6 ZÁVĚR

V první části práce byly popsány teoreticky ztráty, které vznikají na lineární ose s kuličkovým šroubem a servomotorem. Tato část byla rozdělena na ztráty na elektrické a mechanické části lineární osy. Ve druhé, praktické části byl popsán výpočet, který byl nejdříve ověřen vytvořením ověřovacího algoritmu a který byl dále přetvořen na míru zadanému pohybu nástroje a zadané ose. Celý výpočet je tvořený tak, aby byl jednoduše modifikovatelný na mnoho různých pohybů tak, že se dají přepisovat jednotlivé vstupní veličiny, které byly zadávány dle zadané osy, zatížení a podmínek, a tím definovat reálnou situaci a tím, že je dle zadání v jednom modelu více druhů pracovních cyklů motoru, a proto se dá i jednoduše vhodnou kombinací jednotlivých těchto cyklů kompletní pracovní cyklus předělat pro jiný příklad lineární osy. Díky tomu by mohl sloužit jako podklad pro budoucí výpočty a pro konstruktéry, kteří budou tento výpočet transformovat a dále rozvíjet nebo ho použijí na spočítání jednotlivých ztrát na elektrické či mechanické části lineární osy. Tento výpočet má dvě verze, jednu s lineárním zrychlením a druhou se zrychlením s S-křivkami. Obě jsou charakteristické pro pohyb při obrábění, a proto se dají použít při výpočtu a jeho dalším rozvoji. Výsledkem je vypočítaná energie pro zadaný pohyb a osu pro oba typy pohybů.

Výpočet by se dal upravit tak, aby více odpovídal reálné situaci, a to upravením pro závislost teploty pro jednotlivé komponenty a započítáním odporu vzduchu.

Dále by se dalo počítat i s rekuperací (obnovením) energie mezi jednotlivými osami, kdy jedna osa může dodávat energii při brzdění pro druhou a naopak. Musel by se více vydefinovat motor s měničem, kdy by se musely u měniče definovat vstupní, přestupní a výstupní obvody.

Výpočet by se dále mohl rozvíjet tak, že by se vypočítaly energie spotřebované na dalších částech obráběcího stroje, a to například výpočtem pro osy y a z, dále by se mohla vypočítat energie spotřebovaná vřetenem, navíc by se daly připočítat energie pro osvětlení, kryt, odvod třísek, chlazení apod. Všechny tyto dílčí energie by se sečetly a výsledkem by byl energetický model celého obráběcího stroje.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LAŠOVÁ, Václava. Základy stavby obráběcích strojů. Západočeská univerzita v Plzni: Vydavatelství Univerzitní 8, 306 14 Plzeň, 2012. ISBN 978-80-261-0126-0.
- [2] MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [3] PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valeria HRABOVCOVÁ. Design of rotating electrical machines. Hoboken, NJ: Wiley, c2008. ISBN 978-0-470-69516-6
- [4] MĚŘIČKA, Jiří a Petr VOŽENÍLEK. Elektrické stroje. Praha: České vysoké učení technické, 1993. ISBN 80-01-01020-1.
- [5] GONZALES, Carlos. What's the Difference between AC, DC, and EC Motors? Machine design. 2017, 2. ISSN 0024-9114.
- [6] FITZGERALD, A. E., Charles KINGSLEY a Stephen D. UMANS. Electric machinery. 6th ed. Boston, Mass.: McGraw-Hill, c2003. ISBN 0-07-366009-4.
- [7] GIERAS, Jacek F. a Mitchell WING. Permanent magnet motor technology: design and applications. 2nd ed., rev. and expanded. New York: Marcel Dekker, c2002. ISBN 0-8247-0739-7.
- [8] ZAHRADNÍK, Jiří. Elektrická výzbroj obráběcích strojů. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 80-7043-494-5.
- [9] PAVELKA, Jiří a Jiří JAVŮREK. Elektrické pohony. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02314-1.
- [10] VOŽENÍLEK, Petr, Vladimír NOVOTNÝ a Pavel MINDL. Elektromechanické měniče. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04875-7
- [11] BORSKÝ, Václav. Základy stavby obráběcích strojů. Vyd. 2., přeprac. Brno: VUT, 1991. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-0361-6.
- [12] KASBERG, Jonathan. The Fundamentals of Ball Screws. Machine design. 2015, 4. ISSN 0024-9114.
- [13] Rolling bearings. Göteborg: SKF, 2016, 1363.
- [14] SKALICKÝ, Jiří. Elektrické servopohony. Vyd. 2. Brno: Vysoké učení technické, 2001. ISBN 80-214-1978-4.
- [15] NEBORÁK, Ivo a Václav SLÁDEČEK. Elektrické pohony [online]. Ostrava: VŠB, [2008] [cit. 2019-04-20]. ISBN 978-80-248-1493-3.
- [16] PATOČKA, Miroslav. Vybrané stati z výkonové elektroniky. Vyd. 2. Brno: PC-DIR, 1998. Učební texty vysokých škol. ISBN 8021408960.
- [17] LIN, M. C., B. RAVANI a S. A. VELINSKY. Kinematics of the Ball Screw Mechanism. Journal of Mechanical Design [online]. 1994, 116(3), 7 [cit. 2019-04-20]. DOI: 10.1115/1.2919459. ISSN 10500472. Dostupné z: <http://MechanicalDesign.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1444243>
- [18] MAREK, Jiří. Kuličkové šrouby a matice ve stavbě CNC obráběcích strojů, část 2. MM Průmyslové spektrum [online]. 2015, 08.04.2015, 2015(4), 50 [cit. 2019-04-20]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kulickove-srouby-a-matice-ve-stavbe-cnc-obrabecich-stroju-cast-2.html>

- [19] MAREK, Jiří. Kuličkové šrouby a matice ve stavbě CNC obráběcích strojů, část 3. MM Průmyslové spektrum [online]. 2015, 06.05.2015, 2015(5), 72 [cit. 2019-04-20]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kulickove-srouby-a-matice-ve-stavbe-cnc-obrabecich-stroju-cast-3.html>
- [20] MAREK, Jiří. Kuličkové šrouby a matice ve stavbě CNC obráběcích strojů, část 4. MM Průmyslové spektrum [online]. 2015, 03.06.2015, 2015(6), 70 [cit. 2019-04-20]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/kulickove-srouby-a-matice-ve-stavbe-cnc-obrabecich-stroju-cast-4.html>
- [21] ELUC: Elektrotechnika [online]. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/558>
- [22] Lineární vedení. 1. Brno: HIWIN s.r.o, 2018.
- [23] Advanced Mechanisms/Robotics: S-Curve TG [online]. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <http://www.et.byu.edu/~ered/ME537/Notes/notes.html>

8 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

8.1 Seznam tabulek

TAB 1) ZÁVISLOST ELEKTRICKÝCH ZTRÁT NA VSTUPNÍCH VELIČINÁCH	27
TAB 2) MATERIÁLY PRO ZÁKLADNÍ KINEMATICKOU DVOJICI PRACOVNÍ STŮL-LOŽE [2]:	30
TAB 3) ZÁVISLOST MECHANICKÝCH ZTRÁT NA VSTUPNÍCH VELIČINÁCH	35
TAB 4) ZÁVISLOST ZTRÁT NA VSTUPNÍCH VELIČINÁCH Z PROGRAMU SIZER.....	53

8.2 Seznam obrázků

OBR. 1) POROVNÁNÍ ÚČINNOSTÍ MOTORŮ [5]	20
OBR. 2) SANKEYŮV DIAGRAM ASYNCHRONNÍ MOTORU, P_{Fe} ZTRÁTY ŽELEZA, P_{Cus} ODPOROVÉ ZTRÁTY STATORU, P_{Ad} DALŠÍ ZTRÁTY, P_{δ} VÝKONOVÁ MEZERA, P_{Cur} ODPOROVÉ ZTRÁTY ROTORU, P_P TŘECÍ ZTRÁTY [3].....	22
OBR. 3) NAPĚŤOVÝ MĚNIČ FREKVENCE S DIODOVÝM NAPÁJEČEM [14]25	
OBR. 4) VLEVO NA OBRÁZKU SÉRIOVÉ SPOJENÍ PRVKŮ RC A VPRAVO PARALELNÍ [21]	26
OBR. 5) POHLED NA MATICI KULIČKOVÉHO ŠROUBU S USPOŘÁDÁNÍM KULIČEK [17]	31
OBR. 6) ZPŮSOBY NAPOJENÍ AC SERVOPOHONU NA KULIČKOVÝ ŠROUB [2] 31	
OBR. 7) DRUHY LOŽISEK PRO POUŽITÍ PRO KULIČKOVÝ ŠROUB [2]....	33
OBR. 8) IDEÁLNÍ S-KŘIVKA [23]	38
OBR. 9) S-KŘIVKA S LINEÁRNÍM ZRYCHLENÍM [23].....	39
OBR. 10)GRAF PRŮBĚHU POLOHY, RYCHLOSTI A ZRYCHLENÍ V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO LINEÁRNÍ ZRYCHLENÍ.....	45
OBR. 11)GRAF PRŮBĚHU OTÁČEK V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO LINEÁRNÍ ZRYCHLENÍ.....	45
OBR. 12)GRAF PRŮBĚHU ÚHLOVÉHO ZRYCHLENÍ, MOMENTU A VÝKONU V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO LINEÁRNÍ ZRYCHLENÍ.....	46
OBR. 13)GRAF PRŮBĚHU DRÁHY, RYCHLOSTI A ZRYCHLENÍ V ZÁVISLOSTI NA ČASE, KDY BYL VÝPOČET PŘEPSÁN NA SITUACI S S-KŘIVKAMI	47

OBR. 14) GRAF PRŮBĚHU OTÁČEK V ZÁVISLOSTI NA ČASE, KDY BYL VÝPOČET PŘEPSÁN NA SITUACI S S-KŘIVKAMI	47
OBR. 15) GRAF PRŮBĚHU ÚHLOVÉHO ZRYCHLENÍ, MOMENTU A VÝKONU V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO LINEÁRNÍ ZRYCHLENÍ, KDY BYL VÝPOČET PŘEPSÁN N SITUACI S S-KŘIVKAMI	48
OBR. 16) SCHEMATICKY ZAZNAČENÝ ZADANÝ POHYB.....	49
OBR. 17) VYGENEROVANÁ PLOCHA ZÁVISLOSTI ÚČINNOSTI A MOMENTU A OTÁČEK SOUSTAVY MOTOR-MĚNIČ	54
OBR. 18) PRŮBĚHY POLOHY A RYCHLOSTI V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO LINEÁRNÍ ZRYCHLENÍ	56
OBR. 19) PRŮBĚHY ZRYCHLENÍ V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO LINEÁRNÍ ZRYCHLENÍ	57
OBR. 20) GRAF PRŮBĚHU OTÁČEK V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO LINEÁRNÍ ZRYCHLENÍ	57
OBR. 21) PRŮBĚHY ÚHLOVÉHO ZRYCHLENÍ A MOMENTU MOTORU V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO LINEÁRNÍ ZRYCHLENÍ	57
OBR. 22) PRŮBĚH VÝKONU MOTORU V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO LINEÁRNÍ ZRYCHLENÍ	58
OBR. 23) PRŮBĚHY ÚHLOVÉHO ZRYCHLENÍ, MOMENTU A VÝKONU MOTORU V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO LINEÁRNÍ ZRYCHLENÍ	58
OBR. 24) PRŮBĚH PROUDU V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO LINEÁRNÍ ZRYCHLENÍ	59
OBR. 25) PRŮBĚH DRÁHY A RYCHLOSTI V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO POHYB S S-KŘIVKAMI.....	59
OBR. 26) PRŮBĚH ZRYCHLENÍ V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO POHYB S S-KŘIVKAMI.....	60
OBR. 27) GRAF PRŮBĚHU OTÁČEK V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO LINEÁRNÍ ZRYCHLENÍ	60
OBR. 28) PRŮBĚH DRÁHY V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO POHYB S S-KŘIVKAMI.....	60
OBR. 29) PRŮBĚH RYCHLOSTI A ZRYCHLENÍ V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO POHYB S S-KŘIVKAMI	61
OBR. 30) GRAF PRŮBĚHU ÚHLOVÉHO ZRYCHLENÍ A MOMENTU MOTORU V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO POHYB S S-KŘIVKAMI.....	61
OBR. 31) GRAF PRŮBĚHU VÝKONU V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO POHYB S S-KŘIVKAMI	62
OBR. 32) PRŮBĚHY PŘÍKONU A ENERGIE V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO POHYB S S-KŘIVKAMI.....	62
OBR. 33) PRŮBĚH PROUDU V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO POHYB S S-KŘIVKAMI.....	63
OBR. 34) TŘECÍ MOMENT LOŽISKA JAKO FUNKCE RYCHLOSTI A VIZKOZITY [20]	64

8.3 Seznam symbolů

P_{Cu}	[W]	Odporové ztráty ve vinutí
m_F	[-]	Počet fází
I	[A]	Proud
R_{AC}	[Ω]	Odpor fázového vinutí
k_R	[-]	Koeficient skin efektu
N	[-]	Počet otáček
l_{av}	[m]	Průměrná délka otáčení
σ	[$S \cdot m^{-1}$]	Specifická vodivost vodiče
S_C	[m^2]	Plocha průřezu vodiče
R_0	[Ω]	Odpor při teplotě t_0
t_0	[$^{\circ}C$]	Teplota
α	[K^{-1}]	Teplotní součinitel elektrického odporu
Δt	[$^{\circ}C$]	Změna teploty
m_{Cu}	[kg]	Hmotnost mědi
J	[$A \cdot m^{-2}$]	Proudová hustota ve vodičích
$P_{Fe,n}$	[W]	Ztráty v železe
P_{10}	[-]	Ztrátové číslo
B_n	[$V \cdot s \cdot m^{-2}$]	Radiální hustota toku
$m_{Fe,n}$	[kg]	Hmotnost železa
P_{15}	[-]	Ztrátové číslo
P_{ad}	[W]	Dodatečné ztráty
f	[Hz]	frekvence
$P_{\rho,bearing}$	[W]	Ztráty na ložisku
μ	[-]	Koeficient tření
F	[N]	Síla
$D_{bearing}$	[m]	Vnitřní průměr ložiska
$P_{\rho,w2}$	[W]	Třecí ztráty od koncových ploch rotoru
C_M	[Nm]	Točivý moment
ρ	[$kg \cdot m^{-3}$]	hustota
D_r	[m]	Vnější průměr rotoru
D_{ri}	[m]	Průměr hřídele
Re_r	[-]	Reynoldsovo číslo

p_C	[W]	Ztrátový výkon přeměňovaný v čipu na teplo
u_{CE}	[V]	Kolektorové napětí
i_C	[A]	Kolektorový proud
W_{off}	[J]	Ztráty při vypnutí
W_{on}	[J]	Ztráty při zapnutí
P_{pu}	[W]	Ztrátový přepínací výkon
P_Z	[W]	Přenosové ztráty
R	[Ω]	Odpor
$tg\delta$	[-]	Ztrátový činitel
U_{RS}	[V]	Napětí na rezistoru
U_{CS}	[V]	Napětí na kondenzátoru
R_s	[Ω]	Odpor rezistoru
X_{CS}	[Ω]	Kapacitance
C_s	[F]	Kapacita kondenzátoru
F_t	[N]	Třecí síla
f_n	[-]	Koeficient tření
F_n	[N]	Kolmá tlaková síla
R	[m]	Poloměr průřezu valeného tělesa
m	[kg]	Hmotnost
g	[$m \cdot s^{-2}$]	Gravitační zrychlení
f_1	[-]	Součinitel tření ve vodících plochách
α	[$^\circ$]	Úhel sklonu
s	[m]	Stoupání
i_p	[-]	Převodový poměr vložené převodovky
i_l	[-]	Převodový poměr vloženého převodu
η_p	[-]	Účinnost vložené převodovky
η_l	[-]	Účinnost vloženého převodu
F_p	[N]	Předeptnutí kuličkového šroubu
η_s	[-]	Účinnost kuličkového šroubu
d_s	[m]	Střední průměr
M_{lt}	[Nm]	Třecí moment v ložisku
P	[kN]	Ekvivalentní dynamické zatížení ložiska
d	[m]	Průměr ložiska

M_{rr}	[Nm]	Valivý třecí odpor
M_{sl}	[Nm]	Moment smykového tření
M_{seal}	[Nm]	Třecí moment těsnění
M_{drag}	[Nm]	Třecí moment způsobený odporem brodění, hnětením, rozstříkáváním atd. v olejové lázni
ϕ_{ish}	[-]	Redukční faktor zahřívání na vstupu
ϕ_{rs}	[-]	Redukční faktor kinematického doplňování
G_{rr}	[W]	Valivá frikční proměnná
ν	$[mm^2 \cdot s^{-1}]$	Skutečná provozní viskozita oleje
n	$[rad \cdot min^{-1}]$	Rotační rychlost
G_{sl}	[-]	Posuvná frikční proměnná
μ_{sl}	[-]	Kluzný třecí koeficient
K_{S1}	[-]	Konstanta závisující na typu těsnění
d_s	[m]	Průměr protikusu těsnění
K_{S2}	[-]	Konstanta závisující na typu těsnění
β	[-]	Exponent závisující na typu těsnění a typu ložiska
V_M	[-]	Faktor tahové ztráty
K_{roll}	[-]	Konstanta související s valivým elementem
B	[m]	Šířka ložiska
d_m	[m]	Hlavní průměr ložiska
j_m	$[m \cdot s^{-3}]$	Jerk
M_m	[Nm]	Potřebná velikost momentu
J_{rhm}	$[kg \cdot m^2]$	Moment setrvačnosti
ε_m	$[rad \cdot s^{-2}]$	Úhlové zrychlení motoru
M_{zdrhm}	[Nm]	Moment zátěže motoru
M_G	[Nm]	Moment od přesouvaných hmot
M_{GT}	[Nm]	Moment pasivních odporů
M_{KSM}	[Nm]	Moment pasivních odporů
F_A	[N]	Axiální síla
J_{mot}	$[rad \cdot s^{-2}]$	Moment setrvačnosti kotvy rotoru AC servomotoru
J_{br}	$[rad \cdot s^{-2}]$	Moment setrvačnosti brzdy AC servomotoru
J_p	$[rad \cdot s^{-2}]$	Moment setrvačnosti převodovky na motoru
J_1	$[rad \cdot s^{-2}]$	Moment setrvačnosti hnací řemenice (pastorku)
J_2	$[rad \cdot s^{-2}]$	Moment setrvačnosti hnané řemenice (kola)

J_s	$[rad \cdot s^{-2}]$	Moment setrvačnosti kuličkového šroubu
J_m	$[rad \cdot s^{-2}]$	Redukovaný moment setrvačnosti posuvných hmot
b	[m]	Rameno působíště tíhové síly
b_ξ	[m]	Délka kuličkového šroubu
d_ξ	[m]	Průměr kuličkového šroubu
P_M	[W]	Výkon motoru
ω	$[rad \cdot s^{-1}]$	Úhlová rychlost

9 SEZNAM PŘÍLOH

CD - obsahuje M-fily výpočtů ověření pro lineární a S-křivky, dále výpočty upravené dle zadání opět pro lineární a S-křivky