



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta elektrotechnická**

**Katedra elektrických pohonů a trakce**

---

## **Řízení otáček BLDC motorů pomocí kitu Arduino**

### **BLDC motor speed control by Arduino kit**

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Ing. Jan Bauer, Ph.D.

**Ondřej Lipčák**

---

**Praha 2016**



České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrických pohonů a trakce

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Ondřej Lipčák**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Řízení otáček BLDC motorů pomocí kitu Arduino**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popište stavbu BLDC motoru
- 2) Nastudujte metody řízení otáček BLDC motorů
- 3) Prostudujte možnosti využití kitu Arduino pro realizaci zvolené metody řízení z bodu 2
- 4) Navrhněte obvody pro propojení BLDC motoru s kitem Arduino
- 5) Realizujte zvolenou metodu řízení z bodu 2

Seznam odborné literatury:

- [1] B. K. Bose: Power electronics and motor drives: advances and trends. Academic Press, Amsterdam, 2006.
- [2] Pavelka, J., Čeřovský, Z., Lettl, J.: Výkonová elektronika, Vydavatelství ČVUTv Praze, Praha, 2007
- [3] Brandštetter, P.: Střídavé regulační pohony - moderní způsoby řízení, VŠB Ostrava, 1999
- [4] Javůrek, J.: Regulace moderních elektrických pohonů, Grada Publishing, 2003, str. 190

Vedoucí: Ing. Jan Bauer, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

L.S.

Ing. Jan Bauer, Ph.D.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 1. 4. 2016



## **Prohlášení**

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

V Praze dne: .....

.....

podpis

## **Poděkování**

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval mému vedoucímu doktoru Bauerovi za námět na toto téma, za poskytování konzultací a za umožnění pracovat na praktické části práce v prostorách katedry.

## **Abstrakt**

Tato práce nabízí úvod do problematiky BLDC motorů. V první části jsou popsány jejich základní konstrukční směry. Je zde rovněž stručný rozbor jejich elektrických a mechanických vlastností. Další část se týká zejména problematiky sensorového a bezsensorového řízení. Uvedeno je také pojednání o používaných typech senzorů a o třífázovém napěťovém střídači, který se používá jako výstupní měnič. V posledních kapitolách je proveden návrh hardwaru a řídicího programu pro kit Arduino. Cílem práce je realizovat zvolenou metodu řízení pomocí desky Arduino Mega 2560. Pro tento účel byla vybrána sensorová metoda šestikrokové komutace na základě informace o poloze rotoru od Hallových sond.

## **Abstract**

This bachelor's thesis offers an introduction to BLDC motors. The first section describes their basic construction principles. There is also a brief analysis of their mechanical and electrical characteristics. The next section deals with sensed and sensorless motor control. This section also includes information about used types of sensors and about three phase voltage inverter which is used as an output energy source for the motor. The last chapters deal with hardware and software design for Arduino Mega 2560. The aim of this thesis is to implement chosen method of the motor control with help of the Arduino Mega 2560 prototyping board. For this purpose was chosen a sensed six-step commutation method based on the rotor position information from Hall effect sensors.

## **Klíčová slova**

BLDC motor, EC motor, bezkartáčový stejnosměrný motor, synchronní motor s permanentními magnety, elektronická komutace, třífázový napěťový střídač, Hallovy sondy, bezsensorové řízení, Arduino Mega 2560

## **Keywords**

BLDC motor, EC motor, brushless DC motor, synchronous motor with permanent magnets, electronic commutation, three phase voltage source inverter, Hall effect sensor, sensorless control, Arduino Mega 2560



# Obsah

1 Úvod.....	12
2 BLDC motor.....	13
2.1 Stavba motoru.....	13
2.1.1 BLDC s vnějším rotorem.....	13
2.1.2 BLDC s vnitřním rotorem.....	14
2.2 Stator.....	14
2.2.1 Drážkovaný stator.....	14
2.2.2 Stator bez drážek.....	15
2.3 Vinutí.....	16
2.4 Rotor.....	16
2.4.1 Permanentní magnety.....	17
2.4.1.1 Alnico.....	17
2.4.1.2 Ferity.....	17
2.4.1.3 Permanentní magnety ze vzácných zemin.....	17
2.5 Základní rovnice.....	17
2.6 Momentová charakteristika.....	18
2.7 Elektrická vs. mechanická úhlová rychlost.....	19
2.8 Princip činnosti.....	19
3 Řízení BLDC motorů.....	20
3.1 Střídače.....	20
3.1.1 Třífázový napěťový střídač.....	21
3.1.2 Unipolární vs. bipolární spínání.....	21
3.1.3 Nezávislé vs. komplementární spínání tranzistorů.....	22
3.1.4 Pulsně šířková modulace (PWM).....	22
3.2 Senzory polohy a otáček.....	22
3.2.1 Hallovy sondy.....	22
3.2.2 Optické enkodéry.....	23
3.2.3 Resolvery.....	24
3.3 Regulace rychlosti.....	25
3.4 Šestikroková komutace.....	27
3.4.1 Řízení pomocí Hallovyh sond.....	27
3.4.2 Bezsenzorové řízení.....	27
3.4.2.1 Metody založené na změně indukčnosti.....	28
3.4.2.2 Metody nepřímého měření indukovaného napětí.....	28
3.4.2.2.1 Metoda integrace indukovaného napětí.....	28
3.4.2.2.2 Metoda detekování třetí harmonické indukovaného napětí.....	28

3.4.2.3	Metoda detekce proudu nulovou diodou.....	29
3.4.2.4	Metody přímého měření indukovaného napětí.....	29
3.4.2.4.1	Metody měření průchodu indukovaného napětí nulou.....	30
3.4.3	Rozběh.....	32
3.4.3.1	Metoda rozběhové rampy.....	32
3.4.3.2	Metoda proměnné indukčnosti.....	33
3.4.3.3	Metoda jednoduchého rozběhu bez rampy.....	34
3.5	Metody založené na pozorovateli.....	35
4	Hardware.....	36
4.1	Motor.....	36
4.2	Řídicí část.....	36
4.2.1	Arduino.....	36
4.2.2	Arduino Mega 2560.....	36
4.3	Výkonová část - L6234.....	38
4.4	Měření.....	39
4.4.1	Měření proudu.....	39
4.4.2	Měření otáček.....	40
4.5	Ochrany.....	40
4.6	Osazení součástek.....	40
5	Software.....	41
5.1	Definování komutační sekvence na základě výstupů Hallových sond.....	41
5.2	Strategie řízení.....	42
5.3	Programování Arduina.....	43
5.4	Nastavení PWM.....	43
5.5	Strategie spínání.....	43
5.6	PWM rampa.....	43
5.7	Ovládání.....	44
5.7.1	Ovládání pomocí tlačítek.....	44
5.7.2	Ovládání přes sériový monitor v Arduino IDE.....	45
5.8	Komutace.....	45
5.9	Regulátor otáček.....	46
5.10	Programové měření.....	47
5.10.1	Měření otáček.....	47
5.10.2	Měření proudu.....	48
5.10.2.1	AD (analogově-číslicový) převodník.....	48
5.10.2.2	Číslicová filtrace.....	48
5.10.3	Odesílání naměřených dat.....	49
5.11	Ukázka průběhů sejmutých z osciloskopu.....	50

6 Závěr.....	51
7 Seznam obrázků.....	52
8 Seznam tabulek.....	53
9 Seznam použité literatury.....	54
10 Seznam příloh.....	57
Příloha A - Obsah přiloženého CD.....	58
Příloha B - Arduino Mega 2560 s shieldem včetně osazených součástek.....	59
Příloha C - Vývojový diagram řídicího programu.....	60
Příloha D - Schéma zapojení .....	61

# 1 Úvod

Bezkartáčové stejnosměrné motory (anglicky BLDC - brushless DC nebo též EC - electronically commutated) patří mezi nejmladší typy elektrických strojů. U klasických komutátorových stejnosměrných motorů je statorový budicí magnetický tok vytvořen buďto budícím vinutím nebo permanentními magnety. Rotor se otáčí v magnetickém poli a je na něm umístěno vinutí, jehož konce jsou vyvedeny na lamely komutátoru, který slouží jako mechanický střídač. Na komutátor dosedají kartáče, které přenášejí elektrickou energii ze zdroje na kotvu. Právě komutátor patří mezi největší slabiny tradičního stejnosměrného motoru. Je totiž zdrojem mechanických poruch a elektromagnetického rušení vlivem jiskření mezi lamelami a kartáči. Jeho životnost je omezená a komutátorový motor vyžaduje pravidelnou údržbu.

Výše zmíněné nevýhody odstraňuje právě bezkartáčový stejnosměrný motor a to díky prohození funkce rotoru a statoru a díky nahrazení mechanického komutátoru polovodičovým měničem. Budicí tok je nyní vytvořen permanentními magnety na rotoru a fáze statoru jsou spínány z napěťového střídače. Aby se motor otáčel kontinuálně a disponoval co nejlepšími vlastnostmi, je nutné znát polohu rotoru, resp. budicího rotorového magnetického toku. To lze zajistit jednak přímými senzory polohy (senzorová komutace) a jednak nepřímým měřením polohy rotoru (bezsenzorová komutace). Z uvedeného plyne, že je potřeba mít k dispozici i nějakou logiku, která bude na základě informace o poloze rotoru spínáním střídače motor komutovat. Dnes se často k tomuto účelu používají mikrokontroléry.

V teoretické části práce se nejdříve zabývám BLDC motory z hlediska jejich mechanické konstrukce, používanými permanentními magnety a dále stručně jejich elektromechanickými vlastnostmi. Poměrně rozsáhlou část práce věnuji jejich řízení. Čtenář se zde může seznámit s některými používanými senzory polohy a rychlosti a dále s pojmy jako PWM, třífázový střídač, šestikroková komutace, sensorové a bezsenzorové metody řízení a rozběh v otevřené smyčce. Práci uzavírá návrh hardwaru pro propojení s vývojovou deskou Arduino Mega 2560 a popis vytvořeného řídicího programu pro motor malého výkonu.

BLDC motory patří mezi moderní a perspektivní elektrické stroje, které díky svým výborným vlastnostem, které jdou ruku v ruce s vývojem permanentních magnetů na bázi vzácných zemin a současné dostupnosti řídicích obvodů, našly uplatnění ve široké škále aplikací

Cílem této práce je seznámit se BLDC motory, jejich řízením a realizovat jednu z používaných metod řízení pomocí populárního vývojového kitu Arduino.

## 2 BLDC motor

Jako BLDC nebo také EC jsou označovány elektronicky komutované synchronní stroje s permanentními magnety na rotoru a lichoběžníkovým rozložením magnetické indukce ve vzduchové mezeře, jejichž řídicí systém se skládá běžně z třífázového napěťového střídače řízeného zejména pomocí mikrokontroléru na základě informace o aktuální poloze rotoru. [7][20] Mezi jejich výhody patří především: [20]

- vysoká dynamická odezva,
- lineární momentová charakteristika,
- vysoká účinnost,
- dlouhá životnost,
- tichý provoz,
- vysoký rozsah řízení otáček,
- dobrý poměr výkonu ku velikosti.

### 2.1 Stavba motoru

Existují dvě základní koncepce BLDC motoru: s **vnitřním** nebo s **vnějším rotorem**. [1]

#### 2.1.1 BLDC s vnějším rotorem

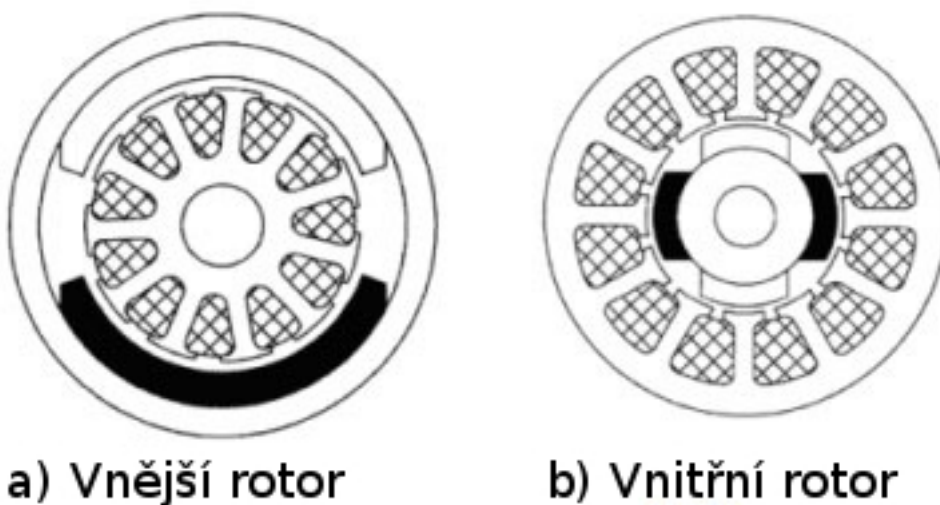
U tohoto typu se rotor otáčí po obvodu kolem statoru umístěného uprostřed motoru. Situace je schematicky znázorněna na Obr. 1 a). [4]

Oproti konstrukci s vnitřním rotorem je zde horší odvod tepla, protože rotor s magnety se chová jako izolátor. Další nevýhodou je vyšší moment setrvačnosti rotoru a tím horší dynamické vlastnosti. Předností je, že pro dosažení požadované magnetické indukce ve vzduchové mezeře lze použít větší, a tudíž méně kvalitní magnety, a také to, že motor má menší pulzační moment. BLDC motory s vnějším rotorem se používají například v počítači jako pohony pevného disku nebo jako ventilátory. [1][4]

## 2.1.2 BLDC s vnitřním rotorem

Zde se rotor otáčí uvnitř statoru, kterým je po obvodu obklopen. Situace je schematicky znázorněna na Obr. 1 b). [4]

Výhodou tohoto uspořádání je lepší odvod tepla, možnost zmenšení celkové konstrukce motoru a menší moment setrvačnosti rotoru a z toho plynoucí dobré dynamické vlastnosti. Nevýhodou je, že pro dosažení vysoké magnetické indukce ve vzduchové mezeře musí být použity silné, tedy dražší magnety. Většina BLDC motoru používá konstrukci s vnitřním rotorem. [1][4] Dále v textu se budu zabývat výhradně stroji této konstrukce.



Obr. 1: Znázornění konstrukce BLDC motoru s vnitřním a vnějším rotorem [4], upraveno

## 2.2 Stator

Stator je skládán z navzájem izolovaných plechů, na kterých je uloženo vinutí. Může být opatřen drážkami nebo být bez drážek. [23] Porovnání je na Obr. 2.

### 2.2.1 Drážkovaný stator

U tradičních drážkovaných BLDC motorů jsou jednotlivé plechy (tloušťky 0,1 až 0,6 mm), ze kterých je stator složen, opatřeny drážkami. Do těchto drážek jsou poté uloženy cívky tvořící vinutí, které společně s vrstvenými plechy tvoří výslednou statorovou sestavu. [23]

BLDC motory s drážkovaným statorem disponují větším výkonem resp. momentem a to proto, že statorové zuby, kolem kterých je navinuto vinutí, jsou blíže rotorovým magnetům. Vzduchová mezera a tedy i reluktance magnetického obvodu je snížena a magnetický tok se lépe uzavírá. Z toho plyne ale i jedna nevýhoda a tou je, že zde existují preferované pozice rotoru, kdy jsou statorové permanentní magnety přitahovány více k zubům než k mezerám, kde je uloženo měděné vinutí. Tato nerovnoměrnost magnetických sil po vnitřním obvodu statoru vede k pulzačnímu momentu, což se v anglické literatuře

označuje jako *cogging torque*. Důsledkem je zvlnění hnacího momentu, hluk a vibrace motoru, snížení účinnosti a špatná plynulost otáčení při nižších rychlostech. [23]

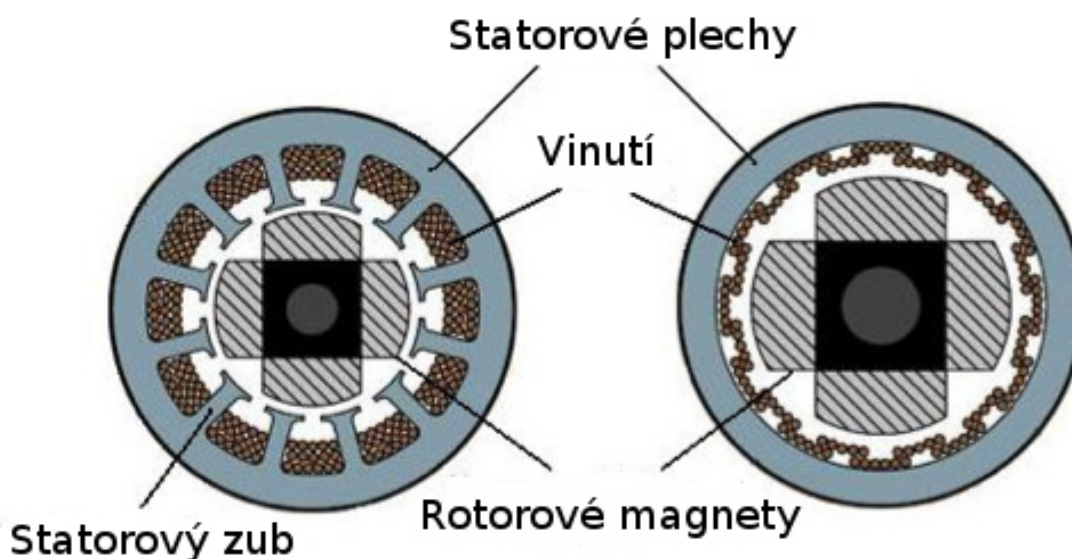
Hlavní výhody motorů s drážkovaným statorem jsou: [23]

- snadné přizpůsobení vinutí,
- zvýšený odvod tepla,
- schopnost odolat nárazovým zátěžným momentům,
- vyšší výkon na jednotku hmotnosti.

### 2.2.2 Stator bez drážek

Měděné vodiče tvořící vinutí jsou navinuty do válcového tvaru a poté zality do vysokoteplotní epoxidové pryskyřice. Toto uspořádání eliminující statorové zuby odstraňuje trhavý pohyb rotoru, což vede k tichému provozu a plynulé rychlosti otáčení. [23]

Vinutí má rovněž menší indukčnost a tím menší časovou konstantu, umožňující dosáhnout i velmi vysokých otáčivých rychlostí. Vzduchová mezera je zde větší, což na jednu stranu vede k menším ztrátám vířivými proudy, na druhou stranu snižuje výsledný moment motoru. Nevýhodu menšího momentu oproti drážkovaným motorům se ale prakticky podařilo odstranit použitím vysoce výkonných permanentních magnetů na bázi vzácných zemin, které velkou vzduchovou mezera do značné míry kompenzují. Další důležitý rozdíl oproti BLDC motorům s drážkovaným statorem je průměr rotoru, který je při stejném výsledném průměru motoru větší, což vede k vyššímu momentu setrvačnosti. [23]



Obr. 2: Drážkovaný stator (vlevo) a stator bez drážek (vpravo) [23], upraveno

## 2.3 Vinutí

Nejčastěji se používá vinutí trojfázové, existují ale i stroje s jednofázovým a dvoufázovým vinutím. U trojfázového existují dvě základní možnosti spojení vinutí - do trojúhelníka ( $\Delta$ ) nebo do hvězdy (Y). Většina BLDC motorů s trojfázovým vinutím používá spojení do hvězdy. [6][20]

Pro doplnění uvedu, že u synchronních strojů s permanentními magnety, existují dvě základní rozložení statorového vinutí, resp. magnetické indukce ve vzduchové mezeře: **lichoběžníkové** a **sinusové**. [7]

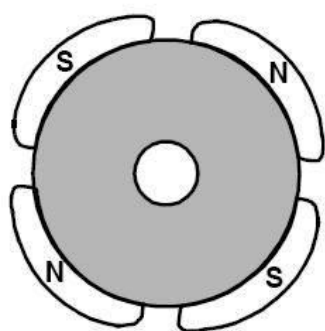
U **lichoběžníkového** typu má průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře a tím i indukované zpětné elektromotorické napětí a také proud tekoucí jednotlivými fázemi přibližně lichoběžníkový průběh. Právě takovéto stroje se běžně označují jako BLDC motory, jak již bylo zmíněno v úvodu. [7]

**Sinusově** vinuté synchronní motory s permanentními magnety, označované jako PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor), vykazují v porovnání s lichoběžníkově vinutými BLDC motory řadu odlišností. Vzduchová mezera a tím i indukované zpětné elektromotorické napětí mají díky sinusovému rozložení vinutí a speciálně tvarovaným rotorovým magnetům sinusový průběh. Motor ke své činnosti využívá třífázové sinusové napájení a strategie jeho řízení je podobná jako u asynchronního motoru. [7]

## 2.4 Rotor

Na rotoru jsou umístěny permanentní magnety a je vyráběn typicky s dvěma až osmi pól páry. Po jeho obvodu se střídá severní (N) a jižní (S) pól. [20]

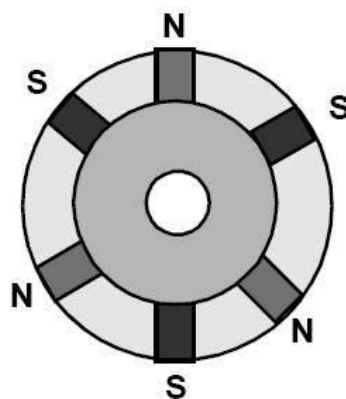
Obr. 3 znázorňuje několik možných rotorových konfigurací.



Kruhové jádro s magnety na okraji



Kruhové jádro s obdélníkovými magnety zabudovanými uvnitř



Kruhové jádro s obdélníkovými magnety vloženými do jádra rotoru

Obr. 3: Příčné řezy rotorovými magnety [20], upraveno



## 2.4.1 Permanentní magnety

Pro elektrické stroje obecně se používají tři skupiny permanentních magnetů: [13]

- Alnico magnety (Al, Ni, Co, Fe),
- ferity, např. barnaté ferity a strontnaté ferity,
- magnety vzácných zemin (SmCo, NdFeB).

### 2.4.1.1 Alnico

Výhodou Alnico magnetů je vysoká remanence, malá teplotní závislost jejich parametrů a maximální provozní teplota až 520 °C. Tyto vlastnosti zaručují velkou magnetickou indukci ve vzduchové mezeře i při vysokých provozních teplotách. Bohužel jejich demagnetizační křivka je silně nelineární a jejich koercitivní síla malá, proto mohou být náchylné k demagnetizaci pomocí reakce kotvy. [13]

### 2.4.1.2 Ferity

Ferity mají vyšší koercitivní sílu než Alnico magnety, jejich remanence je ale nižší. Rovněž teplotní závislost jejich parametrů je poměrně velká a maximální provozní teplota nepřesahuje 400 °C. Mezi jejich hlavní výhody patří nízká pořizovací cena a velmi vysoký elektrický odpor, což znamená, že v nich nevznikají ztráty způsobené vířivými proudy. Ferity jsou dostupné v izotropních i anizotropních variantách. [13]

### 2.4.1.3 Permanentní magnety ze vzácných zemin

Za posledních několik desetiletí byl díky dostupným technologiím dosažen velký pokrok na poli permanentních magnetů ze vzácných zemin. První generací byly slitiny na bázi **samarium-kobaltu**, které se vyznačují vysokou remanencí a koercitivitou, lineární demagnetizační křivkou a nízkými koeficienty teplotní závislosti. Maximální teplota provozu se pohybuje od 300 do 350 °C. Snad jedinou nevýhodou je jejich cena. Jak samarium, tak kobalt jsou relativně drahé kvůli jejich omezené dostupnosti. [13]

Druhou generací magnetů na bázi vzácných zemin jsou **neodymové** magnety. Neodym je oproti samariu výrazně dostupnější. NdFeB magnety mají lepší magnetické vlastnosti než magnety samarium-kobaltové. Bohužel ale jen při pokojové teplotě. Demagnetizační křivka a zvláště koercitivní síla jsou silně teplotně závislé. Maximální provozní teplota je 250 °C, Curieova teplota pak 350 °C. NdFeB magnety jsou rovněž náchylné ke korozi, proto se opatřují svrchní vrstvou nerezů nebo pryskyřice. Neodymové magnety nabízejí velmi dobrý poměr ceny ku výkonu a jejich další vývoj má do budoucna velký potenciál. [13]

## 2.5 Základní rovnice

Uvažujme stroj se dvěma póly na rotoru a trojfázovým statorovým vinutím spojeným do hvězdy se dvěma drážkami na fázi a  $N$  závity na drážku. Cívky jedné fáze jsou oproti sobě natočeny o úhel 30°. Pro

zjednodušení předpokládejme rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře za čistě obdélníkové. Při otáčení rotoru se ve statorovém vinutí indukuje napětí a spřažený magnetický tok se mění lineárně s natočením rotoru. Dále uvažujme, že komutace probíhá okamžitě a že fázové proudy mají obdélníkový průběh. Z těchto předpokladů lze odvodit rovnice pro indukované napětí dvou fází v sérii a moment motoru. Rovnice pro indukované napětí je [7]

$$U_i = k \psi \omega_m. \quad (1)$$

Konstanta  $k$  je dána konstrukcí stroje,  $\psi$  je magnetický tok daný konstrukcí stroje a  $\omega_m$  je mechanická úhlová rychlost. Rovnici pro moment lze napsat jako [7]

$$M = k \psi I, \quad (2)$$

kde  $k$  a  $\psi$  mají stejný význam jako u rovnice pro indukované napětí a  $I$  je proud tekoucí dvěma fázemi.

Rovnice (1) a (2) jsou formálně stejné jako odpovídající rovnice klasického komutátorového stejnosměrného motoru. Tím lze do jisté míry vysvětlit, proč se tyto motory označují jako BLDC, tj. brushless DC, ačkoliv je správněji vystihuje název "synchronní motor s permanentními magnety a lichoběžníkovým rozložením magnetické indukce ve vzduchové mezeře". [7]

Nutno poznamenat, že rovnice platí pro ideální motor, tj. za předpokladu, že komutace probíhá okamžitě, proudy mají obdélníkový průběh a že magnetická indukce v celé vzduchové mezeře má obdélníkový průběh. Toto sice není v praxi splněno, ale u běžných aplikací mohou být pro výběr motoru a jeho řídicí části rovnice použity. [7]

## 2.6 Momentová charakteristika

Pokud ke zjednodušujícím předpokladům z minulé kapitoly přidáme podmínku pro nulový úbytek napětí na spínacích polovodičových prvcích, tak rovnici pro okamžitou hodnotu napětí můžeme napsat jako [7]

$$U = U_i + R I, \quad (3)$$

kde  $R$  je elektrický odpor vinutí,  $U$  svorkové napětí a  $U_i$  je součet indukovaných napětí dvou fází. S využitím napěťové rovnice a rovnic z minulé kapitoly dostaneme rovnici momentové charakteristiky [7]

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \frac{M}{M_z}\right), \quad (4)$$

kde rozepsaná rychlost naprázdno je

$$\omega_0 = \frac{U}{k \psi}. \quad (5)$$

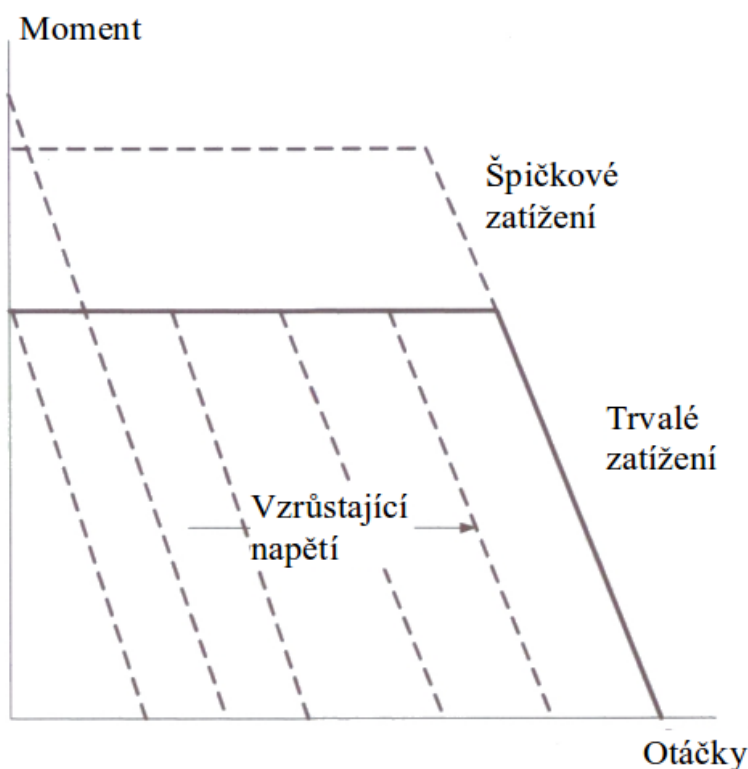
Záběrný moment je dán

$$M_z = k \psi I_0, \quad (6)$$

kde

$$I_0 = \frac{U}{R}. \quad (7)$$

Rychlost motoru je tedy závislá na svorkovém napětí a při zatížení bude funkcí odporu vinutí. V praxi je velikost napětí motoru obvykle řízena pomocí pulsně-šířkové modulace. Výsledná sít' charakteristik je na Obr. 4. V reálném případě budou křivky následkem indukčnosti vinutí, reakce kotvy a nerovnoměrného rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře deformovány. [7]



Obr. 4: Momentové charakteristiky ideálního BLDC motoru [7], upraveno

## 2.7 Elektrická vs. mechanická úhlová rychlost

Vztah mezi elektrickou a mechanickou úhlovou rychlostí udává známý vztah z teorie elektrických strojů

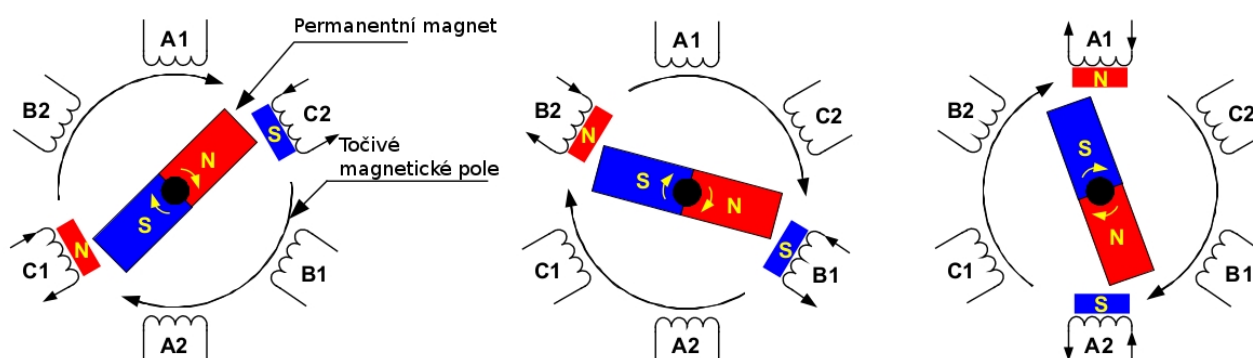
$$\omega_e = p \cdot \omega_m, \quad (8)$$

kde je  $\omega_e$  elektrická úhlová frekvence,  $\omega_m$  mechanická úhlová frekvence a  $p$  počet pólů na rotoru.

## 2.8 Princip činnosti

Elektromagnetický moment je vyvozován interakcí magnetického pole permanentních rotorových magnetů a satorového vinutí. V ideálním případě je moment největší, když jsou tato pole navzájem kolmá a klesá, když se úhel mezi nimi zmenšuje. Aby se motor otáčel nepřetržitě, musí se pomocí vhodného spínání fází měnit magnetické pole satoru. Procesu přepínání fází se říká komutace a u BLDC motorů je realizována elektronicky na základně informace o poloze rotoru. [20][21]

Princip je znázorněn na Obr. 5. Působením magnetických sil má rotor tendenci se natočit do takové polohy, kdy jsou opačné póly permanentních magnetů a magnetického pole statorového vinutí proti sobě. Na Obr. 5 vlevo se rotor otáčí po směru hodinových ručiček k fázi C. Jakmile se ale rotor k této rovnovážné poloze přiblíží, je fáze C odpojena od napájení a je v příslušné polaritě připojena fáze B (Obr. 5 uprostřed). Rotor tak pokračuje v otáčivém pohybu směrem k fázi B. Když se ale přiblíží k fázi B, je tato odpojena od napětí a připojena je v požadované polaritě fáze A (Obr. 5 vpravo) atd. Celý proces se cyklicky opakuje. [20][21]



Obr. 5: Otáčení BLDC motoru [21], upraveno

### 3 Řízení BLDC motorů

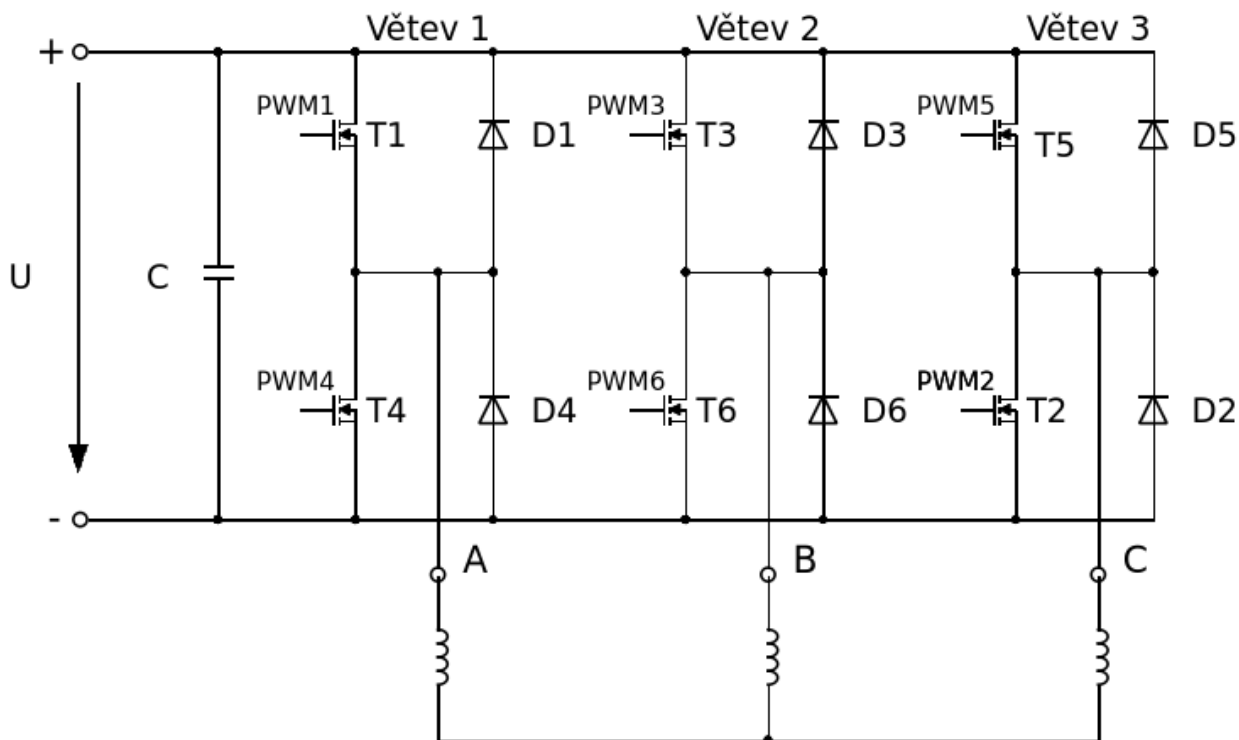
V dalším textu se budu zabývat třífázovými BLDC motory s vinutím spojeným do hvězdy, které jsou nejrozšířenější. [20]

Jejich řídicí systém se skládá z třífázového napěťového střídače, sensorového nebo bezsensorového systému měření polohy a rychlosti rotoru a mikrokontroléru, kde je implementován řídicí algoritmus. [7][17]

#### 3.1 Střídače

Střídače jsou měniče, které přeměňují stejnosměrnou elektrickou energii na střídavou. Jedno z možných dělení je na střídače **napěťové** a střídače **proudové**. Pro řízení BLDC motorů se používají střídače napěťové. [22]

**Napěťové střídače** jsou napájeny z tvrdého napěťového zdroje s malou vnitřní impedancí, který může být říditelný nebo neříditelný. Jejich charakteristickou součástí bývá kondenzátor s velkou kapacitou kryjící špičkový odběr elektrické energie. Další dělení je potom na střídače **jednofázové**, **třífázové** a **vícefázové**. [22]



Obr. 6: Třífázový napěťový střídač

### 3.1.1 Třífázový napěťový střídač

Třífázový napěťový střídač je znázorněn na Obr. 6. Skládá se ze tří větví. V každé větvi jsou dva plně říditelné spínací polovodičové prvky opatřené antiparalelně zapojenými nulovými diodami. Jako vypínatelné součástky se pro velké výkony většinou používají GTO, IGBT nebo IGCT, pro malé výkony dominují MOSFET. Třífázová zátěž je připojena mezi dva spínače v každé větvi. Pro zajištění ochrany proti přepětí, podpětí, poruchovým proudům a nadměrnému oteplení polovodičových součástek, bývá střídač opatřen pomocnými obvody. [7][22]

### 3.1.2 Unipolární vs. bipolární spínání

Rozdíl mezi bipolárním a unipolárním spínáním spočívá v tom, jaké napětí se objevuje na svorkách motoru.

Při **unipolárním spínání** se může na svorkách dvou fází motoru během jedné komutační sekvence objevit napětí jedné polaritě nebo napětí nulové. [17]

U **bipolárního spínání** je využíváno obou polarit napájecího napětí. [17]

### 3.1.3 Nezávislé vs. komplementární spínání tranzistorů

**Nezávislé spínání** znamená, že je trvale sepnut tranzistor v jedné větvi (např. T6 - viz Obr. 6) a v další větvi dochází k spínání a rozpínání jiného tranzistoru (např. T1) v závislosti na požadované střední hodnotě napětí. V nezávislém režimu spínání může pohon pracovat ve dvou kvadrantech otáčko-momentové roviny. [10][17]

**Komplementární spínání** je založeno na tom, že jsou tranzistory v jedné větvi spínány tak, že pokud je jeden ve vodivém stavu, tak se druhý nachází ve stavu nevodivém a naopak. Musíme však zajistit, aby v žádném případě nebyly oba tranzistory sepnuty zároveň, protože pak by prakticky došlo ke zkratu napájecího zdroje a součástky by se mohly nenávratně poškodit. Proto musí být určitou dobu, tzv. "deadtime", současně oba dva tranzistory vypnuty, aby se tranzistor, který byl ve vedení, stačil dostat do stavu vysoké impedance. To se zajišťuje řídicím algoritmem. Při komplementárním spínání může pohon pracovat ve všech čtyřech kvadrantech otáčko-momentové roviny. [10][17]

Jak nezávislé, tak komplementární spínání může probíhat v unipolárním nebo bipolárním režimu. [10]

### 3.1.4 Pulsně šířková modulace (PWM)

PWM funguje na principu změny střídy obdélníkového signálu. Střída je definována jako poměr doby trvání vysoké úrovně signálu ku celé periodě signálu a může nabývat hodnot od 0 do 100 %, tj. nulová výstupní hodnota nebo maximální, spojitá výstupní hodnota. Informace je u PWM zakódována v šířce pulzu, tj. je dána trváním  $\log. 1$  oproti  $\log. 0$  během jedné periody. PWM se velmi často používá ve výkonové elektronice ke spínání tranzistorů. Ve vypnutém stavu teče tranzistorem velmi malý proud a při zapnutém stavu je na něm naopak velmi malé napětí. Z toho plyne, že při těchto dvou provozních stavech vznikají na tranzistoru minimální ztráty. [29]

Pokud pomocí PWM řídíme motor, tak při dostatečné frekvenci PWM se motor chová skoro tak, jako kdyby vstupní napětí bylo spojitě. To je dáno jednak jeho mechanickou setrvačností a pak jeho indukčností, která částečně vyhlazuje proud. [29]

## 3.2 Senzory polohy a otáček

### 3.2.1 Hallové sondy

Nejpoužívanější způsob získávání informace o poloze rotoru u BLDC motorů je pomocí Hallových sond, což jsou senzory magnetického pole využívající tzv. Hallova jevu. Pokud vložíme polovodič protékající stejnosměrným konstantním proudem do stacionárního magnetického pole, můžeme na něm naměřit Hallovo napětí [13]

$$U_H = k_h \frac{1}{\delta} I_c B \sin(\beta), \quad (9)$$

kde  $k_h$  je Hallova konstanta,  $\delta$  je tloušťka polovodiče,  $I_c$  protékající proud,  $B$  magnetická indukce a  $\beta$  úhel

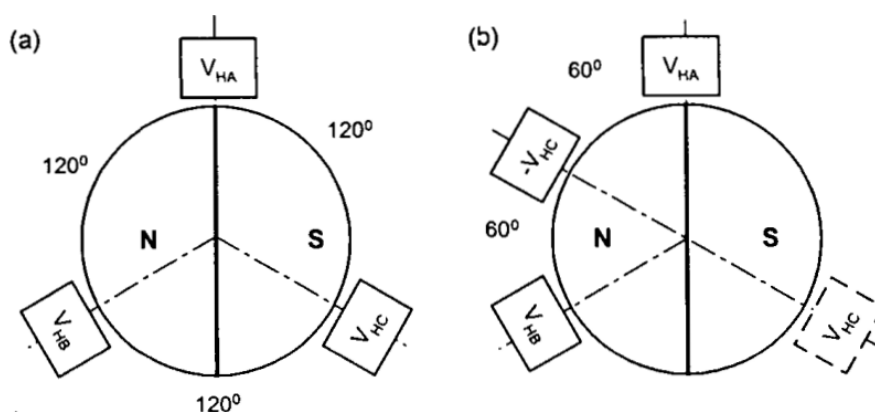
mezi vektorem magnetické indukce a plochou polovodiče.

Pro optimální snímání pozice rotoru je nutné Hallové sondy proti sobě natočit o vhodný úhel, který je závislý na počtu fází statoru a počtu pólů rotoru [7]

$$\alpha_H = \frac{360^\circ}{\text{počet fází} \times \text{počet pólů}} \quad (10)$$

Lze použít i úhel dvakrát menší. Pro získání čistého obdélníkového signálu vhodného pro další zpracování je výstup Hallových sond doplňován Schmittovými klopnými obvody. [7][13]

Použití Hallových sond s sebou nese několik výhod. Je to zejména schopnost provozu i při frekvencích převyšujících 100 kHz, spolehlivost a nízká cena. Hallové sondy bývají umístěny na malém plošném spoji v motoru už od výrobce a snímají většinou přímo magnetické pole rotorových magnetů. Pro některé aplikace se instalují na hřídel pomocné magnety. [7]



Obr. 7: Vzájemné rozmístění Hallových sond v třífázovém dvoupólovém BLDC motoru: a) natočení o 120°, b) natočení o 60° [13]

### 3.2.2 Optické enkodéry

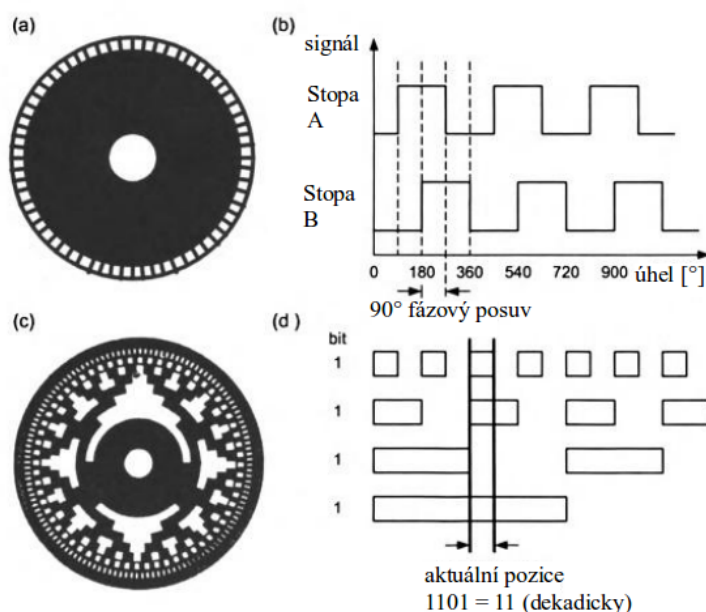
Optický enkodér se skládá ze tří hlavních částí: zdroje světla, kódovacího rotačního disku a fotodetektoru. Jak zdroj světla se většinou používá LED dioda a jako detektor obvykle fototranzistor nebo fotodioda. V optických enkodérech prochází paprsek světla ze zdroje otvory v rotačním disku a je zachycován fotodetektorem. [7]

Optické enkodéry se rozdělují na dva typy: **absolutní** a **inkrementální**. [13]

U **absolutního enkodéru** (Obr. 8 (c)) je rotační disk opatřen několika stopami. Počet stop je dán požadovaným bitovým rozlišením. V každé stopě se nachází množství otvorů, které kódují výstupní signál do binárního (Obr. 8 (d)), BCD nebo Grayova kódu. Nejčastěji se používá Grayův kód, protože se v každém kroku mění pouze jeden bit. Tím pádem lze efektivně podchytit případné chyby vzniklé přechodem mezi dvěma stavy. Kódovací disky se obvykle vyrábí fotolitografií na skleněný substrát. [13]

Rotační disk **inkrementálního enkodéru** (Obr. 8 (a)) je po obvodu opatřen jednou stopou stejně velkých

průsvitných a neprůsvitných otvorů. Při otáčení je generován signál, jehož frekvence je úměrná mechanické rychlosti otáčení disku. Jelikož je výstupní signál detektoru obvykle deformovaný, musí být pro další zpracování upraven pomocnými obvody na čistý obdélníkový signál. Tyto pomocné obvody mohou být přímo součástí enkodéru, nebo je lze řešit jako externí. Doposud popsany inkrementální enkodér dovoluje měřit pouze velikost rychlosti. Přidáním další stopy nebo přídavného senzoru můžeme produkovat tzv. kvadrurní signál (Obr. 8 (b)), pomocí kterého lze určit rovněž smysl otáčení. Rychlost a pozice je měřena technikami čítání pulzů. Rozlišení je dáno provedením enkodéru a čítačem. Někdy jsou inkrementální enkodéry opatřeny ještě jedním výstupem, který signalizuje jednu kompletní mechanickou otáčku. [13]

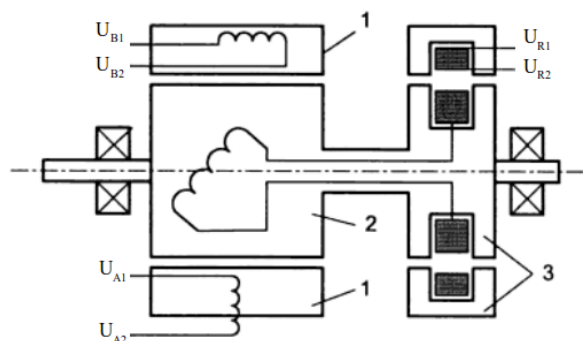


Obr. 8: Inkrementální a absolutní enkodér: (a) disk inkrementálního enkodéru, (b) kvadrurní výstupní signál, (c) disk absolutního enkodéru, (d) výstupní signál absolutního enkodéru [13], upraveno

### 3.2.3 Resolvery

Resolver (Obr. 9) je elektromechanický rotační transformátor. Je tvořen statorem a rotorem. Na rotoru se nachází primární vinutí napájené sinusovým napětím a na statoru dvě sekundární vinutí svírající pravý úhel. Pro eliminaci kroužků a kartáčů je napětí na primární stranu přivedeno pomocí indukční vazby odděleného rotačního transformátoru. Výstupem na sekundárních vinutích je kvadrurní harmonický signál. Jedna z vln je funkcí sinu úhlu natočení, druhá je funkcí kosinu úhlu natočení. Rozdíl mezi jejich amplitudami v sobě nese informaci o poloze rotoru, rychlost otáčení lze určit z jejich periody a směr otáčení je dán sledem jejich změn. [7][13]





Obr. 9: Bezkartáčový resolver: 1-stator, 2-rotor, 3-rotační transformátor [13], upraveno

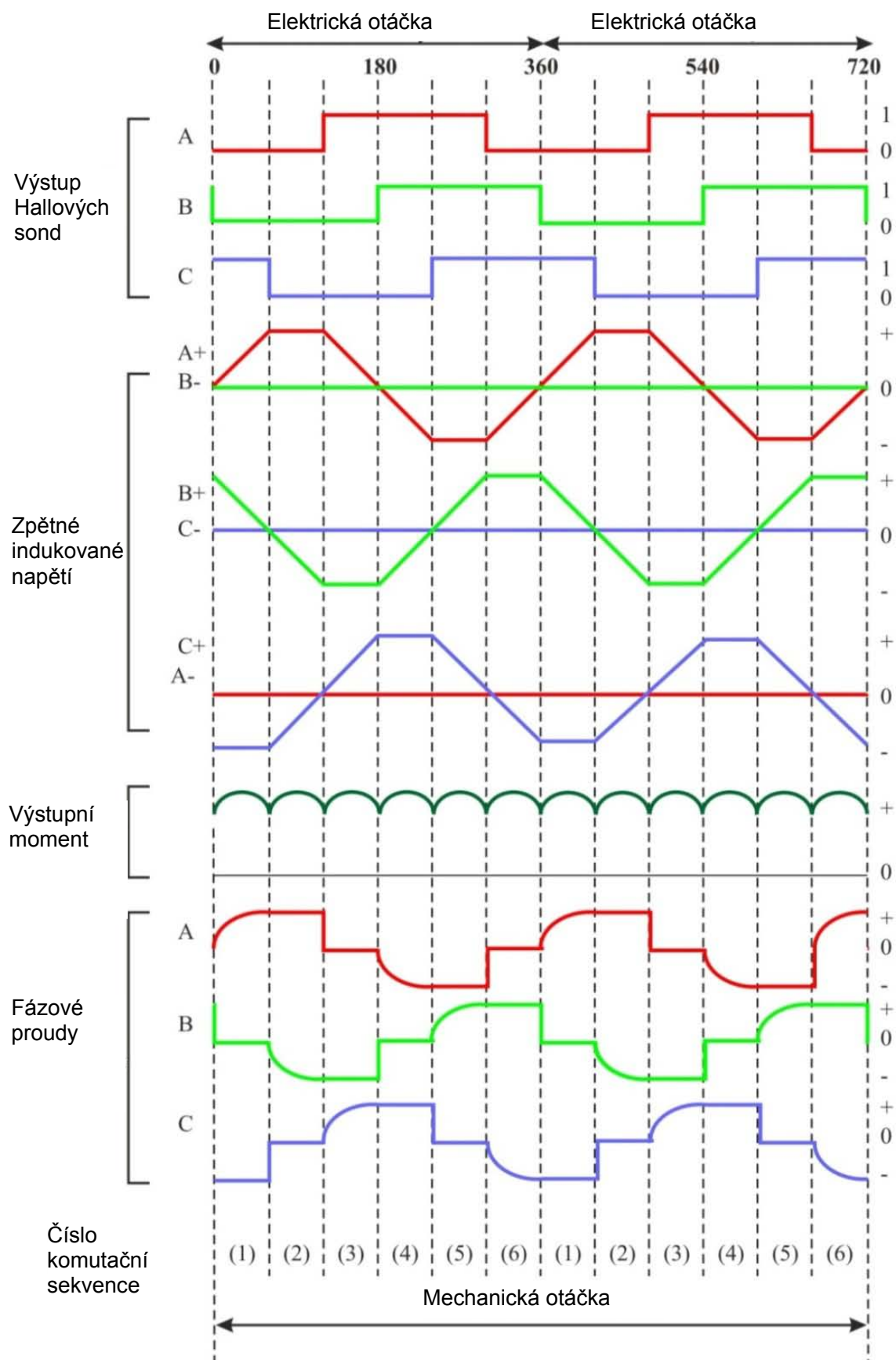
### 3.3 Regulace rychlosti

V kapitole 2.6 bylo uvedeno, že rychlost motoru závisí na velikosti svorkového napětí. Osamostatněme nyní úhlovou rychlost v rovnici (1) a dosadíme za indukované napětí z rovnice (3). Po jednoduché úpravě získáme rovnici pro mechanickou rychlost

$$\omega_m = \frac{U - R \cdot I}{k \cdot \psi} \quad (11)$$

Vidíme, že mechanická rychlost otáčení je úměrná velikosti svorkového napětí. Nejčastější způsob řízení otáček spočívá ve změně střídavého PWM signálu, který spíná třífázový střídač. Je potřeba mít na paměti, že frekvence PWM signálu musí být mnohem větší než maximální rychlost otáčení motoru, podle [20] alespoň desetkrát. Dále je nutné vzít v úvahu přepočítání mezi elektrickou a mechanickou úhlovou rychlostí. [20]

V případě použití senzorového řízení pomocí Hallových sond mohou být ke změření rychlosti pro nenáročné aplikace přímo použity jejich signály. V mikrokontroléru potom lze s pomocí časovače vypočítat na základě trvání změny dvou stavů skutečnou rychlost. Pro náročné aplikace lze použít optický enkodér nebo resolver. [20]



Obr. 10: Signály z Hallových sond, zpětně indukované napětí, výstupní moment a fázové proudy pro čtyřpólový motor [12], upraveno

### 3.4 Šestikroková komutace

Třífázový BLDC motor je nejčastěji řízen tzv. šestikrokovou komutací. Tato technika vytváří šest vektorů napětí, které jsou aplikovány během jedné elektrické otáčky. Existuje tedy šest různých kombinací sepnutí třífázové střídače. Každá trvá 60° elektrických. Pro třífázový střídač může být zvolena různá strategie spínání (viz kapitoly 3.1.2 a 3.1.3). Pro maximální účinnost a maximální hnací moment by měly být fázové proudy a indukovaná napětí ve fázi, jak naznačuje Obr. 12. Připomenu, že se předpokládá spojení vinutí do hvězdy. Pak platí, že v každém okamžiku proud teče vždy dvěma fázemi a třetí je odpojena od napájení. Vektor magnetické indukce statorového vinutí se při šestikrokové komutaci mění po 60 elektrických stupních, tedy v diskretních skocích, což může představovat pro některé aplikace problém z důvodu zvlnění momentu. [12][17][20]

#### 3.4.1 Řízení pomocí Hallových sond

K řízení třífázového BLDC motoru je třeba znát pozici rotoru. To je v případě použití senzorového řízení možné pomocí tří vhodně umístěných Hallových sond. Předpokládejme, že výstupní signály sond jsou již upraveny do podoby přijatelné pro další zpracování mikropočítačem. Po 60 elektrických stupních se překlápí výstupní logická úroveň jedné ze tří sond. Daná úroveň každé sondy trvá vždy 180 stupňů elektrických. Během jednoho elektrického cyklu se tedy vystřídá šest různých kombinací. Na každou lze nahlížet jako na tříbitové binární číslo, které je pak přivedeno na vstup mikrokontroléru. Mikrokontrolér potom na základě naprogramované komutační tabulky vybere příslušnou kombinaci fází a vygeneruje signály pro třífázový střídač, který zajistí jejich sepnutí. Průběhy signálů z Hallových sond, zpětného indukovaného napětí, výstupního momentu a fázových proudů čtyřpólového motoru při šestikrokové komutaci znázorňuje Obr. 10. [7][17][20]

#### 3.4.2 Bezsenzorové řízení

Bezsenzorovým řízením rozumíme regulaci rychlosti otáčení bez snímačů polohy či rychlosti. Existuje několik důvodů, proč použití těchto snímačů eliminovat: [13]

- vylepšení spolehlivosti systému a snížení celkových nákladů,
- teplotní limity Hallových sond,
- spotřeba senzorů může nepříznivě ovlivnit účinnost motorů s výkony pod 1 W,
- někdy nemusí být technicky možné senzory do motoru umístit (např. u pohonů pevných počítačových disků),
- potřeba občasného čištění Hallových sond při použití v prašných a znečištěných prostředích.

### **3.4.2.1 Metody založené na změně indukčnosti**

Zde je nutným předpokladem to, aby se díky konstrukci motoru v průběhu otáčení měnily jeho elektromagnetické parametry (např. motor s vyniklými póly). Pak lze pomocí této metody regulovat rychlost otáčení od 0 do zhruba 20 % jmenovitých otáček. Přesný rozsah je dán konstrukcí motoru. Používají se techniky založené na měření přechodového děje proudu nebo pokročilé techniky založené na injektování proudu, které vyžadují výkonné jádro mikrokontroléru a přesné měření proudu. Při reverzaci a přetížení může velký proud kotvy přesytit magnetický obvod a tak ztížit či znemožnit měření indukčnosti. [13][17]

### **3.4.2.2 Metody nepřímého měření indukovaného napětí**

#### **3.4.2.2.1 Metoda integrace indukovaného napětí**

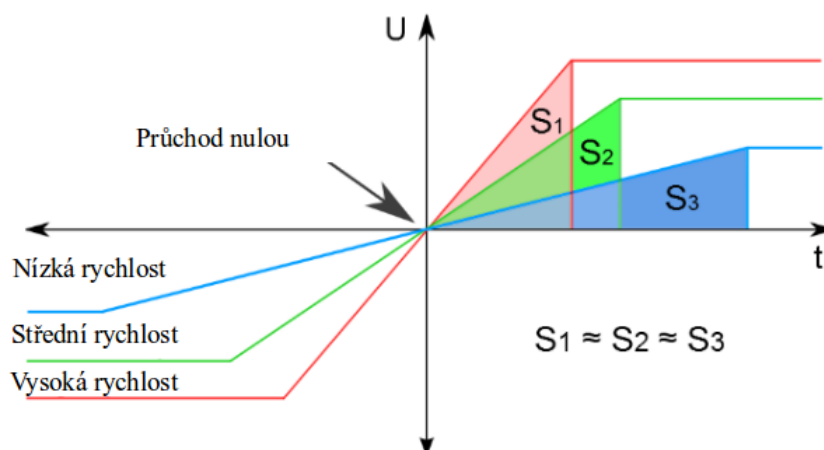
U této metody je určován okamžik komutace na základě integrace indukovaného napětí odpojené fáze. Ke komutaci se přistoupí tehdy, když velikost integrované plochy dosáhne určitou velikost. Hlavním rysem metody je skutečnost, že tato velikost je přibližně stejná při všech rychlostech, jak je znázorněno na Obr. 11. Integrace je spuštěna při průchodu indukovaného napětí nulou. Odchytky od skutečného průchodu nulou ve výsledku nezpůsobí velkou chybu, protože plocha křivky kolem průsečíku s nulou je malá. Ve srovnání s běžnými metodami měření průchodu indukovaného napětí nulou, je tato méně citlivá na spínací rušení, což umožňuje preciznější řízení při nižších rychlostech motoru. Na druhou stranu díky malému počtu PWM period za komutační krok je tato metoda málo efektivní při velmi vysokých rychlostech. [11][12]

#### **3.4.2.2.2 Metoda detekování třetí harmonické indukovaného napětí**

Tuto metodu lze použít u BLDC motorů se statorovým vinutím do hvězdy. Podmínkou je pólová rozteč statorového vinutí větší než  $2/3$ . Pak může třetí harmonická rotorového magnetického toku indukovat do statorové fáze třetí harmonickou napětí, kterou lze detekovat mezi středem vinutí a zápornou svorkou střídače. [15]

Součet fázových napětí obsahuje pouze třetí harmonickou a její násobky, protože středem vinutí může protékat jen netočivá složka proudu. Třetí harmonické jsou totiž ve fázi a algebraicky se sčítají. Pro obdržení spínacích konstant zintegrujeme filtrované napětí s obsahem třetí harmonické podle času. Tím dostaneme třetí harmonickou spráženého toku. Ta se zpožďuje za třetí harmonickou napětí o  $30^\circ$  a její průchod nulou odpovídá okamžiku komutace. Pro detekci třetí harmonické indukovaného napětí se používá externí obvod. [15][16]

Rozsah řízení rychlosti je větší než u zjišťování průchodu indukovaného napětí nulou (cca  $100$  až  $6000 \text{ min}^{-1}$ ), navíc je zde menší zpoždění (filtrovaná frekvence je třikrát vyšší) a menší nároky na filtraci. [15]



Obr. 11: Metoda integrace indukovaného napětí [11], upraveno

### 3.4.2.3 Metoda detekce proudu nulovou diodou

Tato metoda využívá proudu, který teče nulovou diodou v odpojené fázi. Bezprostředně po průchodu indukovaného napětí odpojené fáze nulou, se v době, kdy jsou tranzistory aktivní fáze ve vypnutém intervalu PWM, uzavírá malý proud nulovou diodou. Tento proud začíná téci přibližně v době, kdy indukované napětí odpojené fáze prochází nulou. Největší nevýhodou této metody je potřeba šesti oddělených napěťových zdrojů pro komparační obvod každé nulové diody. Tato nevýhoda brání jejímu praktickému uplatnění. [16]

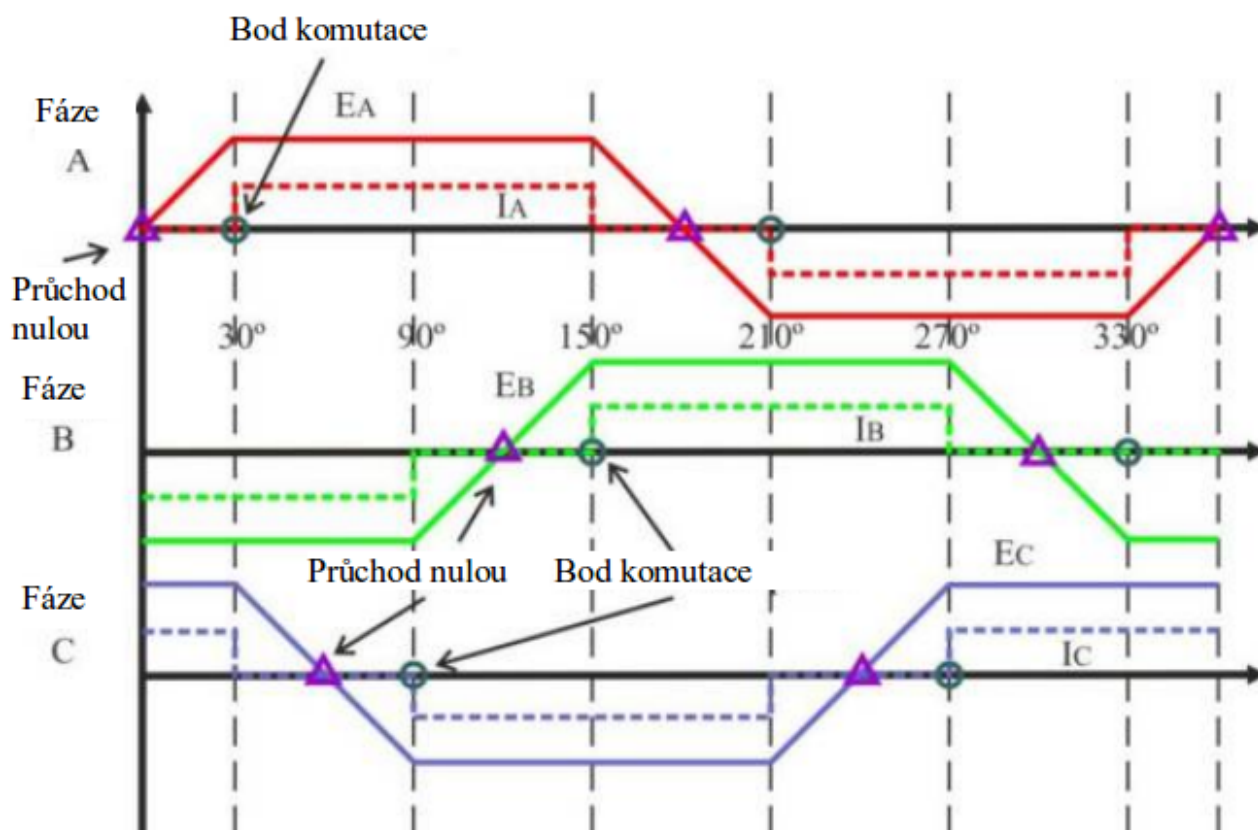
### 3.4.2.4 Metody přímého měření indukovaného napětí

U metod založených na přímém měření indukovaného napětí je hlavním předpokladem, že jedna fáze musí být vždy odpojena od napájení a nesmí v ní protékat proud. U motorů s vinutím do hvězdy odpovídá indukované napětí napětí fázovému, což může představovat jistou komplikaci v případě, kdy střed není vyveden. Měřené napětí musí být navíc filtrováno, jelikož má kvůli PWM spínání velký obsah vyšších harmonických. Další problém, který nelze eliminovat, je doba vedení nulové diody po odpojení fáze. Ta závisí na momentální zátěži motoru a v některých případech je tak velká, že nedovoluje detekovat průchod indukovaného napětí nulou. Chybu může způsobit rovněž omezená přesnost AD převodníku a nedokonalosti prvků komparačního obvodu. V případě použití RC filtrů je nutné rovněž uvážit jejich časovou konstantu. [11][17]

Indukované napětí je úměrné rychlosti otáčení motoru. Pro rozběh a v oblasti velmi nízkých otáček, zhruba pod 5 až 10 % jmenovitých, tuto metodu tedy nelze použít. Proto se pro uvedení motoru do provozu používá start v otevřené smyčce. Po vytvoření dostatečného protinapětí je řízení předáno algoritmu měření indukovaného napětí. Motor lze poté řídit až do plných nominálních otáček. [17][20]

Jedna z možných technik bezsenzorového řízení je založena na měření průchodu indukovaného napětí nulou. Z Obr. 12 je vidět, že bod komutace je od průsečíku s nulou vzdálen o 30° elektrických, což plyne z podmínky pro maximální moment a účinnost motoru. [12][17]

Pokročilé techniky jsou založené na odhadu indukovaného napětí. [17]



Obr. 12: Fázové proudy a indukovaná napětí [12], upraveno

### 3.4.2.4.1 Metody měření průchodu indukovaného napětí nulou

Následující metody se používají v případě, kdy střed statorové hvězdy není vyveden. Obr. 13 znázorňuje schematicky situaci, kdy jsou fáze A a C připojeny k napájecímu napětí (PWM signál je ve vysoké úrovni). Za těchto předpokladů platí pro napětí fáze B vztah [17]

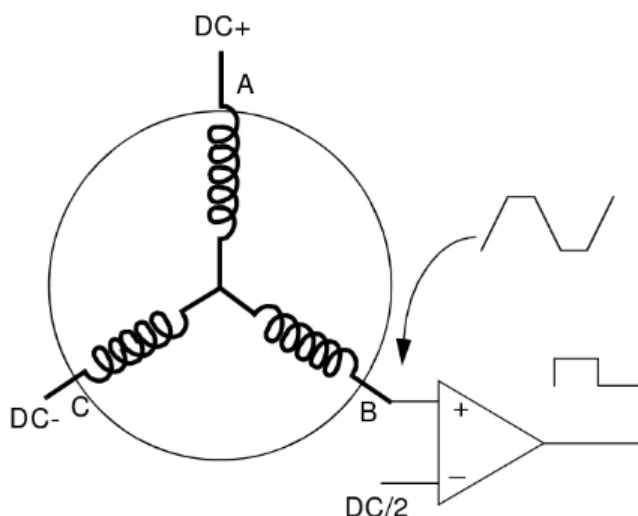
$$u_B = \frac{3}{2} u_{iB} + \frac{U_{DC}}{2}, \quad (12)$$

kde  $u_{iB}$  je indukované napětí fáze B a  $U_{DC}$  napájecí napětí. V případě nulového indukovaného napětí  $u_{iB}$  na této fázi naměříme poloviční napájecí napětí. Porovnáním indukovaného napětí fáze B s polovinou napájecího napětí obdržíme napětí fáze B proti středu. Na Obr. 13 je rovněž schematicky znázorněn princip jednoduchého způsobu porovnání pomocí analogového komparátoru. [17]

Nevýhodou je obtížné měření při malých rychlostech (krátká doba pro měření) a v případě použití odporového děliče chyba způsobená nestejnými rezistory. Další problém je ten, že reálná vinutí nemají úplně totožné parametry, což vede ke kladnému nebo zápornému fázovému posuvu indukovaného napětí. To způsobí komutaci v nesprávném okamžiku, což může vést k nadměrnému proudovému namáhání vinutí. Metoda je vhodná pro unipolární spínání a pro bipolární v případě, že jsou sepnuty tranzistory v diagonále. [17][19]

Velmi podobná metoda je měření indukovaného napětí v případě, že spínáme v unipolárním režimu a jsou

sepnuty pouze dolní tranzistory. Potom na odpojené fázi měříme nulové napětí, tj. porovnávané indukované napětí se zemí. Nevýhodou této metody je obtížné měření při vysokých rychlostech (krátká doba pro měření) a malém indukovaném napětí (offset error). [17]

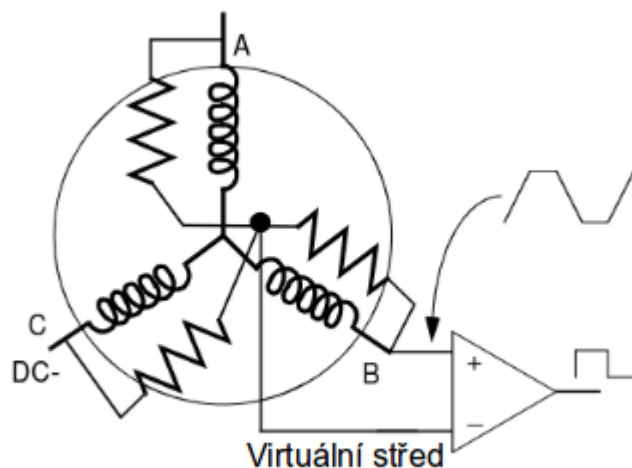


Obr. 13: Porovnání indukovaného napětí s polovinou napájecího napětí [19], upraveno

Princip další metody je znázorněn na Obr. 14. Spočívá ve vytvoření virtuální středu z rezistorů. Každý rezistor je připojen paralelně k jedné fázi vinutí. Rezistory se umísťují mezi střídače a samotný motor. Jejich hodnota by měla být taková, aby výrazným způsobem neovlivňovaly proudy tekoucí fázemi. Indukované napětí odpojené fáze je poté porovnáno s virtuálním středem. V případě průchodu napětí nulou do kladných hodnot se komparátor překlápí z log. 0 do log. 1, v případě průchodu napětí nulou do záporných hodnot se výstup komparátoru překlápí z log. 1 do log. 0. Zapojením komparátorů ke svorce každého vinutí získáme tři binární signály, které odpovídají nulovým indukovaným napětím jednotlivých vinutí. Nevýhodou je to, že reference bývá zarušená. Metoda je vhodná pro unipolární i bipolární spínání a všechny kombinace sepnutí tranzistorů. [17][19]

Čtvrtá metoda je založena na přímém použití analogově-číslicového (A/D) převodníku řídicího mikrokontroléru. Měřené napětí lze upravit na vhodnou úroveň s použitím napěťového děliče. Hodnota navzorkovaného signálu je neustále porovnávána s hodnotou odpovídající nulovému průsečíku indukovaného napětí. Při shodě se přistoupí k další komutační sekvenci. [19]

Výhodou je to, že mikrokontrolér má plnou kontrolu nad referenční hodnotou napětí. Parametry vinutí totiž někdy mohou se změnou rychlosti motoru kolísat, což vede ke změnám indukovaného napětí. Další výhodou je možnost implementace digitálního filtru. [19]



Obr. 14: Porovnání indukovaného napětí s vytvořeným virtuálním středem [19], upraveno

### 3.4.3 Rozběh

V případě komutace založené na indukovaném napětí je zřejmé, že při nulových otáčkách zcela chybí informace o pozici rotoru. Proto se v tomto případě používá pro rozběh start v otevřené smyčce. Po vybudování dostatečného kotevního protinapětí je řízení předáno algoritmu měření indukovaného napětí. Minimální rychlost, při které lze řízení předat závisí na konkrétním typu motoru. [24]

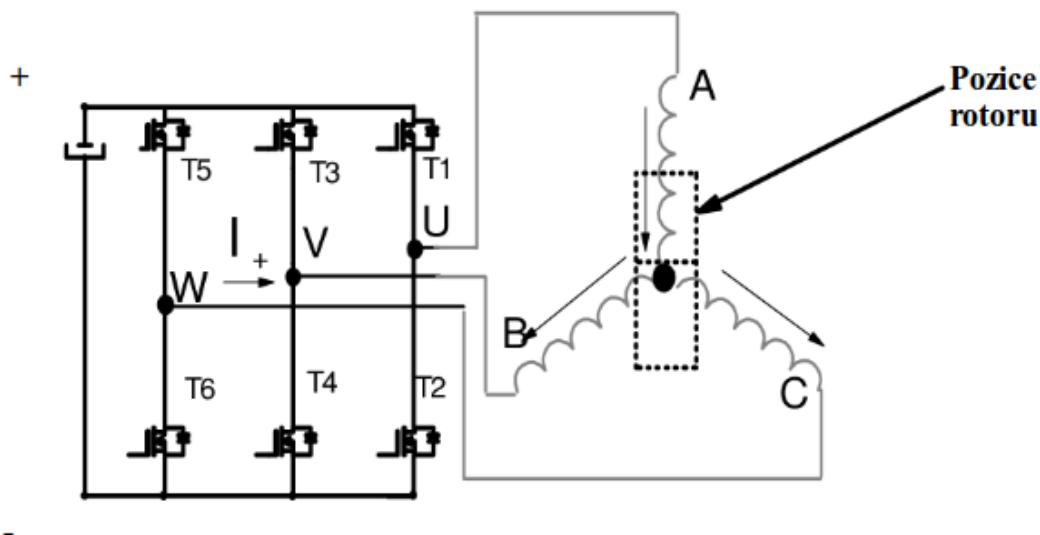
#### 3.4.3.1 Metoda rozběhové rampy

Tato metoda je uvedena v [24]. Nejprve přichází na řadu tzv. přípravná fáze. V té musíme zajistit to, abychom dostali rotor z neznámé pozice do pozice předem definované. Pro maximální utlumení oscilací kolem rovnovážné polohy je vhodné přivést proud do všech fází. Na Obr. 15 jsou sepnuty tranzistory T1, T4 a T6. Fázové proudy tekoucí v naznačených směslech zajistí natočení rotoru do uvedené pozice. Nyní je již pozice rotoru známa a motor lze roztočit v požadovaném směru. [24]

Přivedením příliš velkého proudu v přípravné fázi by mohlo dojít ke značnému urychlení rotoru s následnými kmity kolem startovní pozice. Proto je lepší aplikovat proudovou rampu, která se skládá z určitého počtu schodů stejné délky. Hodnoty proudu řídíme střídou PWM signálu tranzistoru T1, zatímco T4 a T6 jsou trvale sepnuty. Charakter (délka, tvar, šířka kroků) proudové rampy musí být přizpůsoben konkrétnímu motoru a zátěži. [24]

Druhou fází je tzv. vynucený synchronní režim. V této fázi je motor řízen bez zpětné vazby v otevřené smyčce. Komutace je stejná jako při normálním běhu, ale je řízena rozběhovou rampou. Jejím úkolem je postupně v krocích zvyšovat frekvenci točivého satorového magnetického pole při nastavené úrovni proudu. Po určitém předem daném počtu zaznamenaných průchodů indukovaných napětí nulou dojde k předání řízení do uzavřené regulační smyčky. Charakter rozběhové rampy stejně jako u proudové rampy v případě přípravné fáze záleží na konkrétním motoru a zátěži. [24]





Obr. 15: Startovní pozice rotoru [24], upraveno

### 3.4.3.2 Metoda proměnné indukčnosti

Nevýhodou metody popsané v minulé kapitole je skutečnost, že rozběhová rampa musí být naladěna v souladu s parametry motoru a zátěžného momentu. Např. změna zátěže může rozběh ztížit či úplně znemožnit. Tyto nedostatky odstraňuje metoda popsaná v [14].

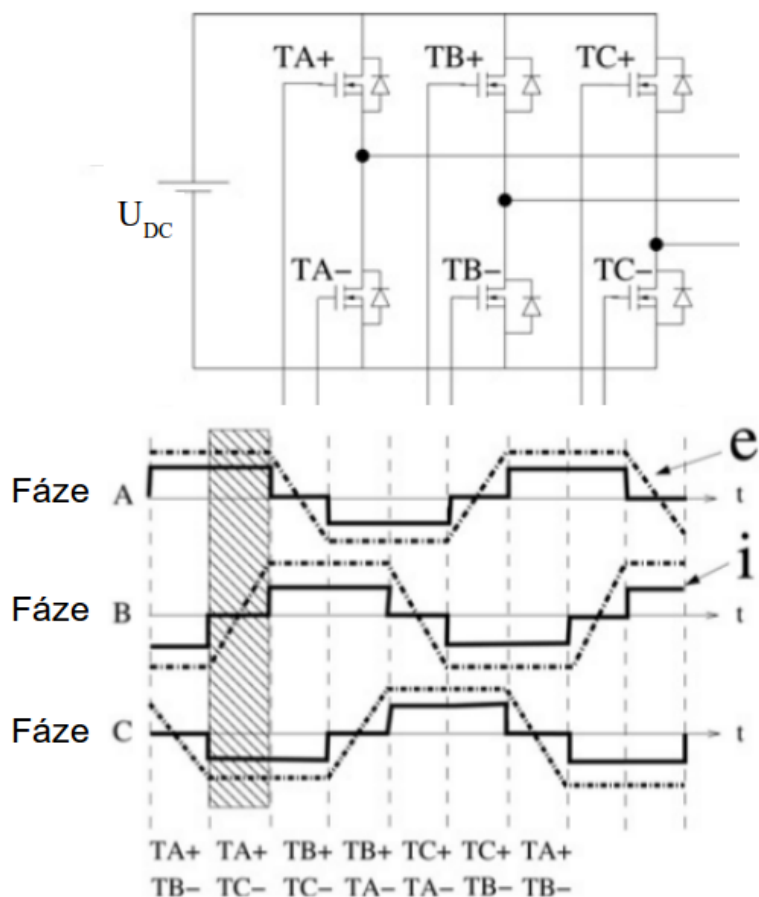
Jestliže přiložíme napětí na cívku, která se nachází v přítomnosti permanentního magnetu, tak následný proud vytvoří magnetické pole, které se bude buďto s polem permanentního magnetu sčítat nebo od něj odečítat, což způsobí snížení nebo zvýšení indukčnosti. [14]

Realizace této metody vyžaduje vytvoření magnetického pole obou polarit ve směru pouze jedné statorové fáze. Magnetické pole jedné polarity vytvoříme tak, že jednu fázi připojíme k napájecímu napětí a zbývající dvě fáze na zem (vektorový součet jejich magnetických polí vytvoří stejné magnetické pole, jako je pole zkoušené fáze). Pro získání pole opačného smyslu předtím uzemněné fáze připojíme na napájecí napětí a zbylou fázi uzemníme. Následně je porovnána amplituda dvou proudových impulzů vytvořených oběma smysly přiloženého napětí. Větší amplituda znamená souhlasnou orientaci vytvořeného proudového impulzu a magnetického pole permanentního magnetu. Z této skutečnosti můžeme určit polohu rotoru s přesností  $180^\circ$ . Opakováním tohoto postupu pro zbývající dvě fáze je informace o poloze rotoru zpřesněna na  $60^\circ$ , tj. na konkrétní komutační krok. Doba magnetizace fází by neměla z důvodu magnetické saturace, která by vedla k nerozlišitelnosti proudových impulzů, být příliš dlouhá. Na druhou stranu příliš krátká doba by mohla vést k impulzům s velmi malým rozdílem amplitudy. Tímto způsobem je tedy možné při malých rychlostech detekovat polohu rotoru a na jejím základě komutovat motor. Po vytvoření dostatečného protinapětí je řízení předáno algoritmu měření indukovaného napětí. [14]

### 3.4.3.3 Metoda jednoduchého rozběhu bez rampy

Tato poměrně jednoduchá metoda je uvedena v [8]. Nejdříve začíná nabuzením dvou libovolných předem určených fází. Pod průběhy jednotlivých fázových proudů a indukovaných napětí na Obr. 16 je vždy uvedeno, které tranzistory jsou v daném okamžiku sepnuty. [8]

Pro start si vybereme např. fáze B a C. Nejdříve jsou po určitéu přípravnou dobu sepnuty tranzistory TB+ a TC-. Tato doba závisí na motoru a jeho zátěži. Na konci tohoto intervalu se rotor již natočil z neznámé pozice do pozice žádané. Pro maximální záběrný moment jsou poté sepnuty fáze C a A (TC+ a TA-). Můžeme si povšimnout, že tato kombinace je oproti výchozímu stavu vzdálena o dva spínací intervaly. To umožní pohyb rotoru v rozsahu 120°, což postačí k tomu, abychom mohli na odpojené fázi B naměřit průchod jejího indukovaného napětí nulou. Na Obr. 16 je vidět, že indukované napětí fáze B prochází nulou tehdy, když jsou vybuzeny fáze A a C. Bezprostředně po detekování prvního nulového průsečíku se přistoupí k další komutaci (TC+ a TB-). Komutační sekvence poté pokračuje podle naprogramované tabulky, dokud není zvolená bezsenzorová metoda připravena přebrat řízení. [8]



Obr. 16: Třífázový střídač a typické idealizované průběhy fázových proudů a indukovaných napětí [8], upraveno

### **3.5 Metody založené na pozorovatelích**

V této kategorii jsou pro určení pozice rotoru využívány různé typy pozorovatelů. Hlavní myšlenkou je uplatnění matematického modelu motoru, do kterého vstupují měřené veličiny systému a jehož výstupem jsou odhady. Chyba mezi výstupním odhadem a měřenými veličinami je přivedena zpět do modelu pro upravení odhadovaných hodnot. Největší výhodou v použití pozorovatelů je, že můžeme odhadnout všechny stavy systému včetně těch, které jsou těžko měřitelné. [16]

Většina metod založená na pozorovatelích se používá pro PMSM motory. Pro BLDC motory, které vyžadují znalost pouze šesti pozic během elektrické otáčky, není detailní informace polohy rotoru od pozorovatele nutná. Na druhou stranu pro některé speciální aplikace je potřeba znát pozici rotoru mezi body komutace. [16]

# 4 Hardware

## 4.1 Motor

Pro účely této práce je použit BLDC motor LINIX 45ZWN24-40, který byl k dispozici na katedře elektrických pohonů a trakce. Jedná se o třífázový motor se statorovým vinutím spojeným do hvězdy a vnitřním rotorem se čtyřmi póly. Jmenovité hodnoty motoru jsou: [5]

- napětí 24 V,
- proud 2.3 A,
- moment 0.097 Nm,
- výkon 40 W,
- otáčky 4000 min<sup>-1</sup>.

## 4.2 Řídicí část

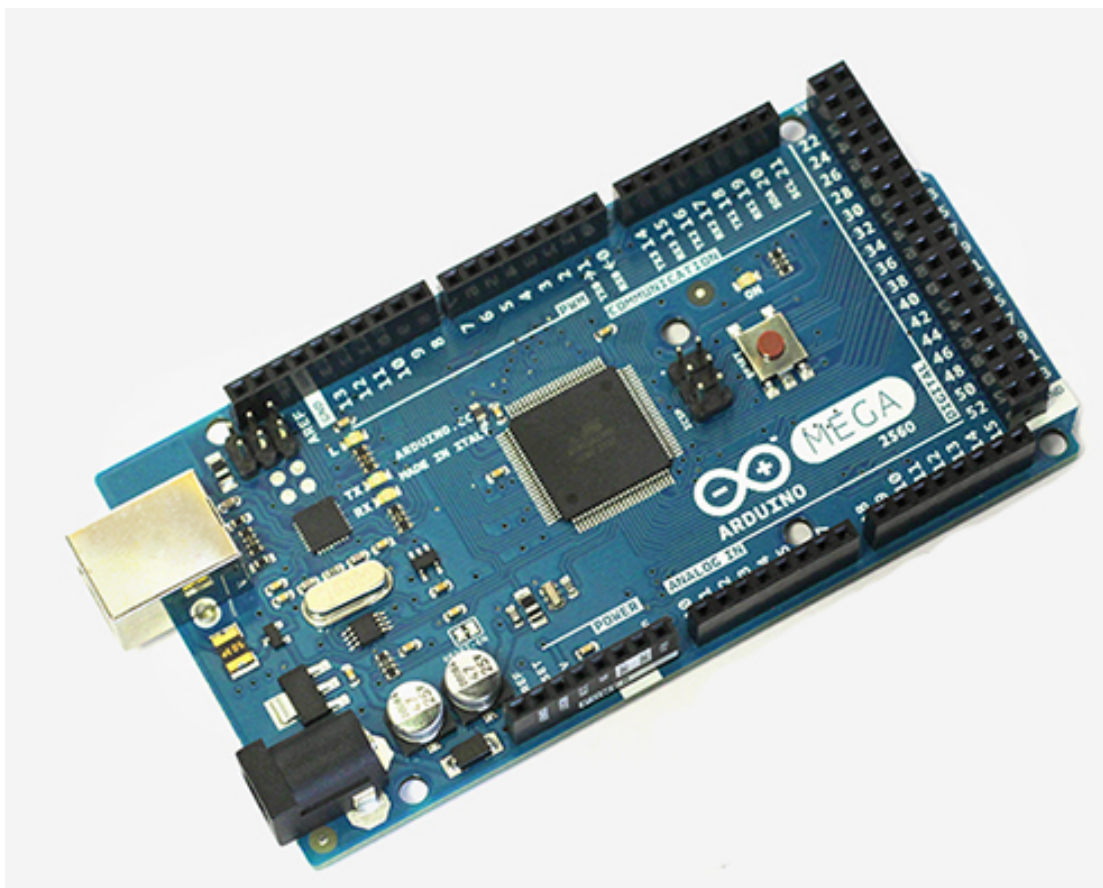
Jako metodu řízení pro praktickou realizaci jsem zvolil šestikrokovou komutaci na základě informace o poloze od Hallových sond.

### 4.2.1 Arduino

Arduino je open source vývojová platforma, která používá vlastní programovací jazyk založený na Wiringu a vlastní multiplatformní (Windows, Macintosh OS X, Linux) vývojové prostředí Arduino IDE (napsané v Javě) založené na Processingu. Cílem projektu Arduino bylo co nejvíce zpřístupnit prototyping elektronických systémů zejména lidem bez znalostí elektroniky a programování. Arduino software je srozumitelný začátečníkům, ale zároveň i dost flexibilní pro pokročilé uživatele. Desky Arduino jsou osazeny mikrokontroléry Atmel AVR, většinou řadou Atmega. [2]

### 4.2.2 Arduino Mega 2560

Pro účely praktické části bakalářské práce jsem vybral desku Arduino Mega 2560, která je osazena 8-bitovým mikrokontrolérem ATmega2560, který je taktovaný externím krystalovým oscilátorem na frekvenci 16 MHz. Mega 2560 obsahuje 54 vstupně/výstupních pinů, z nichž 16 může být použito jako PWM výstup, 16 analogových vstupů, 4 UART porty, USB konektor, konektor pro externí napájení (7 až 12 V), ICSP konektor a resetovací tlačítko. Provozní napětí je 5 V, doporučený bezpečný proud vstupně/výstupních pinů je 20 mA. [2]



Obr. 17: Arduino Mega 2560[2], upraveno

ATmega2560 má k dispozici 256 KB paměti flash pro uchování kódu (8 KB je využito bootloaderem), 8 KB paměti SRAM a 4 KB paměti EEPROM. [2]

Desku je možné napájet pomocí USB nebo pomocí externího zdroje. Zdroj napětí je vybírán automaticky. [2]

Každý z 54 digitálních pinů může být použit jako vstup nebo výstup. Programově je možné připojit interní upínací rezistory o hodnotě 20 - 50 kΩ. Některé piny mají navíc ještě jiné funkce. Osm pinů (0 - RX, 1 - TX, 19 - RX, 18 - TX, 17 - RX, 16 - TX, 15 - RX, 14 - TX) může být použito pro sériovou komunikaci a šest pinů (2, 3, 18, 19, 20 a 21) pro externí přerušení, které lze programově nastavit na náběžnou hranu, sestupnou hranu nebo na změnu úrovně. Dále, jak již bylo zmíněno, šestnáct pinů (2 - 13 a 44 - 46) může sloužit jako PWM výstup. Čtyři piny lze použít pro SPI komunikaci (50 - MOSI, 51 - MISO, 52 - SCK, 53 - SS) a dva (20 - SDA, 21 - SCL) pro TWI komunikaci. K pinu 13 je připojena LED dioda. [2]

Analogové vstupy mají rozlišení 10 bitů. Výchozí rozsah je od GND do +5 V. Horní rozsah je možné změnit připojením napěťové reference k AREF pinu. [2]

Deska Mega 2560 je vybavena bootloaderem, a tak může být naprogramována přímo pomocí USB z vývojového prostředí Arduino bez použití externího programátoru. Naprogramování je ale možné provést rovněž pomocí ICSP konektoru přes externí programátor. Pomocí USB rozhraní může rovněž probíhat komunikace mezi Arduinem a počítačem. Arduino IDE obsahuje tzv. sériový monitor, přes nějž je možné posílat a přijímat textová data. [2]

### 4.3 Výkonová část - L6234

Jako výkonový měnič pro BLDC motor jsem vybral integrovaný obvod L6234 v pouzdře PowerDIP20 od firmy STMicroelectronics. Elektrické schéma společně s externími součástkami pro nábojovou pumpu a měřicím rezistorem je na Obr. 18.

Specifikace obvodu: [25]

- napájecí napětí od 7 do 52 V,
- 5 A špičkový proud,
- $R_{DSon}$  0.3  $\Omega$  při 25 °C,
- ochrana proti přímému zkratu napájecího zdroje ,
- TTL kompatibilní vstupy,
- pracovní frekvence až 150 kHz,
- teplotní ochrana,
- rychlé nulové diody,
- funkce INPUT a ENABLE pro každou větev střídače,
- 10 V externí reference k dispozici.

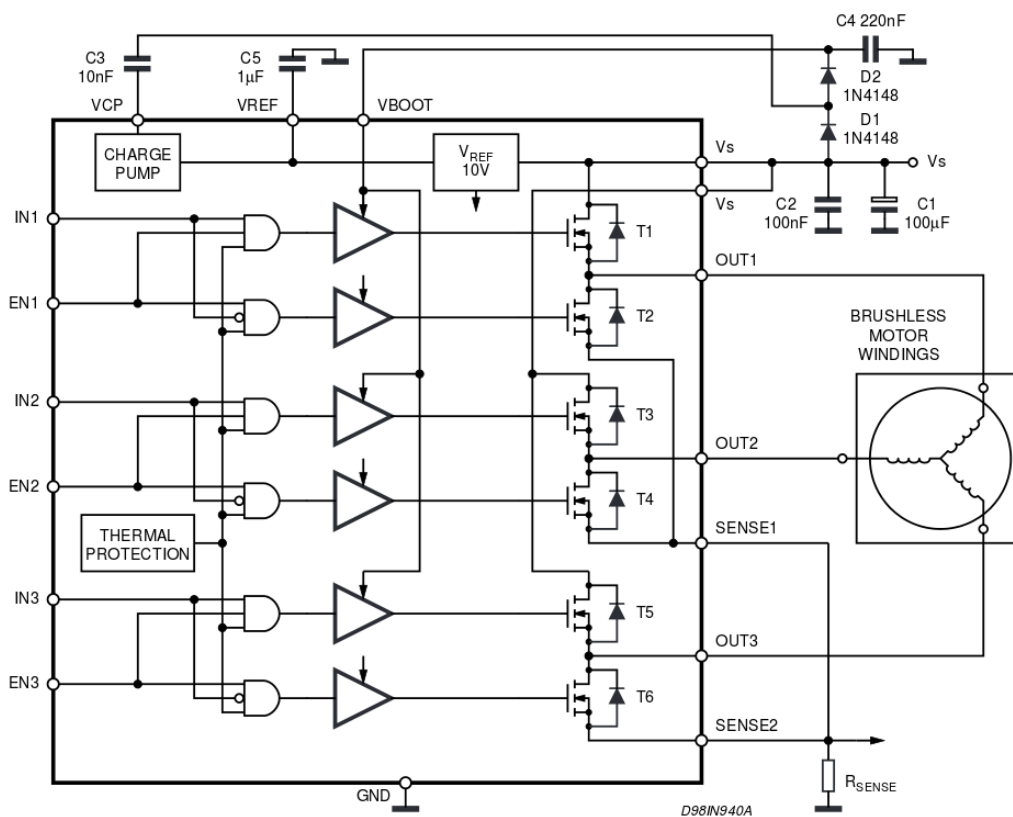
Každá větev střídače může být ovládána nezávisle a to příslušnými vstupy INx a ENx ("x" značí číslo větve), které jsou TTL, CMOS a  $\mu$ P kompatibilní. Vysoká úroveň přivedená na vstup INx zapíná horní tranzistor odpovídající větve, nízká úroveň naopak zapíná tranzistor spodní. Vstupy ENx při vysoké úrovni aktivují celou větev, při nízké deaktivují. Ochrana proti současnému vedení obou tranzistorů v jedné větvi je zřejmá ze zapojení hradel na Obr. 18. Důležité je, že v obvodu je zajištěn fixní deadtime 300 ns mezi vypnutím a zapnutím spínačů v každé větvi, což ulehčuje konstrukci řídicího programu. [25][26]

Výstupní tranzistory jsou typu DMOS. Tato struktura není ovlivněna druhým průrazem, proto tranzistory snesou i velmi vysoké proudy. Maximální efektivní hodnota proudu je tak omezena pouze schopností pouzdra odvést ztrátový výkon. Piny 5, 6, 15, a 16 (GND) jsou využity k odvedení tepla směrem k desce plošného spoje. Obvod je rovněž vybaven tepelnou ochranou, která vypíná všechny tranzistory při teplotě cca 160 °C. Hystereze je kolem 20 °C. Výrobce udává doporučený výstupní proud 2.8 A pro okolní teplotu 25 °C a ideální odvod ztrátového tepla. [25][26]

Spínání horních tranzistorů zajišťuje nábojová pumpa řízená interním oscilátorem. Oscilátor je napájený vnitřní 10 V referencí a jeho frekvence je 1.2 MHz. Nábojová pumpa je k oscilátoru připojena přes výstupní pin Vcp. Zvýšené výstupní napětí nábojové pumpy nutné k sepnutí horních tranzistorů je připojeno k pinu Vboot. [26]

Piny SENSE1 a SENSE2 slouží k připojení externího rezistoru pro snímání proudu. Při výběru hodnoty je třeba dávat pozor, protože napětí nižší než -1 V přivedené na tyto piny by mohlo součástku poškodit. Záporné napětí se na měřicím rezistoru může objevit při recirkulaci proudu zpětnými diodami. [26]

Potřebné externí součástky a jejich hodnoty jsem vybíral tak, jak jsou uvedeny na Obr. 18 výrobcem obvodu. Kondenzátor o hodnotě 1  $\mu\text{F}$  připojený k pinu Vref zajišťuje stabilitu obvodů spínajících DMOS tranzistory. [26]



Obr. 18: Schéma vnitřního zapojení integrovaného obvodu L6234 a externích součástek pro nábojovou pumpu a měření proudu [26]

## 4.4 Měření

### 4.4.1 Měření proudu

Měření proudu je realizováno přes snímací rezistor zapojený mezi zem a piny SENSE1 a SENSE2 obvodu L6234 ( $R_{\text{SENSE}}$  na Obr. 18). Úbytek napětí na rezistoru vytvořený proudem zátěže je zesílen operačním zesilovačem v neinvertujícím zapojení. Operační zesilovač je napájen napětím jedné polaridy, aby zesiloval pouze kladné napětí. Na výstupu operačního zesilovače je zapojen RC filtr s mezní frekvencí přibližně 32 kHz, který slouží jako antialiasingový. Výstup filtru je přiveden na vstup AD (analogově-číslicového) převodníku. Místo rezistoru pevné hodnoty je k zemi zapojen trimr. Zesílení operačního zesilovače lze tudíž regulovat. Schéma zapojení je uvedeno v příloze.

Hodnotu odporu měřicího rezistoru jsem zvolil  $0.1 \Omega$ . Tím je zajištěno, že i při nejvyšším přípustném proudu nedosáhne záporný úbytek napětí na pinech SENSE1 a SENSE2 hodnoty  $-1 \text{ V}$ , která by mohla součástku poškodit. Rezistor je přímo určen pro měření proudu.

Jako operační zesilovač jsem zvolil typ MCP616-I/P od firmy Microchip. Zesilovač disponuje nízkou vstupní napětíovou nesymetrií (méně než  $150 \mu\text{V}$ ) a rail-to-rail výstupním napětím. Napájet ho lze napětím od  $2.3$  do  $5.5 \text{ V}$ . [18]

#### **4.4.2 Měření otáček**

Ke změření skutečné otáčivé rychlosti budou použity Hallovy sondy. O konkrétním řešení bude diskutováno v kapitole týkající se návrhu software.

### **4.5 Ochrany**

Pro připojení napájecího zdroje slouží svorkovnice. Při záměně polariry by bez ochran došlo ke zkratu napájecího zdroje přes nulové diody v L6234. Z tohoto důvodu jsem za svorkovnici zařadil ochranu proti přepólování, která má podobu tavné pojistky a dostatečně dimenzované diody zapojené paralelně k napájecímu zdroji. Dioda je zapojena tak, že při správné polaritě vstupního napětí je polarizována v závěrném směru. Při špatné polaritě se dioda otevře a proud, který má charakter zkratového proudu, se začne uzavírat přes diodu a pojistku, která se přetaví a přeruší obvod. Hodnotu vypínacího proudu pojistky jsem zvolil  $2.5 \text{ A}$  a jmenovitou střední hodnotu propustného proudu diody  $6 \text{ A}$ .

Pojistka slouží rovněž jako fyzická ochrana proti překročení jmenovité hodnoty proudu motoru a obvodu L6234 např. v důsledku možnému zpoždění softwarové ochrany při poruchových stavech.

### **4.6 Osazení součástek**

Pro osazení součástek jsem zvolil neoficiální Arduino Mega prototype shield. Na tento shield lze připájet součástky a následně ho nasadit přímo na desku Arduino. Obrázek shieldu společně s osazenými součástkami je uveden v příloze.



## 5 Software

### 5.1 Definování komutační sekvence na základě výstupů Hallovyh sond

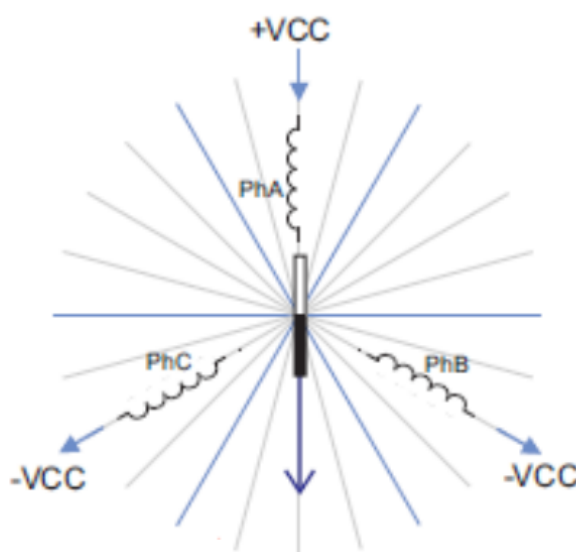
Pro konkrétní motor je nejprve potřeba definovat, jaké fáze je nutné sepnout při dané kombinaci výstupů Hallovyh sond tak, aby bylo zajištěno kontinuální otáčení v požadovaném smyslu. To lze učinit tak, že budeme postupně napájet vždy všechny tři fáze různými kombinacemi kladných a záporných napětí. V každé pozici, do které se rotor natočí, pozorujeme výstupy Hallovyh sond. [9]

Lze postupovat následujícím způsobem: Jednotlivé fáze si označíme libovolně jako A, B a C, výstupy Hallovyh sond rovněž libovolně jako 1, 2 a 3. Pak zajistíme omezení proudu ze zdroje na 20 až 30 % jmenovitého proudu motoru. Následně postupně připojujeme fáze k napájecímu napětí v polaritách podle Tab. 1. Jedná se o šest kombinací, pro každou z nich zaznamenáme logické výstupy Hallovyh sond. [9]

V Tab. 1 jsou uvedeny výsledky pro mnou zvolené pojmenování fází a Hallovyh sond.

Polarita napětí			Výstupy Hallovyh sond		
Fáze A	Fáze B	Fáze C	Hall 3	Hall 2	Hall 1
+	-	-	1	1	0
+	+	-	0	1	0
-	+	-	0	1	1
-	+	+	0	0	1
-	-	+	1	0	1
+	-	+	1	0	0

Tab. 1: Definování komutační sekvence



Obr. 19: Definování komutační sekvence [9], upraveno

Na Obr. 19 je vidět pozice, do které se natočil rotor při připojení fáze A ke kladnému pólu a fází B a C k zápornému pólu napájecího zdroje (první řádek Tab. 1). Jestliže připojíme fázi B na kladný a fázi C na záporný pól, vytvořený magnetický tok kolmý k rotorovému toku urychlí rotor po směru hodinových ručiček. Naopak pokud polaritu fází prohodíme, rotor se začne pohybovat proti směru hodinových ručiček. Z uvedeného vyplývá, že je nyní známo, které fáze sepnout pro požadovaný smysl otáčení při výstupní kombinaci Hallovyh sond "110". Obdobně lze postupovat pro všechny další řádky v Tab. 1. Pro mnou zvolené označení fází a Hallovyh sond je výsledkem Tab. 2 pro otáčení po směru hodinových ručiček a Tab. 3 pro otáčení proti směru hodinových ručiček. Kombinaci binárních signálů od Hallovyh sond jsem převedl na dekadické číslo. Největší váhu bitu jsem uvažoval pro Hallovu sondu č. 3. [9]

Komutační vektor			Výstupy Hallovyh sond			Výstupy dekadicky
Fáze A	Fáze B	Fáze C	Hall 3	Hall 2	Hall 1	
odpojena	+	-	1	1	0	6
-	+	odpojena	0	1	0	2
-	odpojena	+	0	1	1	3
odpojena	-	+	0	0	1	1
+	-	odpojena	1	0	1	5
+	odpojena	-	1	0	0	4

Tab. 2: Komutační tabulka pro otáčení po směru hodinových ručiček

Komutační vektor			Výstupy Hallovyh sond			Výstupy dekadicky
Fáze A	Fáze B	Fáze C	Hall 3	Hall 2	Hall 1	
odpojena	-	+	1	1	0	6
+	-	odpojena	0	1	0	2
+	odpojena	-	0	1	1	3
odpojena	+	-	0	0	1	1
-	+	odpojena	1	0	1	5
-	odpojena	+	1	0	0	4

Tab. 3: Komutační tabulka pro otáčení proti směru hodinových ručiček

## 5.2 Strategie řízení

Rozhodl jsem se pro kombinaci řízení v otevřené smyčce a v uzavřené regulační smyčce pomocí otáčkového regulátoru. Výchozí je řízení v otevřené smyčce, kdy požadovanou střidu PWM zadáváme pomocí tlačítek nebo z počítače. Příkazy z počítače lze rovněž zapnout, případně následně vypnout otáčkový regulátor a zadávat požadované otáčky v dovoleném rozmezí. Otáčkový regulátor neobsahuje podřízený regulátor proudu. Omezení nepřipustného nárůstu proudu je realizováno pomocí PWM rampy. Měření proudu slouží v obou případech jako ochrana, kdy při překročení proudového omezení dojde k zablokování obvodu L6234 a vypnutí regulátoru.

## 5.3 Programování Arduina

Pro programování desky Arduino Mega 2560 jsem zvolil vývojové prostředí Arduino IDE, které lze zdarma stáhnout z oficiálních stránek projektu Arduino. Každý program psaný v Arduino IDE musí obsahovat dvě metody a to *setup()* a *loop()*. Oboje jsou typu *void* tj. bez návratové hodnoty. Metoda *setup()* se spustí jednou po nahrání programu a slouží tak jako inicializační. Metoda *loop()* je nekonečná smyčka. Kód v této smyčce je prováděn stále dokola. [2]

Při konstrukci řídicího programu jsem využíval předprogramované funkce jazyka Arduino i jsem pracoval přímo s registry procesoru Atmega2560 v jazyce C. Použití předprogramovaných funkcí je jednoduché a usnadňuje práci. Nevýhodou je, že některé detaily jsou před uživatelem skryty a také to, že jsou většinou pomalejší než přímá práce s registry procesoru. Z tohoto důvodu jsem je využíval skoro výhradně v inicializační části. Okomentovaný zdrojový kód je k dispozici na přiloženém CD.

## 5.4 Nastavení PWM

Jako časovač pro PWM jsem zvolil jednotku *Timer 3*. Jedná se o 16-bitový čítač/časovač. Jednotku jsem nastavil do tzv. "Phase Correct PWM" módu. V tomto módu *Timer 3* čítá od nuly do maximální hodnoty a poté zpět z maximální hodnoty do nuly. Maximální hodnota určuje rozlišení PWM. Tu jsem zvolil 255, což odpovídá 8-bitovému rozlišení. K vyvedení PWM lze použít piny 5, 3 a 2. Každý z nich má svůj komparační registr. Zvolil jsem tzv. neinvertující PWM výstup, kdy při shodě komparačního registru příslušného pinu a registru *TCNT3* při čítání nahoru dojde k nastavení výstupu do log. 1 a při shodě během čítání dolů do log. 0. Frekvence PWM je dána nastavením dělicího poměru. Ten jsem zvolil 1, takže *Timer 3* čítá přímo hodiny procesoru, tj. 16 MHz. Frekvence PWM potom vychází cca 31 kHz. Tato frekvence je menší než maximální povolená spínací frekvence obvodu L6234 a zároveň je ze všech možných frekvencí dosažitelných dělicím poměrem mimo slyšitelné spektrum, rovněž zajišťuje nejmenší možné zvlnění proudu. [3]

## 5.5 Strategie spínání

Z vnitřního zapojení integrovaného obvodu L6234 (Obr. 18) plyne, že lze dosáhnout pouze komplementárního spínání. Pro toto spínání jsem zvolil unipolární režim. Spodní spínač jedné větve je trvale sepnut a na další větev je přiveden PWM signál. Při PWM v log. 1 tak dochází k připojení dvou fází na napájecí napětí a při PWM v log. 0 jsou fáze odpojeny od napájení a proud doznívá přes trvale sepnutý spínač první větve a spodní spínač druhé větve, resp. jeho nulovou diodu.

## 5.6 PWM rampa

Změna střídy PWM probíhá po rampě. Zadání požadované střídy je vždy nejdříve zapsáno do pomocné proměnné *motorSpeed2* typu *double*. K zápisu do komparačních registrů výstupních PWM pinů při komutaci slouží proměnná *motorSpeed* typu *int*. Algoritmus rampy běží každou milisekundu společně s algoritmem pro potlačení zákmitu tlačítek. V algoritmu rampy dochází k inkrementaci pomocné proměnné *j* typu *byte* a

to tehdy, pokud je tato proměnná menší než nastavený časový interval. Pokud se proměnná rovná nastavenému časovému intervalu a jestliže se proměnná *motorSpeed* liší od proměnné *motorSpeed2*, dochází k inkrementaci či dekrementaci proměnné *motorSpeed* o hodnotu 1. Výchozí hodnota časového intervalu je 10 ms. Uložena je v proměnné *ramp* typu *byte*, kterou lze měnit v rozmezí 10 - 50 pomocí příslušného příkazu ze sériového monitoru.

Použití rampy zaručuje, že nikdy nemůže dojít ke skokové změně střídy PWM, což by v důsledku mohlo vést k nepřipustnému nárůstu proudu.

## 5.7 Ovládání

Ovládat motor je možné pomocí tří tlačítek na shieldu a rovněž pomocí příkazů přes sériový monitor v Arduino IDE. Oba způsoby jsou popsány v následujících dvou kapitolách.

### 5.7.1 Ovládání pomocí tlačítek

Tlačítka jsou připojena na piny 22, 23 a 24, které jsou nastaveny jako vstupní s připojením interního upínacího rezistoru na Vcc. Tlačítka jsou bez aretace a při jejich stisknutí dojde ke spojení vstupního pinu s GND. Tlačítka jsou programově filtrována pro potlačení zákmitu. K tomuto účelu je využita jednotka *Timer 1*, která je inicializována do tzv. "CTC (Clear Timer on Compare Match)" módu. V tomto módu *Timer 1* čítá kmitočet odvozený od vnitřních hodin procesoru a při shodě registru *TCNT1* a *OCR1A*, kde je uložena požadovaná komparační hodnota dojde k vyvolání přerušení. Registr *TCNT1* je automaticky vynulován a *Timer 1* začíná opět čítat od nuly. Hodnotu dělicího poměru jsem zvolil 1, tj. *Timer 1* čítá přímo vnitřní hodiny procesoru. Hodnota v registru *OCR1A* je zvolena tak, aby došlo k vyvolání přerušení každou 1 ms. [3]

Obsluha přerušení je velmi jednoduchá. Dojde pouze k zapsání hodnoty "true" do logické proměnné *interruptTMRI* deklarované jako *volatile*. Samotná filtrace probíhá v hlavní nekonečné smyčce. Princip filtrace je popsán ve zdrojovém kódu. Na konci filtračního algoritmu je do proměnné *interruptTMRI* zapsána hodnota "false".

Při stisknutí prvního tlačítka dojde k inkrementaci proměnné *motorSpeed2* o hodnotu 5. Programově je ošetřena zarážka na hodnotu 255, což odpovídá maximu nastaveného PWM rozlišení. Toto tlačítko je tedy využito ke zvyšování rychlosti motoru při otáčení po směru hodinových ručiček a snižování při otáčení proti směru hodinových ručiček.

Při stisknutí druhého tlačítka dojde k dekrementaci proměnné *motorSpeed2* o hodnotu 5. Programově je ošetřena zarážka na hodnotu -255, což odpovídá mínus maximu nastaveného PWM rozlišení. Toto tlačítko je využito ke zvyšování rychlosti motoru při otáčení proti směru hodinových ručiček a ke snižování při otáčení po směru hodinových ručiček.

Třetí tlačítko slouží jako tlačítko STOP. Při jeho stisknutí dojde k zablokování obvodu L6234, vynulování

komparačních registrů všech výstupních PWM pinů, nahrání nulové hodnoty do proměnných *motorSpeed* a *motorSpeed2* a rovněž k vypnutí regulátoru otáček, pokud je v činnosti.

Příkaz	Povolené hodnoty	Funkce	Poznámka
PWM	<-255, 255>; číslo musí být dělitelné pěti	hodnota střidy PWM	případná desetinná část se odřízne, nereaguje při zapnutém regulátoru
PID	{0, 1}	zapíná (1) nebo vypíná (0) regulátor otáček	lze zapnout pouze při kladných otáčkách nebo nulových otáčkách ( <i>motorSpeed2</i> ≥ 0)
RPM	<800, 3000>	požadované otáčky při zapnutém regulátoru v min <sup>-1</sup>	požadované otáčky jsou zapamatovány i při vypnutém regulátoru, případná desetinná část se odřízne
T	<1, 1000>	perioda výpočtu regulátoru v ms	případná desetinná část se odřízne
KP	<0, horní rozsah double>	proporcionální konstanta	výchozí hodnota je 0.1
KI	<0, horní rozsah double>	integrační konstanta	výchozí hodnota je 1
KD	<0, horní rozsah double>	derivační konstanta	výchozí hodnota je 0
ODREZ	<1, 10000>	mezní frekvence číslicového filtru v Hz	výchozí hodnota je 50, doporučuje se neměnit - původně použito při ladění optimální mezní frekvence, případná desetinná část se odřízne

Tab. 4: Podporované příkazy pro ovládání motoru přes sériovou komunikaci z Arduino IDE

## 5.7.2 Ovládání přes sériový monitor v Arduino IDE

Motor lze ovládat a nastavovat jeho parametry pomocí sady podporovaných příkazů přes sériový monitor v Arduino IDE. Každý příkaz má povolenou množinu zadávaných hodnot. Formát příkazu je následující: <PŘÍKAZ: požadovaná\_hodnota>. Znak "<" je zahajovací, znak ">" je ukončovací a znak ":" je využit při oddělování textové a číselné části řetězce. Podporované příkazy společně s množinami dovolených hodnot a vysvětlivkami jsou uvedeny v Tab. 4. Maximální délka příkazového řetězce je 32 znaků.

## 5.8 Komutace

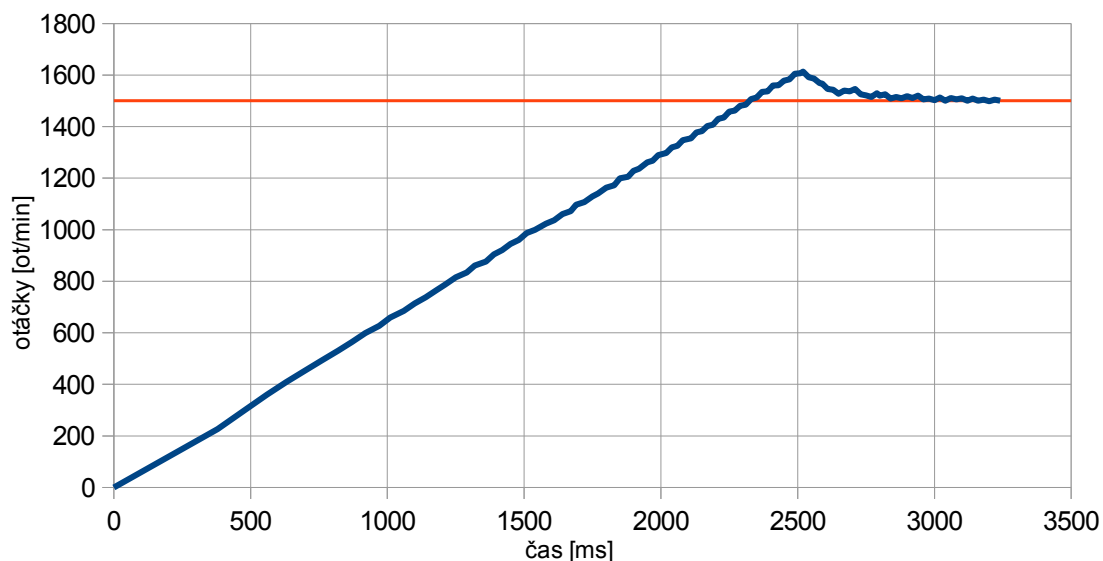
Hallovy sondy jsou připojeny na piny 21, 20 a 19. Tyto piny podporují externí přerušeni, které jsem nakonfiguroval na změnu hrany. V obsluze přerušeni dochází pouze k přečtení *PORTU D*, kam jsou Hallovy sondy připojeny a uložení přečtené hodnoty do proměnné *hallVal*. Ta je deklarována jako *volatile*, datový typ je *byte*. Výstupy Hallových sond jsou s otevřeným kolektorem. Z tohoto důvodu je v inicializační části provedeno mimo nastavení pinů 21, 20 a 19 jako vstupních i připojení interního upínacího rezistoru na *Vcc*.

Samotná komutace poté probíhá v hlavní nekonečné smyčce pomocí konstrukce *switch()*. Vstupním parametrem je proměnná *hallVal*, která je bitově maskována, abychom brali v úvahu pouze ty piny *PORTUD*, na které jsou připojeny Hallovy sondy. V souladu s Tab. 2 a Tab. 3 je pak podle hodnoty proměnné *hallVal* vybrána příslušná komutační sekvence. Nejdříve dojde pomocí pinů 52, 51 a 50, které jsou nakonfigurovány jako výstupní a připojeny k pinům ENx obvodu L6234 k zablokování větve, která nebude spínána, a odblokování dvou větví, které spínány budou. Následně dojde k nahrání nulové hodnoty do komparačního registru výstupního PWM pinu, který se na komutaci nepodílí a do komparačního registru pinu, jenž má zajistit trvalé sepnutí spodního spínače větve, která má připojit fáze na zápornou svorku napájecího napětí. Nakonec je do komparačního registru pinu, který má zajistit požadovanou střední hodnotu napětí, uložena hodnota proměnné *motorSpeed*. Při jakékoliv jiné hodnotě vstupního parametru *hallVal* než je číslo 1 až 6, dojde k zablokování všech větví zapsáním log. 0 na porty ovládající vstupy ENx. K zablokování všech větví (a rovněž k vynulování všech komparačních registrů PWM pinů) také dojde, pokud je hodnota *motorSpeed* rovna nule. V tomto případě ale pomocí podmíněného příkazu mimo *switch()*.

Pro oba smysly otáčení jsou použity různé konstrukce *switch()*. Při otáčení proti směru hodinových ručiček (záporná hodnota proměnné *motorSpeed*) je proměnná *motorSpeed* nahrávána s minusem.

## 5.9 Regulátor otáček

Jako regulátor otáček je použit PI (proporcionálně-integrační) regulátor. Při implementaci jsem využil volně dostupnou knihovnu PID pro Arduino. Všechny proměnné, se nimiž regulátor pracuje, musí být typu *double*. Vstupem do regulátoru je proměnná *rpm*, výstupem proměnná *motorSpeed2*. Žádaná hodnota otáček v  $\text{min}^{-1}$ , která je zadávána příkazem z PC a jejíž výchozí hodnota je 1500, je uložena v proměnné *desiredRPM*. Výchozí perioda volání výpočetního algoritmu regulátoru je nastavena na 20 ms. Konstanty regulátoru jsem stanovil experimentálně. Proporcionální konstanta je při spuštění programu nastavena na hodnotu 0.1, integrační na hodnotu 1 a derivační na hodnotu 0. Periodu výpočtu a hodnoty konstant lze měnit za běhu programu příslušnými příkazy z počítače. Regulátor se zapíná a vypíná rovněž přes sériový monitor. Podmínkou pro zapnutí je, aby hodnota proměnné *motorSpeed2* byla nezáporná, tj. regulátor funguje pouze pro otáčení po směru hodinových ručiček. Výstupní rozsah regulované veličiny je ponechán výchozí, tj. 0 až 255 (odpovídá rozlišení PWM). Na Obr. 20 je znázorněna reakce regulátoru po jeho zapnutí při stojícím motoru na žádanou hodnotu otáček, která je rovna  $1500 \text{ min}^{-1}$ . Vodorovná přímka znázorňuje žádané otáčky. Parametry regulátoru a PWM rampy jsou ponechány takové, jaké jsou inicializovány při spuštění programu.



Obr. 20: Náběh z nulových otáček na žádanou hodnotu 1500 otáček za minutu

## 5.10 Programové měření

### 5.10.1 Měření otáček

Pro měření otáčivé rychlosti je použita záchytná jednotka *Timeru 4*. *Timer 4* je nakonfigurován tak, že je povoleno přerušeni při jeho přetečení a při záchytné události. Předdělička kmitočtu je zvolena 64. Výstup jedné (v principu libovolné) Hallovy sondy je přiveden na pin 49. Při změně z log. 1 na log. 0 dojde k přesunutí obsahu čítače resp. obsahu registru *TCNT4* do záchytného registru *ICR4* a k vyvolání přerušeni. V přerušeni je registr *ICR4* přečten a jeho hodnota uložena do neznaménkové proměnné *currentCapture* typu *int* deklarované jako *volatile*. Na konci těla ISR je zapsáním "true" do logické proměnné *hallCapture* nastaven příznak o tom, že je k dispozici nová zachycená hodnota. Příznak je poté průběžně testován v nekonečné smyčce, kde je rovněž proveden v případě nově zachycené hodnoty výpočet otáček. Nejdříve je od aktuální zachycené hodnoty odečtena hodnota minulá. Ta je uložena v proměnné *previousCapture* (rovněž neznaménkové a typu *int*). Na základě tohoto rozdílu je poté vypočítána skutečná otáčivá rychlost v  $\text{min}^{-1}$ , která je uložena do proměnné *rpm* typu *double*. Ve výpočtu je použita korekční konstanta (formálně pojmenovaná *RPM\_CONSTANT*), která zohledňuje nastavení čítače, počet pólpárů na rotoru a přepočítání mezi Hz a  $\text{min}^{-1}$ . Po výpočtu dojde k uložení aktuální zachycené hodnoty do předchozí a k zapsání "false" do příznaku *hallCapture*. [3]

K detekci nulových otáček je využita informace o přetečení *Timeru 4*. V obsluze přerušeni od záchytné jednotky je po uložení nové hodnoty z registru *ICR4* průběžně nulována proměnná *timer4\_overflow* typu *byte* deklarovaná jako *volatile*. V obsluze přerušeni od přetečení *Timeru 4* je tato proměnná naopak

inkrementována. Pokud se mezi dvěma záchytnými událostmi podaří inkrementovat *timer4\_overflow* více než jednou, dojde k vynulování proměnné *rpm* a následně i *timer4\_overflow*.

Experimentálně bylo zjištěno, že v náhodných časových intervalech dochází k měření chybné otáčivé rychlosti. Špatná hodnota otáček je typicky přibližně dvakrát větší než hodnota skutečná. Regulátor na toto reagoval prudkým poklesem střídy PWM. Příčinu tohoto problému se mi bohužel nepodařilo odhalit. Přijal jsem ale následující opatření: Vytvořil jsem pomocnou proměnnou *previousRPM* typu *unsigned int*. Po výpočtu otáček a jejich uložení do proměnné *rpm* dochází k testování, zdali hodnota aktuálních otáček není větší než 1.5 násobek otáček předešlých. Pokud ano, tak je do proměnné *rpm* nahrána hodnota proměnné *previousRPM*. Pokud ne, tak je naopak do *previousRPM* nahrána hodnota *rpm*. Testování se spouští jen v případě, kdy je otáčivá rychlost větší než  $600 \text{ min}^{-1}$ . Při rozběhu z klidu by totiž podmínka byla vždy splněna.

## 5.10.2 Měření proudu

### 5.10.2.1 AD (analogově-číslicový) převodník

O obvodovém zapojení pro měření proudu bylo diskutováno v kapitole 4.4.1. Výstup zapojení je přiveden na analogový pin 0. Převodník je nastaven do tzv. auto-trigger režimu. V tomto režimu dochází po skončení aktuálního převodu ihned k započetí převodu dalšího. Hodiny AD převodníku jsou odvozeny dělicím poměrem od hodin procesoru. Dělicí poměr jsem zvolil 16. Frekvence hodin AD převodníku pak vychází 1 MHz. Doba převodu v auto-trigger režimu zabere 13.5 hodinových cyklů AD převodníku. Výsledná vzorkovací frekvence je cca 74 kHz. Jako referenční napětí je zvolena vnitřní reference 2.56 V. K pinu AREF je zapojen externí kapacitor o hodnotě 10 nF. [3]

V nekonečné smyčce je pak průběžně testován příznakový bit *ADIF* z registru *ADCSRA*, který signalizuje dokončení převodu. Jestliže je k dispozici nová hodnota, dojde k jejímu uložení do proměnné *xi* typu *float*. Následně je proveden výpočet nové výstupní hodnoty číslicového filtru, převod této hodnoty na skutečný proud a je provedeno testování, zdali nedošlo k překročení nastaveného proudového omezení, které je uloženo v proměnné *currentLimit* a jehož výchozí hodnota je 1000 mA. Jestliže je omezení překročeno, dojde k zablokování obvodu L6234, nahrání nulové hodnoty do komparačních registrů všech PWM pinů, vynulování proměnných *motorSpeed2* a *motorSpeed* a k vypnutí regulátoru.

Bit *ADIF* je nulován programově před opuštěním podmínky pro testování dokončení převodu.

### 5.10.2.2 Číslicová filtrace

Měřený proud je pro získání střední hodnoty programově filtrován. Je použit algoritmus filtru s nekonečnou impulzní odezvou, který je analogií k RC článku v diskrétní oblasti. Aktuální výstupní hodnota je vypočtena z aktuální vstupní hodnoty a z výstupní hodnoty minulé podle rekurentního vztahu [28]

$$y_i = \alpha x_i + (1 - \alpha) y_{i-1}, \quad (13)$$



kde  $y_i$  je aktuální výstupní hodnota,  $x_i$  je aktuální vstupní hodnota,  $y_{i-1}$  je výstupní hodnota v předchozím okamžiku a  $\alpha$  je konstanta definovaná jako [28]

$$\alpha = \frac{T}{\tau + T}, \quad (14)$$

kde  $T$  je vzorkovací perioda a  $\tau$  je časová konstanta aproximovaného RC článku.

Vzorkovací perioda je odvozena od nastavení AD převodníku a časová konstanta je vypočtena na základě požadované mezní frekvence podle vztahu [28]

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_0}. \quad (15)$$

Kalibrace výstupu číslicového filtru na skutečný proud je provedena pomocí ampérmetru a zpětnovazebního trimru operačního zesilovače. Výsledná hodnota odporu trimru po kalibraci je 12.75 k $\Omega$ . Napěťové zesílení operačního zesilovače potom vychází 8.85. Při referenčním napětí AD převodníku 2.56 V je hodnota proudu motoru, kdy dojde k dosažení maximální výstupní hodnoty AD převodníku, rovna 2.9 A. Hodnota maximálního nastavitelného proudového omezení, při kterém dojde k vypnutí L6234, je omezena na 1500 mA z toho důvodu, že bylo experimentálně zjištěno, že obvod L6234 se neúměrně zahřívá již při trvalém proudu 1 A. Důvodem je zřejmě to, že obvod L6234 je upevněn v patici, takže odvod tepla piny GND je ztížen.

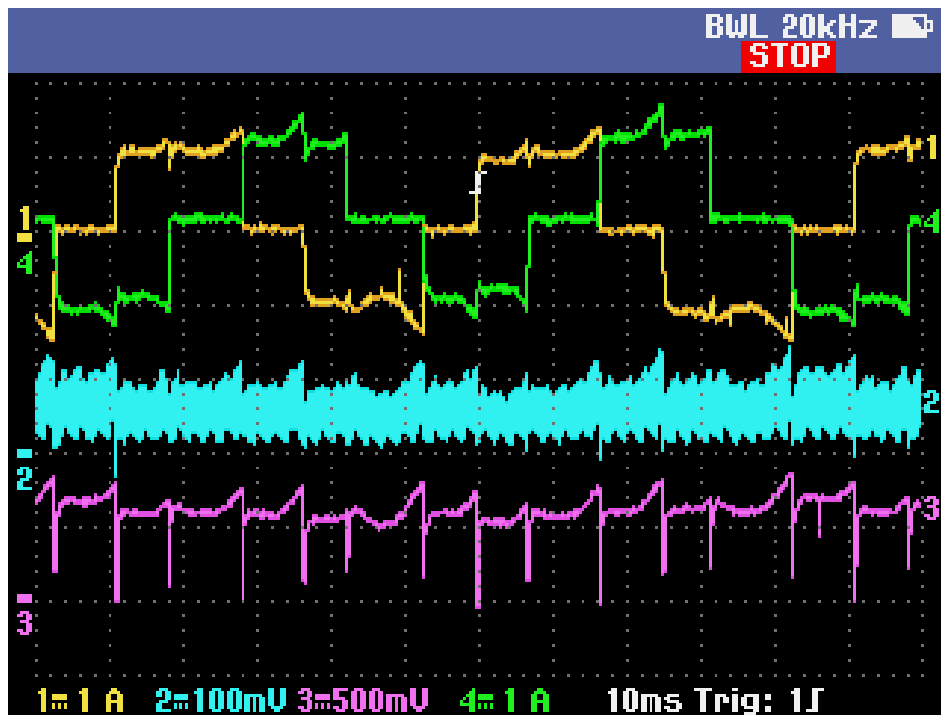
Výstup číslicového filtru je pro získání proudu vynásoben získanou převodní konstantou (formálně pojmenovanou jako *CALIBRATION*). Výchozí mezní frekvenci filtru jsem zvolil 50 Hz a to z důvodu malé fluktuační naměřených hodnot proudu a přijatelného zpoždění.

### 5.10.3 Odesílání naměřených dat

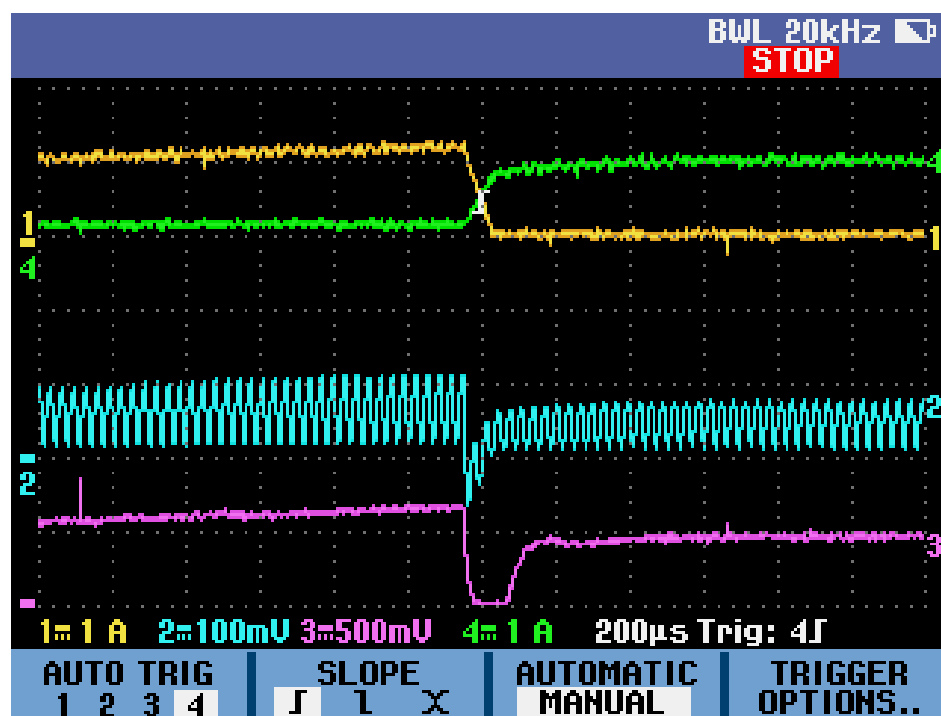
Naměřená data jsou posílána každou sekundu přes USB do počítače na sériový monitor v Arduino IDE. Pro odměření intervalu je použit *Timer 5*, který je nakonfigurován do stejného módu jako *Timer 1* použitý pro filtraci zákmitu tlačítka. Dělicí poměr je zvolen 64. Do komparačního registru *OCR5A* je nahrána taková hodnota, aby docházelo k vyvolání přerušení každou sekundu. Hodnota je vypočtena z vnitřních hodin procesoru a dělicího poměru. V obsluze přerušení dochází pouze k zapsání hodnoty "true" do logické proměnné *rpmUpdate* deklarované jako *volatile*. Samotné odesílání dat probíhá v nekonečné smyčce pokaždé, když je *rpmUpdate* rovno "true". K odeslání dat je použita funkce *Serial.println()*, jejímž parametrem je odesílaná hodnota. Sériová komunikace je inicializována v inicializační části programu na rychlost 115 200 Bd.

## 5.11 Ukázka průběhů sejmutých z osciloskopu

Obr. 21 znázorňuje průběhy proudů ve fázích A (kanál 1) a B (kanál 4), napětí na měřicím rezistoru (kanál 2) a filtrovaný výstup operačního zesilovače (kanál 3) při běžícím motoru. Na Obr. 22 je vidět detail těchto veličin při komutaci.



Obr. 21: Průběhy proudů ve fázích A a B, napětí na měřicím rezistoru a napětí na výstupu operačního zesilovače za filtrem



Obr. 22: Průběhy proudů ve fázích A a B, napětí na měřicím rezistoru a napětí na výstupu operačního zesilovače za filtrem - detail při komutaci motoru

## 6 Závěr

Cílem práce bylo popsat konstrukci BLDC motorů, provést rešerši metod řízení jejich otáček, vybrat si jednu z možných metod řízení, následně navrhnout obvody pro propojení s kitem Arduino a naprogramovat řídicí program.

V kapitole 2 je nejprve uvedeno zařazení BLDC motorů a seznam jejich výhod. Následně je provedena klasifikace podle umístění rotoru, rozbor konstrukcí statoru a vinutí a popsána stavba rotoru včetně rozboru vlastností používaných permanentních magnetů. Kapitulu uzavírá stručný rozbor elektromechanických vlastností BLDC motorů a vysvětlení principu činnosti.

Kapitola 3 se zabývá prostředky pro řízení BLDC motorů a různými metodami řízení. Na začátek jsem zařadil pojednání o třífázovém střídači, který se používá jako výstupní měnič, včetně různých metod spínání a o PWM modulaci. Následně jsou uvedeny některé používané senzory polohy a otáček pro sensorové řízení a vysvětlena nejpoužívanější tzv. šestikroková komutace. Poté je proveden rozbor řízení na základě Hallových sond a nakonec je uveden přehled bezsensorových metod řízení včetně různých metod rozběhu.

Jako metodu pro praktickou realizaci jsem zvolil šestikrokovou komutaci na základě informace o poloze rotoru od Hallových sond. Pro řízení běhu motoru jsem vybral desku Arduino Mega 2560, která pro tento účel disponuje dostatečným výkonem a dostatečným množstvím vstupů a výstupů. Kapitola 4 popisuje použitý hardware a kapitola 5 konstrukci řídicího programu pro 40W motor firmy LINIX. Jako výstupní měnič pro motor jsem zvolil integrovaný obvod L6234, který se mi pro účel této práce jevil jako ideální. Jedná se v principu o integrovaný třífázový střídač s poměrně vysokým proudovým a napěťovým zatížením, který lze ovládat přímo pomocí mikrokontroléru Arduino. Výhodou jsou rovněž zabudované ochrany.

Snažil jsem se rovněž o implementaci měření proudu. Pro tento účel jsem zvolil měření úbytku na měřicím rezistoru zapojeným mezi zátěž a GND. Napětí je zesíleno operačním zesilovačem v neinvertujícím zapojení a před vstupem k AD převodníku filtrováno RC dolní propustí.

Obvodové schéma, které je uvedeno v příloze, jsem kreslil ve freeware programu fritzing. Součástky jsem pájel na neoficiální prototype shield, který se přímo dá nasadit na desku Arduino Mega 2560.

Ovládání motoru probíhá pomocí tlačítek na shieldu a příkazů ze sériového monitoru v Arduino IDE. Program umožňuje řízení v otevřené smyčce i v uzavřené regulační smyčce s regulátorem otáček bez podřízeného regulátoru proudu. Změřené hodnoty otáčivé rychlosti a proudu jsou pro informaci každou sekundu odesílány na sériový monitor vývojového prostředí Arduino IDE.

Vytvořený systém nabízí do budoucna možnosti rozšíření, zejména zdokonalení obvodu pro měření proudu, implementaci proudové regulační smyčky a realizaci zobrazovacího a ovládacího programu např. pro PC. Nicméně závěrem lze konstatovat, že cíle této bakalářské práce se podařilo naplnit.

## 7 Seznam obrázků

Obr. 1: Znázornění konstrukce BLDC motoru s vnitřním a vnějším rotorem.....	14
Obr. 2: Drážkovaný stator (vlevo) a stator bez drážek (vpravo).....	15
Obr. 3: Příčné řezy rotorovými magnety.....	16
Obr. 4: Momentové charakteristiky ideálního BLDC motoru.....	19
Obr. 5: Otáčení BLDC motoru.....	20
Obr. 6: Třífázový napěťový střídač.....	21
Obr. 7: Vzájemné rozmístění Hallových sond v třífázovém dvoupólovém BLDC motoru: a) natočení o 120°, b) natočení o 60°.....	23
Obr. 8: Inkrementální a absolutní enkodér: (a) disk inkrementálního enkodéru, (b) kvadrurní výstupní signál, (c) disk absolutního enkodéru, (d) výstupní signál absolutního enkodéru.....	24
Obr. 9: Bezkartáčový resolver: 1-stator, 2-rotor, 3-rotační transformátor.....	25
Obr. 10: Signály z Hallových sond, zpětné indukované napětí, výstupní moment a fázové proudy pro čtyřpólový motor.....	26
Obr. 11: Metoda integrace indukovaného napětí.....	29
Obr. 12: Fázové proudy a indukovaná napětí.....	30
Obr. 13: Porovnání indukovaného napětí s polovinou napájecího napětí.....	31
Obr. 14: Porovnání indukovaného napětí s vytvořeným virtuálním středem.....	32
Obr. 15: Startovní pozice rotoru.....	33
Obr. 16: Třífázový střídač a typické idealizované průběhy fázových proudů a indukovaných napětí.....	34
Obr. 17: Arduino Mega 2560.....	37
Obr. 18: Schéma vnitřního zapojení integrovaného obvodu L6234 a externích součástek pro nábojovou pumpu a měření proudu.....	39
Obr. 19: Definování komutační sekvence.....	41
Obr. 20: Náběh z nulových otáček na žádanou hodnotu 1500 otáček za minutu.....	47
Obr. 21: Průběhy proudů ve fázích A a B, napětí na měřicím rezistoru a napětí na výstupu operačního zesilovače za filtrem.....	50
Obr. 22: Průběhy proudů ve fázích A a B, napětí na měřicím rezistoru a napětí na výstupu operačního zesilovače za filtrem - detail při komutaci motoru.....	50

## 8 Seznam tabulek

Tab. 1: Definování komutační sekvence.....	41
Tab. 2: Komutační tabulka pro otáčení po směru hodinových ručiček.....	42
Tab. 3: Komutační tabulka pro otáčení proti směru hodinových ručiček.....	42
Tab. 4: Podporované příkazy pro ovládání motoru přes sériovou komunikaci z Arduino IDE.....	45

## 9 Seznam použité literatury

- [1] 2-2-2 Structure And Application Of Brushless DC Motors | Nidec Corporation. *Nidec Corporation* [online]. 2014 [cit. 2015-10-23]. Dostupné z: <http://www.nidec.com/en-NA/technology/motor/basic/00019/>
- [2] Arduino - Home [online]. 2016 [cit. 2016-02-26]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/>
- [3] Atmel [online]. *Atmel ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V . Datasheet*. 2014. [cit. 2016-3-12]. Dostupné z: [http://www.atmel.com/images/atmel-2549-8-bit-avr-microcontroller-atmega640-1280-1281-2560-2561\\_datasheet.pdf](http://www.atmel.com/images/atmel-2549-8-bit-avr-microcontroller-atmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf)
- [4] BLDC Motor – Brushless DC Motor Introduction. *NMB Technologies Corporation – Fans – Motors – Bearings – LED Lighting*. [online]. © 2014 [cit. 2015-10-24]. 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/)
- [5] Brushless DC Motor, China DC Motor Manufacturer, Linix. *AC Motor Manufacturer, DC Motor in China, Linix* [online]. [cit. 2016-02-26]. Dostupné z: <http://www.linixmotor.com/3-3-Tool-Motor.html>
- [6] Brushless DC Motors – Part I: Construction and Operating Principles . *EDN*. [online]. Copyright © 2015 [cit. 2015-10-23]. Dostupné z: <http://www.edn.com/design/sensors/4406682/Brushless-DC-Motors—Part-I—Construction-and-Operating-Principles>
- [7] CROWDER, Richard M. *Electric drives and electromechanical systems*. 1st ed. Oxford: Elsevier, 2006. ISBN 9780750667401
- [8] DAMODHARAN, P., R. SANDEEP a K. VASUDEVAN. Simple position sensorless starting method for brushless DC motor. *IET Electric Power Applications* [online]. 2008, vol. 2, no. 1, s. 49-55. ISSN 17518660.
- [9] Freescale Semiconductor [online]. *BLDC Motor Control with Hall Sensors Driven by DSC . Application Note*. [cit. 2016-07-03]. Dostupné z: [http://cache.nxp.com/files/microcontrollers/doc/app\\_note/AN4413.pdf?fpsp=1&WT\\_TYPE=Application%20Notes&WT\\_VENDOR=FREESCALE&WT\\_FILE\\_FORMAT=pdf&WT\\_ASSET=Documentation&fileExt=.pdf](http://cache.nxp.com/files/microcontrollers/doc/app_note/AN4413.pdf?fpsp=1&WT_TYPE=Application%20Notes&WT_VENDOR=FREESCALE&WT_FILE_FORMAT=pdf&WT_ASSET=Documentation&fileExt=.pdf)
- [10] Freescale Semiconductor [online]. *BLDC Motor Control: Trapezoidal back EMF BLDC motor control techniques*. 2012 [cit. 2015-12-12]. Dostupné z: <https://cache.freescale.com/files/industrial/doc/brochure/BBCNTRLBLDCART.pdf>
- [11] Freescale Semiconductor. *Three-phase Sensorless BLDC Motor Control Application*. [online]. 2014 [cit. 2015-12-12]. Dostupné z: [http://cache.freescale.com/files/32bit/doc/ref\\_manual/DRM144.pdf](http://cache.freescale.com/files/32bit/doc/ref_manual/DRM144.pdf)
- [12] GAMAZO-REAL, Jose, Ernesto VAZQUEZ-SANCHEZ a Jaime GÓMEZ-GIL. Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends. *Sensors* [online].

2010, vol. 10, no. 7, s. 6901-6947.

[13] GIERAS, Jacek F a Mitchell WING. *Permanent magnet motor technology: design and applications*. 2nd ed., rev. and expanded. New York: Marcel Dekker, c2002. ISBN 0824707397.

[14] Infineon Technologies AG [online]. *Start-up Control Algorithm for Sensorless and Variable Load BLDC Control Using Variable Inductance Sensing Method*. 2006 [cit. 2015-12-7]. Dostupné z: [http://www.infineon.com/dgdl/ap0801810\\_Sensorless\\_Variable\\_Inductance\\_Sensing.pdf?fileId=db3a304412b407950112b40c7c150b39](http://www.infineon.com/dgdl/ap0801810_Sensorless_Variable_Inductance_Sensing.pdf?fileId=db3a304412b407950112b40c7c150b39)

[15] JOHNSON, J. P., M. EHSANI a Y. GUZENGUNLER. Review of sensorless methods for brushless DC. *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. no.99CH36370)*, vol. 1/(1999), pp. 143-150 vol.1. ISSN 0197-2618

[16] KIM, T., H-W LEE a M. EHSANI. Position sensorless brushless DC motor/generator drives: review and future trends. *IET Electric Power Applications* [online]. 2007, vol. 1, no. 4, s. 557-564. ISSN 17518660.

[17] LEPKA, Jaroslav a Pavel GRASBLUM . *Použití mikroprocesorů pro řízení pohonů s BLDC motory* [online]. 2011. [cit. 2015-10-31]. Dostupné z: [http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura\\_09\\_1111.pdf](http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_09_1111.pdf)

[18] Microchip [online]. *MCP616/7/8/9. Data Sheet*. 2008. [cit. 2016-2-27]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21613c.pdf>

[19] Microchip [online]. *Using the PIC18F2431 for Sensorless BLDC Motor Control. Application Note*. 2005. [cit. 2015-12-5]. Dostupné z <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00970A.pdf>

[20] Microchip Technology [online]. *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals. Application Note*. 2003 [cit. 2015-10-18]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>

[21] Monolithic Power System [online]. *Brushless DC Motor Fundamentals Application Note*. 2014, (Rev. 1.0) [cit. 2015-11-01]. Dostupné z: <https://www.monolithicpower.com/Portals/0/Documents/Products/Documents/appnotes/Brushless%20DC%20Motor%20Fundamentals.pdf>

[22] PAVELKA, Jiří, Zdeněk ČEŘOVSKÝ a Jiří LETTL. *Výkonová elektronika*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03626-6.

[23] Slotted vs. Slotless Motor Technology . *High Performance Automation and Motion Control Components & Systems | Servo2Go*. [online]. © 2015 [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: <https://www.servo2go.com/information.php?menu=TS&page=10032>

[24] STMicroelectronics [online]. *BLDC MOTOR START ROUTINE FOR THE ST72141 MICROCONTROLLER*. 2000 [cit. 2015-12-6]. Dostupné z: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/SGSThompsonMicroelectronics/mXywxsy.pdf>

[25] STMicroelectronics [online]. *L6234 - Three phase motor driver. Datasheet*. 2011. [cit. 2016-2-26]

Dostupné z: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00000046.pdf>

[26] STMicroelectronics [online]. *L6234 THREE PHASE MOTOR DRIVER. Application note.* 2001 [cit. 2016-2-26]. Dostupné z: [http://www.st.com/st-web-ui/static/active/jp/resource/technical/document/application\\_note/CD00004062.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/jp/resource/technical/document/application_note/CD00004062.pdf)

[27] STMicroelectronics [online]. *SENSORLESS BLDC MOTOR CONTROL AND BEMF SAMPLING METHODS WITH ST7MC. Application Note.* 2007 [cit. 2015-12-12]. Dostupné z: [http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/application\\_note/CD00020086.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/application_note/CD00020086.pdf)

[28] Wikipedia: The Free Encyclopedia. *Low-pass filter* [online]. 2015 [cit. 2016-3-20]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Low-pass\\_filter&oldid=715123423](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Low-pass_filter&oldid=715123423)

[29] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: *Pulzně šířková modulace* [online]. 2015 [cit. 2016-3-12]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Pulzn%C4%9B\\_%C5%A1%C3%AD%C5%99kov%C3%A1\\_modulace](https://cs.wikipedia.org/wiki/Pulzn%C4%9B_%C5%A1%C3%AD%C5%99kov%C3%A1_modulace)



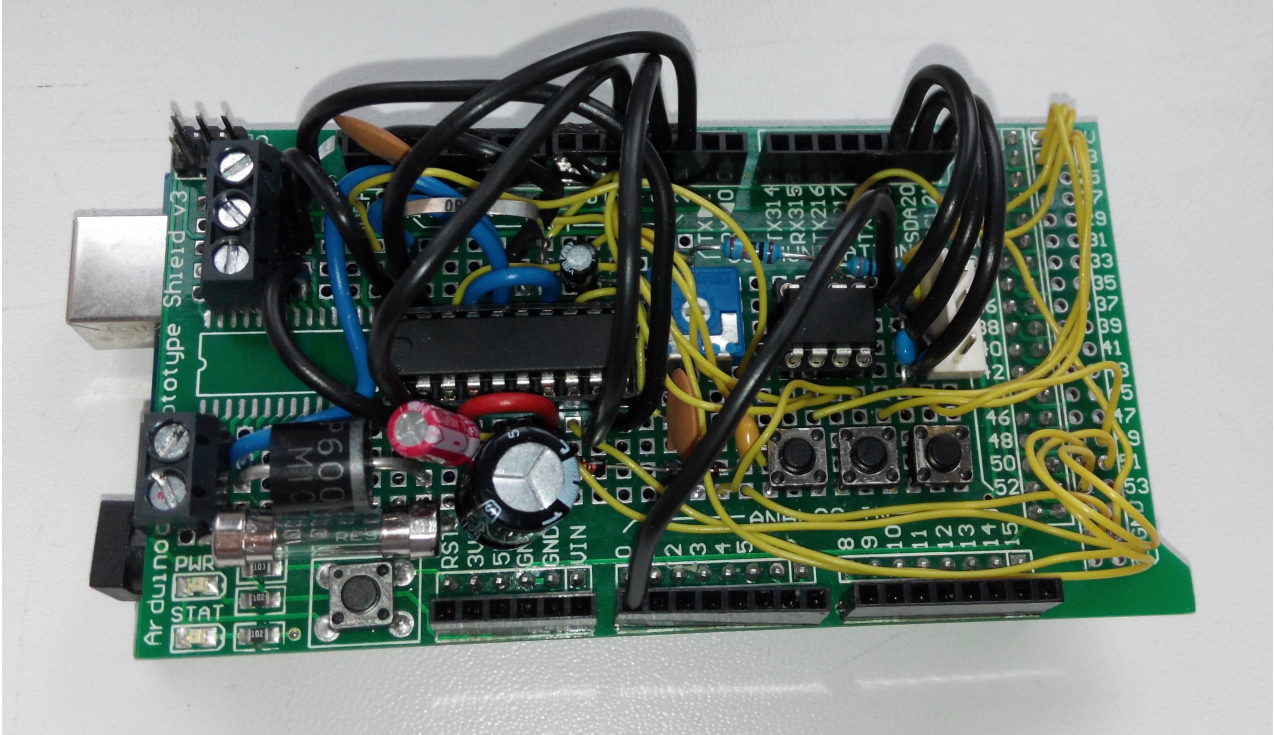
## 10 Seznam příloh

Příloha A - Obsah přiloženého CD.....	58
Příloha B - Arduino Mega 2560 s shieldem včetně osazených součástek.....	59
Příloha C - Vývojový diagram řídicího programu.....	60
Příloha D - Schéma zapojení .....	61

## **Příloha A - Obsah přiloženého CD**

- bakalarska\_prace.pdf - bakalářská práce ve formátu *pdf*
- Arduino - složka se zdrojovým kódem pro Arduino
- PID - složka obsahující knihovnu PID regulátoru

**Příloha B - Arduino Mega 2560 s shieldem včetně osazených součástek**



# Příloha C - Vývojový diagram řídicího programu

