

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická  
Katedra mikroelektroniky



Bakalářská práce

Měřicí systém pro měření momentu síly BLDC  
motorků s využitím optických metod

Autor: Petra Salfická

**Vedoucí práce:** Ing. Lubor Jirásek, CSc.

2019

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Salfická** Jméno: **Petra** Osobní číslo: **457143**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**  
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektronika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Měřicí systém pro měření momentu síly BLDC motorků s využitím optických metod**

Název bakalářské práce anglicky:

**The BLDC Motor Torque Measurement System Using Optical Methods**

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte dostupnou literaturu týkající se bezkartáčových třífázových motorků i s ohledem na rekuperaci energie.
2. Na základě 1) vyberte vhodný motorek a navrhnete a realizujete měřicí soustavu umožňující měřit moment síly motoru a velikost získané energie v režimu rekuperace v závislosti na otáčkách soustavy.
3. Proveďte ověřovací měření.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky.
5. Zařízení zůstane v majetku zadávajícího pracoviště.
6. Publikování výsledků dosažených v této práci je možné pouze se svolením zadavatele.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Microchip. Brushless DC Motor Control Using PIC18FXX31 MCUs. AN899, leden 2004. ([http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS\\_GET\\_PAGE&nodId=1824&appnote=en012145](http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodId=1824&appnote=en012145))
- [2] Brushless DC Motor Fundamentals. AN885. 2003
- [3] [www.infineon.com](http://www.infineon.com) - aplikační poznámky^
- [4] HEXFETs Designers Manual HDM-1, Vol. 1 a 2. IRF.
- [5] Wünsche, D.: Diplomová práce. ČVUT FEL, Praha 2015.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Lubor Jirásek, CSc., katedra mikroelektroniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **12.02.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **08.01.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Lubor Jirásek, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studentky

## Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

V Praze, 8. ledna 2019

Podpis:



## Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Luboru Jiráskovi, CSc. za jeho ochotu a cenné rady, připomínky a metodické vedení práce. Také bych chtěla poděkovat celé rodině, která mě vždy podporovala.



## Abstrakt

Práce se zabývá měřením kroutícího momentu bezkartáčových motorů známých pod zkratkou BLDC. Již v úvodu je popsána konstrukce stroje a princip jeho činnosti. Vlastnosti zmíněných motorů jsou porovnány s vlastnostmi stejnosměrných motorů. Tato práce je založena na principu torzní pružiny. Pozornost je také věnována optickým prvkům, které společně s mikrokontrolérem zaznamenávají data. Druhá část práce je věnována praktickému návrhu měřicí soustavy. V této části jsou postupně popsány vybrané součástky. Na závěr práce je ukázána realizace měření BLDC motoru.

**Klíčová slova:** elektromotory, bezkartáčový stejnosměrný motor, BLDC, točivý moment, světelná závora, laserová dioda, fototranzistor, ATmega328, torzní pružina

## Abstract

This bachelor's thesis focuses on torque measurement of BLDC motors. In the beginning the construction and principle of the BLDC motor is described. The features of these motors are compared to DC motors. This thesis is based on torsion spring principle. Special attention is paid to optical components. These components together with a microcontroller record measuring data. The second part of this thesis is dedicated to the practical design of measuring equipment; this part includes information about selected components. In the conclusion the implementation of measuring the BLDC motor is presented.

**Keywords:** electric motors, brushless DC motor, BLDC, torque, light barrier, laser, phototransistor, ATmega328, torsion spring





# Osnova

Prohlášení .....	3
Poděkování.....	5
Abstrakt .....	7
Abstract .....	7
Osnova.....	9
<b>Seznam použitých symbolů .....</b>	<b>11</b>
<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>12</b>
Seznam tabulek .....	13
<b>1 Úvod .....</b>	<b>14</b>
<b>2 Elektrické motory .....</b>	<b>15</b>
2.1 DC motor .....	15
2.1.1 Konstrukce .....	15
2.1.2 Princip .....	16
2.1.3 Dynamo .....	17
2.2 BLDC motor.....	17
2.2.1 Konstrukce .....	17
2.2.2 Princip .....	20
2.2.3 <b>Základní rovnice .....</b>	<b>22</b>
2.2.4 Charakteristika moment - <b>otáčky</b> .....	<b>22</b>
2.2.5 <b>Elektrická a mechanická rychlost</b> .....	<b>23</b>
2.2.6 <b>Momentově proudová charakteristika .....</b>	<b>23</b>
2.3 <b>Stanovení momentové konstanty .....</b>	<b>24</b>
2.4 <b>Porovnání BLDC a DC motorů.....</b>	<b>25</b>
2.5 Rekuperace .....	25
<b>3 Šroubovitě pružiny válcové zkrutné z drátů .....</b>	<b>26</b>
<b>4 Lagrangeovy rovnice II. druhu.....</b>	<b>28</b>
4.1.1 <b>Sestavení pohybových rovnic systému .....</b>	<b>28</b>
<b>5 Snímací soustava .....</b>	<b>30</b>
5.1 <b>Světelná závora .....</b>	<b>30</b>
5.1.1 <b>Laserová dioda .....</b>	<b>30</b>
5.1.2 <b>Fototranzistor.....</b>	<b>31</b>
5.2 <b>Mikrokontrolér ATmega .....</b>	<b>32</b>
<b>6 Návrh.....</b>	<b>34</b>
6.1 <b>Použité součástky .....</b>	<b>35</b>
6.1.1 <b>Motory .....</b>	<b>35</b>
6.1.2 <b>Elektronická jednotka.....</b>	<b>36</b>
6.1.3 <b>Pružiny .....</b>	<b>36</b>
6.1.4 <b>Vysílač.....</b>	<b>37</b>

6.1.5	Přijímač .....	37
6.1.6	Arduino NANO.....	38
7	Měření .....	39
7.1	Režim rekuperace.....	43
8	Závěr .....	46
9	Reference.....	47
10	Příloha.....	50
10.1	Přijímač .....	50
10.1.1	Schéma .....	50
10.1.2	DPS.....	50
10.2	Vysílač.....	51
10.2.1	Schéma .....	51
10.2.2	DPS.....	51
10.3	Třífázový usměrňovač .....	52
10.3.1	Schéma .....	52
10.3.2	DPS.....	52
10.4	Pracoviště.....	53
10.5	Kotouč .....	54

## Seznam použitých symbolů

	Wb	celkový tok
	T	magnetická indukce
$\sigma$	MPa	napětí materiálu pružiny v ohybu
	rad	úhel natočení
m	kg	hmotnost kotouče
	V	indukované napětí
$E_k$	J	kinetická energie
E	Mpa	modul pružnosti v tahu
	Nm	moment
$I$	kg.m <sup>2</sup>	momentem setrvačnosti
	Nm/A	momentová konstanta
	$\Omega$	odpor vinutí
n	-	počet činných závitů
	-	počet pólpárů
R	m	poloměr kotouče
	A	proud dvěma fázemi
	A	proud ve vodiči
	A	proud vinutím
d	m	průměr drátu
R	m	rameno síly
	Nm	rozběhový moment
p	mm	rozteč mezi závity
	rad/s	rychlost naprázdno
	Vs/rad	rychlostní konstanta
	N	síla
D	m	střední průměr pružiny
	V	svorkové napětí
k	Nmm/rad	tuhost pružiny

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Příčný řez DC motorem [3], upraveno autorem .....	15
Obrázek 2: Princip DC motoru [5] .....	16
Obrázek 3: Konstrukce BLDC motoru typu a) inrunner, b) outrunner [9], upraveno autorem	
Obrázek 4: Porovnání výsledných momentů [22].....	19
Obrázek 5: Příčný řez rotorem, [11] upraveno autorem .....	19
Obrázek 6: Zjednodušené zapojení [14], upraveno autorem .....	20
Obrázek 7: BLDC motor a Hallovy sondy [6], upraveno autorem.....	21
Obrázek 8: Výstup Hallovy sond a zpětné elektromotorické napětí pro čtyřpólový motor [6], upraveno autorem.....	21
Obrázek 9: Charakteristika moment - proud ideálního bezkartáčového DC motoru [17], upraveno autorem .....	23
Obrázek 10: Charakteristika proud - moment ideálního bezkartáčového DC motoru [19]	24
Obrázek 11: Ohnutí šroubových pružin válcových zkrutných [24] .....	26
Obrázek 12: Konstrukce šroubovitě pružiny válcové zkrutné.....	27
Obrázek 13: Motory spojené torzní tyčí, vytvořeno autorem .....	28
Obrázek 14: Blokové schéma snímací soustavy .....	30
Obrázek 15: Watt-Ampérová charakteristika pro laserovou diodu [30].....	31
Obrázek 16: Zapojení fototranzistorů [29] .....	32
Obrázek 17: Harvardská architektura počítače [31].....	32
Obrázek 18: Blokové schéma konstrukce .....	34
Obrázek 19: Konstrukce měřících kotoučů.....	35
Obrázek 20: Zkrutná pružina [35] .....	37

## Seznam tabulek

<b>Tabulka 1: Porovnání BLDC a DC motorů [6], upraveno autorem .....</b>	<b>25</b>
Tabulka 2: Specifikace elektromotoru [33] .....	35
<b>Tabulka 3: Specifikace regulátoru otáček [39].....</b>	<b>36</b>
<b>Tabulka 4: Specifikace pružin [35].....</b>	<b>36</b>
<b>Tabulka 5: Specifikace laserové diody F-LASER 5 mW [36].....</b>	<b>37</b>
Tabulka 6: Specifikace fototranzistoru SFH 309 [37].....	37

# 1 Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá specifickým typem stejnosměrných motorů, a to bezkartáčovým stejnosměrným motorem (anglicky Brushless Direct Current Motor, zkráceně BLDC). Bezkartáčový motor se řadí mezi nejmladší typy elektromotorů. Dříve byly pro stejnosměrné pohony využívány zejména tradiční komutátorové elektromotory, ale k bezchybnému chodu komutátorového motoru je nutná přesná komutace. Problém nastává hlavně u malých strojů (v důsledku vysokých otáček), kde dochází k rychlému opotřebení kontaktních kartáčů. Zmíněný jev je u bezkartáčových DC motorů vyřešen tzv. elektronickou komutací. Konstrukce částí BLDC motoru je obrácená vzhledem ke komutátorovým strojům. U klasických komutátorových motorů je pevná budící část, otáčí se vinutí napájené pomocí kartáčů a komutátoru. U bezkartáčových DC motorů se otáčí budič tvořený permanentními magnety a vinutí je pevné.

Cíl práce je navržení a realizace soustavy umožňující měření kroutícího momentu bezkartáčového stejnosměrného motorku pomocí optických systémů. Měření kroutícího momentu hraje významnou roli ve strojírenství, neboť se vztahuje k otáčení hřídele ve strojích jako jsou čerpadla, nápravy vozidla či již zmíněné elektromotory. Práce bude využívat způsob měření, kdy je deformační člen soustavy zatěžován kroutícím momentem za vzniku deformace. Velikost deformace bude ovlivňovat měřitelné veličiny a bude úměrná momentu. V návrhu budou popsány vhodné součástky pro toto měření.

Teoretická část bude věnována BLDC a DC motorům. Bude popsána jejich konstrukce a základní princip funkce. Klasické komutátorové motory zde budou také uvedeny, neboť budou využity k měření rekuperace a k zatěžování BLDC motoru.

## 2 Elektrické motory

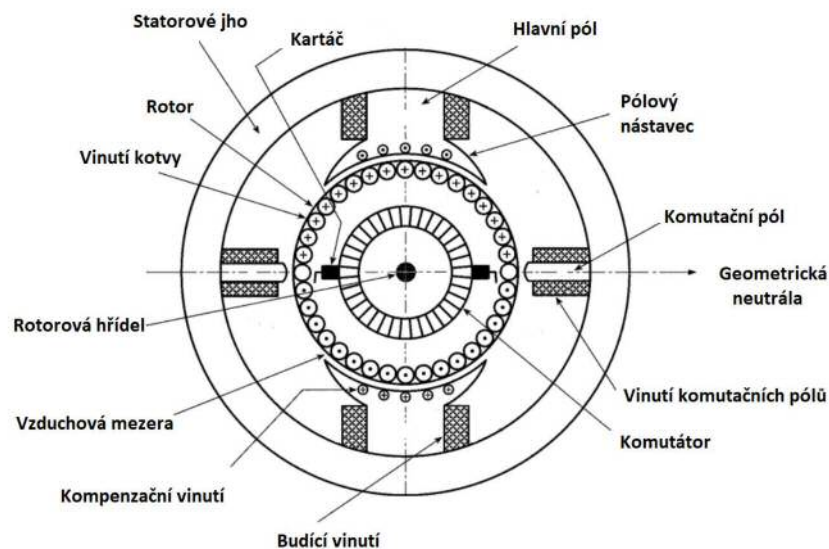
Elektrické motory transformují elektrickou energii na mechanickou pomocí silových účinků magnetického pole. Dále budou popsány principy DC motorů a BLDC motorů.[1]

### 2.1 DC motor

U stejnosměrných motorů je buzena jak statická část, tak i rotující část motoru. K lepšímu porozumění fungování stejnosměrného motoru je nejdříve uvedeno jeho konstrukční uspořádání.[2]

#### 2.1.1 Konstrukce

Statická část (neboli stator), rotující část (neboli rotor), také kartáče a mechanický komutátor jsou základními komponenty stejnosměrného motoru. Příčný řez motorem je zobrazen na obrázku. [2] [3]



Obrázek 1: Příčný řez DC motorem [3], upraveno autorem

##### 2.1.1.1 Rotor

Rotor tvaru válce má po obvodě drážky, ve kterých je připevněno vinutí rotoru. Každá cívka vinutí je spojena s jednou lamelou komutátoru. Komutátor má funkci usměrňovače, který mění směr proudu v komutující cívce. Jelikož je u stejnosměrného motoru komutace řešena mechanicky, motor nevyžaduje od regulátoru spínání proudu ve vinutí motoru. Na lamely komutátoru dosedá sběrné ústrojí tvořené uhlíkovými kartáči. Kartáče jsou přichycené v držácích ve statoru, a tudíž se při otáčení komutátoru dostanou do kontaktu s různými lamelami komutátoru. Kartáče se tedy využívají k převodu proudu z vnějšího obvodu do komutátoru a komutátor jej přenáší do vinutí rotoru. [2] [4]

V rotoru dochází ke střídavému magnetování, a to ve feromagnetických materiálech způsobuje vířivé proudy. Kvůli snížení ztrát vířivými proudy jsou magnetické obvody rotoru složeny z tenkých vzájemně izolovaných ocelových plechů. Zmenšení ztrát vířivými proudy

Ize dosáhnout i zvýšením rezistivity feromagnetika. Rezistivita těchto plechů se může až šestkrát zvětšit přidáním křemíku. [4][5]

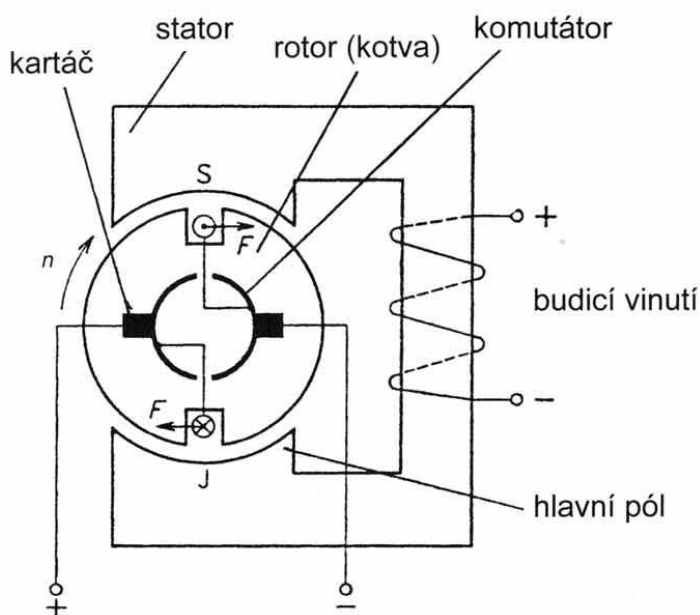
### 2.1.1.2 Stator

Magnetický rám tvaru dutého válce je nedílnou součástí statoru. Na této kostře se pravidelně střídají magneticky opačné póly. Ty jsou složeny z hlavního pólu, na kterém je uchyceno budící vinutí či permanentní magnety, a pólových nástavců. Stator může být zhotoven z magneticky měkkého materiálu, neboť je vinutí buzeno stejnosměrným proudem a generuje tak stálý magnetický tok. [2] [3]

Ke zlepšení komutace se u větších strojů vsazují mezi hlavní póly úzké komutační póly bez pólových nástavců, jejichž vinutí je sériově spojeno s vinutím rotoru. [4]

### 2.1.2 Princip

Princip činnosti stejnosměrného motoru bude pro zjednodušení vysvětlen na motoru, kde se kotva rotoru bude skládat pouze ze dvou vodičů propojených v jeden závit. Závit je vyveden ke dvěma lamelám komutátoru, které se otáčejí společně s rotorem. Na statoru bude pouze jeden pár hlavních pólů, které vytváří statické magnetické pole. Kartáče stroje se nacházejí v místě geometrické neutrality, kde je díky symetrii konstrukce magnetická indukce rovna nule. [2] [4] [5]



Obrázek 2: Princip DC motoru [5]

Stejnoseměrné napětí je přivedeno na kartáče, a proto na vodiče v magnetickém poli začne působit dvojice sil. Směr síly je závislý na směru magnetické indukce a směru proudu ve vodiči o délce  $l$ . [4]



Působící síly vytvářejí moment, který začne otáčet rotorem. Tento moment je přímo úměrný celkovému toku a proudu vinutím . Lze jej vyjádřit jako:

kde je konstrukční konstanta. Pohybem vodičů v magnetickém poli se začne indukovat napětí, jehož výsledná hodnota je:

Kde představuje mechanickou úhlovou rychlost. Směr indukovaného napětí je opačný než přivedené svorkové napětí . Proto platí:

je odpor vinutí. [4]

### 2.1.3 Dynamo

Všechny stejnosměrné stroje mohou pracovat jako výše zmíněný motor či dynamo. Dynamo mění mechanickou energii na elektrickou, jedná se o stejnosměrný generátor. Rozdíl mezi generátorem a motorem je absence stejnosměrného zdroje na kartáčích. Místo něho zde může být připojena zátěž. Otáčením rotoru v poli statoru se ve vodičích indukuje napětí a zátěží prochází proud. [4]

## 2.2 BLDC motor

BrushLess DC Motors zkráceně BLDC je název pro bezkartáčové stejnosměrné motory s elektronickou komutací. Někdy se také využívá zkratka ECM z anglického označení Electronically Commutated Motors, tedy elektronicky komutované motory. [6] [7]

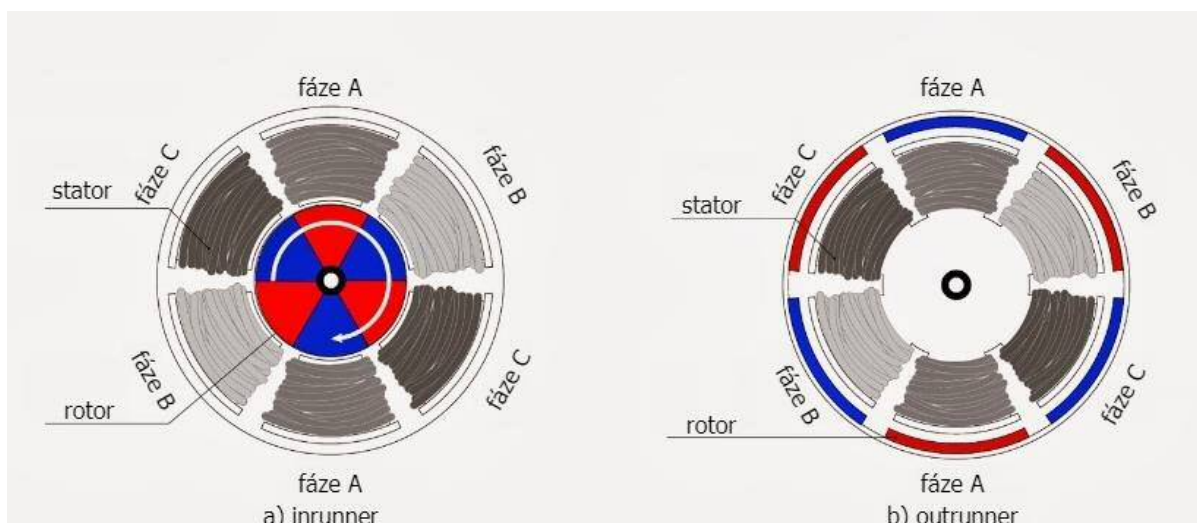
Absence mechanického komutátoru je vyřešena vhodnými elektronickými spínacími obvody. Podstatnou část tvoří elektronická jednotka, která spíná jednotlivá vinutí statoru tak, aby docílila požadovaného chodu motoru. Napájení motoru je stejnosměrné. [6] [7]

Elektronická komutace vyřešila problém, který nastával u komutátorových strojů (problém kluzného kontaktu mezi kartáčem a komutátorem). BLDC motor dosahuje vyšší účinnosti ve srovnání s DC motory. Mezi další výhody v porovnání s DC motory můžeme řadit lepší dynamickou odezvu, lineární momentovou charakteristiku, dlouhou životnost, tichý provoz a vyšší maximální otáčky. Lze je proto spatřit v průmyslových a dopravních zařízeních, v zemědělské technice, v leteckých a kosmických pohonných systémech a v modelářské technice. Mezi nevýhody patří vyšší pořizovací cena. [6] [7]

### 2.2.1 Konstrukce

Hlavní částí BLDC motoru představuje rotující část z permanentních magnetů a statická část obsahující cívky vinutí. BLDC motor se řadí mezi synchronní motory. U těchto motorů stator vytváří kruhové točivé pole, které se pohybuje stejnou rychlostí (tedy synchronně)

jako pole rotoru. Konstrukce může být typu „inrunner“ (s vnitřním rotorem) či „outrunner“ (s vnějším rotorem), jak je zobrazeno na obrázku. [6] [8]



Obrázek 3: Konstrukce BLDC motoru typu a) inrunner, b) outrunner [9], upraveno autorem

#### 2.2.1.1.1 Inrunner

Koncepce motoru s vnitřním rotorem, který rotuje uprostřed statoru, je využívána u většiny BLDC motorů. Jako hlavní přednost vyzdvihují výborné odvádění tepla, které přímo souvisí se schopností vytvářet točivý moment, a nižší moment setrvačnosti rotoru. V případě velkého počtu cívek je také jednodušší zvolit inrunner. Avšak nevýhoda tohoto typu je nutnost přítomnosti malých silných magnetů. [8] [10]

#### 2.2.1.1.2 Outrunner

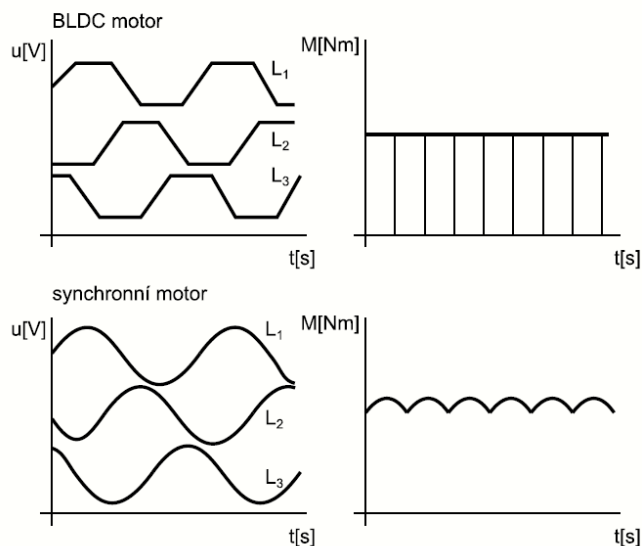
U druhého způsobu se stator nachází uprostřed konstrukce a rotor se točí kolem něj. Magnety rotoru nemusí být zmenšované, a proto lze využít velké, a tedy levné magnety. Magnety jsou však také jeho nevýhodou, neboť se chovají jako tepelné izolátory, čímž komplikují odvod tepla z motoru. Vyšší moment setrvačnosti u tohoto typu způsobuje horší dynamické vlastnosti. [8] [10]

#### 2.2.1.2 Stator

Stator je zkonstruován z ocelových plechů. Plechy tvořící stator jsou u běžných BLDC motorů vybaveny drážkami oddělenými zuby. Vinutí generující elektromagnetické pole je vloženo do těchto drážek tak, aby vytvářelo sudý počet pólů. [6]

Nejnámější zapojení statorového vinutí je třífázové do hvězdy. Můžeme se ale také setkat s konfigurací do trojúhelníku nebo s rozdílným počtem fází (jednofázové, dvoufázové). Podle daného typu má stator určitý počet vinutí. Rozdíl mezi konfiguracemi do hvězdy a do trojúhelníku spočívá ve velikosti točivého momentu při nízkých otáčkách, kde pro hvězdu je točivý moment vysoký, zatímco pro trojúhelník dosahuje nízkých hodnot. U jednofázového motoru tvoří stator jedno vinutí, které musí vytvořit točivé elektrické pole.

Podle rozložení statorového vinutí dělíme motory na sinusové a lichoběžníkové. Lichoběžníkové motory bývají běžně označovány za BLDC motory. Lichoběžníkový tvar má nejen průběh proudu jednotlivými fázemi, ale také magnetická indukce ve vzduchové mezeře a vzniklé zpětné elektromotorické napětí. Sinusové motory neboli tzv. PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) mají sinusový průběh. [6] [11] [12]

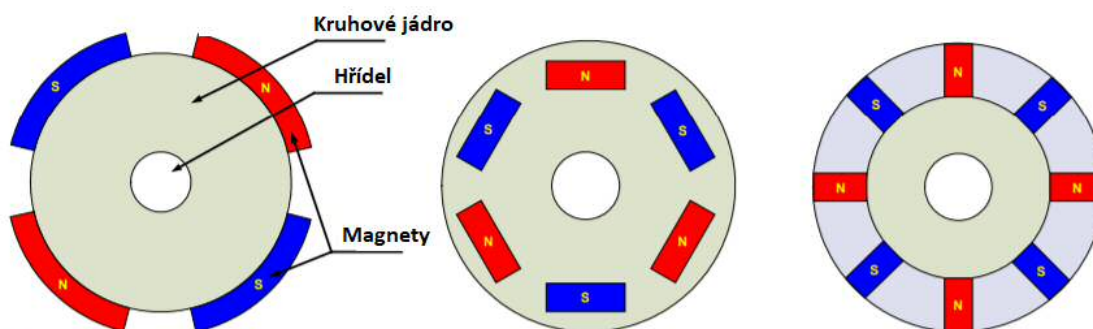


Obrázek 4: Porovnání výsledných momentů [22]

Každé vinutí generuje při rotaci napětí známé jako zpětné elektromotorické napětí značené také jako BEMF. Zpětné elektromotorické napětí je ovlivněno úhlovou rychlostí rotoru, magnetickým polem rotoru a počtem závitů vinutí v statoru. Polarita tohoto napětí je opačná vůči napájecímu napětí dle Lenzova zákona. [6]

### 2.2.1.3 Rotor

Rotor typického BLDC je tvořen z permanentních magnetů. Počet pólů v rotoru se může měnit od dvou až do osmi podle požadavků na určitou aplikaci. Póly jsou uspořádány tak, aby se po obvodu střídaly severní (N) a jižní (S). Obrázek Příčný řez rotorem znázorňuje tři průřezy různého uspořádání magnetů. Zvýšení počtu pólů zajistí lepší točivý moment, ale za cenu snížení maximální možné rychlosti. Další parametr ovlivňující velikost točivého momentu představuje materiál používaný pro konstrukci permanentního magnetu. Čím větší je hustota magnetického toku, tím je větší točivý moment. Tradičně se využívají ferity. [6] [11] [13]

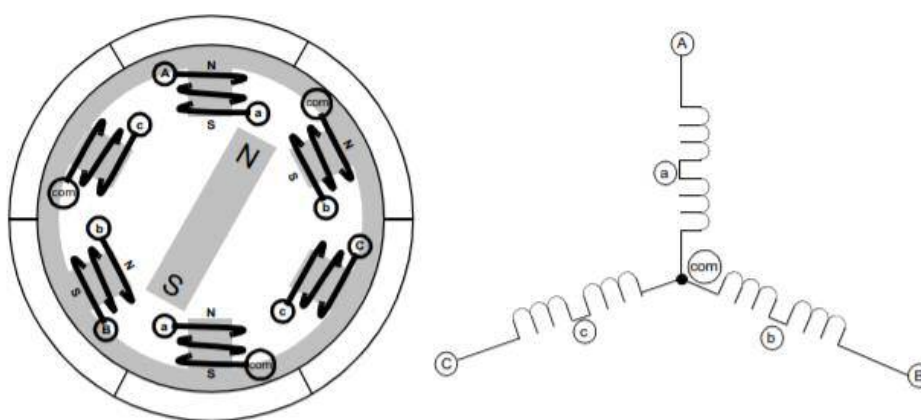


Obrázek 5: Příčný řez rotorem, [11] upraveno autorem

## 2.2.2 Princip

Zjednodušené zapojení BLDC motoru je vyobrazeno na obrázku 5. Točivý moment motoru vzniká vzájemným působením magnetického pole statorového vinutí a otočného permanentního magnetu. Nepohyblivé vinutí musí tedy vytvářet točivé magnetické pole. To je zajištěno třemi fázemi, které jsou na obrázku v konfiguraci do hvězdy. Všechny tři sekce se protínají v jednom bodě. Lze je rozpojit tak, aby se rotor mohl otáčet. Cívky umístěné na protějších nástavcích jedné fáze jsou zapojeny v sérii za sebou tak, že při sepnutí této fáze vznikne magnetický pól. Po obvodu jsou cívky posunuty o  $60^\circ$ . [8] [14]

Proud protékající jednou sekcí vinutí vytváří kolem cívky magnetické pole, které vzájemně působí s magnetickým polem rotoru. Rotační pohyb je dosažen nepřetržitým přepínáním polarity napájení jednotlivých sekcí. Maximální točivý moment vzniká, když magnetická pole způsobená vinutím statoru a permanentními magnety na rotoru jsou na sebe kolmá. [8] [14]



Obrázek 6: Zjednodušené zapojení [14], upraveno autorem

Přepínání jednotlivých fází neboli komutace je u BLDC motorů řešena elektronicky na základě aktuální informace o poloze rotoru. Elektronická jednotka se skládá z logické sekce, která představuje mikrokontrolér, a výkonové sekce, do které se řadí tranzistorový můstek a jeho budicí obvod. Řídící jednotka je schopna regulovat otáčky a chrání motor před přehřátím či přetížením. Elektronická jednotka motoru vyhodnotí díky zpětné vazbě aktuální informaci v mikroprocesoru, který vydá příkazy pro spínání výkonových tranzistorů. K určení polohy rotoru se u malých motorů velmi často využívají Hallovy sondy umístěné po obvodu statoru. Mezi další možnosti se řadí optický enkodér nebo resolver. Ty jsou však pro malé motory finančně náročné. Vyskytují se samozřejmě i bezsenzorové způsoby detekce polohy rotoru. [8] [14] [15]

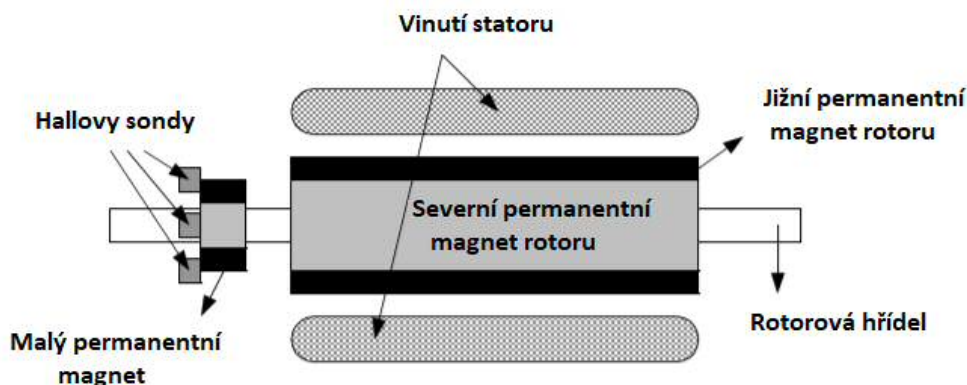
### 2.2.2.1 Hallové sondy

Jak již bylo zmíněno, k určení polohy se velmi často využívají Hallové sondy. Sondy jsou založené na principu Hallova jevu. Pokud je polovodičová destička umístěna do elektrického pole a současně kolmo do pole magnetického, generuje se rozdílové napětí na bočních stranách destičky. [6] [16]

U BLDC motorů lze tři Hallové senzory upevnit do stacionární oblasti, tedy do statoru. Hallové sondy mohou být vzájemně posunuty o  $60^\circ$  nebo  $120^\circ$  elektrických. Přiblíží-li se

magnetické póly rotoru k Hallovým sondám, vzniká signál o příslušné logické úrovni. Podle hodnoty výstupního signálu lze rozeznat jižní a severní pól magnetu. Využitím všech tří signálů z Hallových sond lze určit přesnou polohu rotoru. [6]

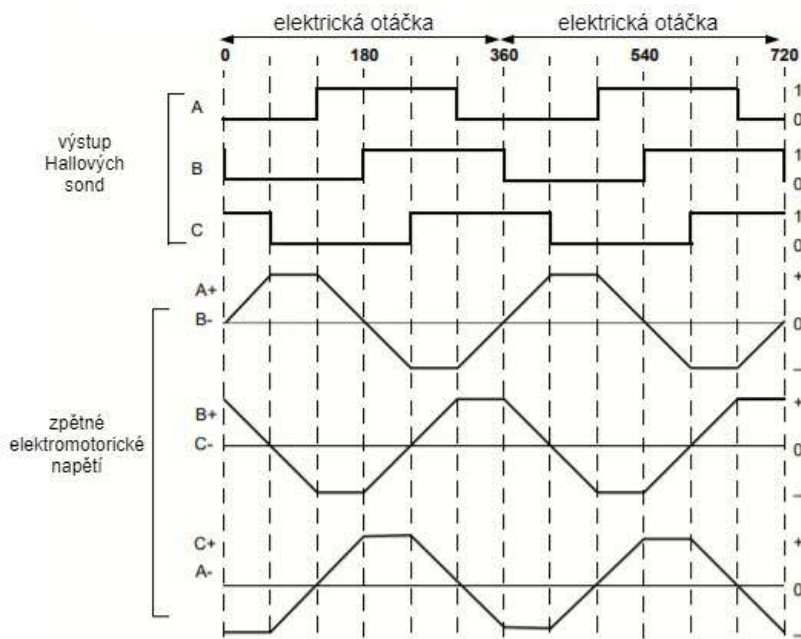
Zapuštění Hallových snímačů do stacionární části motoru je velice komplikované. Odchylka



Obrázek 7: BLDC motor a Hallové sondy [6], upraveno autorem

snímačů způsobená touto konstrukcí vzhledem k rotorovým magnetům zapříčiní vznik chyby při určování polohy rotoru. Jednodušším řešením je využití repliky rotoru, tedy malého permanentního magnetu, který je připevněn na hřídel motoru. Malý magnet vytváří kruhové točivé pole, které je zachyceno Hallovými senzory umístěnými na desce plošných spojů. Tento způsob řešení je ilustrován níže. [6]

Průběh signálu z Hallových sond je vykreslen v nadcházejícím obrázku společně se zpětným elektromotorickým napětím [6]



Obrázek 8: Výstup Hallových sond a zpětné elektromotorické napětí pro čtyřpólový motor [6], upraveno autorem

Každých  $60^\circ$  elektrických mění svůj stav jeden ze tří Hallových senzorů, proto k dokončení jednoho cyklu je potřeba šesti kroků. Elektrický cyklus nemusí odpovídat mechanickému cyklu, neboť je ovlivněn počtem pólů rotoru. [6]

### 2.2.3 Základní rovnice

Pro zjednodušení popisu bezkartáčového motoru bude předpokládán dvupólový rotor a třífázové statorové vinutí s konfigurací do hvězdy. Vinutí má pro každou fázi dvě drážky natočené vůči sobě o úhel  $30^\circ$  a  $N$  závitů na drážku. Dále bude uvažován obdélníkový průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře a také proudu procházejícího jednou fází. V každém okamžiku bude procházet proud pouze dvěma fázemi. Magnetický tok je lineární funkcí polohy rotoru. Pokud se rotor otáčí, indukují se napětí ve statorových cívkách. Zpětné elektromotorické napětí pro jakékoliv dvě fáze v sérii může být vyjádřeno jako:

Magnetický tok  $\Phi$  a konstanta  $k$  jsou ovlivněny konstrukcí motoru,  $\omega$  symbolizuje mechanickou úhlovou rychlost. Indukované napětí je možné vyjádřit pomocí rychlostní konstanty  $k_e$  v jednotkách (V/rad/s). Momentová rovnice motoru je se stejnými konstantami a proudem  $i$ , který prochází dvěma fázemi, vyjádřena jako:

Forma rovnic (2.5) (2.6) je shodná s rovnicemi pro již zmíněné stejnosměrné kartáčové motory (2.3) (2.2). Z toho důvodu se tyto motory označují jako bezkartáčové stejnosměrné motory, tedy BLDC. Korektnější název by byl synchronní motory s permanentními magnety, jejichž magnetická indukce je ve vzduchové mezeře tvaru lichoběžníků.

V praxi budou výše popsané rovnice zachovány pouze tehdy, pokud je spínání fází okamžité a pokud bude obdélníkový průběh fázových proudů a magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Což nelze u reálných motorů splnit.

### 2.2.4 Charakteristika moment - otáčky

Využitím výše uvedených vztahů lze určit momentově otáčkovou charakteristiku ideálního bezkartáčového motoru. V úvahu je stále brána ideální komutace a obdélníkový průběh zpětného elektromotorického napětí. Při zapojení vinutí do hvězdy, může být okamžitá napěťová rovnice charakterizována jako:

kde  $R$  je součet všech odporů vinutí,  $U$  svorkové napětí a  $U_j$  je suma mezi dvěma fázemi zpětného elektromotorického napětí. Momentově otáčková charakteristika:

—



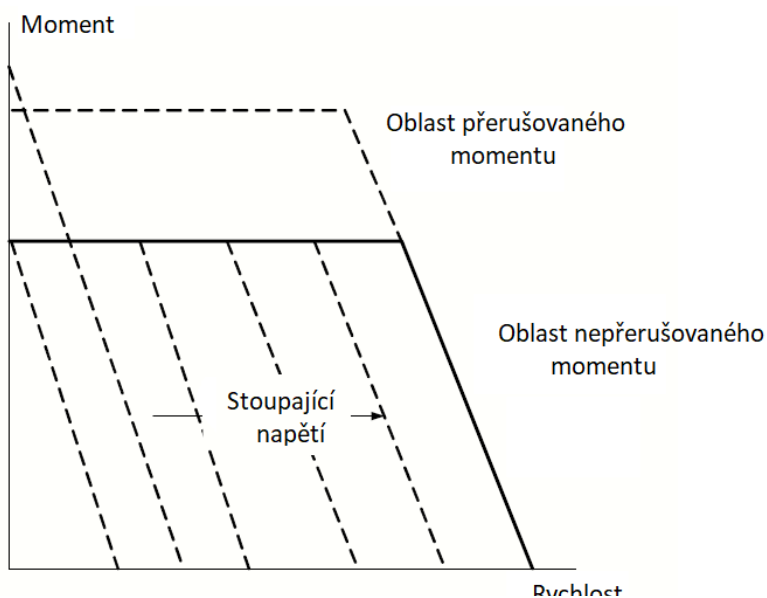
Rychlost **naprázdno** lze zapsat jako:

—

Rozběhový moment :

—

Rychlost motoru **naprázdno** je určena hodnotou napájecího napětí, pokud je motor zatížen, jedná se o funkci odporu vinutí. Při překonání jmenovitých otáček přestává být moment konstantní a klesá. Motor lze krátkodobě zatížit až na hodnoty dosahující rozběhového momentu, tedy maximálního. Při změně svorkového napětí se vytvoří skupina křivek znázorněných na obrázku. Ve skutečnosti budou křivky deformovány indukčností vinutí, reakcí kotvy a rozložením magnetické indukce ve vzduchové mezeře. [17]



Obrázek 9: Charakteristika moment - proud **ideálního bezkartáčového DC motoru** [17], upraveno autorem

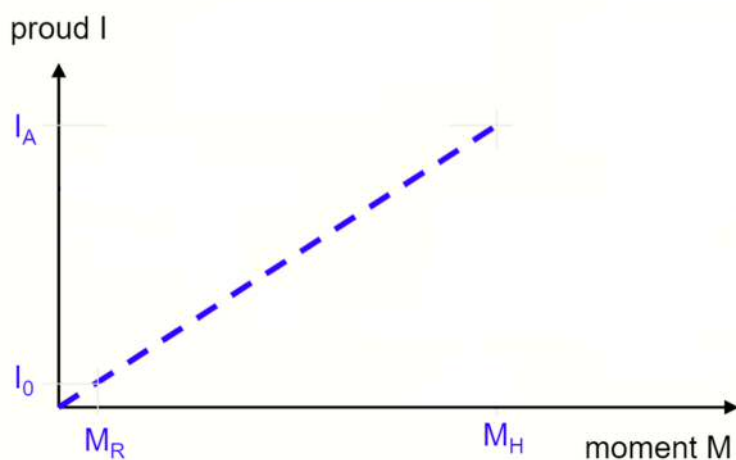
### 2.2.5 Elektrická a mechanická rychlost

Rovnice vyjadřující elektrickou úhlovou rychlost pomocí mechanické úhlové rychlosti a počtu pólů na rotoru je rovna: [18]

### 2.2.6 Momentově proudová charakteristika

Další důležitá charakteristika motoru je momentově proudová charakteristika, kterou lze s pomocí momentové konstanty ( $Nm$ ) vyjádřit jako:

Jedná se o lineární závislost ilustrovanou na obrázku 9. Graf této závislosti se nemění s napájecím napětím motoru. V ideálním případě není proud bez zátěže ovlivněn vnitřními třecími ztrátami. [17] [19]



Obrázek 10: Charakteristika proud - moment ideálního bezkartáčového DC motoru [19]

### 2.3 Stanovení momentové konstanty

V ideálním případě platí rovnost mezi mechanickým výkonem na hřídeli a elektrickým příkonem. V tom případě by platila rovnice: [17]

Dosazením rovnic (2.5) a (2.6) vyjde rovnost mezi momentovou ( $V$  ) a rychlostní konstantou ( $Nm$  ).



## 2.4 Porovnání BLDC a DC motorů

Následující tabulka shrnuje rozdíly mezi bezkartáčovými DC motory a klasickými komutátorovými stejnosměrnými motory.

Vlastnosti	BLDC motor	DC motor
Komutace	Elektronická komutace využívající senzorové či bezsenzorové snímání polohy rotoru	Mechanická komutace využívající komutátoru a kartáčů
Údržba	Méně potřebná díky absenci kartáčů	Nutná častá údržba
Životnost	Dlouhá	Krátká
Otáčkově-momentová charakteristika	Umožňuje provoz při všech rychlostech s jmenovitou zátěží	U vyšších rychlostí je tření kartáče a komutátoru vyšší, což snižuje točivý moment
Účinnost	Vysoká	Střední
Výkon/velikost	Vysoký – malá velikost díky odvodu tepla	Střední/nízká – teplo je rozptýleno ve vzduchové mezeře - omezení
Setrvačnost rotoru	Nízká – díky permanentním magnetům na rotoru	Vyšší – omezení dynamických vlastností
Rozsah otáček	Vyšší	Nížší – omezení kartáči
Cena	Vyšší – permanentní magnety	Nížší
Řízení	Drahé - složité	Levné - jednoduché

Tabulka 1: Porovnání BLDC a DC motorů [6], upraveno autorem

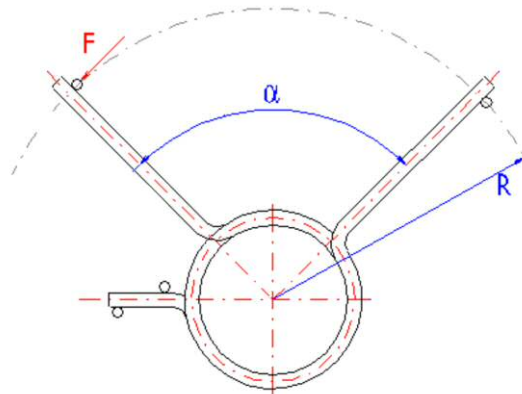
## 2.5 Rekuperace

Rekuperace je děj přeměny kinetické energie vozidla zpět na elektrickou. Brzdění rekuperací využívá zákon zachování energie, kdy energii nelze zničit, ale pouze přeměnit do jiné formy. Elektromotory díky své konstrukci mohou být v motorickém nebo generátorickém režimu. Elektronické obvody jsou nezbytné k přepínání těchto režimů. Při brzdění je motor použit jako generátor, kdy převádí velkou část kinetické energie zpět na elektrickou. Získanou elektrickou energii lze pak ukládat do akumulátorů nebo jiných zásobníků energie jako je superkondenzátor nebo setrvačnick. V následujícím zrychlení vozidla je využita uložená energie. Při brzdění rekuperací je zvláště u rychlých zastaveních potřeba tradičních mechanických brzd. [20]

Pokud je při rekuperaci využit akumulátor, rekuperace bude pouze malé účinnosti. Změna elektrochemické reakce totiž trvá určitou dobu. Superkondenzátory dokáží akumulovat i vydat energii velmi rychle. Mezi těmito režimy jsou schopny také přepnout velmi rychle. Jejich dalším plusem je dlouhodobá životnost a odolnost vůči nízkým teplotám. Ale jako pohonný zdroj vzhledem ke své nízké hustotě energie na jednotku hmotnosti se zatím neuplatní. [21]

### 3 Šroubovité pružiny válcové zkrutné z drátů

Konstrukci tvoří nejčastěji dvě ramena a šroubovitá činná část. Ramena jsou potřebná k uchycení pružiny a přenosu kroutícího momentu. Konstrukce je ilustrována na obrázcích níže. Zkrutná pružina vytváří kroutící moment  $M$  v rovině kolmé na osu vinutí. Zkrutná pružina vyvíjí sílu  $F$ , jež působí kolmo na osu vinutí ve směru kolmém na rameno síly  $R$ . Kolmá spojnice mezi působišťem této síly a osy vinutí se nazývá rameno síly. [23]



Obrázek 11: Ohnutí šroubovitých pružin válcových zkrutných [24]

Tuhost pružiny, charakterizována jako kroutící moment na jednotku výchylky, je možné vyjádřit jako podíl momentu  $M$  a úhlu natočení  $\alpha$ .

—

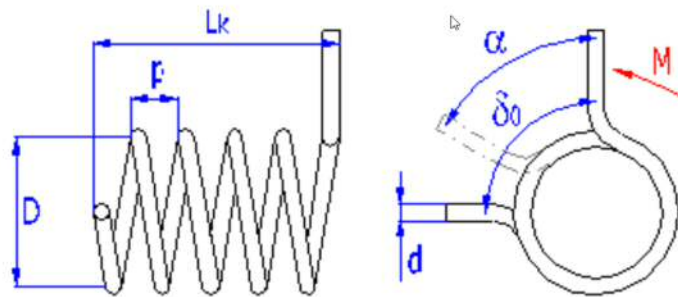
Tuhost pružiny s drátem kruhové průřezu je také dána charakteristickými parametry pružiny dle vztahu:

\_\_\_\_\_

Vlivem svinování pružiny se zmenšuje její střední průměr:

\_\_\_\_\_

Pokud jsou ramena zkrutné pružiny připevněna pevně, je úhel natočení dán pouze zkroucením závitů pružiny. V případě volně opřené rameno pouze v jednom bodě dojde vlivem zatížení k prohnutí ramene. Dochází tak k nárůstu skutečného úhlu natočení. Ohnutí je ovlivněno ramenem síly. Se zvyšujícím se ramenem síly roste velikost ohnutí. [24]



Obrázek 12: Konstrukce šroubovitě pružiny válcové zkrutné

- d ... průměr drátu (mm)
- D ... střední průměr pružiny (mm)
- M ... zatížení pružiny (Nmm)
- E ... modul pružnosti v tahu (MPa)
- k ... momentová (úhlová) tuhost pružiny (Nmm)
- $L_K$  ... délka závitové části pružiny (mm)
- n ... počet činných závitů (-)
- p ... rozteč mezi závity (mm)
- $\alpha$  ... úhlová výchylka pracovního ramene pružiny (°)
- $\delta_0$  ... úhel mezi rameny volné pružiny (°)
- $\sigma$  ... napětí materiálu pružiny v ohybu (MPa)

## 4 Lagrangeovy rovnice II. druhu

Lagrangeovy rovnice II. druhu jsou významnou alternativou pro Newtonovy pohybové zákony. Výhoda je možnost zapsání v libovolném křivočarém souřadnicovém systému, zatímco Newtonův zákon má svou jednoduchou formu pouze v kartézských souřadnicích. [25]

Lagrangeovy rovnice II. druhu jsou pohybové rovnice, které popisují pohyb soustavy těles. V obecném tvaru je lze zapsat jako:

$$\dots$$

kde představuje kinetickou energii  $N$  hmotných bodů, symbol značí zobecněné souřadnice. Značkou jsou označovány zobecněné rychlosti a jsou zobecněné vnější síly. Počet těchto diferenciálních pohybových rovnic druhého řádu je shodný s počtem stupňů volnosti systému  $n$ . [25]

Předností Lagrangeových rovnic II. druhu proti rovnicím na principu virtuálních prací je to, že se u nich nezavádí setrvačné účinky. Místo setrvačných účinků se pracuje s kinetickou energií. Kinetická energie se skládá z translační a rotační části. Kinetickou energii tuhého tělesa rotujícího kolem své osy lze vyjádřit jako:

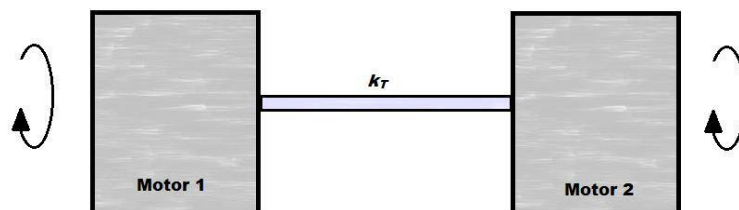
$$\dots$$

Kinetická energie je určena tedy momentem setrvačnosti, který specifikuje rozložení látky v tělese k dané ose souřadnicového systému, a úhlovou rychlostí. [26] [27]

### 4.1.1 Sestavení pohybových rovnic systému

Analytická mechanika je výhodná, neboť vede přímo k pohybovým rovnicím při ideálních vazbách. Pokud se jedná o vazby reálné, vyskytují se pasivní účinky. V tomto výpočtu jsou uvažovány pouze vazby ideální. Soustavě lze udělit takovou změnu souřadnic neboli virtuální posuv, která se nemění se změnou času. [26] [27]

K sestavení pohybových rovnic systému, který měří moment síly BLDC motoru, budou využity Lagrangeovy rovnice II. druhu. Následující obrázek ilustruje dva motory otáčející se stejným směrem spojené torzní tyčí o tuhosti  $k_T$ .



Obrázek 13: Motory spojené torzní tyčí, vytvořeno autorem

System má dva stupně volnosti. Za obecnou souřadnici použijí úhel natočení.

Celková kinetická energie se vypočítá jako součet jednotlivých energií obou motorů, tedy:

$$- \quad -$$

Lagrangeovy rovnice II. druhu dle vzorce (4.1) mají v zápisu parciální derivace, které slouží jako pomůcka k vyřešení derivace kinetické energie. Zobecněné souřadnice jsou funkcemi času, tedy  $q_j(t)$ . Tudíž se zde vyskytují pouze derivace podle času. [26] [27]

Dosazením rovnice (4.3) do (4.1), dostáváme pro jednotlivé derivace:

$$\frac{d}{dt}$$

$$\frac{d}{dt}$$

$$\frac{d}{dt} \quad \frac{d}{dt}$$

kde  $j = 1,2$

Soustavě lze udělit nenulový virtuální posuv  $\delta q$ . Porovnání virtuální práce zobecněné síly se silovými účinky vede k rovnicím ve tvaru:

Virtuální posuv lze vykrátit z rovnic, a tak jejich výsledný tvar po využití rovnice (4.6) je:

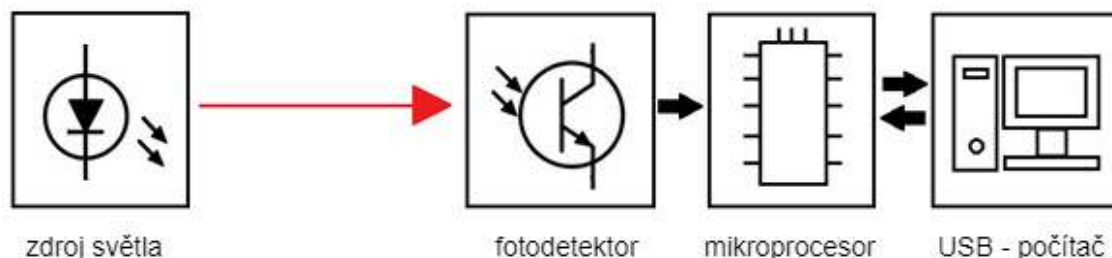
Moment setrvačnosti kotouče k ose procházející jeho středem hmotnosti je dán takto

$$-$$

kde  $m$  je hmotnost kotouče a  $R$  jeho poloměr. Torzní pružina bude uvažována jako nehmotná.

## 5 Snímací soustava

Snímací soustava skládající se z jednotlivých komponentů je ilustrována na obrázku níže. Jednotlivé prvky jsou popsány v následující části.



Obrázek 14: Blokové schéma snímací soustavy

### 5.1 Světelná závora

Světelná závora je tvořena dvěma prvky, zdrojem světla a fotodetektořem, umístěných na opačných stranách snímací cesty. Elektroluminiscenční diody či laserové diody jsou nejčastěji využity jako vysílací prvek, přijímací jednotkou je fotodioda nebo fototranzistor s citlivostí na vlnovou délku paprsku. Princip jednocestné optické závory spočívá ve snímání dopadajícího světla na oddělený fotodetektor. Pokud světelný paprsek prochází mezi vysílačem a přijímačem, fotodetektořem teče proud. V opačném ideálním případě proud neprochází. [28]

Další možný způsob konstrukce je reflexní závora, u které je emitující vysílač i přijímač na stejné straně. Paprsek světla se odráží od reflexního členu a vrací se zpět. Z toho vyplývá menší dosah vlivem nejen dvojnásobné dráhy, ale také většího útlumu, rušení a nedokonalého odrazu. [28]

#### 5.1.1 Laserová dioda

Laser využívá k zesílení světla jevu stimulované emise elektromagnetického záření. Laser je zdrojem koherentního (staticky uspořádaného) monochromatického záření, jak v infračervené, tak ve viditelné nebo v ultrafialové oblasti spektra. Lze ho nazývat monochromatickým (jednobarevným) zářením, neboť jeho fotony mají stejnou frekvenci a lidské oko vidí shodnou frekvenci jako jednu barvu. [29]

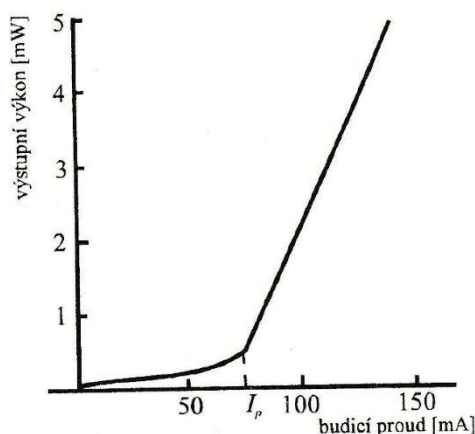
Laser je založen na procesu stimulované emise, při tomto jevu reaguje foton s atomem umístěným ve vyšší energetické hladině. Energie fotonu musí být rovna energetickému rozdílu hladin. Foton způsobí, že atom přejde do nižší hladiny a dojde k vyzáření dalšího fotonu. Emitovaný foton má stejný směr, frekvenci i fázi jako foton, jenž emisi přivodil. Výsledné záření se tedy zesílí, neboť dojde k superpozici obou fotonů. Záření je tedy koherentní a celý děj se může lavinovitě šířit dále. [29]

Generování koherentního záření je docíleno nerovnovážným stavem aktivního prostředí, kde počet atomů ve vyšší hladině převládá nad počtem částic v hladině nižší. Pokud by převládal počet v nižším stavu, docházelo by k absorpci. [29]

Pro fungování laseru však nerovnovážný stav aktivního prostředí nestačí, musí být také zajištěna kladná zpětná vazba pomocí optického rezonátoru. Nejvíce využívaný u polovodičových laserů je Fabryův-Perotův rezonátor, zkonstruovaný ze dvou rovnoběžných rovinných zrcadel obklopující aktivní prostředí. Mnohočetné odrazy paprsku způsobí stimulované emise a také jeho zesílení. Aby světelný paprsek mohl opustit rezonátor, je jedno ze zrcadel polopropustné. Paprsky odchylující se od osy se nezesílí, a proto je výsledný paprsek také unikátní ve své nízké rozbíhavosti a vysoké hustotě výkonu. [29]

#### 5.1.1.1 Watt-Ampérová charakteristika

Z charakteristiky optického výkonu a proudu na obrázku níže lze pozorovat, že pro generaci koherentního záření je potřeba překonat prahový proud  $I_p$ . Pod prahovým proudem je LD zdrojem nekoherentního záření. Nad prahovým proudem převládá stimulovaná emise, která je potřeba pro činnost laserové diody. [30]



Obrázek 15: Watt-Ampérová charakteristika pro laserovou diodu [30]

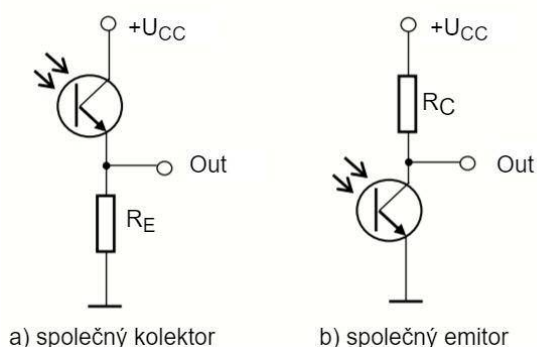
#### 5.1.2 Fototranzistor

Fototranzistory se využívají jako detektory světelného záření, které převádí na elektrickou energii. Tento polovodičový přijímač je založen nejen na vnitřním fotoelektrickém jevu, ale také na tranzistorovém jevu. [29]

Jedná se o tranzistor, ve kterém je průchod nosičů náboje řízený intenzitou dopadajícího světelného záření. Fototranzistor má dva PN přechody. Přechod báze – kolektor je polarizován v závěrném směru a pracuje jako polovodičová dioda. Emitorový přechod je polarizovaný propustně a zesiluje tak elektrický proud získaný na kolektorovém přechodu. [29]

Fototranzistor může být zapojen nejen se společným emitorem, ale také se společným kolektorem. Výstupní napětí u zapojení se společným emitorem při detekci světla přechází z vysoké úrovně na nízkou. Zatímco u obvodu se společným kolektorem se vlivem dopadajícího osvětlení mění hodnota výstupního napětí ze stavu nízkého do stavu vysokého. V obou případech může být fototranzistor použit ve dvou režimech, v aktivním nebo v režimu přepínání. V aktivním režimu je výstupní napětí úměrné dopadajícímu světlu, dokud nenastane saturace. Režim přepínání je výhodný pro digitální výstup, kdy se střídá nízký a vysoký stav v závislosti na dopadajícím záření. Velikostí rezistoru v obvodu lze

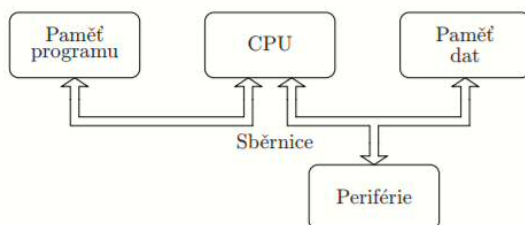
nastavit příslušný režim. Pro režim přepínání je typická hodnota rezistoru 5 k $\Omega$  nebo vyšší. [29]



Obrázek 16: Zapojení fototranzistorů [29]

## 5.2 Mikrokontrolér ATmega

Jelikož je využita vývojová deska Arduino Nano, bude popsána jeho nejpodstatnější součástka ATmega328. Tento osmibitový mikrokontrolér od firmy Atmel má speciální architekturu známou jako AVR. Název AVR nese nejspíše po vývojářích. Architektura AVR vychází z Harvardské architektury. Nejvýznamnější výhodou Harvardské architektury je oddělení paměti dat a programu. Díky tomu lze do těchto pamětí přistupovat najednou a nemůže dojít k přepsání vlastního programu. Zjednodušené schéma je na následujícím obrázku. Centrální procesorová jednotka je zkrácena na CPU, obsahuje programový řadič a aritmeticko-logickou jednotku. [31]



Obrázek 17: Harvardská architektura počítače [31]

ATmega328 využívá instrukční sadu RISC, procesor s redukováným souborem instrukcí. Snížení množství instrukcí a také zjednodušení vede k jejich rychlejšímu zpracování. [31]

Mikrokontrolér ATmega328P disponuje pamětí FLASH s kapacitou 32 KB, pamětí SRAM s kapacitou 2 KB a pamětí EEPROM s kapacitou 1 KB. [32]

EEPROM je elektronicky mazatelná paměť. Lze tedy do této paměti opakovaně zapisovat. Informace paměti se uchovává i po odpojení napájecího zdroje, a to díky izolovanému elektrickému náboji. Naprogramování buňky se docílí pulzem o délce 50 ms a velikostí napětí + 5 V. K vymazání informace u tohoto typu dochází pomocí elektrického pulzu opačné polarity. Což je velice výhodné proti jeho předchůdci EPROM, kde k mazání bylo potřeba ultrafialového záření. Počet přepsání paměti je omezený. [31]



Struktura Flash paměti je v podstatě stejná jako u EEPROM. Délka potřebného pulzu je kratší a pohybuje se okolo 10  $\mu$ s a napětí 12 V. Proces zapisování a mazání lze uskutečnit 10 000krát. [31]

Poslední zmíněná paměť je SRAM. Jedná se o statickou paměť. Při odpojení napětí ztrácí tato paměť veškeré uložené informace. Data se ukládají stavem klopného obvodu. Stav klopného obvodu se mění přijatým signálem. [31]

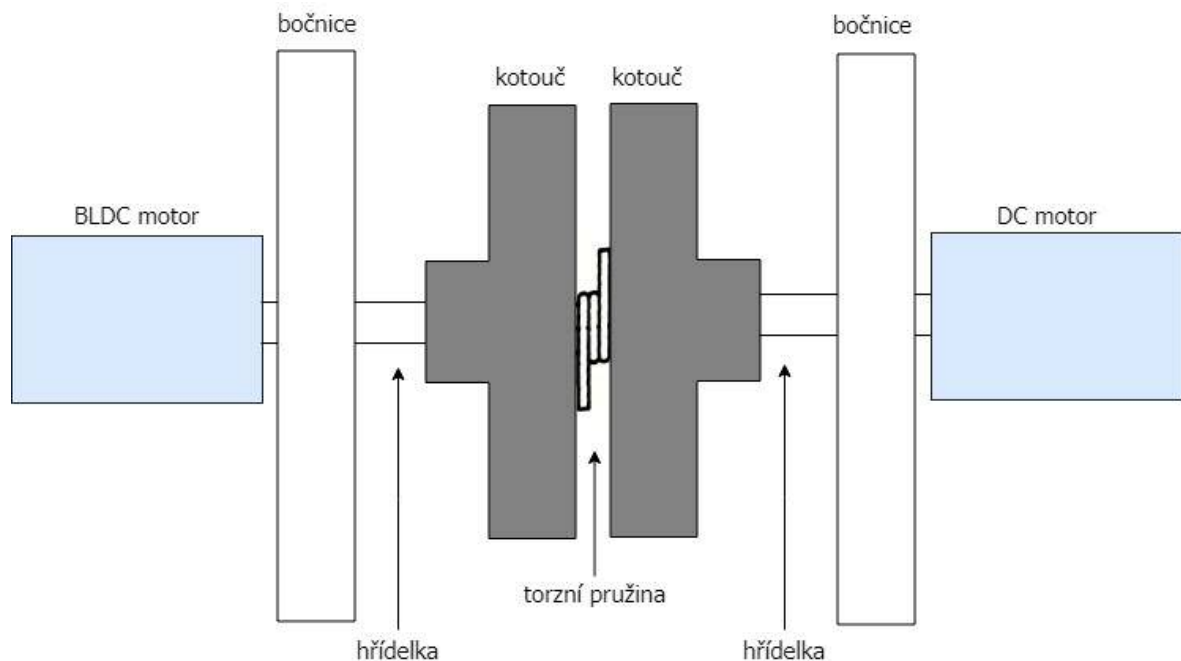
## 6 Návrh

Měření točivého momentu je realizováno se dvěma motory, bezkartáčovým stejnosměrným motorem a s kartáčovým stejnosměrným motorem. Motory jsou spojené pružnou spojkou, v tomto případě torzní pružinou. K určení točivého momentu je využito tuhosti torzní pružiny. Jak již bylo odvozeno v rovnici (4.9), lze takto vypočítat moment i u zrychlujících soustav. Hodnoty měření budou odečítány při konstantních otáčkách, a tím dojde ke zjednodušení vzorce na:

Jelikož se tato práce zabývá měřením BLDC motoru, bude motor BLDC hnací a DC motor bude plnit funkci dynamu. Natočení motorů je možné určit pomocí kotoučů s otvory. Při otáčení motoru je zaznamenávána doba průchodu paprsku snímací soustavou, kdy paprsek prochází mezerou v kotoučích. Pomocí úhlové rychlosti, která je definována jako:

Lze tedy úhel natočení dopočítat.

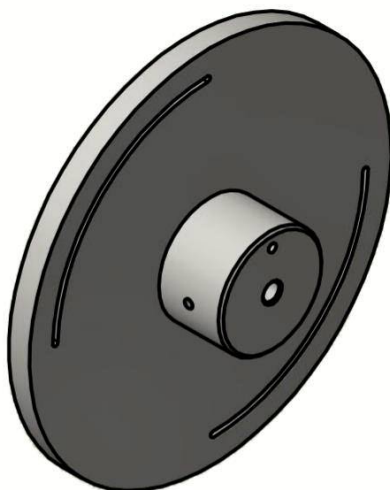
Blokové schéma konstrukce je znázorněno na následujícím obrázku. Hřídelky motorů, a tím i středová osa testovacích kotoučů, leží v jedné přímce. To znamená, že středy kotoučů jsou vycentrované.



Obrázek 18: Blokové schéma konstrukce

Měřicí kotouče zobrazené na obrázku 19 byly vyrobeny přesně na CNC stroji z hliníkové slitiny, aby povrch a okraje otvorů byly hladké a rovné. Tato lehká slitina byla použita také i proto, aby setrvačné síly tolik neovlivňovaly měření. Kotouče jsou přišroubovány k hřídelkám motorů šrouby M3 s vnitřním šestihranem, aby je bylo možné dostatečně utáhnout. Boky měřicího zařízení z odolného plexiskla (z důvodu možnosti pozorování

stavu kotoučů) jsou spolu spojeny nerezovými šrouby M6. Jemné mechanické vibrace jsou utlumeny gumovými podložkami, které zároveň chrání boky před poškozením. Celá soustava, tzn. měřicí stojan a měřicí prvky, jsou přišroubovány k základové desce z umělé hmoty. Pružiny jsou vystředěny válečky, jejichž vnější průměr je stejný jako vnitřní průměr pružiny. Tím je zajištěna stabilní poloha použité pružiny. Šroubové spojení bočnic bylo vybráno kvůli snadné výměně používaných pružin. Navíc umožňuje přesné nastavení vzdálenosti plexisklových bočnic podle šířky pružin.



Obrázek 19: Konstrukce měřicích kotoučů

## 6.1 Použité součástky

### 6.1.1 Motory

BLDC motory jsou k dostání v široké nabídce. Vyrábí se již řadu let a vyskytují se v CD mechanikách, magnetofonech, počítačových ventilátorech, ale také v zemědělské mobilní technice, leteckých pohonných systémech. Největší zastoupení mají v modelářské technice, tedy v modelech vrtulníků, aut, letadel, a v dopravních zařízeních.

K dispozici byl motor LRP Vector K7 brushless 21.5T, proto budou **proměřeny** jeho vlastnosti. Tento **bezkartáčový** motor typu inrunner **využívá Hallových** sond. **Zapojení** motoru je do **hvězdy s nevyvedeným středem**. Motor je **využíván** v modelech aut v **měřítku 1:10**.

LRP Vector K7 Sensored Brushless Motor (21.5T)	
Otáčky za minutu	12 580 ot/min
Hmotnost	154 g
Maximální výkon	145 W
Počet otáček motoru na volt ( $K_v$ )	1700
Provozní napětí	3,7 – 14,8 V
Účinnost	93 %
Průměr osy	3,17 mm

Tabulka 2: Specifikace elektromotoru [33]

Otáčky za minutu i výkon jsou ovlivněny počtem závitů motoru, v tomto případě 21.5T. S menším počtem závitů motoru výkon i otáčky rostou a motor odebírá větší proud při stejném napájecím napětí.

### 6.1.2 Elektronická jednotka

Otáčky BLDC motoru budou řízeny pomocí elektronického senzorového regulátoru řady LRP Spin Brushless speed-controls. Tento regulátor je pro BLDC motory od 9.5 závitů. K určení polohy rotoru využívá Hallových sond v BLDC motoru. V případě problémů jako přehřátí motoru, vybitá baterie a dalších inicializuje tento stav pomocí třech LED diod. Lze na něm nastavit typ baterie, tedy minimální napětí, nastavení kroutícího momentu a režim zpátečky.

LRP Brushless speed-controls	
Provozní napětí	3,7 - 14,8 V
Špičkové zatížení	100 A / fáze
Hmotnost	32 g
Spínaný stabilizátor napětí	5,5 V/ 2 A

Tabulka 3: Specifikace regulátoru otáček [39]

Regulátor otáček má zabudovaný stabilizátor napětí, s jehož pomocí napájí servo tester. K testru je možné připojit až tři elektronické regulátory otáček či serva. Může pracovat ve třech režimech testování. V manuálním režimu se rychlost řídí otočným potenciometrem. Další režim neutrální polohy nalezne střední bod serva. Poslední automatické nastavení umožňuje pohyb serva z krajních poloh. V tomto případě bude servo tester pracovat v manuálním nastavení. Odebíraný proud ze zdroje bude řízen otočným potenciometrem.

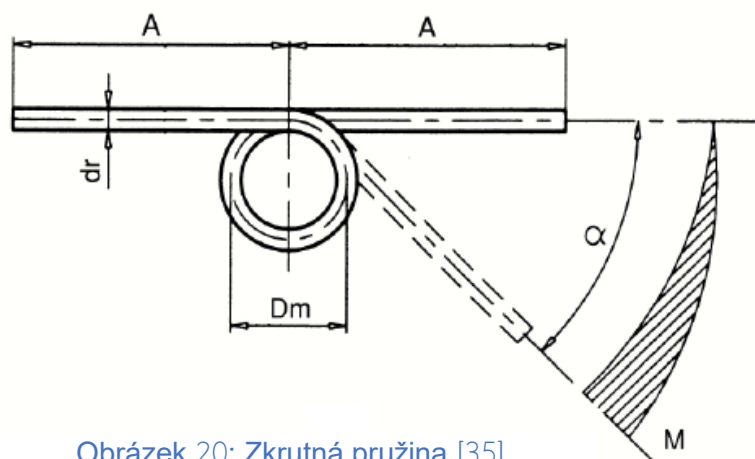
Jako zátěž poslouží DC motor Himoto RC 540. Jedná se o standardní univerzální stejnosměrný motor pro modely aut v měřítku 1:10. Průměr hřídelky je 3,17 mm. Bližší informace o motoru nejsou dostupné.

### 6.1.3 Pružiny

Zkrutná pružina využívá zatěžování navinutých drátů. Z katalogového letáku firmy Alcomex byly vybrány pružiny TO680R a TO950R. Jejich parametry jsou v následující tabulce.

Název pružiny	Průměr drátu (mm) <i>dr</i>	Středový průměr pružiny (mm) <i>Dm</i>	Počet závitů	Délka ramene (mm) <i>A</i>	Úhel natočení (°)	Požadovaný točivý moment (Nmm) <i>M</i>	Tuhost pružiny (Nmm/°) <i>k</i>
TO680R	1	6	3	35	44	138	3,12
TO950R	1,25	7,3	3	40	41	258	6,26

Tabulka 4: Specifikace pružin [35]



Obrázek 20: Zkrutná pružina [35]

#### 6.1.4 Vysílač

Jako vysílací prvek je využita laserová dioda F-laser. Jedná se o zdroj úzkého paprsku o průměru 4 mm s vlnovou délkou 650 nm. Viditelná vlnová délka je výhodná vzhledem k vhodnému nastavení průchodu kotoučem. Proti LED diodě má LD dioda rychlejší dobu náběhu. V tabulce jsou uvedeny typické hodnoty modelu F-LASER 5 mW.

F-LASER 5 mW	
Optický výkon	3 mW
Provozní napětí	3 V
Provozní proud	25 mA
Vlnová délka	650 nm
Životnost	3000 h

Tabulka 5: Specifikace laserové diody F-LASER 5 mW [36]

Obecně je lepší laserové diody napájet z proudového zdroje, neboť ten poskytuje stálý proud i při změně zátěže. Jelikož lze použít Arduino jako zdroj napětí, bude před LD zařazen v sérii rezistor hodnoty 47 Ω. Rezistor vymezí procházející proud, ale také nastaví optimální podmínky pro laserovou diodu. Do obvodu bude také přidána ochranná usměrňovací dioda. Napájecí napětí může Arduino dodávat v hodnotě 5 V a 3,3 V. Obvod s LD bude připojen tedy k pinu 5 V a pinu GND. Proudový limit pro Arduino, které je napájeno přes USB port, je 500 mA.

#### 6.1.5 Přijímač

Fotodetektozem monochromatického paprsku je fototranzistor SFH 309. Spektrální rozsah vlnových délek je od 380 nm do 1150 nm. Maximální citlivost má na vlnovou délku 860 nm.

Fototranzistor SFH 309	
Maximální citlivost	860 nm
Spektrální rozsah	380 – 1150 nm
Proud kolektorem	0,48 mA
Skupina	5

Tabulka 6: Specifikace fototranzistoru SFH 309 [37]

Fototranzistor nemá v tomto případě vyvedenou bázi. Zapojení fototranzistoru je se společným kolektorem. Pokud světlo nedopadá na fototranzistor, je výstupní napětí nulové. Naopak při maximální intenzitě světla je výstup roven maximálnímu napětí. Jedná se tedy o pozitivní logiku. Je v režimu přepínání, a proto je v sérii zapojen rezistor o hodnotě 10 k $\Omega$ . Na výstupním pinu fototranzistoru se střídá logická jednička s logickou nulou, lze jej přímo připojit na digitální vstup mikrokontroléru.

### 6.1.6 Arduino NANO

Pro tuto práci byla vybrána mikroprocesorová deska Arduino Nano. Její výhodou je nejen cena, ale také malé rozměry. Nejdůležitější částí této desky je mikrokontrolér ATmega328P od firmy Atmel. Flash paměť tohoto mikrokontroléru je 32 KB, 2 KB zabírá bootloader. Pracovní frekvence mikrokontroléru je 16 MHz. Díky USB převodníku na RS-232 může komunikovat sériovou komunikací s počítačem. Arduino Nano disponuje 8 analogovými vstupními/výstupními piny, dále 14 digitálními piny, z nichž 6 pinů může pracovat s pulzně šířkovou modulací. Na každém pinu může být až 40 mA. Arduino lze napájet v rozsahu 7 V - 12 V nebo 5 V přes mini USB konektor. [32]

#### 6.1.6.1 Programování

Vývojové prostředí nese stejnojmenný název Arduino IDE. Program je napsán v jazyce Java, a proto ho lze otevřít ve všech operačních systémech podporujících Java Virtual Machine. Programovací jazyk vychází z jazyka C a C++. [38]

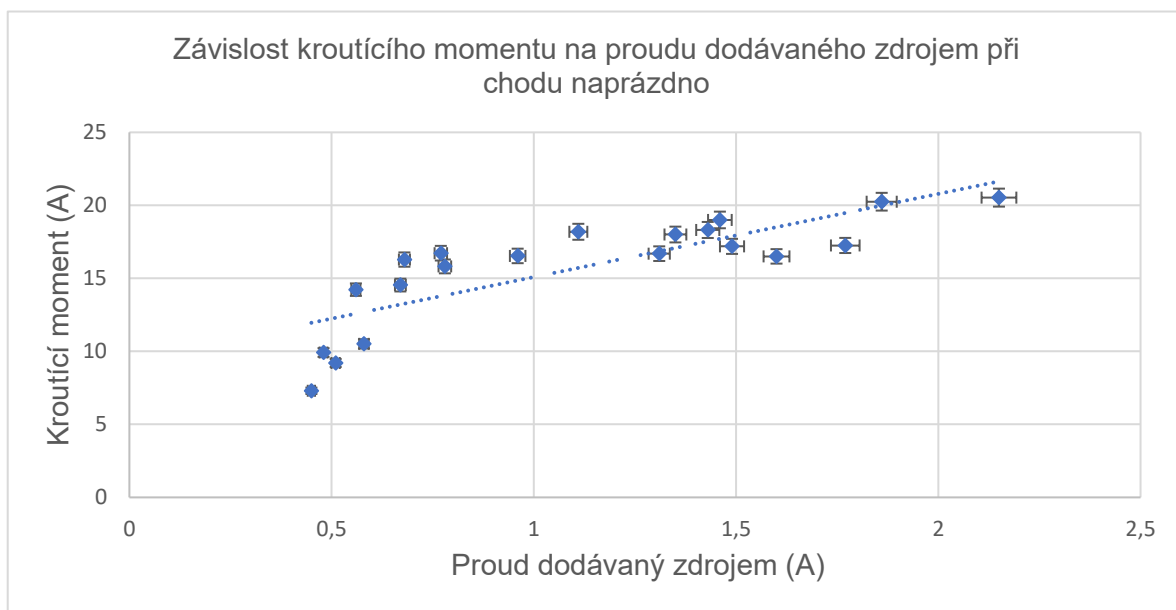
Ke komunikaci mezi Arduinem a dalším zařízením, v tomto případě s počítačem, je používán sériový UART neboli univerzální asynchronní přijímač/vysílač. Tato komunikace je možná přes piny 0 (RX) a 1 (TX) nebo přes USB kabel. Arduino Nano má pouze jeden UART, a proto lze používat buď jen piny nebo USB. [38]

K zobrazení přijatých dat z Arduina slouží sériový monitor, který se nachází přímo ve vývojovém prostředí. Přes sériový monitor lze data také odesílat. Protože je využita sériová komunikace mezi počítačem a deskou Arduina pomocí USB kabelu, je tím vyřešeno i napájení desky.

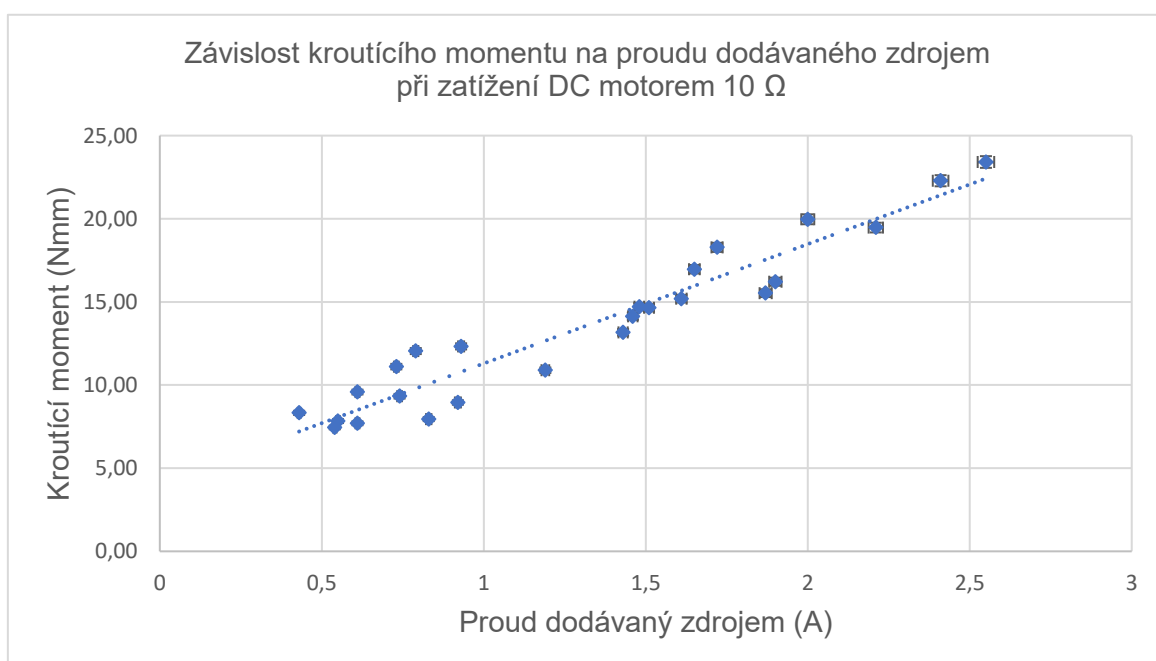
V programu je volána funkce *pulseIn()*. Tato funkce měří délku impulsu a vrací její hodnotu.

## 7 Měření

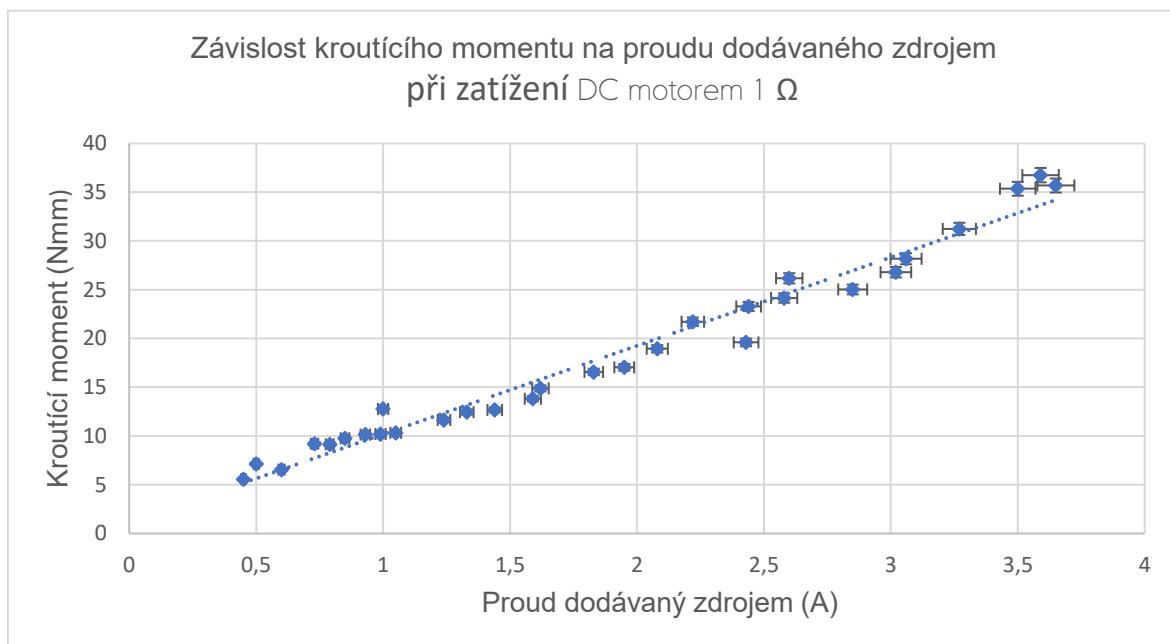
Měření probíhalo při konstantním napětí 8 V. V první části je motor BLDC hnací a DC motor bude plnit funkci dynamu. DC motor byl v průběhu měření rozpojen, zkratován a propojen výkonovým rezistorem o hodnotě 1 a 10 ohmů. Podle teorie je krouticí moment přímo úměrný proudu procházejícím vinutím. Výsledný moment je v tomto případě vyobrazen v závislosti na proudu dodávaný zdrojem do regulátoru. Střední hodnota tohoto proudu byla odečtena z ampérmetru. Rozsah otáček je od 1000 až do 8000 otáček za minutu pro níže uvedené grafy, pokud nejsou otáčky motoru udány. V grafech je znázorněna směrodatná odchylka aritmetického průměru.



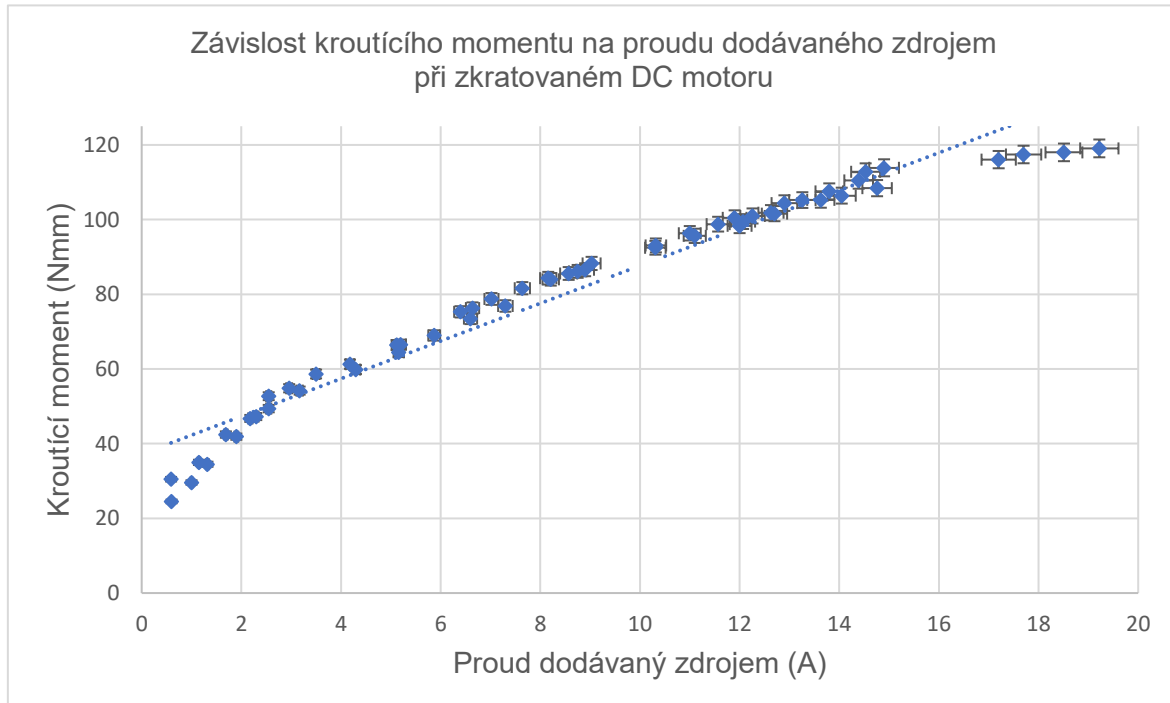
Charakteristiky se vlivem zapojením rezistorů značně mění. Při dalším měření byly svorky DC motoru spojené pomocí výkonových rezistorů. Na následujícím grafu je motor zatěžován rezistorem o hodnotě 10  $\Omega$ .



Při klesající hodnotě rezistorů roste proud potřebný k roztočení motoru na dané otáčky. Jelikož platí přímá úměra proudu a výsledného momentu, roste rovněž i moment.

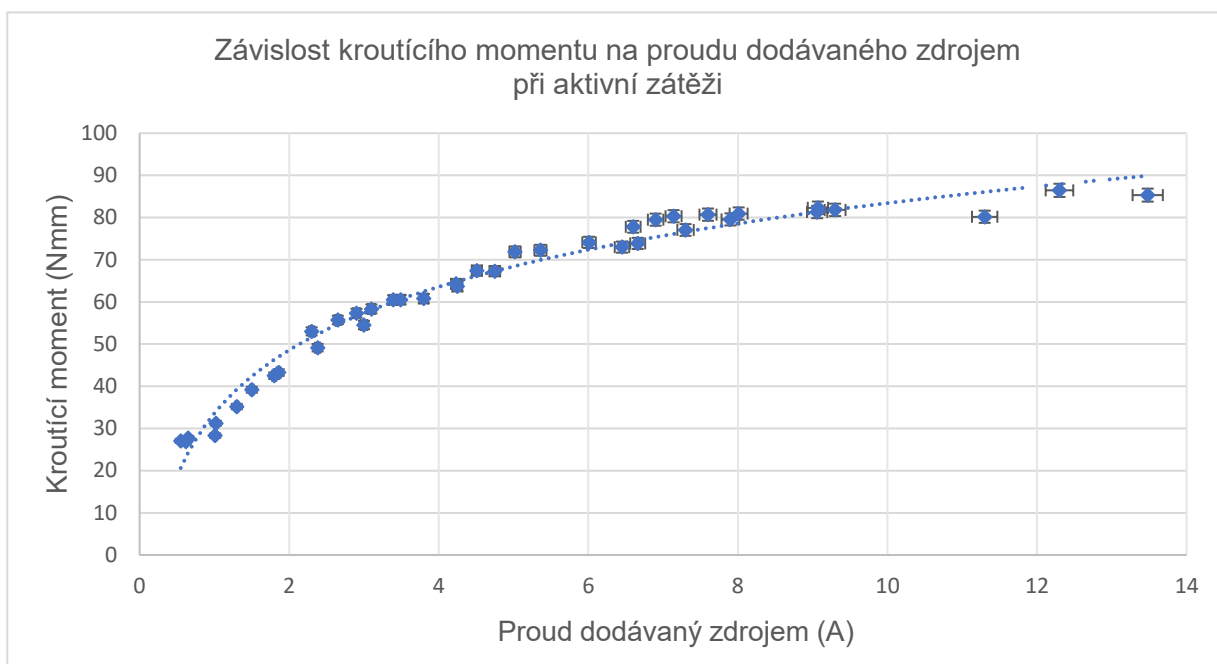


Protože při zkratovaném DC motoru dosahuje proud vysokých hodnot, moment také roste. Motor dosahuje při proudu 16 A téměř 115 Nmm. Aby motor dosáhl 1000 ot/min je potřeba mu dodat proud o velikosti 1 A.

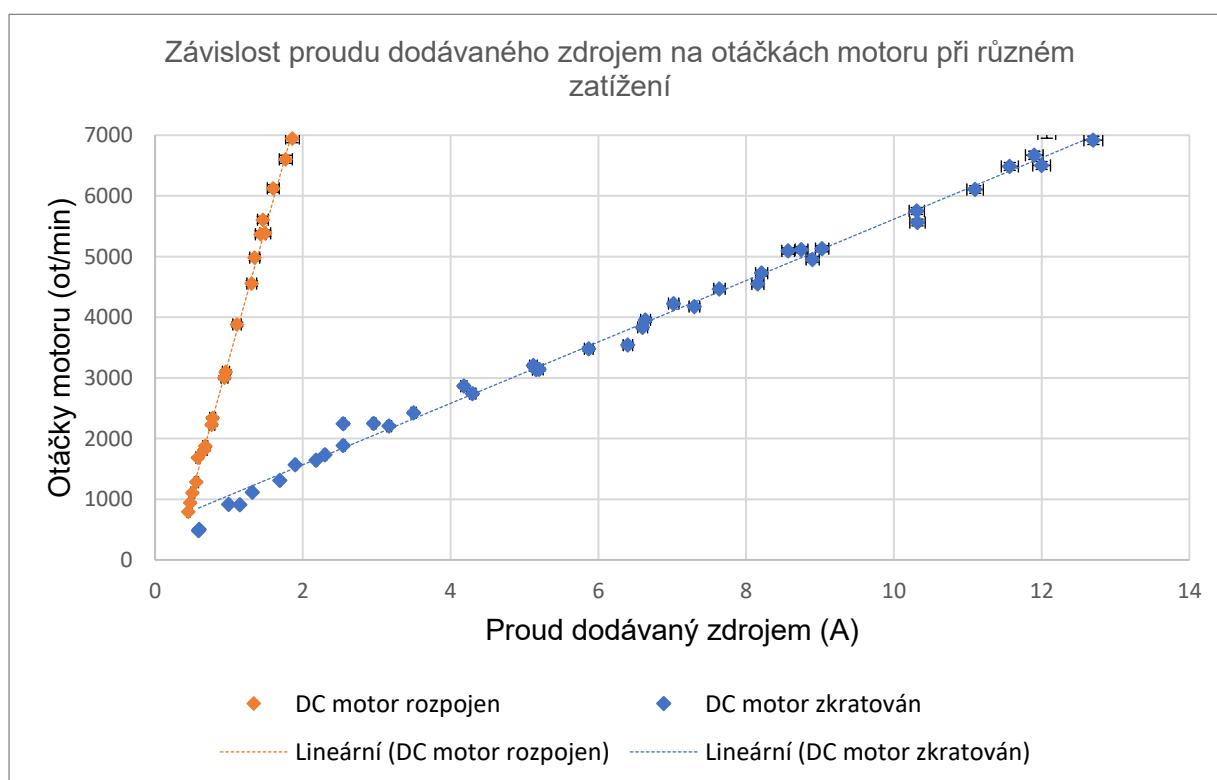




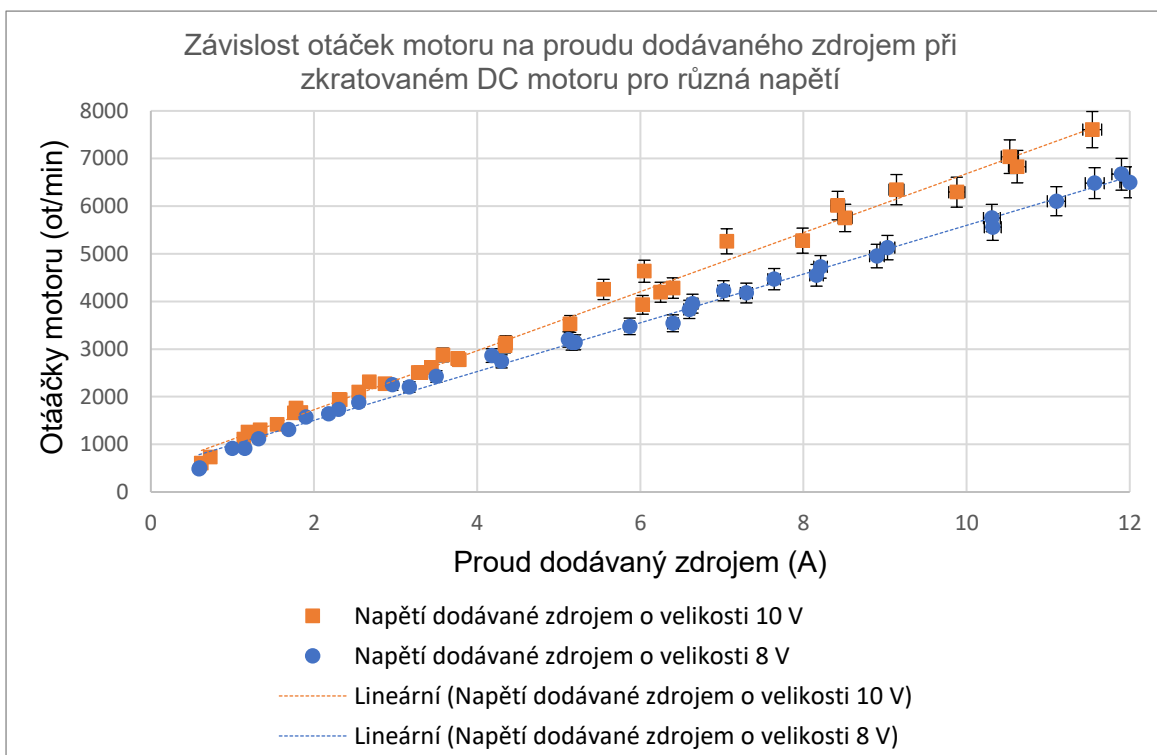
Poté byl využit DC motor jako aktivní zátěž. Jeho napětí bylo zvyšováno tak, aby napětí generované dynamem a napětí dodávané zdrojem byla rovna. Výsledný moment je zobrazen na obrázku níže.



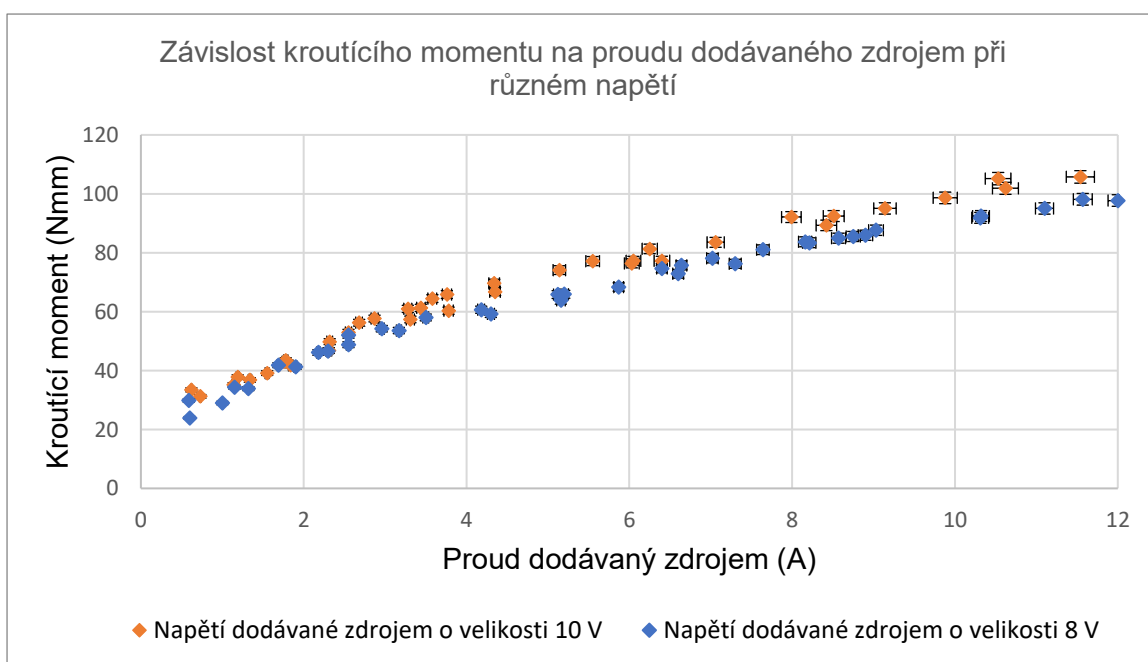
Na dalším grafu je vyobrazena závislost otáček na proudu dodávaného zdrojem při různém zatížení. Proud je přímo úměrný otáčkám motoru a také se zvyšuje s rostoucí zátěží.



Napájecí napětí ovlivňuje proud potřebný k roztočení motoru na určité otáčky. Jak je z grafu níže patrné, proud potřebný k docílení určité rychlosti se s rostoucím napětím snižuje při konstantní zátěži motoru. Maximální dosažitelné otáčky motoru se zvýší s rostoucím napětím, což ale v grafu znázorněno není

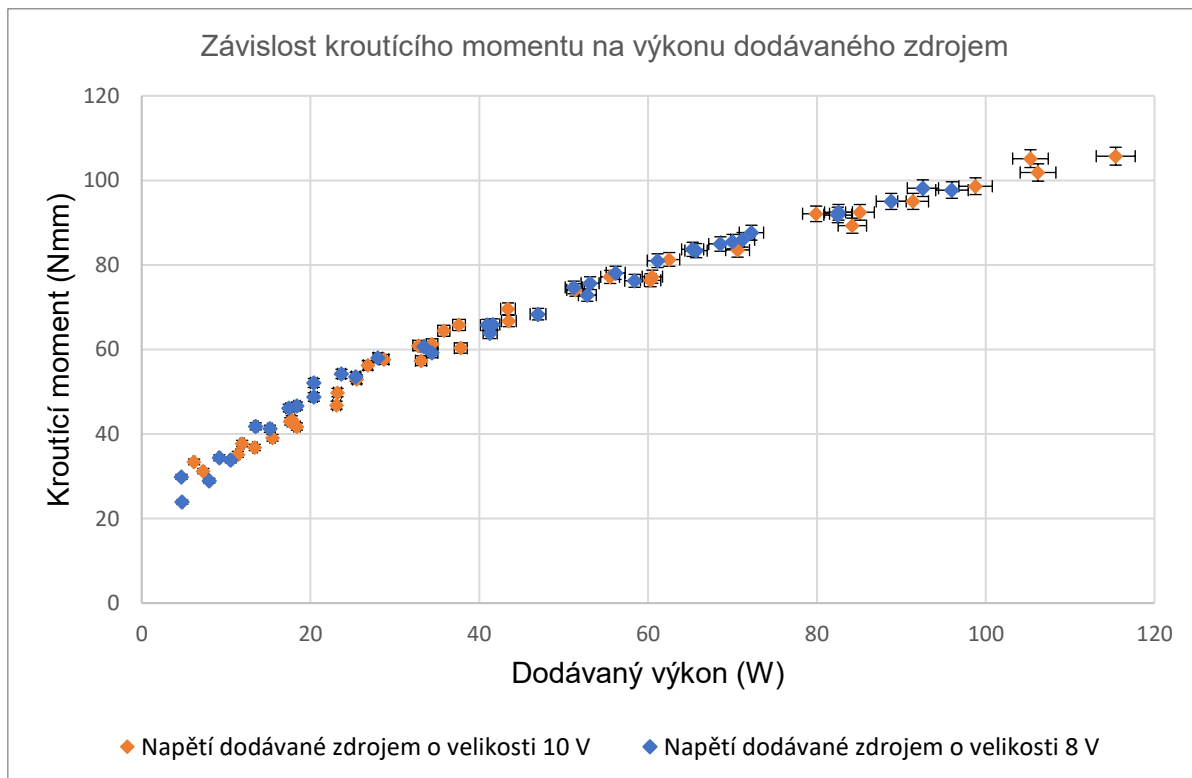


Dle momentově proudové charakteristiky dané vzorcem (2.6) závisí výsledný točivý moment pouze na fázovém proudu a není nijak ovlivňován napájecím napětím. Ovšem proud dodávaným zdrojem se vlivem napětí mění.



Zvýšením napětí zdroje dochází k snížení proudu dodávaného zdrojem do regulátoru. Dle naměřených výsledků je dodávaný výkon stále stejný. Platí tedy rovnice:

Napětí dodávané zdrojem a proud dodávaný zdrojem se mění ve stejném poměru.



## 7.1 Režim rekuperace

Při brždění rekuperací funguje motor jako generátor. V tomto režimu dokáže přeměnit mechanickou energii na elektrickou. Otáčením rotorového magnetu se v motoru indukují napětí ve fázovém vinutí, jak již bylo zmíněno u popisu BLDC motoru. Generované napětí je funkcí polohy rotoru, tudíž je jeho amplituda ovlivněna rychlostí jeho rotace. Nejčastěji má lichoběžníkový průběh jako je na obrázku 7. Napětí na fázích jsou vzájemně posunuta o 120 stupňů elektrických.

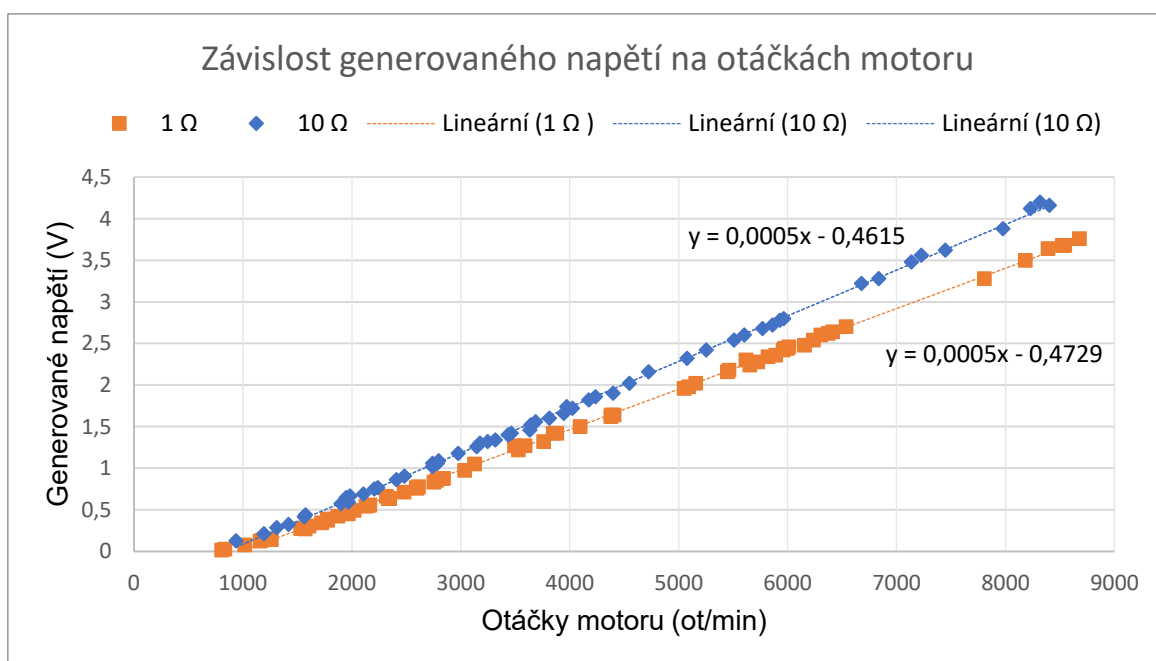
Výsledné generované napětí je usměrněno pomocí trojfázového můstkového usměrňovače. Každá fáze vinutí je přivedena mezi dvě diody. Zátěž je pouze tvořena rezistorem hodnoty 1  $\Omega$  a také 10  $\Omega$ .

Indukované napětí je dle rovnice (2.5) závislé na napěťové konstantě. Katalogová hodnota konstanty BLDC motoru je v jednotce počet otáček na volt, proto platí rovnice:

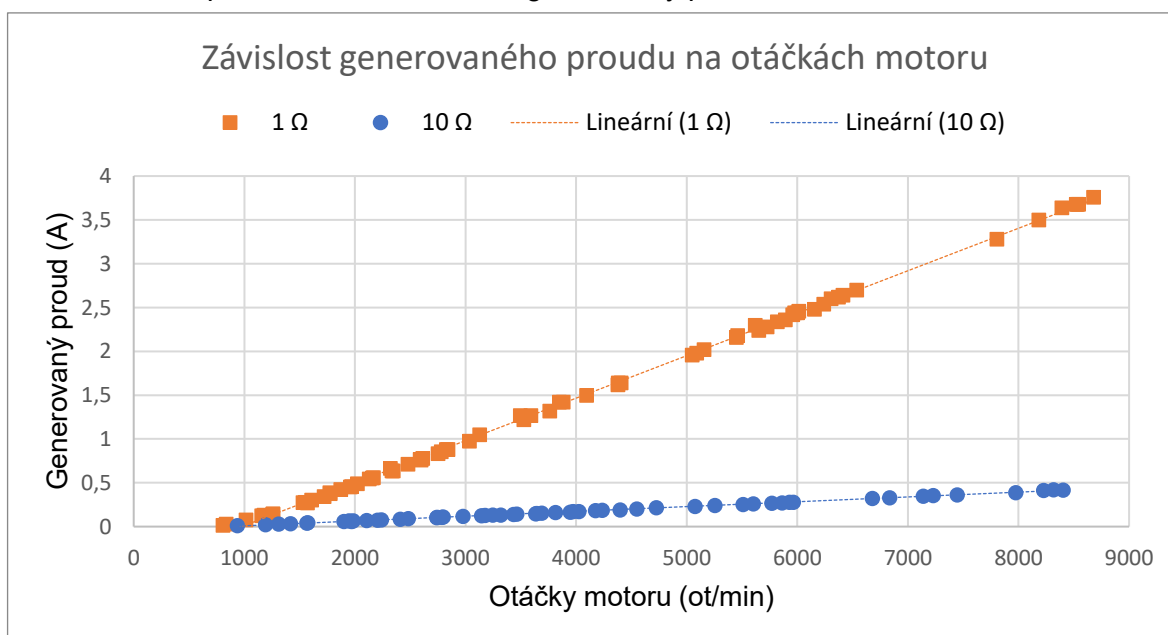
—

Velikost napětí bude ovlivněna úbytkem napětí na diodách, která představuje hodnotu menší než 1 V. Výsledky ukazují závislost napětí, proudu a výkonu na otáčkách motoru.

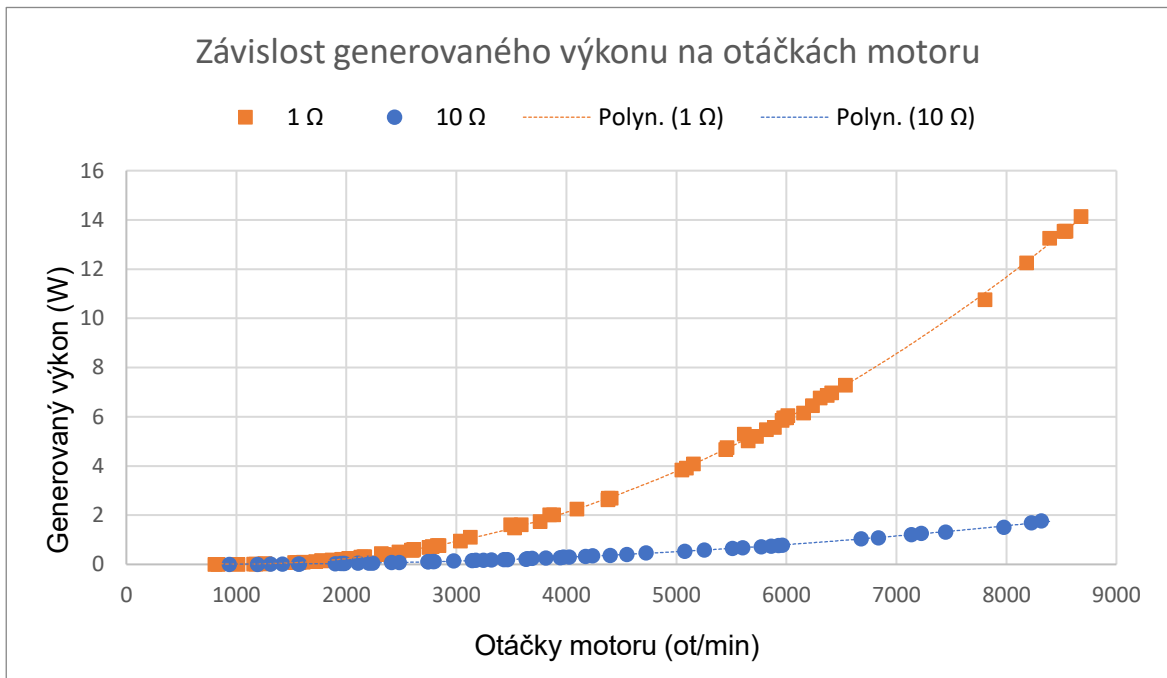
Následující graf zobrazuje lineární závislost mezi generovaným napětím a otáčkami motoru. Směrnice přímky se s větším rezistorem přibližuje k vypočítané hodnotě.



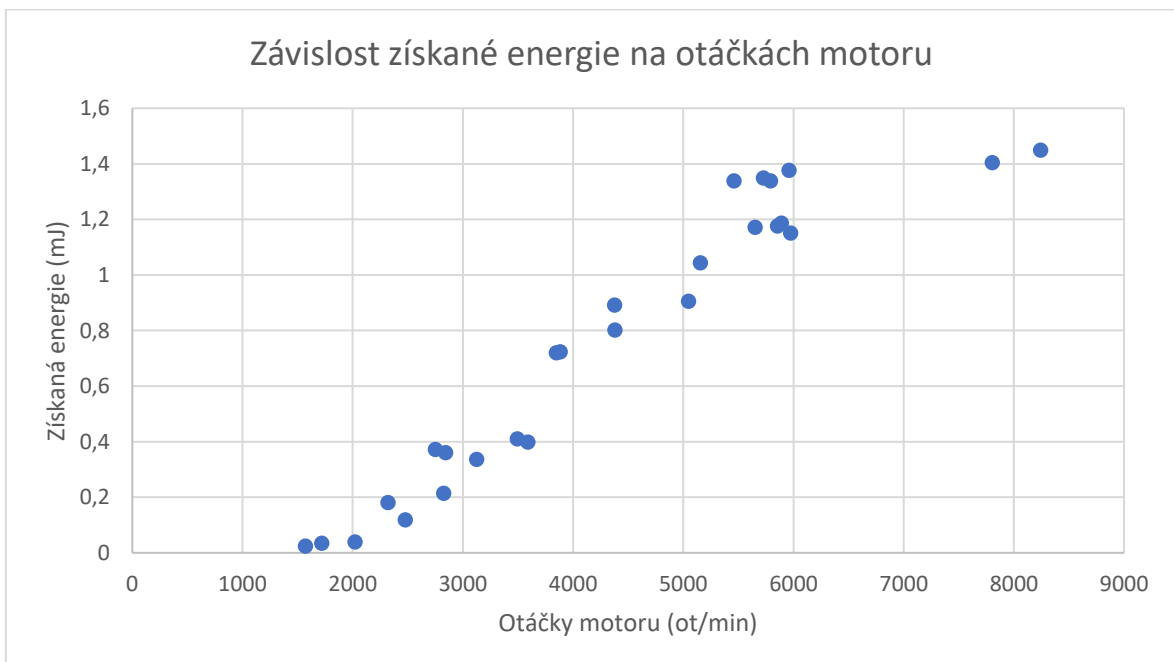
Hodnota generovaného proudu stejně jako generované napětí lineárně roste s rychlostí. Na rozdíl od napětí s větším rezistorem generovaný proud klesá.



Výkon stejně jako proud s rostoucím rezistorem klesá; v závislosti na otáčkách se nezvyšuje lineárně, ale kvadraticky.



Pružina je schopna akumulovat energii v deformační práci. V následujícím grafu je znázorněná získaná energie při rekuperaci s rezistorem o hodnotě 1  $\Omega$ .



## 8 Závěr

Účel práce bylo navrzení a realizace soustavy umožňující měření kroutícího momentu motoru pomocí optických systémů. Bylo využito zkrutné pružiny, jejíž deformace, úhel natočení, je úměrná momentu. Úhel natočení pružiny snímá jednocestná optická závora. K vyhodnocení zaznamenaných hodnot je využita vývojová deska Arduino Nano.

Naměřené výsledky ukazují závislost točivého momentu na velikosti zatížení DC motorem. Při rozpojeném DC motoru běží BLDC motor naprázdno a k otáčení potřebuje jen nepatrný proud dodávaný zdrojem v porovnání se zatěžováním zkratovaným DC motorem. S rostoucím proudem roste také i moment. DC motor byl využit také jako aktivní zátěž. Napětí dodávané zdrojem bylo zvyšováno tak, aby bylo stejné hodnoty jako napětí generované dynamem.

Napájecí napětí ovlivňuje velikost proudu potřebného k roztočení motoru na určité otáčky. S rostoucím napětím se snižuje velikost proudu dodávaného zdrojem. Závislost kroutícího momentu na proudu procházejícího fází není dle teorie ovlivněna napájecím napětím, ale proud dodávaný zdrojem se vlivem napětí mění. Snížení proudu dodávaného zdrojem je ve stejném poměru jako je zvýšení napětí.

Měření mělo ukázat závislost mezi naměřeným kroutícím momentem a proudem dodávaným zdrojem do regulátoru otáček. U zatíženého motoru má tato charakteristika téměř lineární charakter, zatímco u nezatíženého motoru je charakteristika zcela nelineární. Měření je tedy nepřesné pro malé výchylky. Při zatěžování motoru je dosahováno přesnějších výsledků.

Porovnávána je také získané napětí v režimu rekuperace v závislosti na otáčkách soustavy. Generované napětí roste s rostoucím odporem zátěže, zatímco proud s rostoucím odporem zátěže klesá. Byla změřena také energie akumulovaná v zkrutné pružině.

Rameno pružiny je uchyceno co nejbližší tak, aby ohyb drátu ovlivňoval měření co nejméně.

Naměřené výsledky mohly být dále ovlivněné počátečním záběrem pružiny, a také nepřesností zdroje.

Měření by se dalo vylepšit využitím fotodiody, která je v porovnání s fototranzistorem rychlejší. Také využitím pružin s nižší tuhostí, která by se více ohýbala.

## 9 Reference

- [1] SLEMON, Gordon R. Electric motor. In: *Britannica.com* [online]. 16.11.2018 [cit.10.12.2018]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/electric-motor>
- [2] CONDIT, Reston. Brushed DC Motor Fundamentals. In: *Microchip application note: AN905* [online]. 2010 [cit.11.10.2018]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00905B.pdf>
- [3] KOYA, Shameer. DC machines – introduction. Electrical engineering tutorial. In: *Electricalteacherblog.wordpress.com* [online]. 7.12.2015 [cit.12.10.2018]. Dostupné z: <https://electricalteacherblog.wordpress.com/2015/12/07/dc-machines-introduction-and-construction/>
- [4] PIVOŇKA, Pavel. Stejnoseměrné motory. [přednáška]. In: *Moodle.fel.cvut.cz* [online]. [cit.12.10.2018]. Dostupné z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/77621/mod\\_resource/content/1/SS-Motory\\_2012.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/77621/mod_resource/content/1/SS-Motory_2012.pdf)
- [5] ROUBÍČEK, Ota. Princip stejnosměrných motorů. In: *Elektrika.cz* [online]. 13.8.2008 [cit. 14.10.2018]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/princip-stejnosmernych-motoru>
- [6] YEDAMAL, Padmaraja: Brushless DC (BLDC) Motor Fundamental. In: *Microchip application note: AN885* [online]. 2003 [cit. 14.10.2018]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>
- [7] ŠIMON, Josef: BLDC aneb DC motor s nulovými náklady na údržbu, *Časopis Elektro*, [online] 2011 [cit.12.10.2018]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/bldc-aneb-dc-motor-s-nulovymi-naklady-na-udrzbu--10016>
- [8] BLDC Motor – Brushless DC Motor Introduction. [online]. [cit.12.10.2018]. Dostupné z: [http://www.nmbtc.com/brushless-dc-motors/engineering/brushless\\_dc\\_motors\\_engineering/](http://www.nmbtc.com/brushless-dc-motors/engineering/brushless_dc_motors_engineering/)
- [9] Rclab.info: The basics of electric power: In: *Brushless motors* [online]. [cit.12.10.2018]. Dostupné z: <http://www.rclab.info/2014/01/the-basics-of-electric-power-brushless.html>
- [10] 2-2-2 Structure And Application Of Brushless DC Motors. In: *Nidec Corporation* [online]. 2014 [cit.14.10.2018]. Dostupné z: <http://www.nidec.com/en-NA/technology/motor/basic/00019/>
- [11] ZHAO, Jian a YANGWEI, Yu. Monolithic Power System [online]. Brushless DC Motor Fundamentals Application Note. In: *MPS AN047* [online] 2011 [cit.14.10.2018] Dostupné z: [https://www.monolithicpower.com/pub/media/document/Brushless\\_DC\\_Motor\\_Fundamentals.pdf](https://www.monolithicpower.com/pub/media/document/Brushless_DC_Motor_Fundamentals.pdf)

- [12] BELLO, Abdulaziz a KILISHI, Ibrahim Muhammad a BARI, Muntaka Musa a ABUBAKAR, Usman. Comparative Review Of PMSM And BLDCM Based On Direct Torque Control Method. In: *IJSTR* [online]. 2014 [cit. 14.10.2018]. Dostupné z: <http://www.ijstr.org/final-print/mar2014/Comparative-Review-Of-Pmsm-And-Bldcm-Based-On-Direct-Torque-Control-Method-.pdf>
- [13] MADAN, Pushek. Brushless DC Motors – Part I: Construction and Operating Principles. In: *EDN* [online]. 11.2.2013 [cit. 3.11.2018]. Dostupné z: <https://www.edn.com/design/sensors/4406682/Brushless-DC-Motors---Part-I--Construction-and-Operating-Principles>
- [14] Brown, Ward. Brushless DC Motor Control Made Easy. In: *Microchip application note: AN857* [online]. 2002 [cit. 14.10.2018]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00857a.pdf>
- [15] ŠIMON, Josef. BLDC aneb DC motor s nulovými náklady na údržbu. In: *Elektro* [online]. 2011 [cit. 5.4.2018]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/obsah-cisla-10-2011--210>
- [16] Encyklopedie fyziky. Hallův jev [online]. 16.2.2010 [cit. 21.4.2018]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/294-halluv-jev#>
- [17] CROWDER, Richard M. Electric drives and electromechanical systems. Oxford: Elsevier, 2006. ISBN-13: 978-0-7506-6740-1. Dostupné z: <http://www.wagnerrp.com/files/9780750667401.pdf>
- [18] HLINOVSKÝ, Vít. Modelování BLDC motoru [přednáška]. In: *Moodle.fel.cvut.cz* [online]. Dostupné z: [http://motor.fel.cvut.cz/sites/default/files/predmety/A3B14EPR/12%20\\_%20BLDC%20motor%20simulace%20-%20matematick%C3%BD%20model.pdf](http://motor.fel.cvut.cz/sites/default/files/predmety/A3B14EPR/12%20_%20BLDC%20motor%20simulace%20-%20matematick%C3%BD%20model.pdf)
- [19] HLINOVSKÝ, Vít. Elektronicky komutovaný motor IV. [přednáška]. In: *Moodle.fel.cvut.cz* [online]. Dostupné z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/126107/mod\\_resource/content/1/4%20\\_%20Elektronicky%20komutovan%C3%BD%20motor%20-%20EC.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/126107/mod_resource/content/1/4%20_%20Elektronicky%20komutovan%C3%BD%20motor%20-%20EC.pdf)
- [20] DIETHER, JOHN. How regenerative braking work. In: *CarsDirect.com* [online]. 23.5.2016 [cit. 10.12.2018]. Dostupné z: <https://www.carsdirect.com/green-cars/how-does-regenerative-braking-work>
- [21] ČERNÝ, Michal. Superkondenzátory místo akumulátorů? In: *RoboDoubě.cz* [online]. 29.9.2014 [cit. 12.12.2018]. Dostupné z: <http://robodoupe.cz/2014/superkapacitory-misto-akumulatoru/>
- [22] VAVROUŠ, Jan. Pohon přední nápravy modelu elektromobilu [online]. 2014 [cit. 5.12.2018]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/24611>
- [23] ONDRÁK, Miroslav a SHUCK, Karel. Šroubovitě pružiny. Kurs technických znalostí Praha 1965 . 84. ISBN: 621.81-272

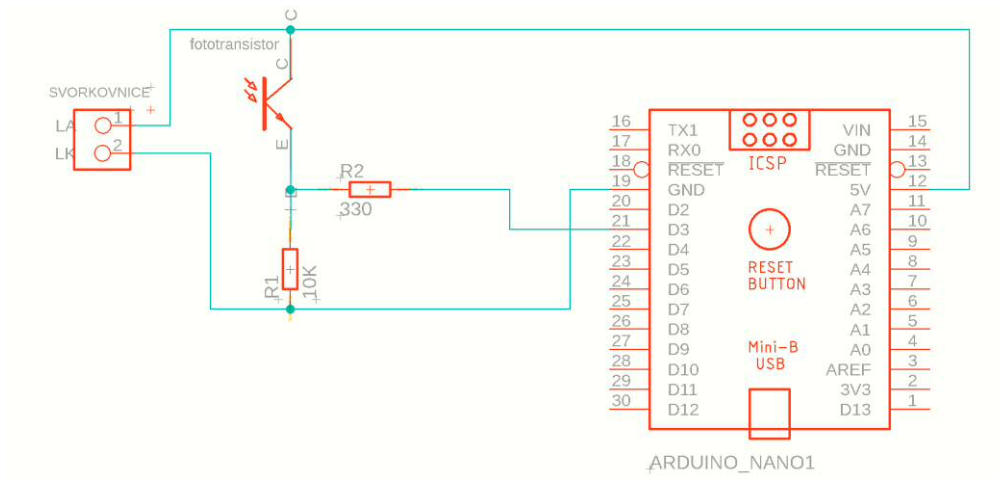


- [24] MITCalc. Mechanical, Industrial and Technical Calculations. Strojírenské, průmyslové a technické výpočty. In: *Mitcal.com*. Dostupné z: <http://www.mitcalc.com/doc/springs/help/cz/springs.htm>
- [25] SCHOLTZ, Martin. Classical Mechanics and Dynamical Systems. With calculations in Mathematica [online]. 27.12.2012 [cit. 11.5.2018]. Dostupné z: <http://utf.mff.cuni.cz/~scholtz/data/mechanics-mathematica.pdf>
- [26] SZABÓ, Tamás. **Mechatronical Modelling. Lagrange's Equations** of Motion of Second Kind. In: *Moodle.autolab.uni-pannon.hu* [online]. 2014 [cit. 15.12.2018]. Dostupné z: [http://moodle.autolab.uni-pannon.hu/Mecha\\_tananyag/mechatronikai\\_modellezes\\_angol/index.html](http://moodle.autolab.uni-pannon.hu/Mecha_tananyag/mechatronikai_modellezes_angol/index.html)
- [27] STEJSKAL, Vladimír, BROUSIL, Jaromír and STEJSKAL, Stanislav. *Mechanika III*. Praha : ČVUT, 1993.[5.11.2018]. 204.ISBN 80-01-00918-1
- [28] MAIXNER, Ladislav. *Mechatronika*. Vydání první. Brno: Computer Press, 2006. [cit. 8.12.2018] 284. ISBN 80-251-1299-3
- [29] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky*. Optoelektronika, optoelektronické prvky a optická vlákna. 3 díl. 185. Praha 2005. [cit. 8.9.2018]. ISBN 80-7300-184-5
- [30] NOVOTNÝ, Karel. *Optická komunikační technika*. 160. Praha 2007. [cit. 6.12.2018]. ISBN 978-80-01-03920-5
- [31] OLIVA, Petr. *Architektura počítačů*. [Přednáška]. Ostrava 2010. [cit. 1.1.2019]. Dostupné z: <http://poli.cs.vsb.cz/edu/apps/down/archpoc.pdf>
- [32] Arduino-shop. Arduino Nano V3.0 ATmega328. In: *Arduino-shop.cz* [online] Dostupné z: [https://arduino-shop.cz/hledani.php?q=arduino+nano&n\\_q=](https://arduino-shop.cz/hledani.php?q=arduino+nano&n_q=)
- [33] LRP. Blue is better. Vector k7 brushless motor – 21.5T. In: *Lrp.cc* [online]. Dostupné z: <https://www.lrp.cc/en/product/vector-k7-brushless-motor-215t/>
- [34] LRP. Blue is better. Spin super brushless speed-control. In: *Lrp.cc* [online]. Dostupné z: <https://www.lrp.cc/en/product/spin-super-brushless-speed-control/>
- [35] Alcomex Veren. Spanbroek. Torsieverem. 5.
- [36] GM Electronic. Laserová dioda F-Laser 5 mW. In: *Gme.cz* [online]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/laserova-dioda-f-laser-5mw>
- [37] GM Electronic. SFH – 309. In: *Gme.cz* [online]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/sfh309-5>
- [38] SLINTÁK, Vlastimil. Vývojové prostředí programování Arduina. In: *Uart.cz* [online]. Dostupné z: <https://uart.cz/90/ide-a-programovani-arduina/>

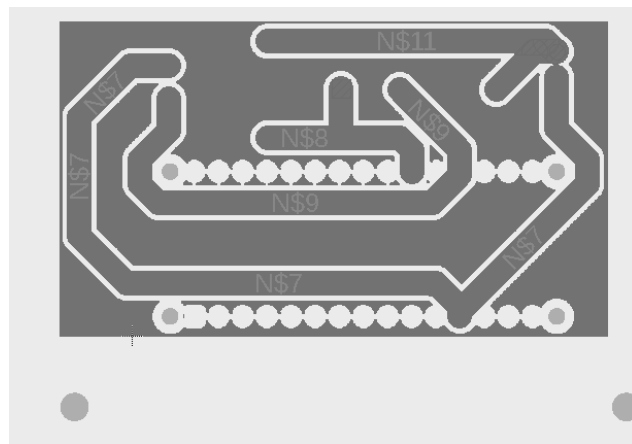
# 10 Příloha

## 10.1 Přijímač

### 10.1.1 Schéma

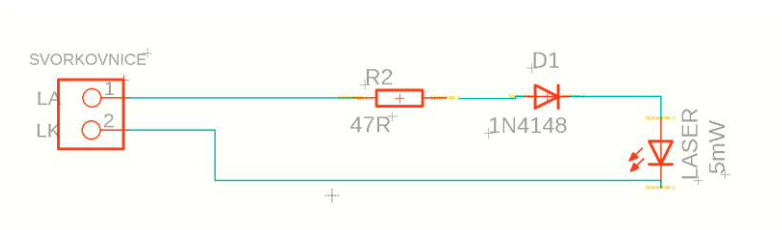


### 10.1.2 DPS

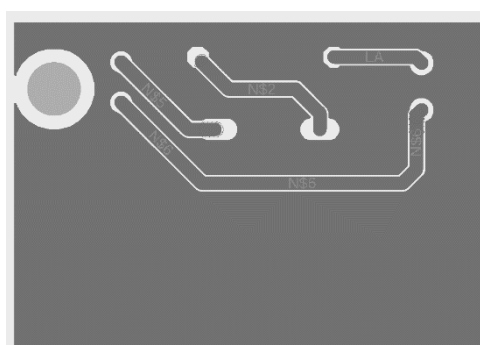


## 10.2 Vysílač

### 10.2.1 Schéma

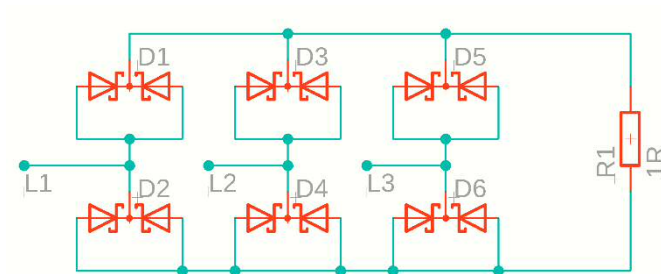


### 10.2.2 DPS

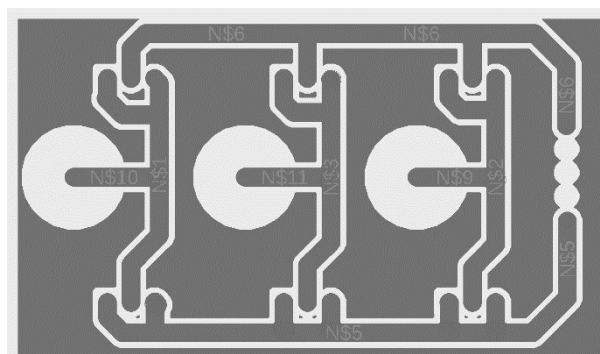


## 10.3 Třífázový usměrňovač

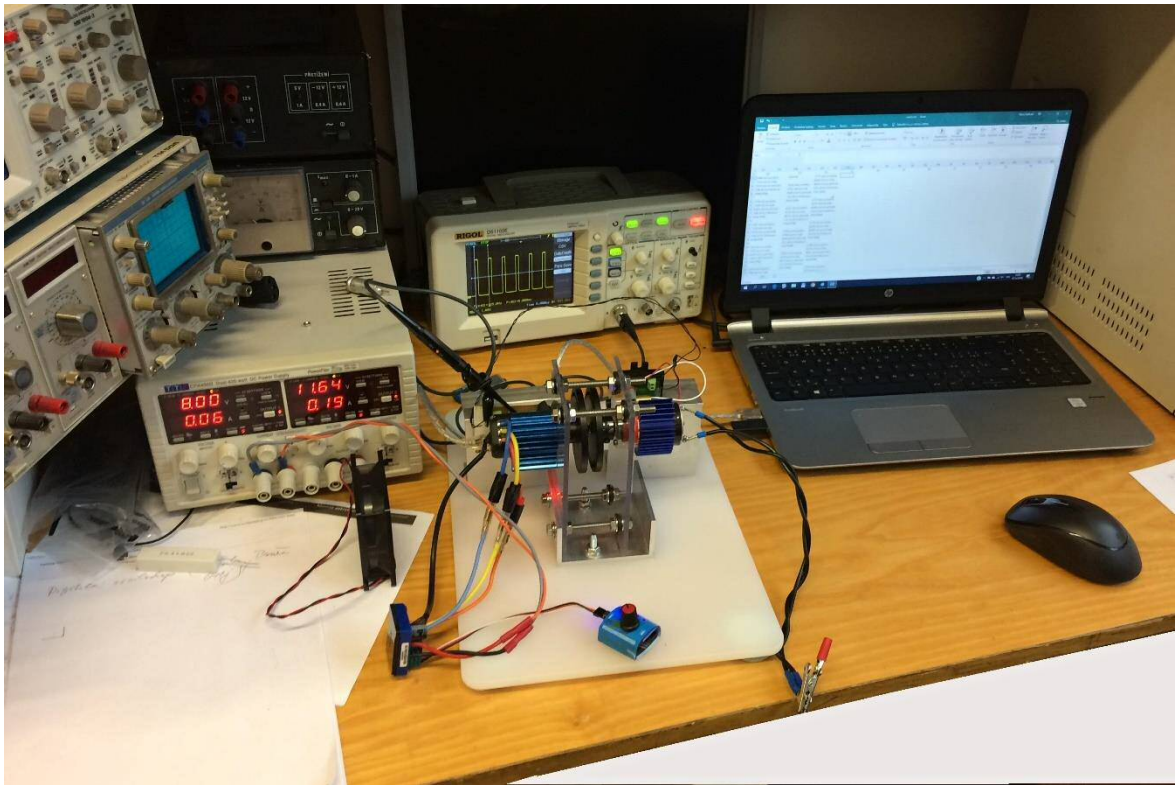
### 10.3.1 Schéma



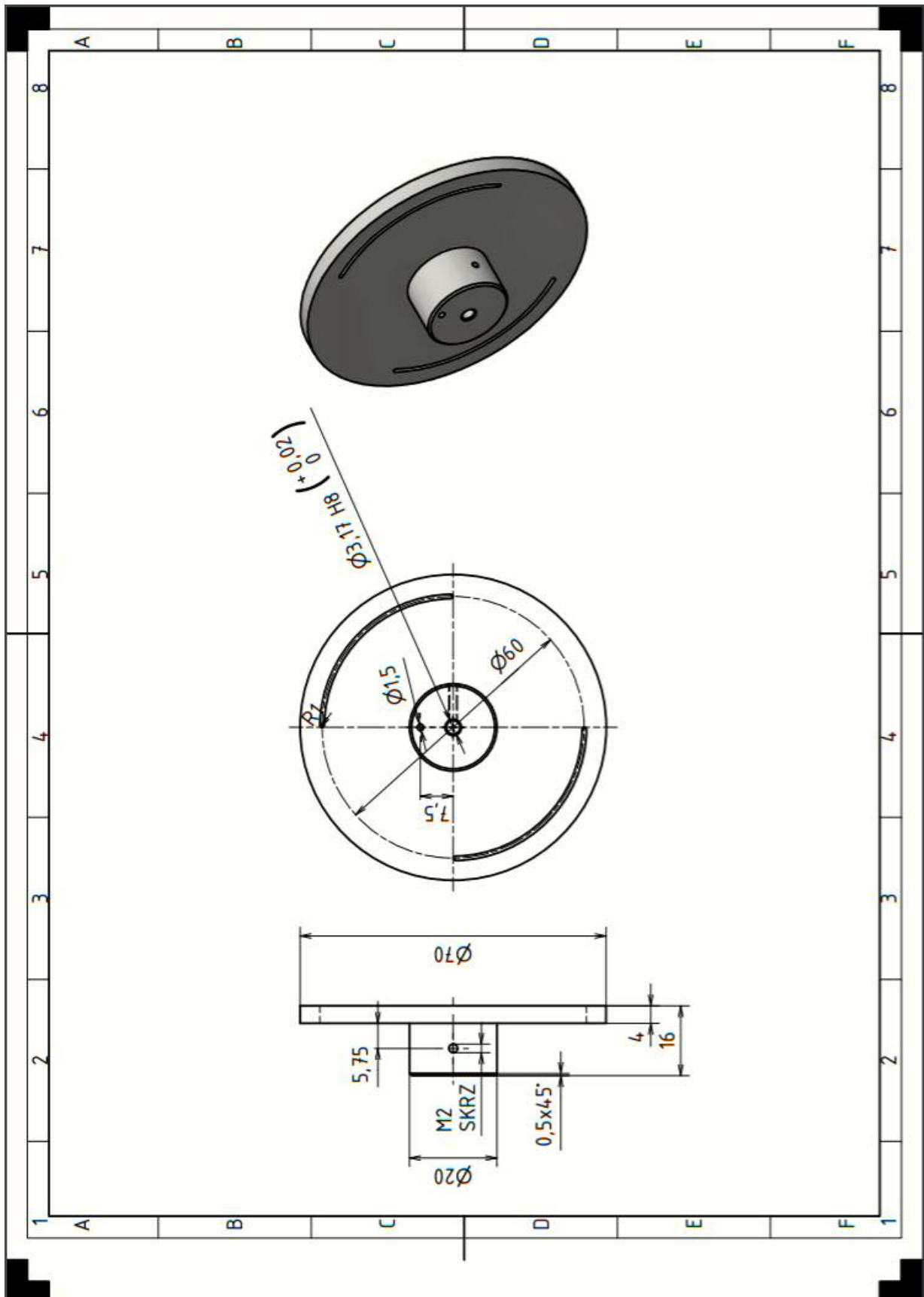
### 10.3.2 DPS



## 10.4 Pracoviště



## 10.5 Kotouč



## 10.6 Váleček

