



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## LINEÁRNÍ JEDNOTKA S KROKOVÝM MOTOREM

LINEAR ACTUATOR WITH STEPPER MOTOR

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Farba

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Kopečný, Ph.D.

BRNO 2016



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Marek Farba

**ID:** 164262

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2015/16

## NÁZEV TÉMATU:

### Lineární jednotka s krokovým motorem

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte lineární jednotku s krokovým motorem. Zadáání lze shrnout do následujících bodů:

1. Navrhněte lineární vedení s pracovní délkou 0,4 m.
2. Navrhněte řídicí modul jednotky.
3. Výpočty a simulací ověřte funkčnost jednotky.
4. Začněte s praktickou realizací lineární jednotky.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

katalog Hennlich [online]. [cit. 2015-09-29]. <<http://www.hennlich.cz>>.

**Termín zadání:** 8.2.2016

**Termín odevzdání:** 23.5.2016

**Vedoucí práce:** Ing. Lukáš Kopečný, Ph.D.

**Konzultant bakalářské práce:**

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc., předseda oborové rady**

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Témou bakalárskej práce je lineárna jednotka s krokovým motorom. Práca je zameraná na návrh jednotky, stručný popis lineárnych vedení a krokového motora. Ďalej sa zaoberá rozborom modelu navrhutej jednotky, výpočtami krútiaceho momentu krokového motora a simuláciou. V závere bakalárskej práce sú popísané vybrané komponenty zostrojenej lineárnej jednotky a postup jej výroby.

## **Kľúčové slová**

Lineárna jednotka, lineárne vedenie, posuvný jazdec, časozber, krokový motor, arduino, SolidWorks 2014, GT2, HC06, TB6600, android, MITAppInventor 2.

## **Abstract**

This bachelor's thesis deals with linear unit with stepper motor. The paper discusses design of the unit, a brief description of linear motion guides and the stepper motor. It also deals with analysis of the model proposed units, the calculation of torque stepper motor and simulation. The conclusion of the bachelor's thesis describes the selected components of the constructed linear unit and its process of manufacturing.

## **Keywords**

Linear unit, linear motion guide, slider, time-laps, stepper motor, arduino, SolidWorks 2014, GT2, HC06, TB6600, android, MITAppInventor 2.

## **Bibliografická citácia**

FARBA, M. Lineární jednotka s krokovým motorem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 52 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Kopečný, Ph.D..

## Prehlásenie

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Lineární jednotka s krokovým motorem“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## PodĎakovanie

Ďakujem vedúcemu semestrálnej práce Ing. Lukášovi Kopečnému, Ph.D. za odborné vedenie a umožnenie vypracovania tejto semestrálnej práce. Ďalej by som rád poďakoval mojim priateľom a to menovite Tadeáš Divácký, Branislav Bednár a Rado Guráň , za financovanie práce a cenné rady pri návrhu.

V Brne dňa: .....

.....

podpis autor

# Obsah

1	ÚVOD .....	8
2	TEÓRIA .....	9
2.1	Fotenie .....	9
2.1.1	Statický časozber .....	9
2.1.2	Dynamický časozber .....	9
2.2	Druhy sliderov .....	10
2.3	Druhy lineárnych vedení a jednotiek .....	10
2.4	Krokový motor .....	11
2.4.1	Typy krokových motorov .....	11
2.4.2	Riadenie krokových motorov .....	12
2.4.3	Porovnanie krokového motora a servomotora .....	13
3	NÁVRH LINEÁRNEJ JEDNOTKY .....	14
3.1	Verzia 1 .....	14
3.2	Verzia 2 .....	16
3.3	Verzia 3 .....	17
3.3.1	Ľavý bok .....	18
3.3.2	Spevňovací profil .....	19
3.3.3	Kovová tyč .....	19
3.3.4	Vozík fotoaparátu .....	20
3.3.5	Držiak remeňa .....	20
3.3.6	Lineárne ložisko .....	21
3.3.7	Vozík statívu .....	21
3.3.8	Pravý bok .....	22
3.3.9	Držiak motora .....	22
3.3.10	Krokový motor a kladka .....	23
3.3.11	Remeň .....	23
3.4	Verzia 4 .....	23
4	RIADIACI MODUL .....	24
4.1	Návrh riadiaceho modulu .....	24
4.1.1	Arduino Nano .....	24
4.1.2	Návrh výkonového stupňa .....	25
4.1.3	Krokový motor .....	26
4.2	Výsledné prevedenie riadiaceho modulu .....	27
4.2.1	Logická časť .....	27
4.2.2	Výkonový stupeň TB6600 .....	27
4.2.3	Krokový motor .....	28
4.2.4	Koncové snímače .....	29
4.2.5	Bluetooth modul HC06 .....	29
4.2.6	Android zariadenie .....	29
4.2.7	Arduino Nano - program .....	30
4.3	Zhrnutie kapitoly 4 - riadiaci modul .....	31

5	VÝPOČTY A SIMULÁCIA .....	32
5.1	Výpočty .....	32
5.1.1	Výpočet vodorovného pohybu .....	32
5.1.2	Výpočet zvislého pohybu .....	34
5.2	Simulácia .....	37
5.2.1	Popis modelu .....	37
5.2.2	Nastavenie modelu .....	38
5.2.3	Získanie hodnôt pre model .....	40
5.2.4	Príprava simulácie .....	40
5.2.5	Výsledky simulácie .....	41
6	REALIZÁCIA SLIDERU .....	42
6.1	Testovanie.....	42
7	ZÁVER.....	43
8	LITERATÚRA.....	44
9	PRÍLOHY.....	47

# Zoznam obrázkov

Obr. 1 Model jednoduchého slideru .....	10
Obr. 2 Usporiadanie rotora hybridného krokového motora [2] .....	12
Obr. 3 Princíp slideru od firmy Edelkrone [5] .....	15
Obr. 4 Model princípu lineárnej jednotky verzia 1 .....	15
Obr. 5 Model lineárnej jednotky verzia 2 .....	16
Obr. 6 Konštrukcia lineárnej jednotky verzia 3 .....	17
Obr. 7 Ľavý bok .....	18
Obr. 8 Spevňovací profil .....	19
Obr. 9 Kovová tyč .....	19
Obr. 10 Vozík fotoaparátu.....	20
Obr. 11 Držiak remeňa .....	20
Obr. 13 Vozík statívu .....	21
Obr. 12 Lineárne ložisko .....	21
Obr. 14 Pravý bok .....	22
Obr. 15 Držiak motora .....	22
Obr. 17 Konštrukcia lineárnej jednotky verzia 4 .....	23
Obr. 16 Krokový motor a kladka .....	23
Obr. 18 Blokovaná schéma riadiaceho modulu .....	24
Obr. 19 Momentová charakteristika krokového motora [7] .....	25
Obr. 20 Blokovaná schéma zapojenia logickej časti slideru.....	27
Obr. 21 Zjednodušený model slideru, vodorovný pohyb.....	32
Obr. 22 Momentová charakteristika vodorovného pohybu.....	34
Obr. 23 Zjednodušený model slideru, zvislý pohyb .....	34
Obr. 24 Momentová charakteristika zvislého pohybu .....	36
Obr. 25 Model krokového motora.....	37
Obr. 26 Ekvivalentný obvod hybridného krokového motora[13].....	38
Obr. 27 Dialógové okno Hybrid Stepper Motor .....	39
Obr. 28 Dialógové okno Driver.....	39
Obr. 29-A Náhľad vývojového prostredia.....	47
Obr. 30-A Výsledný program.....	47
Obr. 31-A Ukážka výslednej aplikácie .....	48
Obr. 32-B Schéma zapojenia arduina.....	48
Obr. 33-C Ideálne priebehy .....	49
Obr. 34-C Simulácia pri vodorovnom pohybe .....	50
Obr. 35-C Simulácia nižšieho napájacieho napätia.....	50
Obr. 36-D Vozík fotoaparátu .....	51
Obr. 37-D Vozík statívu .....	51
Obr. 38-D Ľavý bok .....	51
Obr. 39-D Pravý bok .....	51
Obr. 40-D Spevňovací profil.....	51

# 1 ÚVOD

Predmetom tejto bakalárskej práce je návrh lineárnej jednotky s krokovým motorom. Táto lineárna jednotka má slúžiť ako posuvný jazdec (slider), ktorého hlavnou úlohou bude časozber (timelaps). Podrobnejší popis princípu a účelu tohto zariadenia bude vysvetlený v nasledujúcej kapitole.

Lineárna jednotka bude mať pracovnú dĺžku vedenia 1m. Ako pohon bude použitý krokový motor. Práca bude obsahovať rozbor dostupných lineárnych jednotiek. Budem porovnávať druhy pohonov, konštrukčné prevedenia, využitie a iné dôležité parametre jednotiek.

Riadiaci modul bude realizovaný kombináciou driveru krokového motora a arduino. Bude mať 3 základné funkcie :

- Voľba smeru jazdy
- Rýchlosť jazdy
- Režim natáčania alebo časozber

Súčasťou práce bude výpočet potrebného výkonu krokového motora a vytvorenie modelu, ktorý bude slúžiť na simuláciu a samotný návrh lineárnej jednotky. Predpokladá sa využitie programu SolidWorks 2014 pre tvorbu modelu jednotky a Matlab R2013b pre simuláciu motoru.



## 2 TEÓRIA

Táto časť práce obsahuje základné informácie o spôsoboch fotografovania, pri ktorých sa využívajú lineárne jednotky a teoretické poznatky využité pri návrhu lineárnej jednotky.

### 2.1 Fotenie

Počas štúdia na vysokej škole sa stalo mojou záľubou fotenie, ku ktorému ma priviedol môj spolubývajúci. Fotením a filmovaním sa zaoberá už dlhší čas a stále sa snaží mať dokonalejšie zábery. Jeden z mnohých spôsobov, ktorý využíva na zachytenie scény je aj časozber. Pri tomto druhu fotografovania sa využívajú aj lineárne jednotky. Keďže sú dostupné druhy jednotiek relatívne drahé, rozhodol som sa, že si túto tému zvolím ako bakalársku prácu a pokúsim sa navrhnuť a zostrojiť jednotku sám.

#### 2.1.1 Statický časozber

Princíp časozberu spočíva v intervalovom snímaní. Pre lepšie pochopenie uvediem jednoduchý príklad. Východ slnka je relatívne dlhý dej, ktorý trvá približne dve hodiny. Tento dej by sme chceli zachytiť napríklad do videa dlhého len 12s. Pre plynulosť zvolíme obnovovaciu frekvenciu videa 30 snímkou za sekundu. Na základe týchto údajov si vieme dopočítať, že budeme potrebovať  $12 \cdot 30 = 360$  snímkou. Keďže sa snažíme zachytiť východ slnka, týchto 360 snímkou potrebujeme rozdeliť s lineárnym odstupom do časového úseku dvoch hodín ( $2 \cdot 60 \cdot 60 = 7200$ s). Z toho vyplýva, že budeme fotiť každých  $7200/360 = 20$  sekúnd. Výsledkom bude 360 fotografií tej istej scény s časovým odstupom. Je veľmi dôležité, aby sa s fotoaparátom počas snímania nehýbalo, aby bolo scéna rovnaká a fotografie neboli rozmazané. Následne sa fotografie upravujú špeciálnym programom a vznikne požadované video.

Na takéto časozber nám stačí vhodne položiť fotoaparát na podložku alebo statív. Takéto zábery ale nemajú dostatočnú dynamiku. V špeciálnych programoch sa dá video upraviť. Zvolíme si len časť scény, kde sa nachádza slnko, a túto časť rozhybeme v smere pohybu slnka. Takto nám vznikne dynamickejší záber, ale výsledné video má menšie rozlíšenie, pretože využívame len časť nasnímaných fotografií.

#### 2.1.2 Dynamický časozber

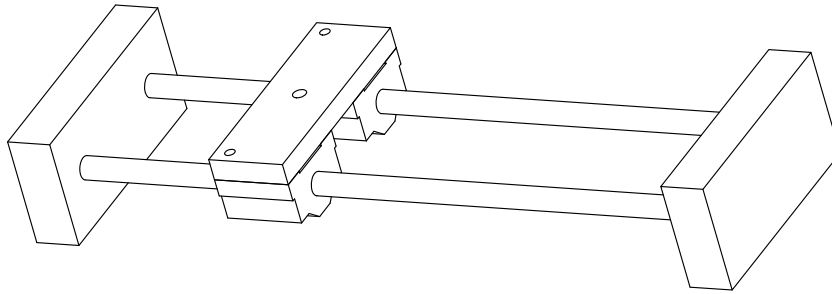
Ďalším spôsobom dosiahnutia väčšej dynamiky záberu je možnosť rozpochybovať fotoaparát. Pre tento účel využijeme posuvný jazdec takzvaný slider. Pre lepšie pochopenie uvediem ďalší príklad.

Chceme zachytiť rastenie húb. Tento dej relatívne dlhý a náročný na zachytenie. Aby sme zachytili celý dej komplexne, potrebujeme nazačiatku snímať detaily a na konci celého deja zasa snímať relatívne veľkú scénu. Bežné zrkadlovky, ktoré sa používajú na časozber nemajú možnosť približovať alebo oddiaľovať scénu. Preto umiestnime fotoaparát na takzvaný slider a maximálne ho priblížime k snímanej hube. Zo začiatku je huba veľmi malá a preto fotíme veľmi malú scénu. S postupom času sa bude huba zväčšovať a fotoaparát automaticky oddiaľovať. Prvý dynamický prvok bude rastenie huby a druhý bude súčasné

zväčšovanie sa scény. Takto vznikne veľmi zaujímavý a dynamický časozber, ktorý je na rozdiel od statického časozberu pútavejší.

## 2.2 Druhy sliderov

Pri fotení a filmovaní sa využívajú rôzne druhy sliderov. Slider má za úlohu pohybovať fotoaparátom alebo kamerou najčastejšie po lineárnej dráhe. Na **Obr. 1** sa nachádza ilustratívny model mnou navrhnutého slideru.



**Obr. 1 Model jednoduchého slideru**

Niektoré druhy sa dajú vyrobiť doma, iné sa dajú zakúpiť. Ako najjednoduchší slider sa dá použiť napríklad hocijaký kolesový podvozok, na ktorý pripevníme fotoaparát a pohybujeme s ním rukou. Trocha zložitejšou variantou je slider vyrobený z plastových alebo kovových trubiek, po ktorých sa pohybuje špeciálny vozík. Vozík sa pohybuje pomocou malých koliesok alebo ložísk a taktiež sa musí rozposhybovať rukou. Namiesto trubiek sa dajú využiť aj iné druhy vedení, ktoré sú drahšie a musia sa zakúpiť v špecializovaných obchodoch. Väčšinou majú tvar hranola alebo kvádra a nachádzajú sa v nich rôzne drážky.

Ďalšiu kategóriu tvoria rovnaké typy sliderov s pridaným pohonom, ktorý je najčastejšie elektrický. Takéto jednotky sa dokážu pohybovať naprogramovanou trajektóriou. Na trhu sú dostupné aj špeciálne druhy sliderov, ktoré umožňujú viacero stupňov voľnosti, zameranie sa na objekt, prepojenie slideru s fotoaparátom a veľa iných funkcií.

## 2.3 Druhy lineárnych vedení a jednotiek

V nasledujúcej kapitole sa oboznámime s niektorými druhmi lineárnych vedení. Podľa druhu vedenia sa dajú zaradiť do týchto hlavných kategórií. [1]

- Valivé lineárne vedenia (vedenia s guľôčkovou alebo valčekovou reťazou)
- Klzné vedenie
- Rolničkové vedenie

Lineárne jednotky sa skladajú z niektorého lineárneho vedenia uloženého v ráme a pojazdnej plochy. Jednotky môžu kombinovať viacero lineárnych vedení uložených v jednom ráme a tak dosahovať rôzne špecifické vlastnosti.

Lineárne jednotky môžu mať rôzne druhy pohonov. Najčastejšie sa používajú krokové motory alebo servo motory, ktoré poháňajú z pravidla guľôčkové skrutky alebo remene.

## 2.4 Krokový motor

Krokové motory sú najrozšírenejšie pohony v automatizácii. Fungujú na princípe riadenej inkrementálnej rotácie v pevných krokoch. Otáčky (kroky) sú riadené postupným prepínaním prúdu do statorových vinutí. Rýchlosť otáčania hriadeľa krokového motora nezávisí na zaťažovacom momente (do určitej medze). Krokový motor sa dá riadiť aj bez spätnej väzby a má rýchlu odozvu na štart, zastavenie a reverzáciu otáčania. [3]

### 2.4.1 Typy krokových motorov

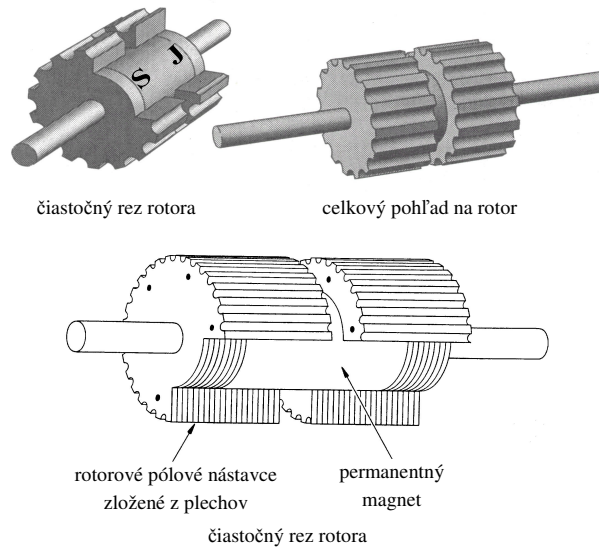
- Pasívne (motor s premenlivou reluktanciou)
- Aktívne (motor s permanentným magnetom)
- Hybridné

Prevzaté z [2]:

"Pasívne krokové motory nazývané taktiež motory s premenlivou reluktanciou majú stator s nástavcami, na ktorých sa nachádzajú vinutia. Rotor je z magneticky mäkkého železa a má malý moment zotrvačnosti, s čím súvisia jeho dobré dynamické vlastnosti. Pasívne krokové motory sa jednoducho konštruujú a preto sú lacné. Môžu mať jedno alebo viac segmentovú konštrukciu.

Aktívne krokové motory nazývané taktiež motory s permanentnými magnetmi majú rotor zložený z permanentného magnetu s radiálnou magnetizáciou. Stator sa skladá z nástavcu, na ktorom sa nachádza vinutie. Motor má dve vinutia, ktoré sú pootočené o štvrtinu zubu.

Ďalším druhom krokových motorov, ktorý kombinuje princíp krokového motora s permanentným magnetom a krokového motora s premenlivou reluktanciou je hybridný krokový motor. Tento krokový motor kumuluje výhody oboch spomínaných typov krokových motorov, to znamená, že môže mať veľmi malý uhol kroku a vysoký hmotný výkon. Usporiadanie statora hybridného krokového motora je rovnaké, resp. podobné usporiadaniu statora krokového motora s premenlivou reluktanciou. Dôležitým znakom hybridného krokového motora je jeho rotor, ktorého štruktúra je znázornená na **Obr. 2** [2]. Ten sa skladá z valcového permanentného magnetu, ktorý je magnetizovaný pozdĺžne, to znamená v rovine rovnobežnej s hriadeľom, a vytvára unipolárne pole. Na oboch koncoch magnetu sa nachádzajú rotorové pólové nástavce, ktoré majú po obvode zuby. Tieto dva pólové nástavce sú totožné a sú voči sebe natočené o jednu polovicu zubového rozstupu rotora."



**Obr. 2 Usporiadanie rotora hybridného krokového motora [2]**

## 2.4.2 Riadenie krokových motorov

Riadenie krokového motora sa dá rozdeliť na štyri logické celky: [3]

- ovládanie
- logika
- budič
- motor

Na ovládacom prvku si zvolíme požadovaný krok, smer a zapnutie krokového motora. Pomocou logických obvodov sa vygenerujú signály potrebné pre budič, v ktorom sa nachádzajú výkonové prvky. Na budič sú pripojené cievky krokového motora, ktorý sa roztočí požadovaným smerom a krokom.

Krokové motory môžu byť unipolárne alebo bipolárne. Líšia sa počtom vyvedených vodičov a ich následným zapojením.

Unipolárne krokové motory majú jednoduchší budič, ktorý spína iba jednotlivé vinutia. Unipolárne krokové motory sa dajú zapojiť aj bipolárne.

Bipolárne krokové motory majú väčší moment. Môžu sa zapojiť sériovo alebo paralelne. Sériové zapojenie sa využíva pre dosiahnutie väčšieho krútiaceho momentu a paralelné pre väčšiu rýchlosť. Bipolárne krokové motory sa riadia pomocou budiča, ktorý má pre každú fázu nezávislý most s možnosťou zmeny smeru prúdu.

Riadenie krokových motorov sa dá podľa sekvencie rozdeliť na :

- jednofázové riadenie
- dvojfázové riadenie s plným krokom
- dvojfázové riadenie s polovičným krokom
- mikro krokovanie

### 2.4.3 Porovnanie krokového motora a servomotora

V tejto kapitole sa nachádza porovnanie krokového motora a servomotora.

Výhody krokového motora [3]:

- nižšia cena
- väčší moment
- jednoduchšia riadiaca elektronika
- presne dodržiava naprogramovanú trajektóriu (za predpokladu, že nestratí krok)

Nevýhody krokového motora [3]:

- menšia rýchlosť
- menšie zrýchlenie
- menšia presnosť polohovania hriadeľa
- môže rezonovať
- trvalý odber prúdu
- nemá spätnú väzbu

Spätná väzba je zaradená do nevýhod krokového motora, pretože všeobecne riadenie bez spätnej väzby prináša riziko, že systém sa nechová ako očakávame. Z iného hľadiska to môže byť výhoda, pretože nepotrebujeme snímače na zabezpečenie spätnej väzby a riadenie je jednoduchšie.

Trvalý odber prúdu zabezpečujúci moment motora v kludovom stave môže byť taktiež žiaducou vlastnosťou. V prípade krokového motora sa dá využiť ako brzda a umožňuje udržať hriadeľ krokového motora v rovnakej polohe aj keď naň pôsobí sila.

Výhody servomotora [3]:

- plynulejší chod
- vyššia rýchlosť
- spätná väzba
- malá chyba polohovania hriadeľa

Nevýhody servomotora [3]:

- vyššia cena
- pri rušení nemusí dodržať naprogramovanú trajektóriu

## 3 NÁVRH LINEÁRNEJ JEDNOTKY

V tejto kapitole si objasníme, ako vyzeral celý postup návrhu lineárnej jednotky. Ako sa model upravoval, doplňoval a vylepšoval. Návrh modelu som rozdelil do niekoľkých verzií. Pri popise verzií sa zameriam na veci, ktoré sú najpodstatnejšie. Poslednú verziu popíšem čo najdetailnejšie a pokúsim sa vysvetliť účel každej súčiastky.

Ako bolo spomenuté v kapitole 2.2 na trhu je dostupných niekoľko druhov sliderov. Pre moje účely som sa rozhodol vyrobiť lineárne vedenie s krokovým motorom. Pri voľbe pohonu lineárnej jednotky bol jednoznačným favoritom krokový motor. Ako vyplýva z porovnania, hlavnou prednosťou krokového motora je jeho nízka cena a jednoduché riadenie bez spätnej väzby. Krútiaci moment a otáčky krokového motora sú po správnom nadimenzovaní dostačujúce.

Ceny dostupných sliderov sa pohybujú rádovo v stovkách eur. Mojim cieľom je dodržať rozpočet približne 200 eur.

Pre návrh modelu lineárnej jednotky som si zvolil program SolidWorks 2014. S týmto programom mám dobré skúsenosti, nakoľko som ho využíval pre návrh 3D dielov a vytvorenie modelu robota do projektu z robotiky. V programe si najprv vymodelujem jednotlivé súčiastky. Tie sa potom pomocou väzieb poskladajú do jednej zostavy. Program umožňuje aj pridanie doplňujúcich väzieb, ktoré slúžia napríklad na vymedzenie pohybu súčiastok. Predpokladám, že využijem aj funkciu na automatické spočítanie hmotnosti súčiastok.

### 3.1 Verzia 1

Po dlhom zvažovaní možných variant som sa rozhodol pre konštrukciu zloženú z lineárnych ložísk a leštených kovových tyčí. Na tomto princípe fungujú aj 3D tlačiarne.

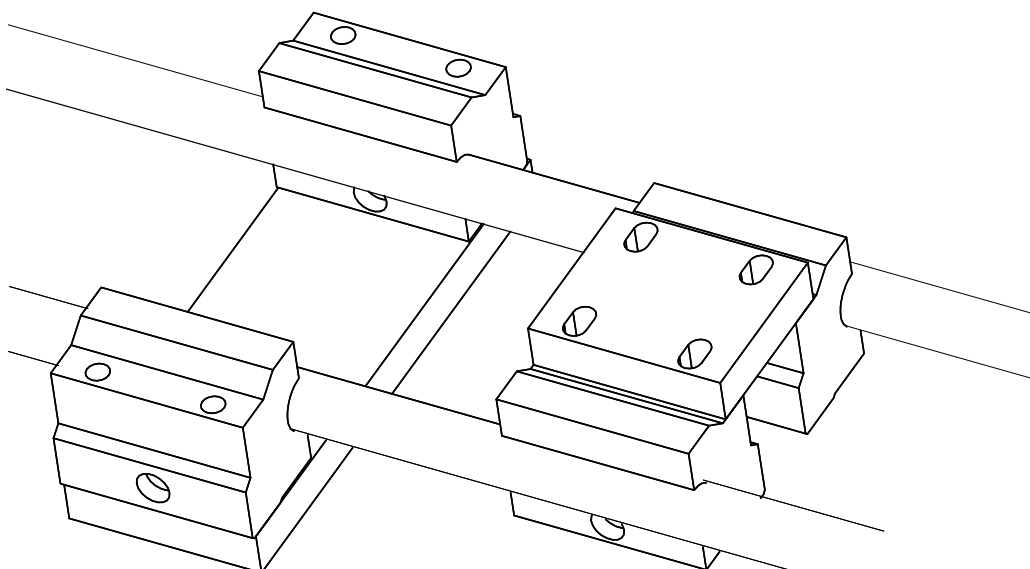
Prvotnú inšpiráciu som čerpal zo stránky predávajúcej komponenty na výrobu domácej 3D tlačiarne [4] a zo stránky výrobcu sliderov [5].

Kovové tyče dlhé 1m sú samozrejme drahšie ako tyče dlhé 50 cm, ktoré by sa dali využiť pri návrhu lineárneho vedenia s pracovnou dĺžkou jeden meter. V programe SolidWorks som začal vytvárať model jednotky, ktorá využíva špeciálny druh lineárneho vedenia pre dosiahnutie dvojnásobnej pracovnej dĺžky. Princíp jednotky spočíva v špeciálnej konštrukcii, ktorá využíva jedno lineárne vedenie pre nezávislý pohyb dvoch vozíkov. Tieto vozíky sú spojené pomocou remeňa cez kladku motora a na druhej strane je upevnená pomocná kladka, ktorá sa môže voľne otáčať. Ak sa spodný vozík upevní na statív, horný vozík s fotoaparátom sa môže pohybovať po dvojnásobne dlhšej trajektórii. Princíp je názorne zobrazený na **Obr. 3** [5] od výrobcu sliderov Edelkrone.



**Obr. 3 Princíp slideru od firmy Edelkrone [5]**

Na základe spomínaného slideru som navrhol podobnú konštrukciu. Mojm zámern bolo využiť 2 kovové tyče, po ktorých by sa pohybovali 2 nezávislé časti. Spodná pohyblivá časť slúži pre uchytienie statívu a horná časť slúži pre uchytienie fotoaparátu. Táto konštrukcia vychádzala z myšlienky prerezať zakúpené lineárne ložiská na dve symetrické časti.

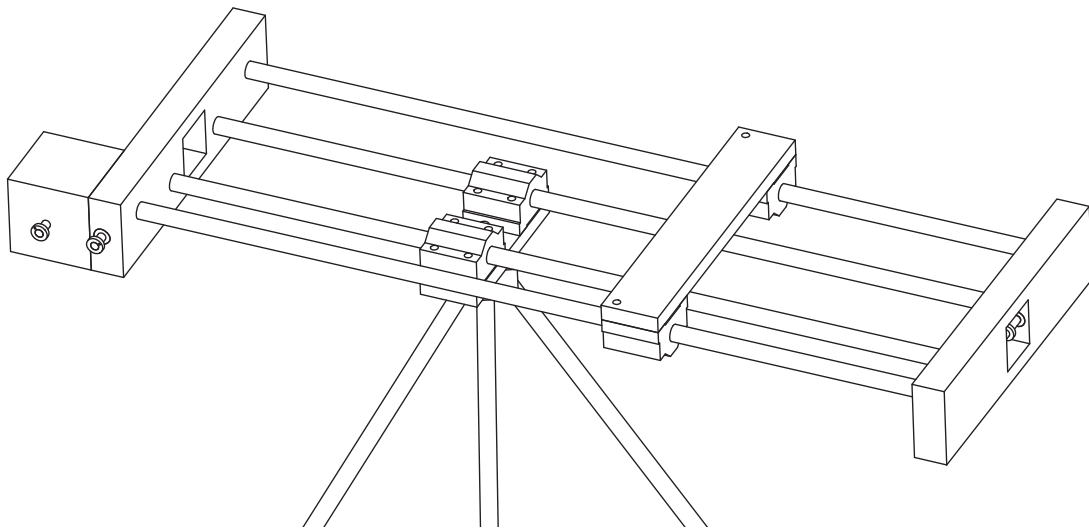


**Obr. 4 Model princípu lineárnej jednotky verzia 1**

Po konzultácii zo strojárrom som zistili, že lineárne ložisko je skonštruované tak, že jeho prerezanie by spôsobilo jeho nefunkčnosť. Z tohto dôvodu som začal tvoriť ďalší model.

## 3.2 Verzia 2

Tento model lineárnej jednotky sa skladá zo zakúpených lineárnych ložísk a štyroch kovových tyčí. Po každej tyči sa pohybuje práve jedno lineárne ložisko. Dve vnútorné tyče slúžia pre pohyblivú časť, pomocou ktorej sa pripevní statív a vonkajšie tyče slúžia pre pohyb časti slúžiacej pre uchytenie fotoaparátu. Ložiská sú spojené pomocou navrhnutých kovových platní, ku ktorým sú prichytené štyrmi skrutkami. Kovové tyče sú na oboch koncoch upevnené v dvoch krajných držiakoch. Jeden držiak obsahuje vyrezaný otvor, v ktorom sa nachádza kladka. Kladka je upevnená na oske, ktorá má na koncoch nalisované ložiská. Druhý držiak má v strede rovnaký otvor, v ktorom sa nachádza kladka. Táto kladka je upevnená na osku, ktorá je uložená v držiaku. Táto oska má jeden koniec vyvedený v otvore držiaku, ktorý sa nachádza v jeho strede. Druhý koniec osky je vyvedený až na pravý koniec držiaku. Oska je nalisovaná na dve ložiská, ktoré sú uložené v držiaku. Na pravom konci osky je pripevnená kladka, ktorá sa remeňom spojí s kladkou krokového motora. Uchytenie krokového motora a veľa iných detailov sa vyrieši v ďalšej verzii modelu.



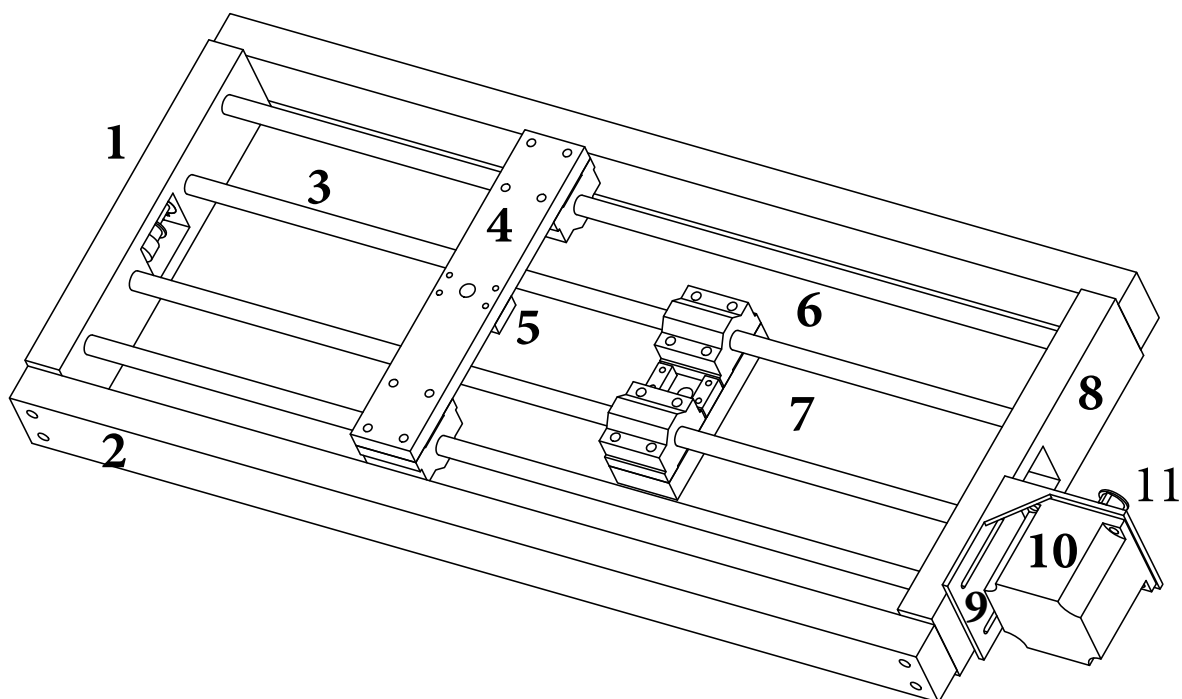
**Obr. 5 Model lineárnej jednotky verzia 2**

Po konzultácii s vedúcim semestrálnej práce a kamarátom, čo študuje na fakulte strojného inžinierstva sme narazili na niekoľko nedostatkov. Pripojenie krokového motora je riešené zbytočne zložito a preto sa krokový motor otočí a remeň bude prechádzať iba priamo cez kladku motora. Vyfrézovanie bočného dielu s takto navrhnutým uložením ložísk by bolo veľmi náročné alebo nemožné. Celá konštrukcia je príliš labilná a preto sa musia doplniť bočné profily, ktoré konštrukciu spevnia.



### 3.3 Verzia 3

V tejto verzii sa pokúsím podrobne popísať princíp celej lineárnej jednotky a význam jednotlivých dielov lineárnej jednotky.

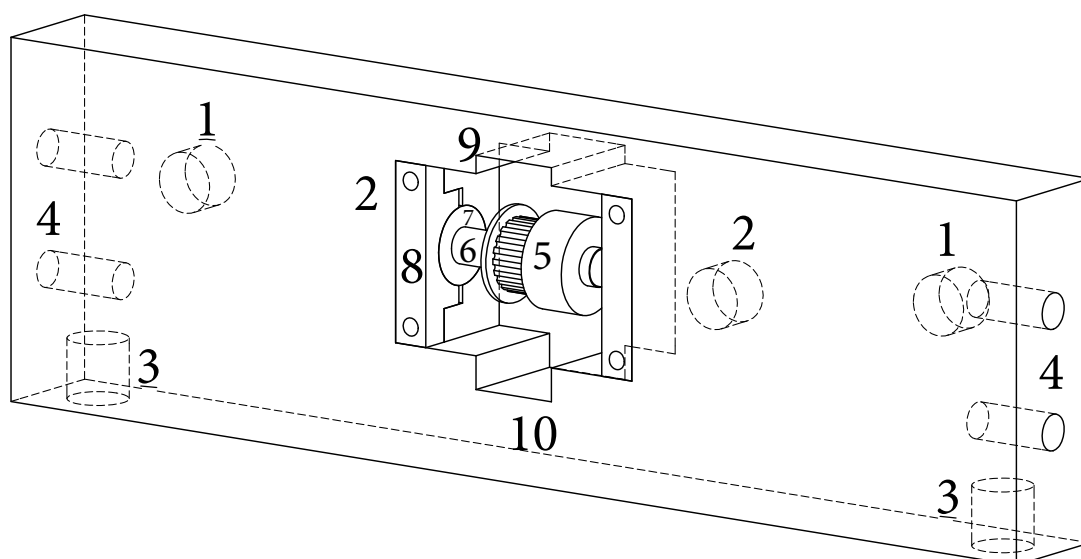


Obr. 6 Konštrukcia lineárnej jednotky verzia 3

Celá konštrukcia sa skladá z nasledovných funkčných celkov :

- ľavý bok
- spevňovací profil
- kovová tyč
- vozík fotoaparátu
- držiak remeňa
- lineárne ložisko
- vozík statívu
- pravý bok
- držiak motora
- krokový motor
- kladka

### 3.3.1 Ľavý bok



Obr. 7 Ľavý bok

Ľavý bok má niekoľko funkcií. V zadnej stene sa nachádzajú 4 otvory (1,2) s priemerom 10 mm, do ktorých sa vsunú kovové tyče. Dva krajné otvory (1) slúžia pre upevnenie tyčí, po ktorých sa bude pohybovať vozík pre uchytenie fotoaparátu. Sú v rovnakej výške a ich odstup je daný šírkou puzdra lineárneho ložiska. V strednej časti sa nachádzajú ďalšie dva otvory (2) pre upevnenie tyčí vozíka statívu (Ľavý otvor nie je zámerne zobrazený kvôli väčšej prehľadnosti). Tieto dve diery sú taktiež v rovnakej výške a sú umiestnené nižšie, aby vznikol potrebný priestor medzi vozíkmi. Bez vzniknutého priestoru by vozíky do seba narážali.

Ďalšie dva otvory (3), ktoré sa nachádzajú na krajoch spodnej podstavy budú mať pravdepodobne závit a slúžia pre uchytenie stojanu. Využitie stojanu predpokladám napríklad pri filmovaní v tráve.

Pomocou dier so závitom (4), ktoré sa nachádzajú na pravej a ľavej strane tohto dielu, sa pripevnia spevňovacie profily.

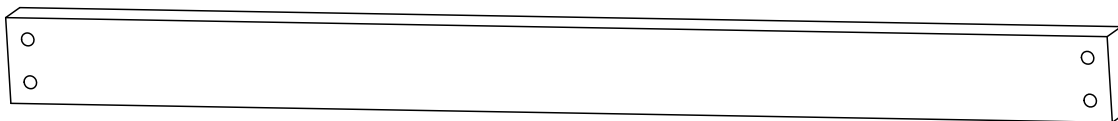
V strede dielu sa nachádza otvor, v ktorom je kladka (5). Táto kladka slúži iba na usmernenie remeňa, preto nie je podstatné aký bude mať vonkajší priemer a či bude ozubená. Kladku som zvolil rovnakú ako pre motor kvôli zvýhodnenej cene dvoch kusov. Kladka bude vycentrovaná a priskrutkovaná k oske pomocou červíka. Jej vnútorný priemer je 6,35 mm.

Oska (6) sa vysústruží s priemerom 6 mm, nalisuje sa na ložiská a v jej strede bude hrubšia, aby presne pasoval k zakúpenej kladke.

Oska je nalisovaná na ložiská (7), čo umožňuje jej voľné otáčanie a znemožňuje jej pohyb do strán. Otvory pre ložiská a navrhnuté držiaky (8) sú o 1mm širšie ako ložiská, čo zabezpečuje, že sa oska na jej koncoch ničoho nedotýka.

Ložiská sú upevnené pomocou navrhnutých držiakov, ktoré sú o milimeter kratšie, tým pádom určite doľahnú na ložiská a pevne ich pritlačia k navrhnutým otvorom. Aby sa remeň nedotýkal hrán otvoru, pridal som hornú a dolnú drážku (9,10).

### 3.3.2 Spevňovací profil



Obr. 8 Spevňovací profil

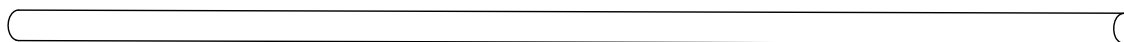
Tieto profily sa priskrutkujú k ľavému a pravému boku. Profil sa zakúpi podľa normovaného prierezu a skráti sa na požadovanú dĺžku. Vzďialenosťou dier profilu sa určí vzdialenosť pravého a ľavého boku. Táto vzdialenosť musí byť vo vypočítanom rozmedzí, aby kovové tyče nevypadli z pred pripravených drážok. Rozstup dier je daný dĺžkou kovových tyčí a rozmermi pravého a ľavého boku. Kvôli prehľadnosti si pomenujem jednotlivé dĺžky a uvediem jednoduchý výpočet:

$l = ?$ mm	dĺžka rozstupu dier spevňovacieho profilu
$l_1 = 500$ mm	dĺžka tyčí
$l_2 = 5$ mm	teoretická hĺbka zapustenia tyčí
$l_3 = 10$ mm	polovica šírky boku

$$l = l_1 - 2 * l_2 + 2 * l_3 = 500 - 2 * 5 + 2 * 10 = 510 \text{ mm} \quad (1)$$

Vo výpočte som uvažoval iba teoretickú dĺžku zapustenia tyčí. Táto hĺbka bude v skutočnosti väčšia, aby sa tyče do drážok zmestili. Nemenej dôležitou úlohou profilov je vytvorenie pevnej a stabilnej konštrukcie. Do budúcnosti plánujem odľahčenie týchto profilov.

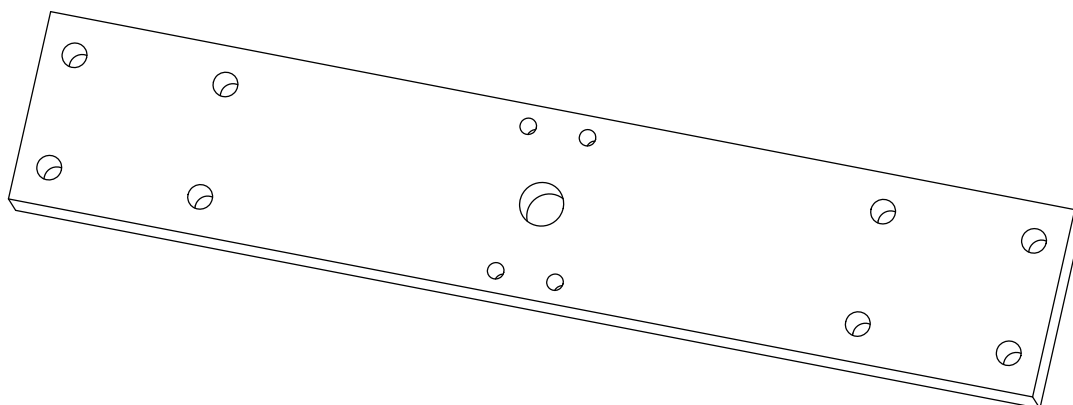
### 3.3.3 Kovová tyč



Obr. 9 Kovová tyč

Lineárna jednotka obsahuje celkovo štyri takéto tyče, ktoré sú dlhé 50 cm a majú priemer 10 mm. Tyče majú leštený povrch, čo zabezpečuje znížené trenie. Objednal som ich z internetového obchodu, kde boli zaradené v kategórii lineárnych vedení. Po tyčiach sa pohybujú lineárne ložiská. Ako bolo spomínané v predchádzajúcich kapitolách sú uložené v predpripravených otvoroch. V prípade, že by sa tyče v drážkach príliš pohybovali, na ich koncoch by sa pridalo vypodloženie.

### 3.3.4 Vozík fotoaparátu

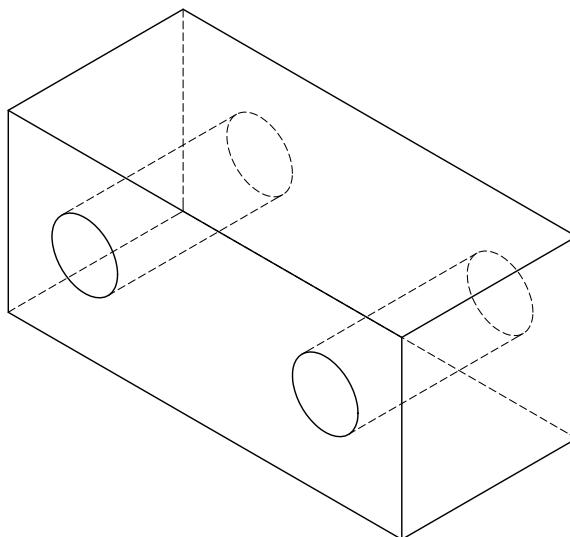


**Obr. 10 Vozík fotoaparátu**

Vozík fotoaparátu je prichytený pomocou štyroch a štyroch krajných dier k dvojici lineárnych ložísk. V strede vozíka sa nachádza diera pre úchyt fotoaparátu. Vrchná a spodná dvojica dier slúži pre uchytienie remeňa. Hrúbka vozíka je 10 mm, šírka a dĺžka je daná veľkosťou držiaka lineárneho ložiska.

### 3.3.5 Držiak remeňa

Rozstup dier držiaka je 11mm a priestor pre remeň široký 6mm je len 8mm. Pomocou držiakov sa bude remeň usmerňovať, šponovať a zároveň slúžia na predanie energie remeňa vozíkom. Držiaky sa upevnia k vozíkom pomocou dvoch skrutiek.

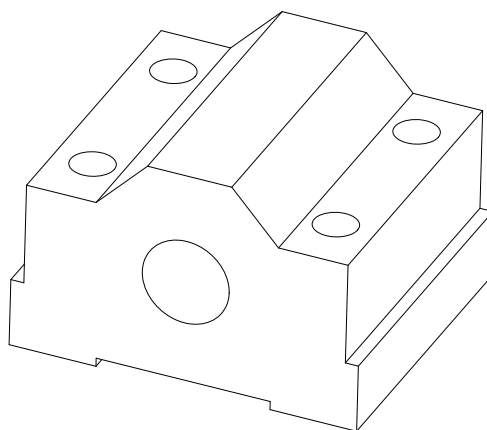


**Obr. 11 Držiak remeňa**

### 3.3.6 Lineárne ložisko

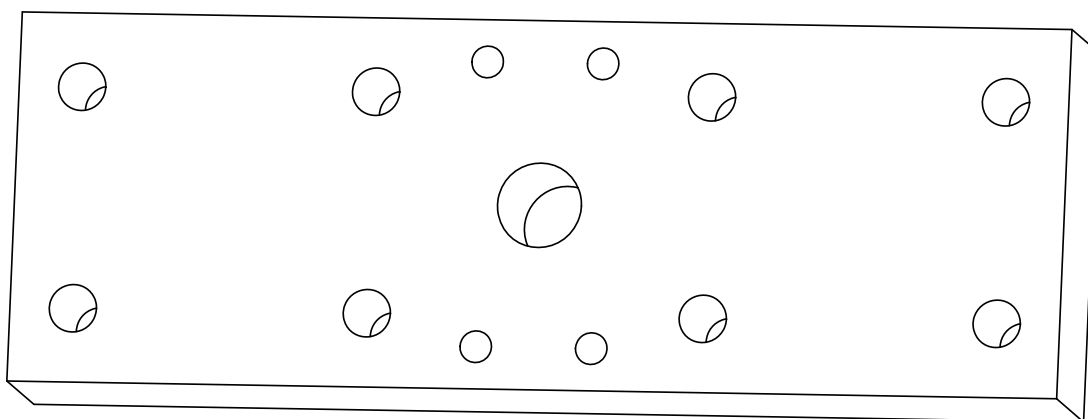
Lineárne ložiská sa pohybujú po lineárnom vedení a pomocou štyroch skrutiek sa pripevnia k vozíkom. Do polovice dier je od výroby narezaný metrický závit M5. Priemer vnútornej diery pre kovovú tyč je 10mm.

Tento blok som zakúpil v internetovom obchode pod názvom SCS10UU. Skladá sa z lineárneho ložiska LM10UU a hliníkového držiaku. Výrobca uvádza nosnosť lineárneho ložiska 372 kg pri gravitačnom zrýchlení  $g=9,81 \text{ ms}^{-2}$  [6]. Podľa katalógu som vytvoril približný model, ktorý zachováva podstatné vlastnosti držiaku, ktorými sú napríklad celkové rozmery, umiestnenie otvoru pre kovovú tyč a rozstupy upevňovacích otvorov.



Obr. 12 Lineárne ložisko

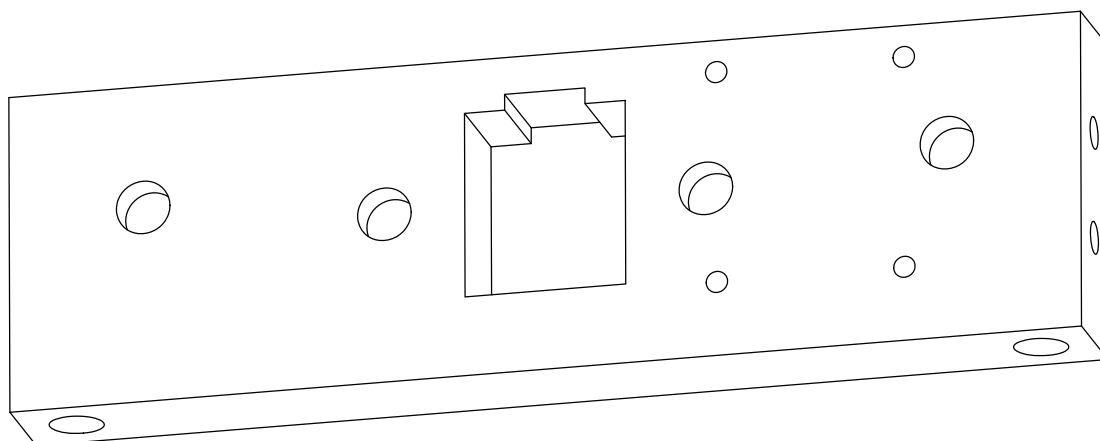
### 3.3.7 Vozík statívu



Obr. 13 Vozík statívu

Vozík statívu je prichytený pomocou štyroch a štyroch krajných dier k dvojici lineárnych ložísk. V strede vozíka sa nachádza diera pre úchyt statívu. Vrchná a spodná dvojica dier slúži pre uchytenie remeňa. Hrúbka vozíka je 15mm pretože musí udržať, na rozdiel od vozíka fotoaparátu, celú lineárnu jednotku. Šírka a dĺžka je daná veľkosťou držiaka lineárneho ložiska.

### 3.3.8 Pravý bok



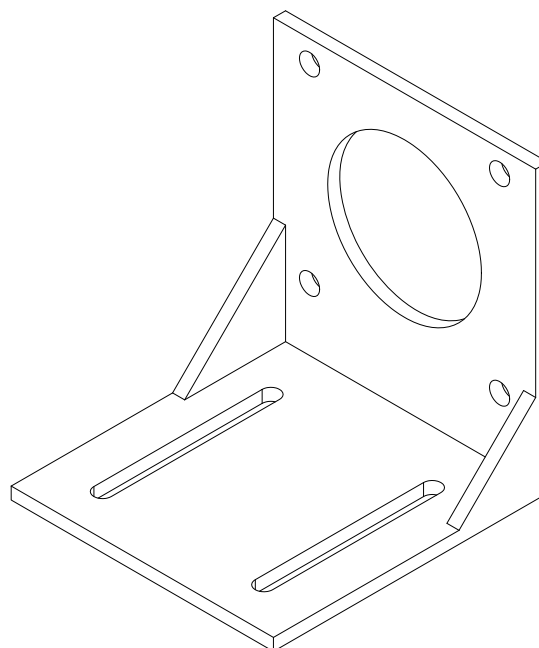
**Obr. 14 Pravý bok**

Pravý bok má rovnaké diery pre uloženie kovových tyčí, diery pre upevnenie stojanu a diery pre spevňovacie profily ako už popísaný ľavý bok.

Stredným otvorom prechádza remeň. Jedinou zmenou sú štyri otvory slúžiace pre uchytenie držiaka krokového motora. Polohu dier som zvolil tak, aby bola kladka motora približne v strede otvoru a držiak motora nepresahoval spodný okraj dielu. Ak by držiak motora presiahol spodný okraj dielu, musel by sa vždy použiť stojan alebo statív. Takto sa bude dať lineárna jednotka položiť na rovný povrch bez použitia stojanu. Ak by držiak krokového motora príliš presiahol horný okraj, zavádzal by fotoaparátu.

### 3.3.9 Držiak motora

Držiak motora som podľa zvoleného motora našiel v internetovom obchode. Držiak je navrhnutý pre krokové motory s označením príruby NEMA23. Pomocou štyroch skrutiek sa upevní krokový motor k držiaku. Držiak sa pripevní pomocou štyroch skrutiek k dielu pravý bok. Držiak krokového motora má v spodnej časti namiesto dier drážky, čo umožňuje polohovať krokový motor.

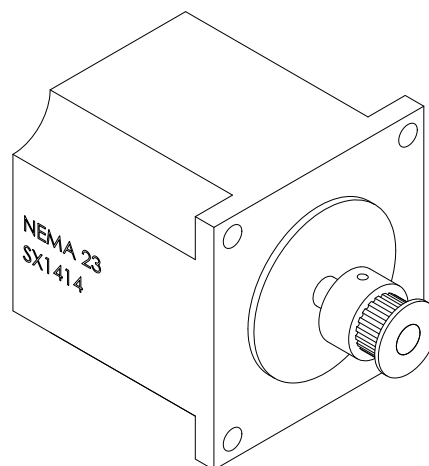


**Obr. 15 Držiak motora**

### 3.3.10 Krokový motor a kladka

Počas návrhu lineárnej jednotky som podľa orientačných výpočtov predbežne zvolil krokový motor s označením SX23-1414, ktorý ma prírubu typu NEMA 23, statický krútiaci moment 1,4 Nm a priemer jeho hriadeľa je 6,35 mm. [7] Po presných výpočtoch ho pravdepodobne zakúpim spolu s driverom od firmy Microcon.

Kladka je typu GT2, má 20 zubov, šírka ozubenej časti je 7mm a vnútorný priemer je 6,35mm. Pomocou červíka sa kladka pripevní k hriadeľu motora. Je vyrobená z hliníku. Túto kladku som zakúpil z internetového obchodu.



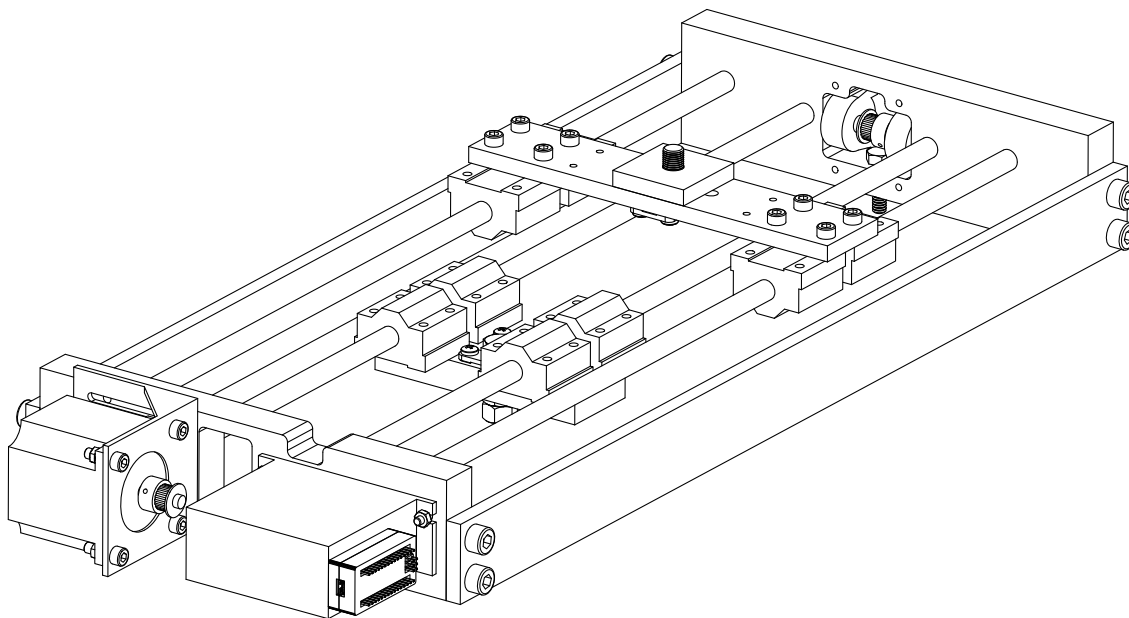
Obr. 16 Krokový motor a kladka

### 3.3.11 Remeň

Remeň je typu GT2 (rozstup dier je 2mm), zakúpil som ho spolu s kladkami. Jeho šírka je 6mm. Jedná sa o otvorený remeň dlhý 2m, ktorý podľa potreby skrátim. Pre typ GT2 som sa rozhodol kvôli jeho nízkej cene a dobrej dostupnosti. Tento typ sa taktiež využíva v 3D tlačiarňach, ktoré boli mojou prvotnou inšpiráciou.

## 3.4 Verzia 4

Posledná verzia slideru prešla drobnými úpravami a je znázornená na Obr. 17.



Obr. 17 Konštrukcia lineárnej jednotky verzia 4

Najdôležitejšou úpravou je pridanie dvojnásobného počtu lineárnych ložísk, ktoré zabezpečujú celkovú stabilitu slideru a fotoaparátu. Nemenej podstatnou zmenou je kompletná úprava uchytenia zadnej osky a kladky, ktorá spočíva vo využití dvoch ložísk s prírubami. Pomocou týchto prírub, skrutiek a matíc sa bude dať šponovať remeň.

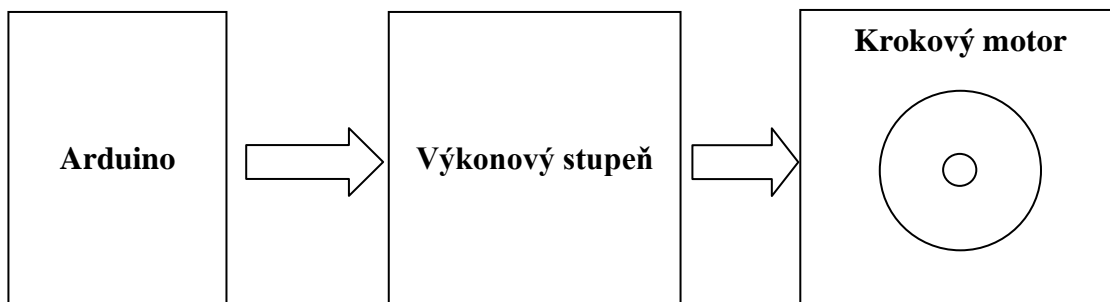
## 4 RIADIACI MODUL

Nasledujúca kapitola sa zaoberá teoretickým návrhom riadiaceho modulu a následným popisom realizovaného riadiaceho modulu. Na konci kapitoly sa nachádza stručné zhodnotenie.

### 4.1 Návrh riadiaceho modulu

Riadiaci modul sa skladá z ovládania, logiky a budiča. Ovládanie a logiku bude predstavovať arduino, pomocou ktorého sa budú generovať potrebné signály pre budič.

V nasledujúcich podkapitolách sú popísané časti blokovej schémy riadiaceho modulu.



Obr. 18 Bloková schéma riadiaceho modulu

#### 4.1.1 Arduino Nano

Arduino Nano je malá, ale napriek tomu kompletne vybavená riadiaca doska založená na mikrokontrolére ATmega328 od firmy Atmel. Na doske je zabudovaný Mini-B USB konektor a radič CH340, pomocou ktorého doska komunikuje s grafickým integrovaným vývojovým prostredím (Arduino IDE).

Základné parametre dosky Arduino Nano : [12]

- Mikrokontrolér: ATmega328
- Prevádzkové napätie (na logickej úrovni): 5V
- Vstupné napätie (doporučené): 7 - 12V
- Vstupní napätie (limitné): 6 - 20V
- Digitálne I/O piny: 14 (6 z nich poskytuje PWM výstup)
- Analógové vstupné piny: 8
- DC prúd pre I/O piny: 40mA
- Pamäť (typu flash): 32KB, 2KB pre boot program
- SRAM: 2KB
- EEPROM: 1KB
- Taktovanie procesoru: 16 MHz
- Rozmery: 45\*18mm
- Hmotnosť: 5g



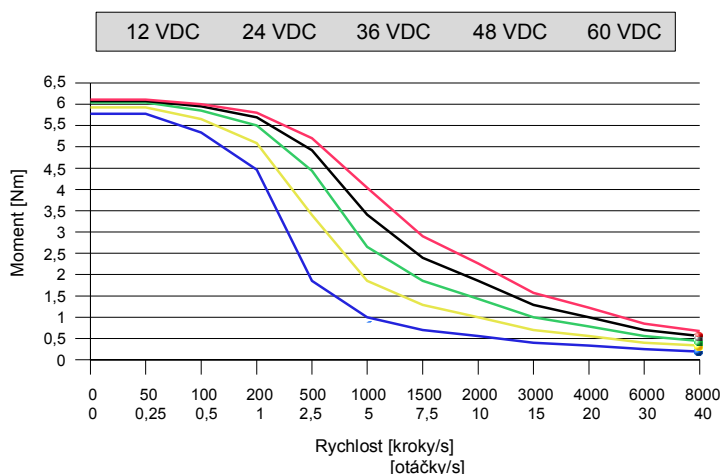
V tomto odseku sa zameriam na špeciálne funkcie digitálnych vstupov a výstupov. Napríklad sériová komunikácia beží pomocou pinov 0-RX a 1-TX, ktoré sú prepojené s radičom CH340. Externé prerušenia sa dajú pripojiť pomocou pinov 2 a 3, ku ktorým sa viaže funkcia `attachInterrupt()`. Piny 3, 5, 6, 9, 10, a 11 poskytujú 8-bitový PWM výstup, ktorý sa nastavuje pomocou funkcie `analogWrite()`. Piny 10-13 podporujú SPI komunikáciu a na pin 13 je vyvedená zabudovaná LED dióda.

Analógové vstupy a výstupy majú 10 bitové rozlíšenie, defaultne merajú napätie v rozsahu 0-5V, ale horná hranica meracieho rozsahu sa dá upraviť pomocou referenčného signálu. Piny A4 a A5 sa dajú využiť pre komunikáciu typu I2C. Arduino Nano má hardwarový a aj softwarový reset. [12]

## 4.1.2 Návrh výkonového stupňa

Pri výbere výkonového stupňa sa musíme zamerať na najrôznejšie parametre. Najdôležitejším parametrom budiča je spôsob prevedenia budiča, ktorý môže byť vo všeobecnosti napäťový alebo prúdový zdroj. Typ budenia krokového motora musí byť realizovaný prúdovým zdrojom.

Momentová charakteristika krokového motora SM32-5008  
při sériovém zapojení a proudu 5 A nastaveném na výkonovém stupni



**Obr. 19** Momentová charakteristika krokového motora [7]

Nemenej dôležité je napájacie napätie, ktoré ovplyvňuje maximálne otáčky motora. Na **Obr. 19** [7] je znázornená momentová charakteristika krokového motora s rôznymi napájacími napätiami. Z grafu vyplýva, že pri nízkych rýchlostiach nie je moment motora výrazne závislý na napájacom napätí, pretože čas pripadajúci na jeden krok je dostatočne dlhý na nabitie indukčností vinutia motora na plnú hodnotu prúdu aj pri nízkom napätí. Preto momentová charakteristika pri nízkych rýchlostiach veľmi neklesá. Od rýchlosti, pri ktorej začína moment klesať, začína pre danú kombináciu napätia a prúdu oblasť vysokých rýchlostí. V tejto oblasti je možné pre návrh aplikácie a odhad dimenzovania motora predpokladať pokles momentu úmerne poklesu napájacieho napätia. Pri znížení napájacieho

napätia taktiež dôjde aj ku zníženiu rýchlosti, na ktorej začne moment klesať. Napájacie napätie krokových motorov je najčastejšie 12, 24 alebo 48V. [7]

Pri vyššom napájacom napätí dochádza ku zvýšeniu tepelných strát motora a je nutné sledovať jeho teplotu. Orientačne sa dá využiť teplota motoru na jeho povrchu, ktorá by nemala bez prídavného chladenia prekročiť 60°C. [7]

Ďalší parameter výkonového stupňa je prúd tečúci jednou fázou motora. Hodnotu prúdu udáva výrobca u menej zložitých budičov len jednu a to maximálnu. Táto hodnota sa udáva väčšinou pri nutnom chladení, ktoré nemusí byť vždy súčasťou jednotky. Zložitejšie výkonové jednotky majú možnosť nastavenia viacerých úrovní prúdu napríklad pomocou DIP prepínačov. Firma Microcon odporúča nastaviť amplitúdu prúdu jednotky na hodnotu menovitého prúdu krokového motoru x 1,41, prípadne na najbližšiu nižšiu hodnotu, ktorú je možné na jednotke nastaviť. Efektívna hodnota prúdu potom odpovedá menovitej hodnote prúdu motoru. Príklad : Pri použití sériovo zapojeného mnou navrhnutého motoru SX23-1414 s menovitou hodnotou prúdu pri sériovom zapojení 1,4 A je doporučené nastavenie amplitúdy prúdu na jednotke menej ako  $1,4 \cdot 1,41 \doteq 2$  A. [7]

Niektoré budiče majú možnosť mikro krokovania. Hodnota mikro kroku sa dá najčastejšie nastaviť na hodnotu 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 alebo 1/32 celo kroku. Mikro krokovanie môže zmenšiť vibrácie motoru, ale zároveň zvyšuje náročnosť na logickú časť. Pri použití 32 mikro krokov je potrebné generovať 32-krát viac pulzov, čo môže byť pri vysokých rýchlostiach náročné. Napríklad pre motor SX23-1414, ktorý by sme chceli roztočiť rýchlosťou 10ot./s by sme potrebovali generovať 32\*2000 pulzov/s, čo je v prepočte pulz dlhý 15,625  $\mu$ s.

Na základe vyššie spomenutých parametrov krokových motorov som sa rozhodol, že budič bude realizovaný výkonovým stupňom typu SD20RE od firmy Microcon. Ako píše výrobca, výkonové stupne slúžia pre bipolárne napájanie krokových motorov s pulznou reguláciou prúdu s možnosťou mikro krokovania. Výkonové stupne od tohto výrobcu sa riadia pomocou signálov pulzy, smer a enable.[7]

Základné parametre výkonového stupňa SD20RE z katalógu výrobcu Microcon [7]:

- Napájacie napätie 12-45 V jednosmerných
- Amplitúda prúdu 2 A (sériové zapojenie)
- Konektory Header pin
- Statický moment KM 0,3-2,7 Nm

### 4.1.3 Krokový motor

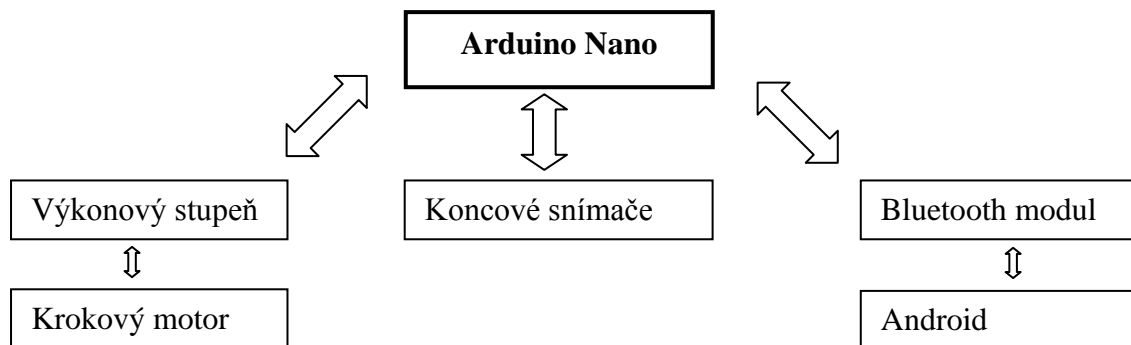
Základným parametrom krokového motora je krútiaci moment hriadeľa. Vyprodukovaný moment sa následne môže sprevodovať pomocou kladky a remeňom sa preniesie na požadované miesto. Pred samotným výberom krokového motora musíme poznať kombináciu dvoch parametrov, ktorými sú maximálny požadovaný moment motora pri požadovanej rýchlosti otáčania hriadeľa motora. Po vypočítaní týchto parametrov sa krokový motor najjednoduchšie a najspoláhlivejšie vyberá podľa momentovej charakteristiky udávanej výrobcom. Súčasťou charakteristiky by mali byť podmienky merania ako napríklad parametre použitého budiča, napájacie napätie, prúd nastavený na budiči a typ zapojenia motora.

## 4.2 Výsledné prevedenie riadiaceho modulu

V tejto podkapitole sa nachádza rozbor realizácie riadiaceho modulu, stručný popis logickej časti slideru, použitého výkonového stupňa, krokového motora a periférií pripojených k riadiacemu modulu.

### 4.2.1 Logická časť

Nasledujúca kapitola pojednáva o logickej časti slideru. Ako prvé uvediem blokovú schému logickej časti slideru, ktorej bloky si podrobne rozoberieme a osvetlíme si ich význam.



Obr. 20 Bloková schéma zapojenia logickej časti slideru

Jadrom logickej časti je arduino Nano, pre ktoré som sa rozhodol hlavne kvôli jeho nízkej cene a jednoduchosti programovania. Výkon dosky je pre potreby môjho slideru zatiaľ dostačujúci.

### 4.2.2 Výkonový stupeň TB6600

Po vypočítaní požadovaného krútiaceho momentu, viz. kapitola 5.1 a následnom zvolení krokového motora SX23-1414, som sa dostal k ďalšej kapitole návrhu slideru. V tejto časti navrhovania slideru som sa musel rozhodnúť pre konkrétny výkonový stupeň. Ako prvé som si na základe vybraného krokového motora zistil potrebné parametre budiča. Hľadal som výkonové stupne s napájacím napätím 24-48V a prúdom minimálne 2A, ktorý tečie fázou motora pri sériovom zapojení vinutí motora. Menej podstatné parametre budičov bola cena, počet mikro krokov a počet úrovní nastavenia prúdu. Najmenej podstatný parameter bol typ pripojovacích konektorov a rozmery budiča. Ako prvý kandidát mi prišiel vhodný budič od firmy Microcon s pomenovaním SD20RE, ktorý som prvotne vybral v teoretickom návrhu slideru. Po zaslaní dopytu mi prišla bohužiaľ nečakaná odpoveď, že jednotka nie je na sklade a bola mi doporučená alternatíva. Výkonový stupeň s označením SD20x a cenovou ponukou 54.44 EUR/ks bez DPH bola položka mimo môj rozpočet. Preto som sa rozhodol pohladať alternatívu na iných internetových obchodoch.

Po hodinách namáhavého hľadania, študovania priložených katalógov a porovnávaní jednotlivých parametrov a cien budičov som sa rozhodol pre výkonový stupeň s označením TB6600. Jeho parametre boli trocha predimenzované, ale zaujala ma jeho relatívne nízka cena okolo 11eur aj s poštovným a veľký chladič, s ktorým som si nemusel robiť starosti s chladením. Pri paralelnom zapojení motora SX23-1414 je prúd udávaný výrobcom 2,9A, z

čoho vyplýva požiadavka na dodávaný prúd driveru približne  $2,9 \cdot 1,41 = 4A$ . Keďže tento budič dokáže dodávať špičkovú prúd až 5A, nemusím sa obávať využívania driveru na plný výkon a prípadným rýchlym opotrebovaním driveru. Napájacie napätie budiča je maximálne 50V, čo je veľmi výhodné pri predpokladanom využití motora v oblasti vysokých otáčok.

Základné parametre driveru udávané predajcom [10] som porovnal s údajmi použitého integrovaného obvodu TB6600HG [11], ktorý tvorí jadro tohto budiča. Následne som vybral najpodstatnejšie vlastnosti tohto integrovaného obvodu .

Ako je uvedené v katalógu výrobcu TOSHIBA, integrovaný obvod TB6600HG je jedno čipový bipolárny sínusový driver typu PWM chopper (prerušovacia budič), určený pre budenie dvojfázového krokového motora s možnosťou mikro krokovania.

Integrovaný obvod má zabudované 3 druhy ochrany. Detekciu prehriatia, uzamknutie obvodu pri poklese napätia pod 5,5V s hysteréziou 0,5V a nadprúdovú ochranu výstupu. S týmito funkciami súvisia aj dva signalizačné výstupy, na ktoré sú pripojené LED diódy. Jeden výstup je výstražný (ALERT) a druhý je monitorovanie výstupu (MO). Signalizačný výstup ALERT slúži pre signalizáciu prehriatia driveru (nad 160°C s hysteréziou ochladenia na 90°C) alebo prekročení výstupného prúdu nad hodnotu 6,5A. Signalizačný pin MO je monitorovanie elektrického natočenia motora. V prípade, že sa driver nachádza v stave "Initial" ( $I_A=100\%$  a  $I_B=0\%$ ), výstup MO to signalizuje svietiacou LED diódou.

Pomocou DIP prepínačov sa dá nastaviť výstupný prúd driveru v rozmedzí 0,2-5A v ôsmich krokoch a počet mikro krokov na hodnotu 2-16. V prípade, že sa prepínače nastavia na kombináciu M1=M2=M3=H/L, driver sa prepne do režimu Standby mode. V tomto režime sú vypnuté výstupy podobne ako pri použití vstupu ENABLE, ale vnútorné obvody majú minimálnu spotrebu a v pohotovostnom režime sú len ochranné obvody.

Integrovaný obvod má dva vstupné piny RESET a ENABLE, ale driver umožňuje ovládať iba pin ENABLE. Týmto pinom sa dajú vypnúť všetky výstupy, jednotka nereaguje na žiadne prichádzajúce signály a prúd cievkami pripojeného motora je nulový, čo v praxi znamená, že hriadeľ motora sa môže voľne otáčať.

Ďalším vstupom driveru je pin DIR, pomocou ktorého sa určuje smer otáčania motora. Vstupným pinom driveru PUL sa ovláda pin integrovaného obvodu s názvom CLK. Tento vstup slúži pre riadenie rýchlosti otáčania motora. Obvod reaguje na nábežnú hranu pulzu s dĺžkou minimálne 2,2  $\mu s$ .

Odvod prebytočného tepla produkovaného prevádzkou driveru zabezpečuje mohutný rebrový chladič (75\*105\*12mm), ktorý sa nachádza na spodnej strane driveru.

### 4.2.3 Krovový motor

Na základe výpočtov uvedených v kapitole 5.1 som sa uistil vo výbere motora s označením SX23-1414 od firmy Microcon. Cena motora bola najnižšia v porovnaní s konkurenciou a dodacia doba bola iba dva dni. Pre budenie motora som využil driver s označením TB6600 5A, ktorý zvládne prúdové zaťaženie pri sériovom aj paralelnom zapojení cievok motora. Rozhodol som sa pre sériové zapojenie motora, keďže bude motor napájaný pomocou batérie. V prípade sériového zapojenia motora bude mať motor menšiu spotrebu prúdu. Nevýhodou je pokles momentu pri vyšších otáčkach.

Napájacie napätie motoru bude v prípade použitia batérie pravdepodobne 12-24V. Alternatívou bude v interiery dostatočne výkonný 12-48V zdroj jednosmerného napätia.

Prehrievanie motoru nastáva pri vyššej amplitúde alebo frekvencii prúdu. Amplitúda prúdu je pomocou driveru nastavená na konštantnú hodnotu 1,8 A, ktorá nebude spôsobovať prehrievanie motoru pri jeho nečinnosti.

Motor bude prevádzkovaný v oblasti nízkych frekvencií ( $f_{\max}=350\text{Hz}$ ) a preto nepredpokladám, že by sa motor prehrieval. Pri testovaní maximálnej rýchlosti motoru nepresiahla teplota na jeho povrchu hodnotu  $60^{\circ}\text{C}$ , z čoho vyplýva, že nie je potrebné dodatočné chladenie motoru.

#### 4.2.4 Koncové snímače

Pomocou vstupno-výstupných portov sú pripojené koncové snímače. Na oboch koncoch lineárneho vedenia slideru je umiestnená dvojica mikrosplínačov so zaoblenou páčkou. Prvý spínač slúži na zisťovanie polohy slideru. Druhý snímač je záložný a slúži iba ako poistka.

#### 4.2.5 Bluetooth modul HC06

Pre ovládanie slideru som využil bluetooth modul, ktorý zabezpečuje bezdrôtovú komunikáciu arduina a android aplikácie. Modul HC06 sa pripája pomocou 4 pinov, napájacie napätie 3,3-6V, uzemnenie (GND), RX a TX slúžia pre komunikáciu po sériovej linke. Sériová linka je nastavená na východiskovú hodnotu prenosovej rýchlosti 9600 Bd. Arduino využíva pre sériovú komunikáciu logické úrovne 0 a 5 V, modul HC06 využíva bohužiaľ úrovne 0 a 3,3 V. Tento problém sa mi podarilo vyriešiť pomocou jednoduchého DC-DC meniča logických úrovní, ktorý som zakúpil v internetovom obchode pod označením "TTL logic level converter".

#### 4.2.6 Android zariadenie

Pomocou bluetooth modulu a android aplikácie sa prepojí android zariadenie s arduinom. Pri tvorbe android aplikácie som použil vývojové prostredie MITAppInventor 2, ktoré je dostupné online cez internetový prehliadač. Vývoj aplikácie je rozdelený do dvoch logických celkov. V časti "Designer" sa navrhuje vzhľad aplikácie, rozmiestňujú sa ovládacie a indikačné prvky a podobne. V časti "Blocks" sa vytvára samotné jadro aplikácie pomocou pridávania pred chystaných funkčných blokov. Na **Obr. 29-A - Obr. 31-A** je náhľad vývojového prostredia, testovací program a testovacia verzia aplikácie. Aplikácia je momentálne v rozpracovanej verzii, ale všetky ovládacie a indikačné prvky sú plne funkčné. Aktuálna verzia aplikácie sa nachádza v prílohe **E** pod názvom "Slider\_v5.apk".

Pred prvým použitím aplikácie je nutné spárovať sa s bluetooth modulom HC06. Po otvorení aplikácie sa vyberie spárované zariadenie a slider by sa mal dať do niekoľkých sekúnd pripojiť. Držaním tlačidiel *Left/Right* sa slider pohybuje do strán a po ich pustení sa slider zastaví. Ťuknutím na tlačidlá *Go left/right* sa slider pohybuje do strán pokiaľ sa nestlačí tlačidlo *STOP* (alebo nenarazí na koncoví snímač). Pomocou listu možností *Pulse width* sa nastavuje šírka pulzu v  $\mu\text{s}$  generovaného pomocou prerušenia. Čím je pulz širší = dlhší, tým sa slider pohybuje pomalšie. Pri zvolení šírky pulzu  $200\ \mu\text{s}$  sa slider pohybuje najrýchlejšie. Ak je pripojený a správne nakonfigurovaný fotoaparát, je možné pomocou tlačidla *Take foto*

urobiť snímku. Prepínačom *Unbreak* sa dá slider odbrzdiť a pohybovať ním manuálne. Indikátor s označením *Status from Arduino* slúži ako spätná väzba. Zobrazuje naposledy vykonaný príkaz alebo prípadnú chybu. V sekcii *Timelaps* sa nastavujú parametre časozberu. Užívateľ musí zvoliť počet snímok, ktoré chce vyfotiť, čas medzi fotkami a správne nastaviť prepínač *Autofocus*, ktorý sa nastavuje podľa aktuálneho režimu zaostrovania nastavenom na fotoaparáte. Tlačidlom *Start TIMELAPS* sa spustí časozber, slider sa nastaví na východziu pozíciu, začne fotiť a postupne posúvať fotoaparát na druhý koniec slideru.

## 4.2.7 Arduino Nano - program

Jadrom celého slideru je program nahratý v arduino, ktorý je rozčlenený do funkčných celkov pomocou funkcií. Schéma zapojenia je v prílohe **B** a celý program sa nachádza v prílohe **E** pod názvom "Slider\_v5.ino".

V programe sa ako prvá načíta priložená knižnica "TimerOne.h", ktorá slúži na prácu s prerušeniami a je voľne dostupná na internete. Mnou používaná verzia knižnice je v prílohe **E** s pomenovaním "TimerOne.h" a "TimerOne.cpp". Nasleduje priradenie symbolických pomenovaní fyzickým výstupom arduino, definícia a inicializácia pomocných premenných. U premenných, ktorých hodnota sa mení vo funkciách prerušenia sa používa príkaz pre preprocesor "volatile", ktorý zaisťuje zmenu hodnoty globálnej premennej aj mimo prerušenia.

Funkcia "void setup()" sa vykoná iba jednorazovo po reštartovaní arduino a slúži pre jednorazové nastavenia ako je napríklad nastavenie sériovej komunikácie, nastavenie funkcie výstupných pinov, inicializáciu prerušenia generujúceho pulzy pre driver krokového motoru a inicializáciu prerušenia spínačov. V prípade zopnutia spínačom automaticky zareaguje prerušenie a zavolá príslušnú funkciu, ktorá obsluhuje toto prerušenie. Prerušovacie funkcie by mali byť z princípu čo najkratšie a nemali by trvať príliš dlho, pretože počas aktívneho prerušenia sú ostatné prerušenia neaktívne.

Funkcia "void loop()" sa cyklicky opakuje. V nej sa najprv kontroluje, či slider nenarazil na prvý snímač. Táto kontrola je zabezpečená prerušením(S1\_error) a v prípade, že sa prerušenie zavolá viac ako dva krát nastaví sa globálna premenná "S1\_flag" na logickú úroveň 1, čo má za následok zavolanie funkcie "S1\_hit()", ktorá zastaví slider a posunie ho späť zo snímača do "bezpečnej" polohy mimo snímača. V prípade, že sa slider dostane až na pozíciu druhého snímača, ďalšie prerušenie (SK\_error) zastaví celý slider a čaká na stlačenie tlačidla "start\_tl".

Nasleduje volanie funkcie BT(), ktorá využíva metódu "pooling", ktorej princíp je nasledovný. V prípade, ak sú na sériovej linke dáta, načítava ich postupne znak po znaku do reťazca. Ak nie je reťazec prázdny, porovnáva sa pomocou príkazov if so známymi reťazcami. V prípade zhody sa vykonajú príslušné príkazy a odošle na sériovú linku potvrdzovací reťazec, ktorý slúži ako spätná väzba pre android aplikáciu.

Nasleduje funkcia Timelaps\_pom(), ktorá kontroluje, či už uplynul stanovený násobok času medzi presunom slideru na ďalšiu pozíciu v režime timelaps. V prípade, že nie je režim timelaps aktívny alebo ešte neuplynul požadovaný čas, funkcia nevykonáva nič. Inak zavolá funkciu Timelaps(), ktorá v prípade prvej fotky nastaví slider na východziu pozíciu alebo v prípade, že počet fotiek je väčší ako 0 zavolá funkciu foto(). Následne sa počká 0,5s aby sa

fotka nerozmazala a slider sa posunie o vypočítanú vzdialenosť smerom doprava. V prípade že je nafotných dostatočný počet snímok, slider prestane volať funkciu timelaps.

Funkcia "void Krok()" pracuje priamo s registrami digitálnych výstupov a preto je dôležité, aby bol pin driveru PUL pripojený na digitálny výstup 11. Práca s registrami je najrýchlejší možný spôsob ovládania výstupných portov, čo je kľúčové pri generovaní veľmi krátkych impulzov. V prípade, že sa má krokovať, digitálny výstup sa nastaví na logickú "1" a po 2  $\mu$ s sa prepne späť na logickú "0". Následne sa na základe aktuálne nastaveného smeru inkrementuje alebo dekrementuje počítadlo krokov, ktoré využíva funkcia Timelaps.

### **4.3 Zhrnutie kapitoly 4 - riadiaci modul**

V kapitole **4.1** sa nachádza teoretický návrh riadiaceho modulu a stručný popis navrhovaných častí modulu. Počiatočný zámer bol využiť ako riadiaci modul kombináciu Arduino Nano + výkonový stupeň typu SD20RE + krokový motor SX23-1414.

V kapitole **4.2** je popísaná výsledná praktická realizácia riadiaceho modulu tvorená kombináciou Arduino Nano + výkonový stupeň TB6600 + krokový motor SX23-1414 + koncové mikropínače + Bluetooth modul HC06 + android zariadenie.

## 5 VÝPOČTY A SIMULÁCIA

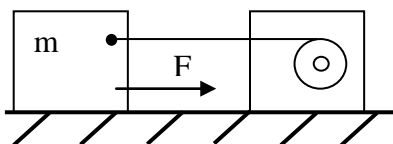
V tejto kapitole sa zameriam na potrebné výpočty, ktoré sú dôležité na overenie funkčnosti navrhnutej konštrukcie slideru. V prevej podkapitole overím ručným výpočtom požadovaný krútiaci moment motoru, ktorý je potrebný na plynulý chod slideru. V podkapitole simulácia sa budem zaoberať modelom krokového motora, zisťovaním parametrov krokového motora a simuláciou krokového motora pri rôznych napájacích napätiach a záťažach.

### 5.1 Výpočty

Na základe modelu verzie 3, ktorý je na **Obr. 6** uvediem výpočty. Pri výpočtoch som sa inšpiroval skriptami z predmetu "BPPA Prostředky průmyslové automatizace" [3] a webovou stránkou Pro pohony [9]. Výpočtom zistím potrebný moment motoru pri zvolenom počte krokov motora za sekundu a následne ho porovnam s údajom od výrobcu. Vo výpočte je zahrnutá rezerva výkonu krokového motora 200%, ktorá sa vo všeobecnosti pri návrhu krokového motora odporúča v rozmedzí 150-200%. Pomocou Solidworksu som po zadaní hustoty dielov zistil hmotnosti potrebné pre výpočty.

#### 5.1.1 Výpočet vodorovného pohybu

Pri vodorovnom pohybe slideru predpokladám využitie statívu a preto som uvažoval hmotnosť celej konštrukcie a fotoaparátu. Zjednodušený model slúžiaci pre výpočty je na **Obr. 21**.



**Obr. 21** Zjednodušený model slideru, vodorovný pohyb

Pri výpočte sa zanedbáva trecia zložka zaťažovacieho momentu, pretože nepoznám koeficient trenia. Predpokladám rozbeh z kľudu na zvolenú rýchlosť krokovania bez rampy so zotrvačnosťou  $J_z$ .

Zvolené hodnoty:

$m=7,5$ kg	hmotnosť telesa
$l=0,5$ m	vzdialenosť pohybu
$f=350$ s <sup>-1</sup>	počet krokov motora za sekundu
$r=0,0061$ m	polomer kladky (GT2 20 zubov)

Údaje z katalógu krokového motora:

$N=200$ s <sup>-1</sup>	počet krokov na otáčku
$J_R=0,03 \cdot 10^{-3}$ kg m <sup>2</sup>	moment zotrvačnosti rotoru
$M_P=1,2$ Nm	moment KM (350 krokov/s, sériové zapojenie, $U=48V$ , $I=2,1A$ )



Neznáme:	
$J_S = ? \text{ kg m}^2$	moment zotrvačnosti záťaže
$\omega = ? \text{ rad s}^{-1}$	uhlové zrýchlenie hriadeľa
$v = ? \text{ m s}^{-1}$	rýchlosť pohybu telesa
$t = ? \text{ s}$	čas, za ktorý prejde teleso danú dráhu
$a_Z = ? \text{ m s}^{-2}$	zaťažovacie zrýchlenie
$F_Z = ? \text{ N}$	zaťažovacia sila
$M_Z = ? \text{ Nm}$	zaťažovací moment
$M_S = ? \text{ Nm}$	zotrvačný moment
$M_H = ? \text{ Nm}$	hnací moment

Ako prvé je potrebné porovnať moment zotrvačnosti motora a záťaže. Podľa [9] má platiť vzťah  $J_R > J_S/10$ , ideálne by mala platiť rovnosť  $J_R = J_S$ .

$$J_S = m \cdot r^2 = 7,5 \cdot 0,0061^2 = 0,279 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^2 \quad (2)$$

$$J_S > J_R/10$$

$$0,03 \cdot 10^{-3} > 0,0279 \cdot 10^{-3}$$

Podmienka nerovnosti z rovnice (2) platí a preto môžeme pokračovať s výpočtom.

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{N} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 350}{200} = 11 \text{ rad s}^{-1} \quad (3)$$

$$v = \omega \cdot r = 11 \cdot 0,0061 = 0,0671 \text{ m s}^{-1} \quad (4)$$

$$t = \frac{l}{v} = \frac{0,5}{0,0671} = 7,5 \text{ s} \quad (5)$$

$$a_Z = \frac{v}{t} = \frac{0,0671}{7,5} = 0,00895 \text{ m s}^{-2} \quad (6)$$

$$F_Z = m \cdot a_Z = 7,5 \cdot 0,00895 = 0,0671 \text{ N} \quad (7)$$

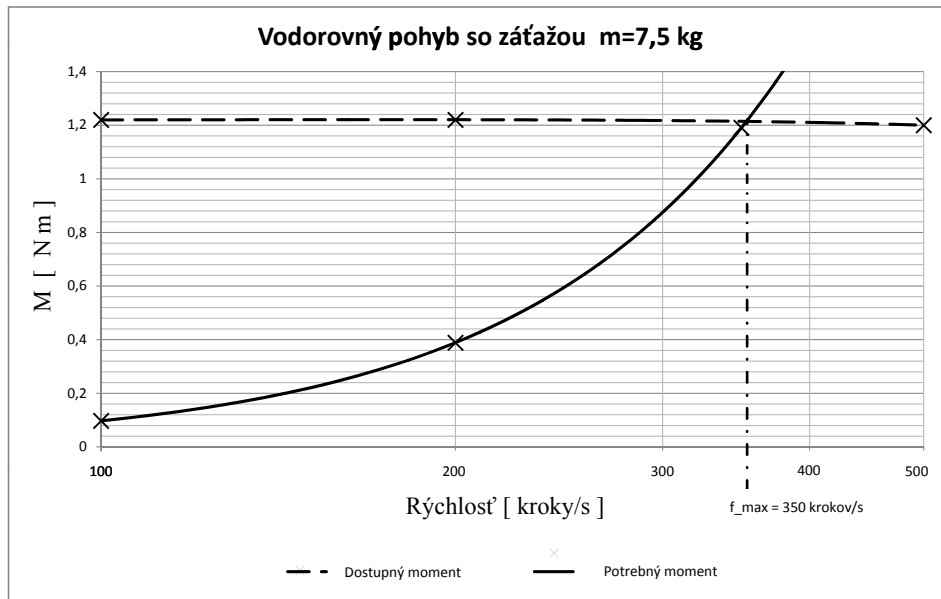
$$M_Z = F_Z \cdot r = 0,0671 \cdot 0,0061 = 0,41 \cdot 10^{-3} \text{ Nm} \quad (8)$$

$$M_S = (J_S + J_R) \frac{f^2 \cdot \pi}{N} = [(0,279 + 0,03) \cdot 10^{-3}] \cdot \frac{350^2 \cdot \pi}{200} = 0,595 \text{ Nm} \quad (9)$$

$$M_H = (M_S + M_Z) \cdot 2 = (0,595 + 0,00041) \cdot 2 = 1,19 \text{ Nm} \quad (10)$$

Z výpočtu vyplýva, že vypočítaný hnací moment je pri zvolenom pracovnom bode nepatrne nižší ako moment krokového motora odčítaný z momentovej charakteristiky uvádzanej výrobcom ( $M_H < M_P$ ) a teda vybraný motor je dostatočne výkonný pri vodorovnom pohybe.

Na základe hore uvedených výpočtov som za pomoci Excelu a momentovej charakteristiky udávanej výrobcom motora zostrojil graf požadovaného a dostupného výkonu motora, ktorý je na **Obr. 22**, pomocou ktorého som určil maximálnu rýchlosť krokovania motora pri vodorovnom pohybe so záťažou 7,5 kg.

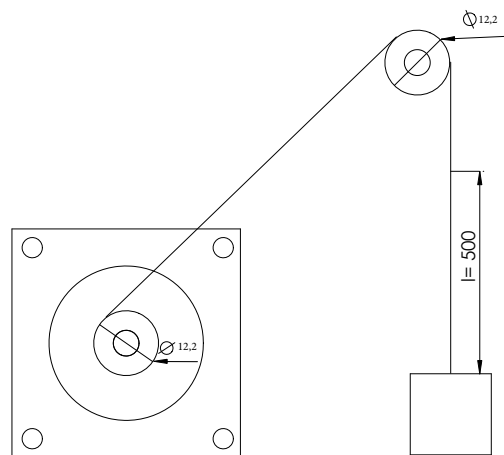


**Obr. 22 Momentová charakteristika vodorovného pohybu**

Pri vodorovnom pohybe a uchytení slideru na statív sa využije princíp konštrukcie a pracovná dĺžka je približne jeden meter. Pri tomto uchytení sa pohybuje celá konštrukcia slideru a preto je tento pohyb pomalý. Pri režime časozberu nám to je jedno, pretože sa pohybujeme s malým krokom. Pri režime filmovania bude na základe výpočtov trvať presun fotoaparátu z jednej strany slideru na druhú približne 7,5s.

### 5.1.2 Výpočet zvislého pohybu

Pri zvislom pohybe slideru som uvažoval iba hmotnosť fotoaparátu a rozdiel hmotností vozíkov. Hmotnosť ložísk, držiakov remeňov a skrutiek sa pri pohybe navzájom kompenzuje. Zjednodušený model slúžiaci pre výpočty je na **Obr. 23**.



**Obr. 23 Zjednodušený model slideru, zvislý pohyb**

Pri výpočte sa zanedbáva trecia zložka zaťažovacieho momentu, pretože nepoznám koeficient trenia. Predpokladám rozbeh z kl'udu na zvolenú rýchlosť krokovania bez rampy so zotrvačnosťou  $J_z$ . Nemeniace hodnoty sú dosadené z predchádzajúceho výpočtu.

Zvolené hodnoty:

$m=1,5 \text{ kg}$	hmotnosť telesa
$l=0,5 \text{ m}$	vzdialenosť pohybu
$f=350 \text{ s}^{-1}$	počet krokov motora za sekundu
$r=0,0061 \text{ m}$	polomer kladky (GT2 20 zubov)

Údaje z katalógu krokového motora:

$N=200 \text{ s}^{-1}$	počet krokov na otáčku
$J_R=0,03 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^2$	moment zotrvačnosti rotoru
$M_P=1,2 \text{ Nm}$	moment KM (350 krokov/s, sériové zapojenie, $U=48\text{V}$ , $I=2,1\text{A}$ )

Neznáme:

$J_S=? \text{ kg m}^2$	moment zotrvačnosti záťaže
$F_Z=? \text{ N}$	zaťažovacia sila
$F_G=? \text{ N}$	gravitačná sila
$M_Z=? \text{ Nm}$	zaťažovací moment
$M_S=? \text{ Nm}$	zotrvačný moment
$M_H=? \text{ Nm}$	hnací moment

Ako prvé je potrebné porovnať moment zotrvačnosti motora a záťaže. Podľa [9] má platiť vzťah  $J_R > J_S/10$ , ideálne by mala platiť rovnosť  $J_R = J_S$ .

$$J_S = m \cdot r^2 = 1,5 \cdot 0,0061^2 = 0,0558 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^2 \quad (11)$$
$$J_S > J_R/10$$
$$0,03 \cdot 10^{-3} > 0,00558 \cdot 10^{-3}$$

Nerovnosť platí a preto môžeme pokračovať s výpočtom. Zaťažovacie zrýchlenie  $a_Z=0,00895 \text{ m s}^{-2}$  je rovnaké ako v predchádzajúcom výpočte, preto jeho výpočet nebudem opakovať.

$$F_Z = m \cdot a_Z = 1,5 \cdot 0,00895 = 0,01342 \text{ N} \quad (12)$$

$$F_G = m \cdot g = 1,5 \cdot 9,81 = 14,715 \text{ N} \quad (13)$$

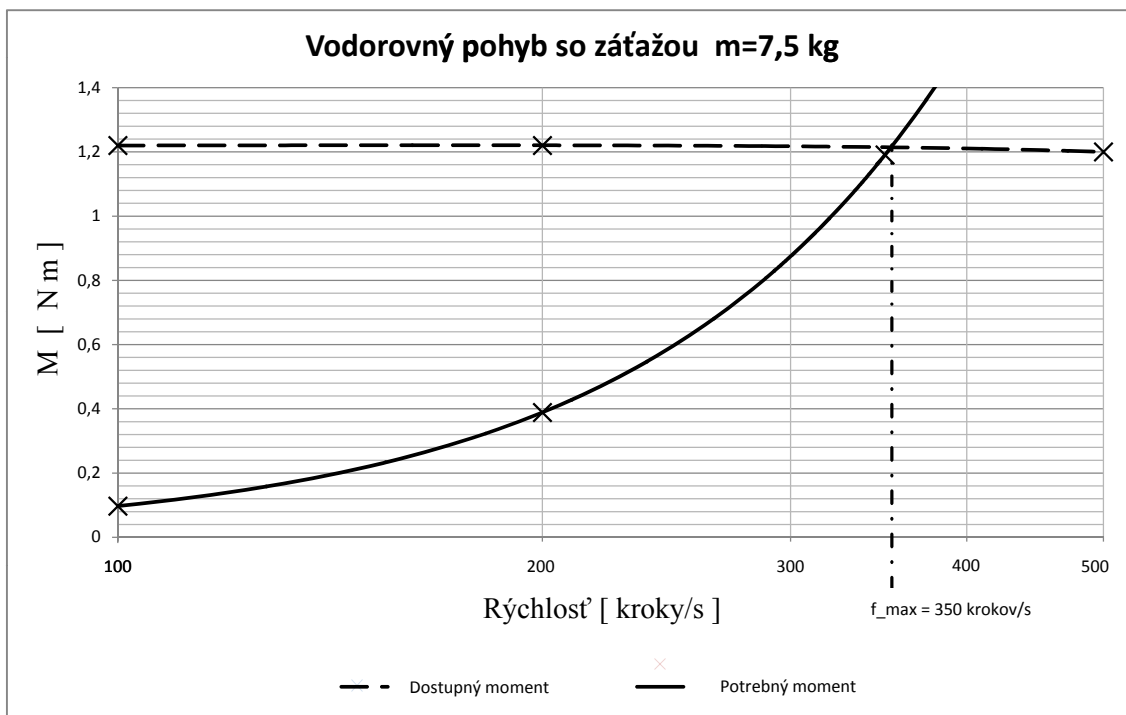
$$M_Z = (F_Z + F_G) \cdot r = (0,01342 + 14,715) \cdot 0,0061 = 0,08984 \text{ Nm} \quad (14)$$

$$M_S = (J_S + J_R) \frac{f^2 \cdot \pi}{N} = ([0,0558 + 0,03] \cdot 10^{-3}) \cdot \frac{350^2 \cdot 3,14}{200} = 0,1651 \text{ Nm} \quad (15)$$

$$M_H = (M_S + M_Z) \cdot 2 = (0,1651 + 0,08984) \cdot 2 = 0,51 \text{ Nm} \quad (16)$$

Z výpočtu vyplýva, že vypočítaný hnací moment  $M_H$  je pri zvolenom pracovnom bode oveľa nižší ako moment motora  $M_P$  odčítaný z momentovej charakteristiky uvádzanej výrobcom ( $M_H < M_P$ ), čo znamená že motor má dostatočný výkon.

Na základe hore uvedených výpočtov som za pomoci Excelu a momentovej charakteristiky udávanej výrobcom motoru zostrojil graf požadovaného a dostupného výkonu motoru, ktorý je na **Obr. 24**, pomocou ktorého som určil maximálnu rýchlosť krokovania motoru pri zvislom pohybe so záťažou 1,5 kg.



**Obr. 24 Momentová charakteristika zvislého pohybu**

Pri zvislom pohybe je záťaž značne nižšia a preto, ako vyplýva z výpočtov, je možné znížiť napájacie napätie alebo zvýšiť zvolenú hodnotu počtu krokov motora za sekundu.

**Tabuľka 1 Zhrnutie výpočtov**

Druh pohybu [-]	Záťaž [kg]	Čas [s]	Požadovaný moment [Nm]	Dostupný moment [Nm]	Vyhovel ?
Vodorovne	7,5	7,5	1,19	1,2	✓
Zvislo	1,5	7,5	0,51	1,2	✓

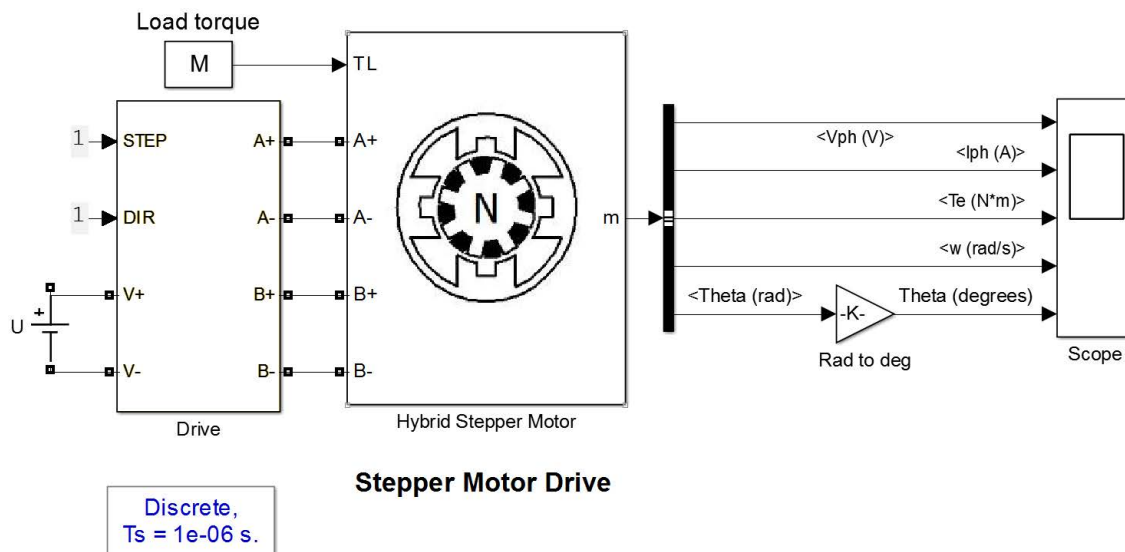
V **Tabuľka 1** sa nachádza zhrnutie hore uvedených výpočtov. V oboch zvolených pracovných bodoch je požadovaný moment menší ako dostupný a preto je výkon motora dostačujúci. V stĺpci čas je uvedený čas, za ktorý sa fotoaparát premiestni z jedného konca slideru na druhý.

## 5.2 Simulácia

Úlohou simulácie je overiť výkon zvoleného krokového motoru a tým preukázať teoretickú funkčnosť slideru. Pre simuláciu som sa rozhodol použiť Matlab R2013b, v ktorom sa nachádza kompletný model krokového motoru. Popis modelu je dostupný na stránkach Matlabu, z ktorých som čerpal dôležité informácie. [13]

### 5.2.1 Popis modelu

Na Obr. 25 sa nachádza bloková schéma požitého modelu, ktorý vznikol úpravou modelu od matlabu.

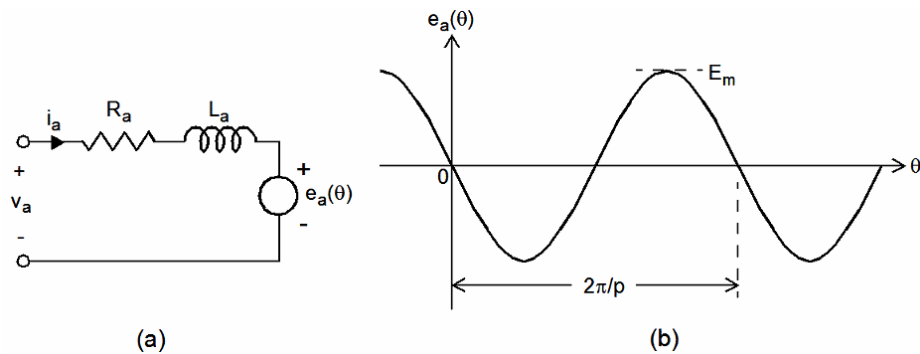


Obr. 25 Model krokového motoru

Blok krokového motoru (Hybrid Stepper Motor) implementuje všeobecný model, ktorý reprezentuje dve najpopulárnejšie skupiny krokových motorov :

- Krokové motory s variabilnou reluktanciou
- S permanentným magnetom alebo hybridný krokový motor

Model krokového motor sa skladá z elektrických a mechanických častí. Elektrická časť je reprezentovaná ekvivalentným obvodom, ktorého konfigurácia závisí od typu motoru. Ekvivalentné obvody boli zostavené za podmienky, že magnetický obvod je lineárny (bez nasýtenia) a vzájomná indukčnosť medzi fázami je zanedbateľná. Mechanická časť je reprezentovaná modelom stavového priestoru založeného na momente zotrvačnosti a viskózného koeficientu trenia.



**Obr. 26** Ekvivalentný obvod hybridného krokového motoru[13]

Ekvivalentný obvod pre jednu fázu hybridného krokového motoru je znázornený na **Obr. 26**, kde  $R_a$  a  $L_a$  reprezentujú odpor a indukčnosť fázového vinutia. Vzhľadom k veľkej hodnote vzduchovej medzery zavedenej magnetmi, môže byť indukčnosť vinutia hybridného krokového motoru považovaná za nezávislú na polohe rotora. Zdroj napätia  $e_a(\theta)$  predstavuje spätnú elektromotorickú silu (EMF) motoru, ktorá je sínusová funkcia polohy rotora  $\theta$ :

$$e_a(\theta) = -p * \psi_m * \sin(p * \theta) * d\theta/dt, \quad (17)$$

kde  $p$  je počet pólových dvojíc daný vzorcom  $p = 360 / (2 * m * sa)$ ,  $m$  = počet fáz motoru,  $sa$  = uhol jedného kroku [ $^\circ$ ] a  $\psi_m$  je maximálny magnetický tok motoru.

Elektromagnetický krútiaci moment produkovaný dvojfázovým hybridným krokovým motorom sa rovná súčtu krútiacich momentov v dôsledku interakcie fázových prúdov a magnetických tokov vytvorených magnetmi a aretačným krútiacim momentom, ktorý vyplýva z asymetrie rotora :

$$T_e = -p * \psi_m * i_a * \sin(p * \theta) - p * \psi_m * i_b * \sin(p * \theta - \pi/2) - T_{dm} * \sin(2 * p * \theta) \quad (18)$$

Fázy krokového motoru sú privedené na dva H-mostíky MOSFET PWM meniča (Driver) pripojeného na zdroj jednosmerného napätia "U". Fázové prúdy motoru sú nezávisle generované porovnaním meraných prúdov so svojimi referenciami. Pravouhlé napät'ové referencie sú generované pomocou amplitúdy prúdu a parametra "Stepping rate" [krok/s].

## 5.2.2 Nastavenie modelu

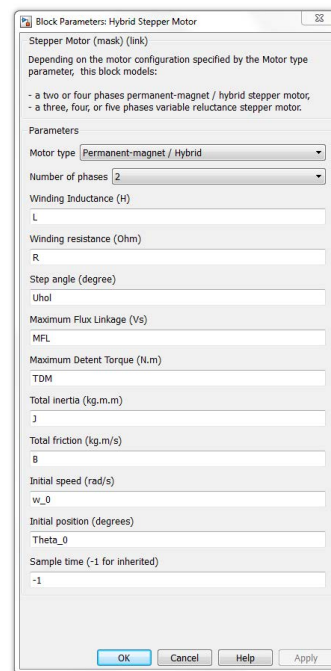
Do bloku "Hybrid Stepper Motor" sa pomocou vstupu TL privádza mechanický zaťažovací moment (v Nm). Výstupom bloku je premenná  $m$  obsahujúca vektor piatich signálov.

**Tabuľka 2 Popis vektoru signálov premennej m**

Signál	Definícia	Jednotka	Symbol
1	Fázové napätie	V	$V_{ph}$
2	Fázový prúd	A	$I_{pH}$
3	Elektromagnetický krútiaci moment	N.m	$T_e$
4	Otáčky rotora	rad / s	$w$
5	Poloha rotora	rad	Theta

V dialógovom okne bloku "Hybrid Stepper Motor" sa zadávajú nasledovné parametre :

Typ motora	[-]
Počet fáz	[-]
Indukčnosť vinutia	[H]
Odpor vinutia	[Ohm]
Uhol jedného kroku	[°]
Elektromag. indukcia magnetov	[V.s]
Maximálny prídržný moment	[N.m]
Celkový zotrvačný moment	[kg.m.m]
Koeficient trenia	[N.m.s]
Počiatočná uhlová rýchlosť	[rad/s]
Počiatočná pozícia	[°]
Periódna vzorkovania	[-]

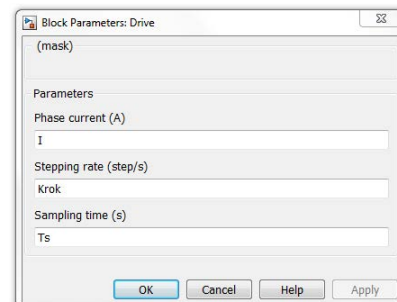


**Obr. 27 Dialógové okno Hybrid Stepper Motor**

Do bloku "Driver" je privedené napájacie napätie (U) a konštanty, pomocou ktorých je driver po celú dobu simulácie zopnutý a generuje signály potrebné pre otáčanie krokového motora jedným smerom.

V dialógovom okne bloku "Driver" sa zadávajú nasledovné parametre :

Prúd jednej fáze motora	[A]
Počet krokov za sekundu	[krok/s]
Periódna vzorkovania	[s]



**Obr. 28 Dialógové okno Driver**

### 5.2.3 Získanie hodnôt pre model

Parametre typ motora, počet fáz, indukčnosť vinutia, odpor vinutia a uhol jedného kroku udáva výrobca v katalógu [7].

Parameter elektromagnetická indukcia magnetov som určil experimentálne za pomoci návodu uvedeného na už zmienenej stránke od Matlabu. [13] Postup experimentu bol nasledovný. Hriadeľ motoru som pomocou druhého krokového motora roztočil na 60 RPM = 1 ot./s a pomocou voltmetru som meral generované striedavé napätie  $E_m$  jednej cievky. Pomocou upraveného vzorca :

$$\Psi_m = E_m * m * s / (N * \pi * 6) = 15,5 * 2 * 1,8 / (60 * 3,14 * 6) = \mathbf{0,0493 \text{ V.s}}$$
 (19)

kde  $E_m$  = generované napätie [V],  $m$  = počet fáz motora,  $s$  = uhol kroku motora [°],  $N$  = rýchlosť otáčania [ot./min], som vypočítal požadovaný parameter elektromagnetická indukcia magnetov  $\Psi_m = \mathbf{0,0493 \text{ V.s}}$ .

Maximálny prídržný moment som určil taktiež experimentálne a to nasledovne. Krokový motor som nenapájal žiadnym napätím. Na kladu známych rozmerov pripevnenú k hriadeľu motora som voľne prevesil remeň. Jeden koniec remeňa bol nezaťažený a na druhý koniec remeňa som postupne pridával závažie. Motor bol schopný udržať maximálne 750g ťažké závažie na kladke s polomerom 6,1 mm. Z týchto hodnôt som dopočítal prídržný moment motora :

$$M_h = F * r = m * g * r = 0,75 * 9,81 * 0,0061 \doteq 0,045 \text{ N.m}$$
 (20)

Celkový zotrvačný moment  $J$  sa musí vypočítať pre každú záťaž a zvolenú rýchlosť pohybu individuálne. Tieto hodnoty som čerpal z výpočtov uvedených v kapitole 5.1.

Vo výpočtoch koeficient trenia zanedbávam, pretože uvažujem pre krokový motor až 200% rezervu potrebného momentu. V simulácii by nulová hodnota koeficientu trenia spôsobovala chybu a príliš malá hodnota trenia má za následok veľmi pomalé ustálenie prechodových dejom pri zmene polohy hriadeľa o jeden krok. Z toho dôvodu som koeficient trenia zvolil  $B=0.05 \text{ N.m.s}$ , pri ktorom je útlm kmitania grafu polohy zrovnateľný s grafom uvedeným na stránkach Matlabu. [13]

### 5.2.4 Príprava simulácie

Na spustenie simulácie som napísal skript, ktorý na začiatku nedefinuje potrebné parametre motora a podmienky simulácie. Následne sa vykoná simulácia a výsledné grafy sa uložia do "Workspace-u" ako štruktúra z časom pod názvom VIX. Z tejto premennej sa následne vypočítavajú priemerné hodnoty, ktoré sa automaticky vpisujú do názvu grafu a vykresľujú sa grafy. V skripte sú zadefinované celkovo 3 simulácie s rôznymi parametrami. V prílohe E sa pod názvom "Skript.m" nachádza zdrojový kód, pomocou ktorého som generoval priebehy uvedené v prílohe C. Pre správnu funkciu je samozrejme potrebný simulačný súbor, ktorý je v prílohe E pod názvom "stepper.slx".



### 5.2.5 Výsledky simulácie

V prílohe C na **Obr. 33-C** sa nachádzajú ideálne priebehy napätí, prúdov, momentu, uhľovej rýchlosti a natočenia hriadeľa krokového motora pri nulovom zaťažovacom momente a parametroch simulácie uvedených v názve grafu. Priebeh napätia má skrátenu časovú os, aby bola viditeľná PWM regulácia napätia. Na začiatku grafov sú prechodové deje, ktoré som zámerne nevykresľoval. Týmto grafom demonštrujem správne určenie všetkých parametrov môjho krokového motora, čo usudzujem na základe podobnosti so vzorovými grafmi uvedených na stránkach Matlabu. [13]

V prílohe C na **Obr. 34-C** sa nachádzajú priebehy, ktoré potvrdzujú že motor má pri zaťažovacom momente 1,2 Nm a parametroch simulácie zodpovedajúcich vodorovnému pohybu popísanému v kapitole 5.1.1 dostatočný výkon a nedochádza ku strate kroku. Priemerný moment hriadeľa má hodnotu 1,3Nm. Táto odchýlka je spôsobená prechodnými dejmi na začiatku grafu, ktoré som zámerne nevykreslil.

V prílohe C na **Obr. 35-C** sa nachádzajú priebehy, ktoré simulujú chod motoru pri zníženej záťaži (napríklad slider upevnený na dvoch statívoch alebo položený na zemi) a zníženom napájanom napätí na 12V, ktoré sa predpokladá pri napájaní z batérie. Z grafov vyplýva, že motor má dostatočný výkon a nedochádza ku strate kroku.

## 6 REALIZÁCIA SLIDERU

V prílohe **D** sa nachádzajú podklady na výrobu slideru. Železný materiál som zakúpil vo firme Feromat Brno s.r.o. a vo firme ALMS spol. s r.o. som zakúpil zliatinu hliníku.

Samotná výroba potrebných dielov prebehla na FSI v Brne. Za pomoci Milana Rusiňáka sme narezali materiál na potrebné rozmery a niektoré jednoduché obrábacie operácie sme urobili ručne. Zložitejšie operácie sa vyrobili pomocou programovateľnej CNC frézy. Všetky plastové diely (kryt pre arduino a spojky remeňa) mi vytlačil na školskej 3D tlačiarňi Ing. František Burian, Ph.D. V prílohe **E** sa nachádza fotka testovacej verzie slideru.

### 6.1 Testovanie

Po zabezpečení všetkých potrebných dielov som zostavil kompletnú konštrukciu slideru. Ako to býva zvykom, nastali prvé komplikácie. Spojenie slideru a statívu bolo iba pomocou jednej 3/8 UNC skrutky, ktorá vyčnievala zo statívu. K tejto skrutke sa pomocou dvoch zvarovaných matíc pripevní skrutka s rovnakým závitom, ktorú som zakúpil vo firme Fabory, pobočka Brno.

Toto spojenie bolo veľmi nestabilné a spôsobovalo nakláňanie celého slideru. Myslel som si, že hlavným problémom bolo nepresné zvarenie dvojice UNC matíc. Preto som strávil niekoľko dní hľadaním dlhej UNC matice. Tento typ matice sa predáva v jedinej firme, ktorú som už zmienil, ktorou je firma Fabory. Túto maticu majú ale iba na centrálnom sklade v Holandsku a musel by som platiť aj dopravu, čo znamená v o finále približne 300 Kč za jednu špeciálnu maticu. Druhou alternatívou bola objednávka zo zahraničia UK alebo USA. Pre zaujímavosť môžem uviesť cenovú ponuku firmy Fastenal. Cena matice bola 1,19 USD a poštovné 54.74 USD. Ďalšou možnosťou bolo zakúpiť alebo zapožičať UNC závitník a maticu si vyrobiť. Pomocou emailu som oslovil asi 30 firiem zaoberajúcich sa strojárskou výrobou a dve firmy vlastnili potrebný závitník. Po niekoľkých emailoch, z mne doteraz neznámych dôvodov, mi prestali obe firmy odpisovať. Poslednou možnosťou bolo zakúpiť tento špeciálny závitník a maticu si vyrobiť sám.

Nakoniec ma napadlo ešte jedno riešenie, ktoré sa ukázalo ako najjednoduchšie a v končenom dôsledku veľmi účinné. Medzi vozík statívu a statív som vložil špeciálne navrhnutú masívnu podložku, ktorá zabezpečovala výborné a stabilné spojenie vozíka statívu a samotného statívu. Táto podložka je kváder s rozmermi približne 4\*3\*2 cm s dierou o priemer 20mm umiestnenou uprostred najväčšej strany kvádra. V diere sa nachádza už zmienená voľne uložená dvojica zvarovaných matíc, ktorá slúži na spojenie statívu a slideru.

Po úspešnom vyriešení nestabilného spojenia statívu so sliderom som narazil na ďalší problém. V návrhu slideru bol u oboch vozíkov využitý pár lineárnych ložísk. Po prvých testoch som zistil, že dvojica ložísk je nedostačujúca a preto som u každého vozíku využil 4 lineárne ložiská, čo malo za následok zvýšenie stability celej konštrukcie. Slider je po úvodných testoch plne funkčný a splňuje všetky očakávania.

Slider som napájal napätím 12V. V odbrzdenom stave je celkový odber prúdu slideru 50 mA. Pri maximálnom vytížení slideru (záťaž cca 7,5 kg, rýchlosť motora 350 krokov/s) je jeho odber prúdu 300 mA. Pri nečinnosti slideru je odber prúdu 500mA.

## 7 ZÁVER

Cieľom bakalárskej práce bolo navrhnuť lineárnu jednotku, riadiaci modul, vytvoriť model a celú prácu podložiť výpočtami. Následne som lineárnu jednotku skonštruoval a otestoval. Stanovené ciele sa mi podarilo splniť.

V teoretickom úvode som stručne objasnil princípy fotografovania a zdôvodnil výber tejto semestrálnej práce. Zaoberal som sa dostupnými druhmi sliderov a ich konštrukciou. Rozbor vyrábaných druhov lineárnych vedení a jednotiek ma len upevnil v predbežnom výbere lineárneho vedenia zloženého z lineárnych ložísk a kovových tyčí. Ako pohon som zvolil krokový motor, popísal som jeho vlastnosti a spôsob ovládania. Z používaných pohonov som vybral najpoužívanejšie a ich porovnaním sa moja voľba utužila.

V kapitole **3 NÁVRH LINEÁRNEJ JEDNOTKY** som popísal postup a priebeh návrhu lineárnej jednotky v prostredí programu SolidWorks2014. V jednotlivých podkapitolách som zhodnotil vývoj modelu a 3. verziu modelu som podrobne popísal a vysvetlil na ňom princíp činnosti celej lineárnej jednotky. U každého dielu som sa snažil popísať jeho význam, umiestnenie a charakteristické vlastnosti.

V kapitole **4 RIADIACI MODUL** som navrhol riadiacu jednotku zloženú z kombinácie mikrokontroléru arduino Nano, výkonového stupňa TB6600, krokového motoru SX23-1414, koncových mikrospínačov, Bluetooth modulu HC06 a android zariadenia.

V kapitole **5 VÝPOČTY A SIMULÁCIA** som na základe modelu verzia 3 spočítal potrebný krútiaci moment krokového motoru a porovnával ho s predbežne vybraným krokovým motorom. Výsledky výpočtov sú zhrnuté v **Tabuľka 1, Obr. 22 a Obr. 24**. Výsledky simulácie sú zhrnuté v podkapitole **5.2.5 Výsledky simulácie**.

Slider sa bude dať položiť na zem, poprípade upevniť na dva statívy. Pre tento pohyb nie je nutný výpočet, lebo bude menej náročný ako zvislý pohyb.

V kapitole **6 REALIZÁCIA SLIDERU** je popísaný popis realizácie slideru a problémy s ňou spojenými. Slider je po úvodných testoch plne funkčný a splňuje všetky očakávania.

Ako možné vylepšenie slideru sa ponúka myšlienka využitia drahšieho a kvalitnejšieho lineárneho vedenia alebo nahradenie ťažkých kovových dielov 3D výtlačkami.

## 8 LITERATÚRA

- [1] HENNLICH. Katalógy Hennlich hennlich.cz [online] © 2016 HENNLICH [cit. 2015-09-29] Dostupné z URL: <https://www.hennlich.cz/produkty/linearni-vedeni-valiva-motory-a-pohony-82.html>
- [2] KVES Krokové motory kves.utc.sk [online] [cit. 2016-01-04] Dostupné z URL: <http://www.kves.utc.sk/kvesnew/dokumenty/%C5%A0ES/Krokov%C3%A9%20motory/Krokove%20motory.pdf>
- [3] Skriptá predmetu BPPA Prostředky průmyslové automatizace VUT Brno [online] [cit. 2016-01-04] Dostupné z URL: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=95930](https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=95930)
- [4] JRC Czech a.s. 3D tlač [online] [cit. 2016-01-04] Dostupné z URL: [http://www.jrc.cz/kategorie\\_3d\\_tisk](http://www.jrc.cz/kategorie_3d_tisk)
- [5] VIDEOFAN.CZ Edelkrone Slider plus videofan.cz [online] [cit. 2016-01-04] Dostupné z URL: <http://edelkrone.videofan.cz/slider-plus/>
- [6] Katalóg výrobcu ložiska SCS10UU [online] [cit. 2016-01-04] Dostupné z URL: <http://g01.a.alicdn.com/kf/HTB1twYuHVXXXXcDXVXXq6xXFXXI/Free-Shipping-4x-SC10UU-SCS10UU-Linear-motion-ball-bearings-slide-block-bushing-for-10mm-linear-shaft.jpg>
- [7] MICROCON Kompletní katalog produktů, verze 9/2015 [online] © Microcon [cit. 2016-01-04] Dostupné z URL: [http://www.microcon.cz/pdf2015/katalog\\_092015.pdf](http://www.microcon.cz/pdf2015/katalog_092015.pdf)
- [8] MICROCON Nejčastější dotazy [online] © Microcon [cit. 2016-01-04] Dostupné z URL: <http://www.microcon.cz/dotazy.asp>
- [9] FLOOWIE Pro elektrické stroje a pohony [online] © floowie.com [cit. 2016-01-04] Dostupné z URL: <http://www.floowie.com/cs/cti/pro-pohony-1-2012/#/strana/16/zvacseni/100/>
- [10] AliExpress [online] © 2010-2015 AliExpress.com [cit. 2016-05-05] Dostupné z URL: <http://www.aliexpress.com/item/CNC-Single-Axis-TB6600-0-2-5A-Two-Phase-Hybrid-Stepper-Motor-Driver-Controller-Worldwide-Store/32251528545.html>

- [11] TOSHIBA TB6600HG toshiba.semicon-storage.com [online]  
Copyright © 1995-2016 TOSHIBA CORPORATION [cit. 2016-05-05] Dostupné z  
URL: <http://toshiba.semicon-storage.com/info/docget.jsp?did=14683&prodName=TB6600HG>
- [12] Arduino Nano arduino.cc [online] ©2016 Arduino [cit. 2016-05-05]  
Dostupné z URL: <http://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardNano>
- [13] MathWorks Stepper Motor mathworks.com [online]  
© 1994-2016 The MathWorks, Inc. [cit. 2016-05-05] Dostupné z URL:  
<http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/steppermotor.html>

# Zoznam príloh

Príloha A: Android aplikácia

Príloha B: Schéma zapojenia arduina

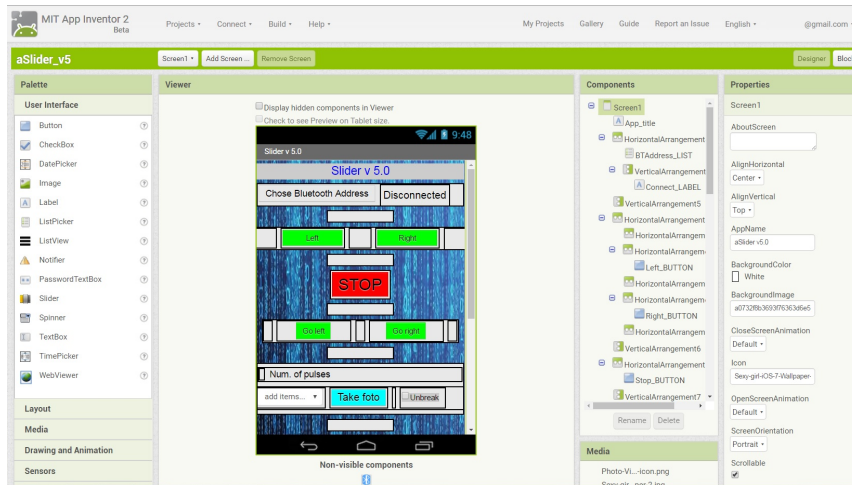
Príloha C: Odsimulované grafy

Príloha D: Výrobná dokumentácia

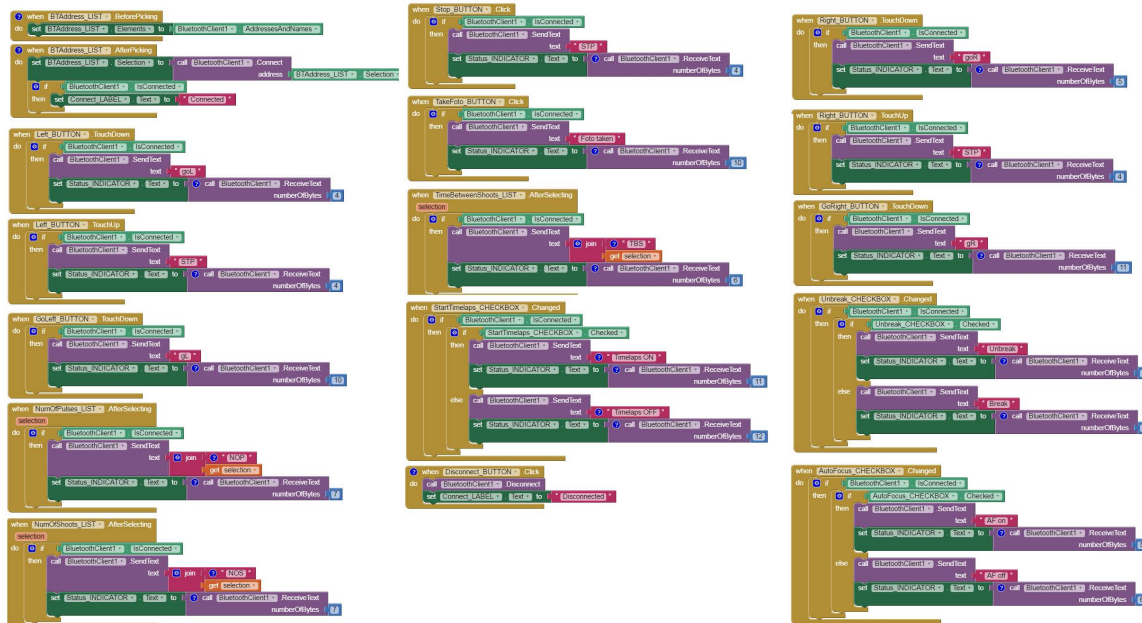
Príloha E: CD

# 9 PRÍLOHY

## Príloha A: Android aplikácia



Obr. 29-A Náhľad vývojového prostredia

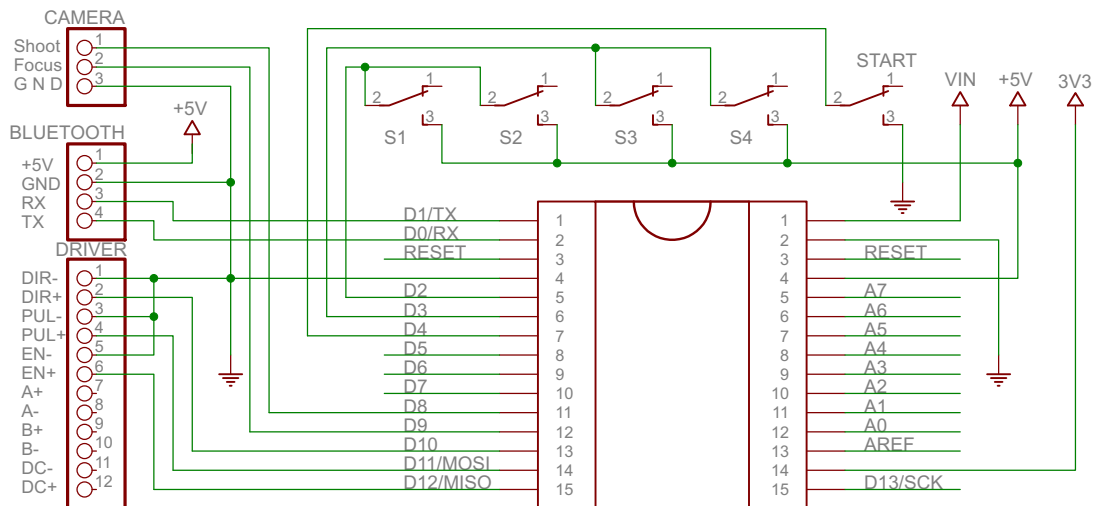


Obr. 30-A Výsledný program



Obr. 31-A Ukážka výslednej aplikácie

## Príloha B: Schéma zapojenia arduina

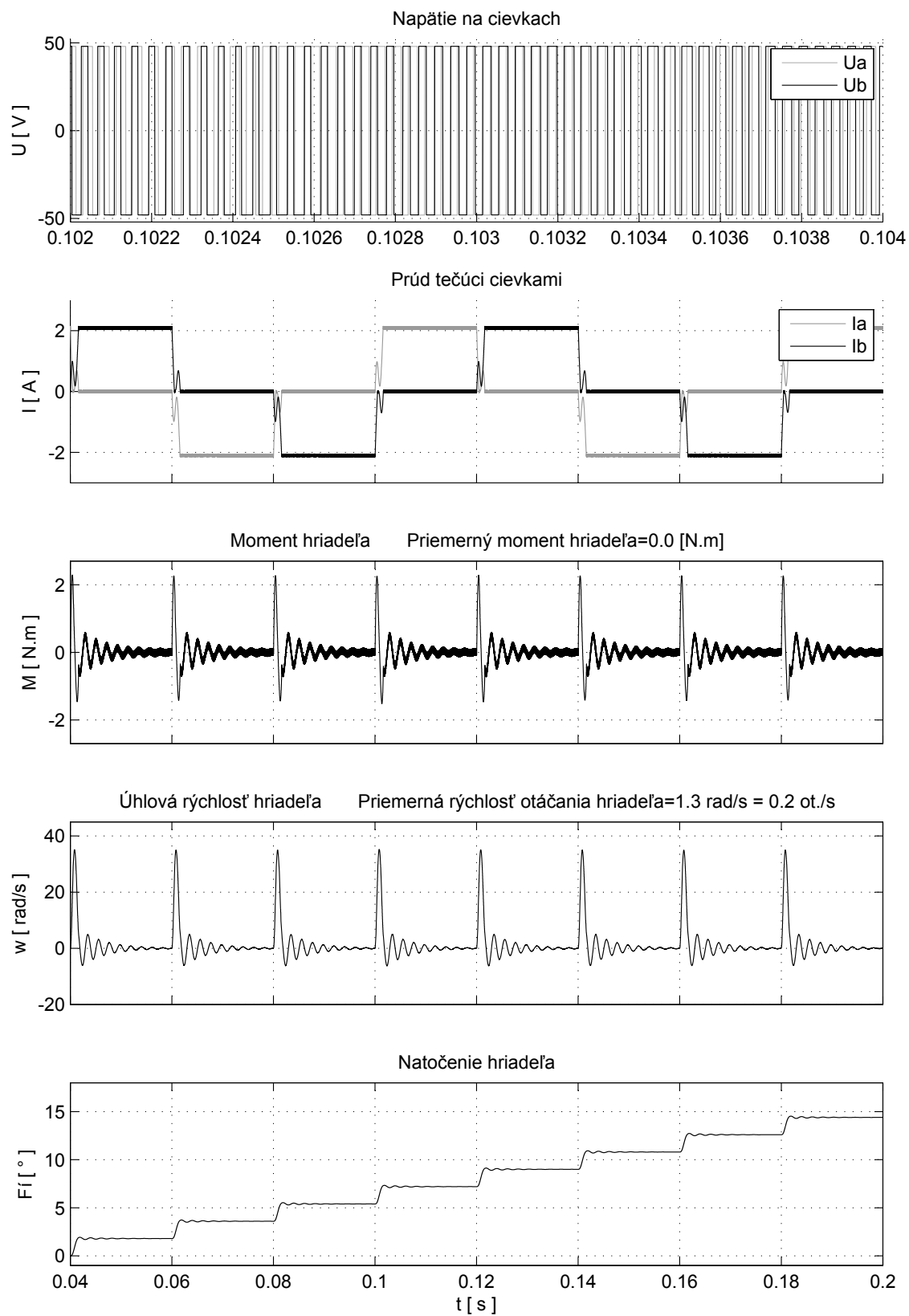


Obr. 32-B Schéma zapojenia arduina



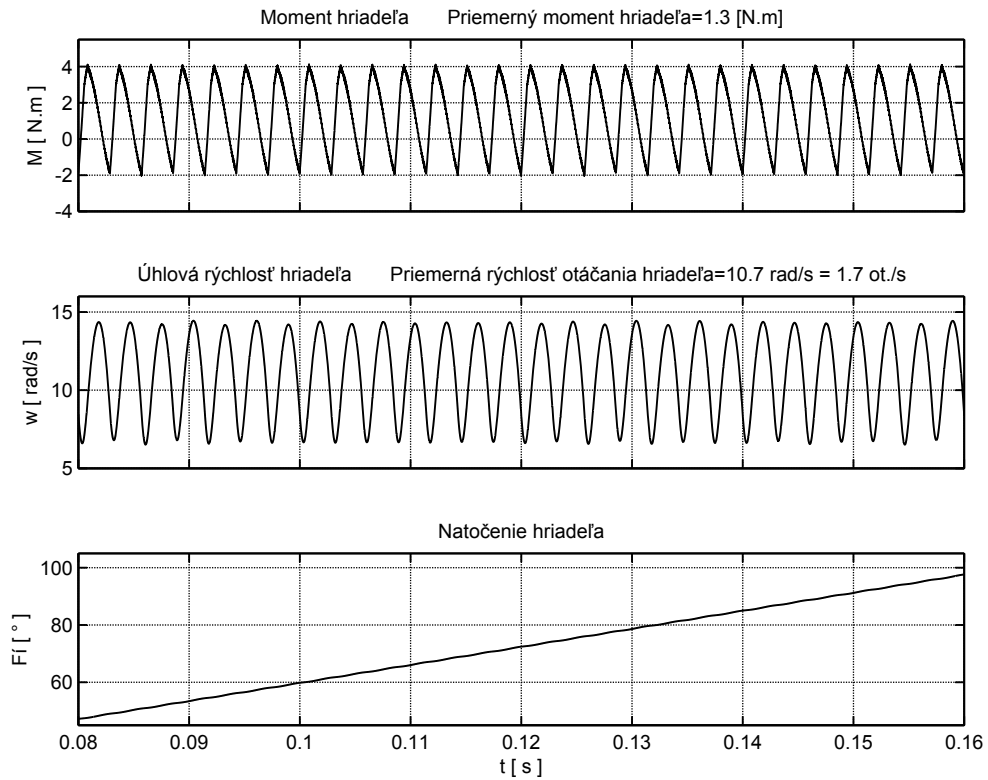
## Príloha C: Odsimulované grafy

$U=48\text{ V}$ ;  $I=2.1\text{ A}$ ; Krok=50 krokov/s;  $M=0.0\text{ N.m}$



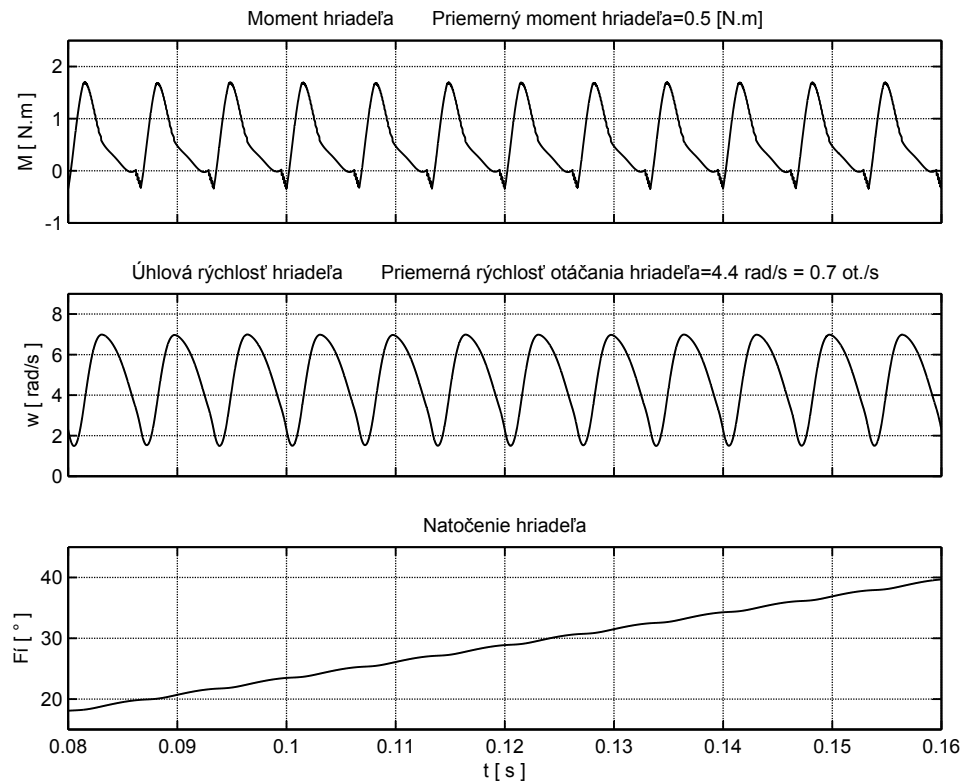
Obr. 33-C Ideálne priebehy

U=48 V; I=2.1 A; Krok=350 krokov/s; M=1.2 N.m



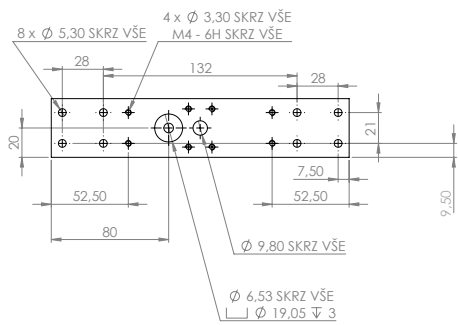
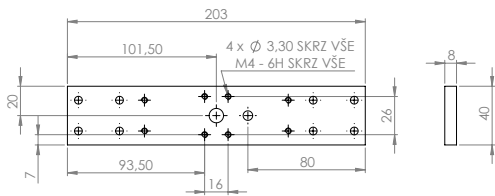
**Obr. 34-C Simulácia pri vodorovnom pohybe**

U=12 V; I=2.1 A; Krok=150 krokov/s; M=0.5 N.m

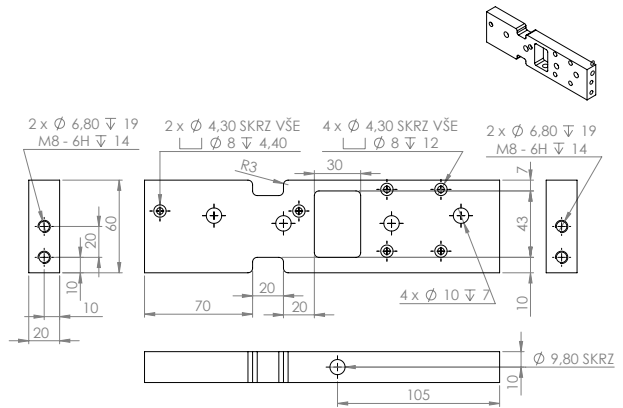


**Obr. 35-C Simulácia nižšieho napájacieho napätia**

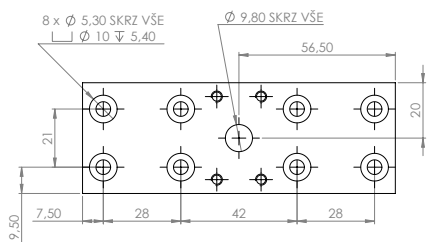
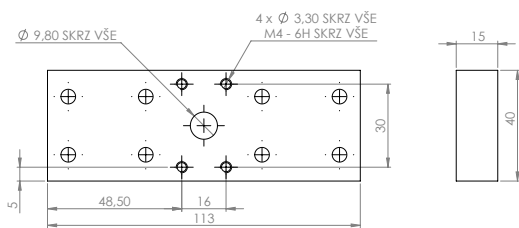
# Príloha D: Výrobná dokumentácia



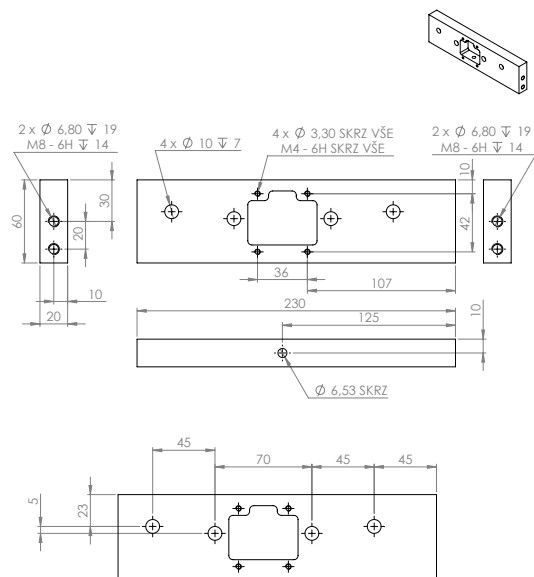
Obr. 36-D Vozík fotoaparátu



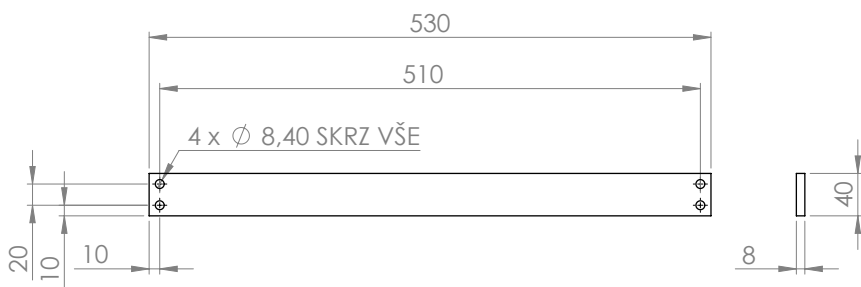
Obr. 38-D Ľavý bok



Obr. 37-D Vozík statívu



Obr. 39-D Pravý bok



Obr. 40-D Spevňovací profil

## **Príloha E: CD**

- PDF verzia bakalárskej práce
- Program v Arduine súbor "Slider\_v5.ino"
- Skript v Matlabe súbor "Skript.m"
- Simulačný súbor "stepper.slx"
- Android aplikácia "Slider\_v5.apk"
- Knižnica "TimerOne.h"
- Knižnica "TimerOne.cpp"
- Fotka slideru "Testovacia verzia slideru.jpg"