

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky



Diplomová práce

Řídicí jednotka pro BLDC motor

Studijní obor:	Elektronika
Autor:	Bc. Tomáš Morcinek
Vedoucí práce:	prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.

Praha 2020

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Řídicí jednotka pro BLDC motor“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce a pouze s použitím odborné literatury uvedené na konci této práce.

V Praze dne

Podpis studenta:

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce profesorovi Ing. Miroslavu Husákovi, CSc. za cenné rady a odborné vedení mé diplomové práce. Dále také firmě STMicroelectronics za darování vývojového kitu s procesorem a samozřejmě v neposlední řadě za psychickou podporu ze strany rodičů a mé přítelkyně.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Morcinek** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **461389**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Elektronika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Řídicí jednotka pro BLDC motor

Název diplomové práce anglicky:

Control unit for BLDC motor

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rozbor stávajícího stavu řešení řídicích jednotek pro řízení bezkartáčových stejnosměrných motorů s výkonem cca 300 W (např. pro elektrické koloběžky). Detailně porovnejte typy řízení s mikroprocesorem a popište různé metody rekuperace.
2. Navrhněte a realizujte laboratorní vzorek řídicí jednotky určené pro řízení BLDC motorů s výkonem cca 300 W určených pro pohon elektrických koloběžek. Při návrhu využijte vhodný typ mikroprocesoru od firmy ST Microelectronics, do návrhu zahrňte funkci rekuperace, baterie obvykle používané pro tyto účely, laboratorní vzorek realizujte.
3. Zjistěte elektrické parametry realizovaného vzorku, navrhněte možnosti jejich vylepšení.
4. Proveďte úvahu o vhodnosti návrhu z hlediska komerčního využití, proveďte jednoduchý ekonomický rozbor s úvahou pro komerční výrobu.

Seznam doporučené literatury:

1. Hughes, A. and Drury, B., 2019. Electric Motors and Drives. 5th ed., Elsevier.
2. Biskup, T., 2012. Recovery braking of variable-structure electronic commutator for BLDC motor. 1st ed., Archiwum Elektrotechniki.
3. Andrea, D., 2010. Battery Management Systems. 1st ed., Artech House.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

prof. Ing. Miroslav Husák, CSc., katedra mikroelektroniky FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **30.01.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**

prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Abstrakt:

Tato diplomová práce se zabývá návrhem univerzální řídicí jednotky pro řízení motoru BLDC s rekuperací pro použití do různých aplikací jako jsou například elektro koloběžky, skútry, nebo čtyřkolky. Součástí této práce je také seznámení s různými typy algoritmů a metod pro řízení motorů. V rámci návrhu jsou zahrnuty simulace obvodů, testování a jejich následná hardware implementace. Navržený a realizovaný algoritmus řízení motoru je následně implementován do procesorové jednotky. U realizovaného vzorku jsou nadále zjištěny jeho elektrické parametry a jsou navržena jejich možná vylepšení. Na závěr je provedena úvaha o vhodnosti návrhu pro komerční využití s cenovou kalkulací.

Klíčová slova:

Bezkartáčový motor, řídicí jednotka BLDC, PWM regulace, trojfázový měnič, procesor, superkondenzátor.

Abstract:

This thesis is focused on design of universal control unit for BLDC motor. At the beginning is introduction to different type of algorithm and methods for driving a motor. Part of design is circuit simulations which are followed by implementation on hardware. Finished and prepared algorithm for control a motor is programmed to processor on finished PCB board. At this prototype are measured electrical parameters and are proposed some upgrade to better performance and efficiency. At the end is considered usage of this control unit for commercial use.

Key words:

Brushless motor, control unit for BLDC, PWM regulation, three phase inverter, processor, supercapacitor.

Obsah

Obsah	6
Seznam symbolů a zkratk	8
Seznam Obrázků.....	10
Seznam Tabulek	11
1. Úvod.....	12
2. Teoretický rozbor.....	13
2.1. BLDC motor	13
2.1.1. Struktura	16
2.1.2. Typy elektromotorů	18
2.1.3. Porovnání BLDC s jinými motory.....	18
2.2. Typy řízení motorů	20
2.2.1. Lichoběžníková PWM.....	21
2.2.2. Sinusová PWM.....	22
2.2.3. Bezsenzorová metoda řízení.....	22
2.2.4. Skalární řízení	23
2.2.5. Vektorové řízení	24
2.3. Typy regulací.....	24
2.3.1. Regulace v otevřené smyčce	24
2.3.2. PID regulace	24
2.4. Typy rekuperací a brždění.....	25
2.4.1. Dynamická	26
2.4.2. Rekuperační.....	27
2.4.3. Kombinované	28
2.5. Výkonové spínací prvky	28
2.5.1. MOSFET	29
2.5.2. IGBT	29
2.6. Zdroje energie pro pohonné systémy	30
2.6.1. Parametry baterií.....	31
2.6.2. Nabíjení baterie.....	31

3. Návrh jednotky	32
3.1. Postup při návrhu jednotky	32
3.2. Hardware	33
3.2.1. Napájení.....	33
3.2.2. Procesorová část	34
3.2.3. Výkonová část.....	36
3.2.4. Budiče MOSFET	38
3.2.5. Rekuperace.....	40
3.3. Software.....	41
3.3.1. Stavový diagram systému	41
3.3.2. Nastavení periférií	42
3.3.3. Program	46
4. Měření vlastností systému.....	47
4.1. Průběh předbíjení.....	47
4.2. Charakteristiky motoru	48
4.3. Rekuperace.....	50
5. Ekonomická rozvaha	51
5.1. Náklady.....	51
5.2. Zisky	51
6. Závěr.....	52
7. Použitá literatura	53
Přílohy.....	I
Elektronické přílohy	IV

Seznam symbolů a zkratek

Symbols

μ	(H.m ⁻¹)	permeabilita
B	(T)	magnetická indukce
C	(F)	kapacita
ε	(F.m ⁻¹)	permitivita
E	(W)	energie
$e_{A,B,C}$	(V)	elektromotorické napětí
f	(Hz)	frekvence
I	(A)	proud
J	(kg.m ²)	moment setrvačnosti
K_M	(-)	konstanta motoru
L	(H)	indukčnost
M	(H)	vzájemná indukčnost
N	(-)	počet závitů cívky
n	(RPM)	otáčky motoru
NF	(-)	počet fází motoru
p	(-)	počet pólů motoru
P	(W)	činný výkon
Q	(C)	náboj
R	(Ω)	odpor
T	(N.m)	točivý moment
U	(V)	napětí
Θ	(°)	elektrický úhel
Ψ	(Wb)	magnetický tok
ω	(rad)	úhlová rychlost
l	(m)	délka
τ	(s)	časová konstanta

Zkratky

AC	alternating current (střídavý proud)
ADC	analog digital conversion (A/D převod)
ARR	auto reload register (registr přetečení)
BEMF	back elektromotor force (zpětná elektromotorická síla)
BLDC	brushless direct current (bezkartáčový motor)
BMS	battery management system (jednotka baterie)
BTH	bluetooth
CC	constant current (konstantní proud)
CP	cross point (procházející bod)
CPU	cycle process unit (procesor)
CV	constant voltage (konstantní napětí)
D	duty cycle (střída)
DC	direct current (stejnoseměrný proud)
DPS	deska plošných spojů
DTC	direct torque control (přímé řízení točivého momentu)
EMI	electro magnetic interference (EM interference)
HDD	hard disk (uložiště)
LRO	linear regulator output (lineární regulátor napětí)
MOS	metal oxid silicone (vodič-izolant-polovodič)
PID	proportional integral derivative (regulátor)
PSC	prescaler (dělička)
RPM	rotations per minute (otáčky za minutu)
SCAP	supercap (superkondenzátor)
TS	touch screen (dotykový displej)
ZCP	zero cross point (průchod nulou)

Seznam Obrázků

Obrázek 1: Náhradní elektrický model BLDC motoru	13
Obrázek 2: Pracovní režimy motoru	16
Obrázek 3: Rotor na vnější straně vlevo, rotor uvnitř statoru vpravo.....	17
Obrázek 4: Axiální motor: rotor vlevo, stator vpravo	17
Obrázek 5: Porovnání typů motorů.....	19
Obrázek 6: Přehled algoritmů pro řízení motorů.	20
Obrázek 7: Řízení BLDC lichoběžníkovým signálem.....	21
Obrázek 8:Řízení BLDC sinusovým signálem	22
Obrázek 9: Bezsenzorová metoda řízení.....	23
Obrázek 10: PID regulace otáček motoru.....	25
Obrázek 11: Dynamická brzda	26
Obrázek 12: Oboustranný DC/DC měnič.....	28
Obrázek 13: Porovnání různých typů baterií.....	30
Obrázek 14: Design flow návrhu jednotky.....	32
Obrázek 15: Napájecí část jednotky.	33
Obrázek 16: Zapojení akcelerometru.....	35
Obrázek 17: Obvod Hallovy sondy.	36
Obrázek 18:Výkonová část zapojení.	37
Obrázek 19: Zapojení napájení budičů MOSFET.	38
Obrázek 20: Zapojení optočlenu s bootstrap obvodem.....	39
Obrázek 21: Zapojení rekuperace.	40
Obrázek 22: Stavový diagram systému.	42
Obrázek 23: Změna stavů Hallových sond	44
Obrázek 24: Průběh předbíjení DC linku.	47
Obrázek 25: Průběh napětí na svorkách BLDC motoru.	48
Obrázek 26: Průběh Hallových sond.	49
Obrázek 27: BEMF z BLDC motoru.....	50

Seznam Tabulek

Tabulka 1: Komutační tabulka.	21
Tabulka 2: Porovnání IGBT a MOSFET tranzistorů	29
Tabulka 3: Energetická bilance napájení.	34
Tabulka 4: Režimy procesoru.	35
Tabulka 5: Přehled časovačů v procesoru a jejich využití.	43
Tabulka 6: Komunikace procesoru.	45
Tabulka 7: Parametry použitého BLDC motoru.	47
Tabulka 8: Odhad ceny jedné řídicí jednotky.	51

1. Úvod

Bezkartáčové motory jsou v dnešní době důležitou součástí všech elektronických zařízení vyžadující rotační pohyb, ať už od masivních několika kilowattových motorů až po mále motory s malými výkony. S těmito motory se můžeme nejčastěji setkat v automobilovém, nebo v hračkářském průmyslu (RC modely). Jejich hlavní výhodou oproti klasickým stejnosměrným kartáčovým motorům je menší údržba a celkově lepší vlastnosti jak dynamické, tak i elektronické. Tyto motory se začali vyskytovat na počátku 21. století a jejich vzestup nastal až pár let poté. První elektromotor byl objeven v 19. století geniálním vědcem jménem Michael Faraday. Ten při experimentech se rtutí, tyčovým magnetem a kouskem zavěšeno drátu zjistil, že po připojení galvanického článku (baterie), dochází k pohybu drátu okolo magnetu. Účinnost byla sice mizivá, ale dlouhá řada dalších vědců se postarala o zdokonalení elektromotorů, až do jejich dnešní podoby. V budoucnu tyto motory jednou možná nahradí veškeré spalovací motory a budou důležitou součástí každého pohonného systému.

Diplomová práce je rozdělena do dvou hlavních částí. První část je zaměřena na detailní rozbor struktury BLDC motorů, jejich řízení a možné způsoby regulace. Součástí těchto principů jsou také rozebírány různé metody rekuperací a typy uložišť pro ukládání elektrické energie. V další části jsou porovnány typy výkonových spínacích prvků, které hrají klíčovou roli při návrhu nových pohonných systémů. Následně jsou všechny tyto poznatky simulovány, otestovány a implementovány do řídicí jednotky. Důležitými parametry při návrhu je nízká cena, vysoká účinnost a splnění všech požadavků, které vznikly při návrhu konceptu jednotky.

Po zhotovení funkčního prototypu je provedeno postupné oživení a doladění různých obvodových prvků. Nadále jsou u této jednotky zjištěny dosažené elektrické parametry a jsou navržena jejich možná elektrická vylepšení.

Nakonec je provedena ekonomická úvaha spolu s náklady a zisky a co všechno obnáší uvedení nového elektronického zařízení v dnešní době na trh pro komerční využití.

Motivací pro tuto práci jsou neustále rozvíjející se pohonné systémy a nové technologie v oblasti ukládání energie. Navrženou a zhotovenou jednotku plánuji v budoucnu implementovat do reálné mechanické elektro koloběžky.

2. Teoretický rozbor

2.1. BLDC motor

Je to elektronické zařízení, které převádí elektrickou energii na mechanickou. V elektrotechnice je to jeden ze synchronních stejnosměrných motorů, který se skládá ze dvou částí, rotoru a statoru.

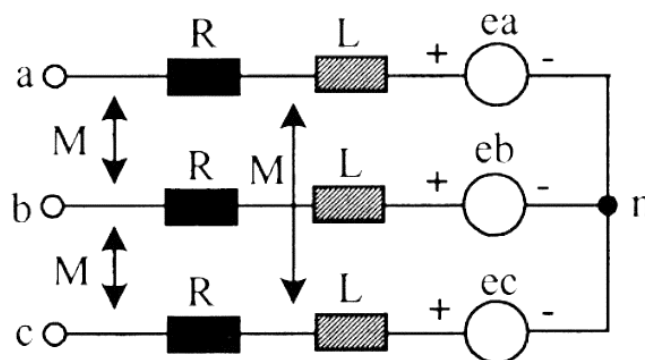
Rotor je pohyblivá část tvořená pevnou hřídelí a permanentními magnety a může nabývat cylindrické nebo diskové podoby. Statorová část je tvořená vinutými cívkami, které vytváří magnetické pole, které působí na magnety rotoru radiální silou a tím ho roztáčí. Pro představu je tato síla v čase dána následovně:

$$\frac{dB}{dt} = \mu_0 * \frac{N}{l} * \frac{dI}{dt} \quad (2.1.1)$$

kde μ_0 je permeabilita, l délka drátu cívky, I proud a N počet závitů cívky.

Cívky se většinou motají do slotů, které jsou odděleny lamináty z křemíkové ocele. Tento motor má 3fázové uspořádání cívek statoru, které může nabývat tvarů jak hvězdicového (nejčastější) tak i trojúhelníkové. U hvězdicového uspořádání je proud tekoucí do cívky motoru totožný s fázovým proudem a spojení všech tří cívek vytváří ve středu tzv. neutrální bod. U trojúhelníkového zapojení je tento proud v cívce 1,73 krát větší. Proto může trojúhelníkové uspořádání cívek dosahovat většího točivého momentu motoru při stejném napájecím napětí.

Teoretické elektrické parametry motoru se dají nejlépe zjistit z náhradního obvodového modelu zapojení pro tento motor, viz Obrázek 1.



Obrázek 1: Náhradní elektrický model BLDC motoru [1].

V jedné fázi motoru lze zjistit velikost napětí, která je dána následovně:

$$u_1 = e_1 + R_1 * i_a + (L_s - M) * \frac{di_a}{dt} \quad (2.1.2)$$

kde e_1 je elektromotorické napětí, R_1 je odpor vinutí a i_a proud.

Točením rotoru s magnety se na cívkách statoru indukují tzv. elektromotorické napětí, kde jeho velikost je závislá na rychlosti otáčení a vlastnostech navinutých cívek na statoru. Toto napětí se dá zjistit následujícím matematickým vzorcem:

$$e_1 = \frac{d\Psi}{dt} = N * \left(\frac{d\Psi}{dt} \right) \quad (2.1.3)$$

kde Ψ je spřažený magnetický tok, N počet závitů.

Spřažený magnetický tok v jedné fázi je závislý na vzájemné interakci rotoru, statoru a velikostí indukčnosti a vzájemné indukčnosti cívek viz vzorec 2.1.4.

$$\Psi_a = L_a * i_a + M_{ab} * i_b + M_{ac} * i_c + \Psi_{PM}(\alpha) \quad (2.1.4)$$

kde M je vzájemná indukce a Ψ_{PM} magnetický tok závislý na úhlu natočení rotoru.

BLDC motory jsou vyráběny jako symetrické, což znamená, že jejich indukčnosti a odpory vinutí každé z fází jsou totožné. To znamená, že vzájemné indukčnosti jsou také totožné ($M_{ab}=M_{bc}=M_{cb}$). Lze tedy říci, že se elektromotorické napětí indukují do všech cívek na statoru při určitých otáčkách rotoru stejně.

Výkonově se tyto motory pohybují od jednotek až po tisíce Wattů. Elektrický výstupní činný výkon lze zjistit následujícím vzorcem:

$$P_{OUT} [W] = (2 * \pi * n) * T_{SH} = \eta * (U * I_a) \quad (2.1.5)$$

kde T_{SH} je točivý moment hřídele, n je rychlost otáčení a η účinnost motoru.

Účinnost motoru se snižuje tepelnými ztrátami ve vinutí cívek, indukčními ztrátami v jádře anebo rotačními ztrátami ve vzduchové mezeře mezi statorem a rotorem (tzv. air flux).

Elektrická rychlost rotoru motoru lze z elektrických veličin motoru zjistit následovně:

$$\omega_e [rad] = \frac{U}{k} - \frac{R}{k^2} * T_L \quad (2.1.6)$$

kde T_L je točivý moment zátěže na rotoru a k konstanta motoru.

Z tohoto vzorce vyplývá, že rychlost otáčení rotoru motoru je tedy dána velikostí přivedeného napětí na svorkách motoru.

Tuto rychlost lze také spočítat z mechanické rychlosti, známe-li počet pólů motoru:

$$\omega_e [rad] = \omega_m * \frac{p}{2} \quad (2.1.7)$$

kde p je počet pólů motoru, ω_m mechanická rychlost hřídele.

Všechny motory včetně tohoto produkují tzv. točivý moment, který je důležitý při kalkulacích zatížení působících na hřídel motoru (pro rozjezd musí být točivý moment motoru větší, než točivý moment zatížení) a lze ho zjistit následující rovnicí:

$$T_{EM}[N.m] = F * r = k_M * i_a \quad (2.1.8)$$

kde F je síla, r poloměr hřídele, k_m konstanta motoru a i_a proud.

Ze vzorce je patrné, že většího točivého momentu lze dosáhnout za pomoci větší šířky, nebo délky rotoru (větší plocha, na kterou působí elektromagnetická síla) a větším budicím proudem vstupujících do cívek motoru. Mají lineární momentovou charakteristiku, což znamená, že dokážou na změně budicích veličin napětí a proudu reagovat lineárně.

Mechanický moment na hřídeli lze zjistit, známe-li setrvačnost rotoru (váha rotoru, zátěže). Záleží také na tom, je-li na hřídeli nějaká zátěž. Pro moment bez zátěže na motoru platí:

$$T_M[N.m] = T_{EM} - J * \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.1.9)$$

kde ω_m je mechanická rychlost motoru.

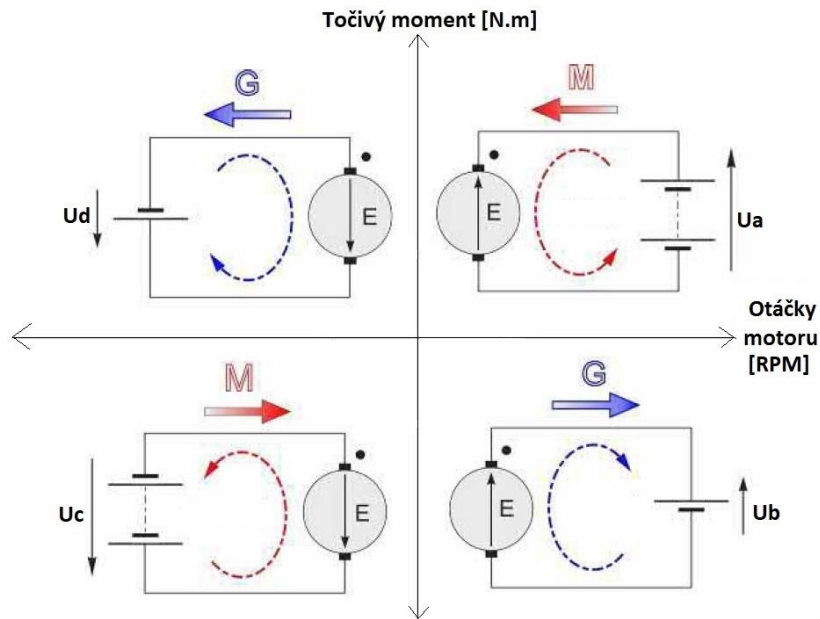
Konstantu motoru, která je nejdůležitějším parametrem při výpočtech a většinou ji výrobce neuvádí, lze spočítat z točivého momentu motoru a maximálního proudu udávané výrobcem viz vzorec 2.1.10. Lze ho také zjistit přes elektromotorické napětí a úhlovou rychlost.

$$k_M = \frac{T_{EM}}{i_a} = \frac{e}{\omega_m} \quad (2.1.10)$$

Dynamickou vlastností motoru je časová konstanta τ . Je to doba, za kterou se po přiložení napětí na svorky motoru stabilizuje proud na svou maximálně možnou konečnou hodnotu. Požadavkem je, aby tato doba byla co nejkratší (reakce motoru). Lze ji spočítat z indukčnosti a odporu armatury motoru:

$$\tau[s] = \frac{L}{R} \quad (2.1.11)$$

Motor může pracovat ve dvou režimech, jedním z nich je motorický a druhý generický. Motorický režim nastává, má-li zdroj napětí na svorkách motoru větší napětí než zpětné elektromotorické napětí z motoru (EMF). Jeli napětí z motoru větší než na zdroji, proud teče obráceně z motoru do zdroje a je tedy v generativním režimu, viz Obrázek 2. Tento princip funguje stejně pro oba směry otáčení motoru.



Obrázek 2: Pracovní režimy motoru [1].

BLDC je zařízení, které pro svůj chod využívá elektronickou komutaci neboli změnu směru proudu v určitých cívkách statoru. Nepotřebuje tedy pro svůj chod mechanickou komutaci za pomoci kartáčů, jak tomu je u klasických stejnosměrných kartáčových motorů.

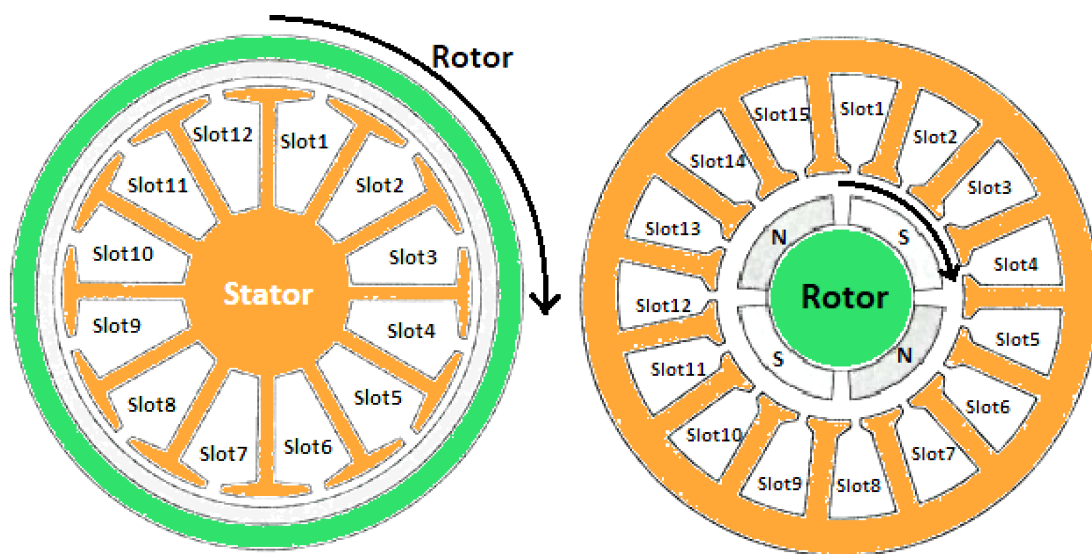
2.1.1. Struktura

Existuje mnoho kombinací a různá geometrická uspořádání rotoru a statoru. Nejčastější typy uspořádání jsou tato: rotor na vnější straně (stator uvnitř), rotor uvnitř (stator na vnější straně), axiální rotor a lineární rotor.

U motoru s vnějším rotorem jsou cívky namotávány na sloupky statoru s vyčnívajícemi zaoblenými plošky, viz Obrázek 3 v levo. Májí tu výhodu, že jsou lehce zkonstruovatelné, ale oproti motoru s vnitřním rotorem mají velkou nevýhodu v odvádění tepla, které produkují cívky statoru. S těmito motory se můžeme nejčastěji setkat v HDD discích nebo ve ventilátorech. Oproti jiným mají také velkou vzduchovou mezeru mezi státorem a prstencem magnetů připevněné na vnitřní straně rotoru. Dosahují tedy vysokých točivých momentů (menší air flux) a nižších ztrát.

Motor s rotorem uvnitř je jeden z nejčastějších, jelikož může dosahovat vysokých výkonů s přijatelným odváděním tepla (nutnost odvodu). Je tvořen státorem na vnější straně se sloupky pro vinutí cívek a vnitřním rotorem, na kterém jsou umístěny magnety obou polarit, viz Obrázek 3 v pravo. Tyto magnety mohou být zapuštěny do rotoru a tím zvetšit jejich plochu (větší rotor) což vede ke zvýšení výkonu motoru a točivého momentu. Existují také varianty s vnořenými magnety ve tvaru obdelníků, které zvetšují vzduchové mezery.

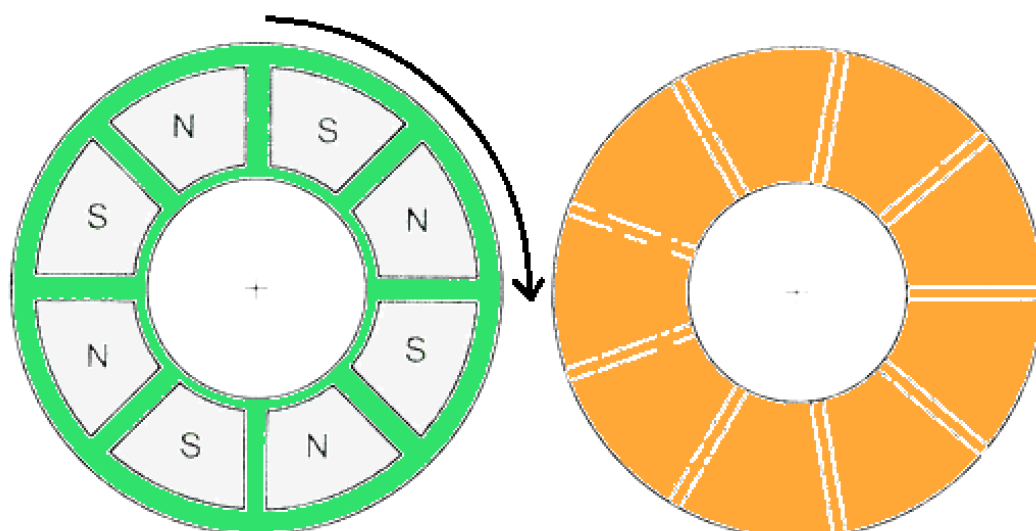
Tyto konstrukce s rotorem uvnitř jsou převážně používány pro vysokorychlostní a vysokovýkonové aplikace (pohony).



Obrázek 3: Rotor na vnější straně vlevo, rotor uvnitř statoru vpravo [2].

Axiální motory mají vzhled plochých disků přimáčknuté na sobě, proto se také někdy označuje jako tzv. „pancake motor“. Rotor je tvořen plochými magnety obou polarit, které vytvářejí axiální magnetický tok reagující s cívkami v radiálních slotech, viz Obrázek 4.

Tyto motory mají velkou výhodu díky jejich mechanické konstrukci, která se dá implementovat přímo do kola vozidla a ušetřit tak spoustu místa pro uložení větší baterie vozu (elektrokolo, elektromobil).



Obrázek 4: Axiální motor: rotor vlevo, stator vpravo [2].

2.1.2. Typy elektromotorů

Hlavní typy motoru dělíme na stejnosměrné a střídavé. Střídavé motory dělíme následně na synchronní a asynchronní, které jsou buzeny pouze střídavým napájením. Stejnosměrné dále dělíme na kartáčové, nebo bezkartáčové a jsou to motory buzené pouze stejnosměrným napájením.

Synchronní motory mají rotaci rotoru synchronizovanou s frekvencí buzení a rychlost zůstává konstantní i při měnícím se zatížení motoru. Tento pohon je tedy ideální pro zařízení, kde vyžadujeme vysoce přesnou polohu motoru, jako jsou například roboti, nebo výrobní linky.

Asynchronní motory využívají elektromagnetickou indukci k přenosu energie do rotoru, který vytváří vůči statoru točivý moment. Je to jeden z nejpoužívanějších motorů v průmyslu, díky své vysoké zatížitelnosti. Pro nižší výkony se používají jednofázové, zatímco třífázové se objevují v průmyslových aplikacích například jako kompresory, čerpadla, nebo pro dopravní systémy.

Kartáčové motory se obvykle používají v aplikacích, kde je důležitým parametrem cena. Jsou totiž levnější a jejich řízení je relativně jednoduché. Existují různé varianty konstrukcí, které využívají buďto permanentní magnety, nebo elektromagnety. Nejčastěji se s těmito motory můžeme setkat v hračkářském průmyslu (RC modely).

Bezkartáčové motory jsou konstrukčně mnohem jednodušší a zmírňují problémy spojené s kartáčovými motory (pravidelná výměna uhlíků). Používají se převážně v aplikacích, kde je vyžadována spolehlivost a robustnost.

2.1.3. Porovnání BLDC s jinými motory

Oproti běžným stejnosměrným kartáčovým motorům mají BLDC motory tyto výhody:

- 1.) Jsou méně údržbové a mají delší životnost.
- 2.) Mají vyšší účinnost a lepší poměr váha/výkon.
- 3.) Dosahují vyšších otáček, mají tichý chod a neprodukují tolik tepla.

Oproti indukčním motorům mají BLDC tyto výhody:

- 1.) Jsou lepší v dynamických vlastnostech a mají lineární momentovou charakteristiku.
- 2.) Mají větší EMI odolnost.
- 3.) Nepotřebují buzení kotvou pro svůj rozjezd.

Jejich hlavní nevýhody oproti všem ostatním jsou:

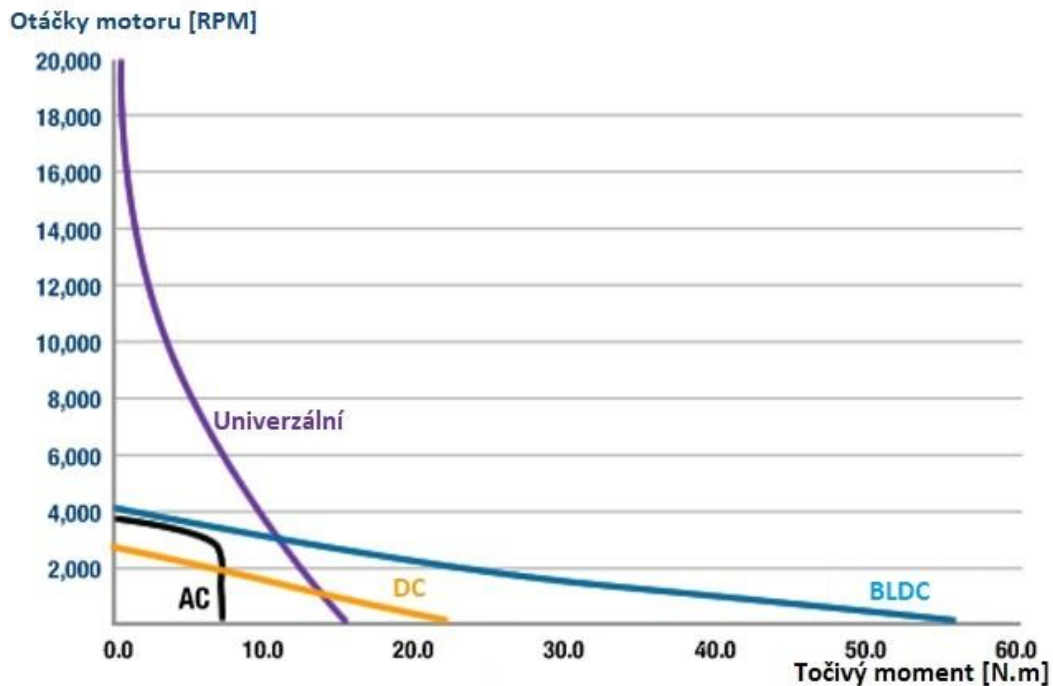
- 1.) Složitost elektronických obvodů pro řízení a regulaci (elektronická komutace).
- 2.) Jsou ekonomicky náročnější.

Budeme-li chtít porovnat motory z hlediska točivých momentů a jejich maximální rychlostí lze se inspirovat grafem na Obrázek 5.

Jak můžeme vidět, BLDC motory mohou oproti všem ostatním dosahovat vyšších točivých momentů. Jak kartáčové, tak i bezkartáčové motory mají lineární průběh točivého momentu. Vyrábí se nejčastěji v napěťových variantách do 48 V.

Univerzální motory dosahují vysokých rychlostí a jsou kombinací obou motorů (AC a DC). Mohou být buzeny jak stejnosměrně, tak i střídavě. Jsou ale nejnáročnější na údržbu, mají horší regulaci otáček a mají větší elektromagnetické rušení (nižší EMI odolnost).

Střídavé (AC) motory drží poměrně konstantní otáčky v rozsahu točivého momentu. Jsou převážně buzené z rozvodné sítě, které jsou na frekvencích 50/60 Hz. To znamená, že na těchto frekvencích dosahují své maximální rychlosti.



Obrázek 5: Porovnání typů motorů [3].

Z hlediska životnosti a účinnosti jsou na tom nejlépe bezkartáčové a indukční motory. Jejich maximální účinnost se pohybuje kolem 80 %. Co se životnosti týče, lze ji snížit špatným buzením, velkou zátěží, nebo provozu ve špatném prostředí (vlhko, teplo). Nejčastěji na motorech odchází ložiska, v kterých je rotor usazen, nebo spálením vinutí na statoru.

2.2. Typy řízení motorů

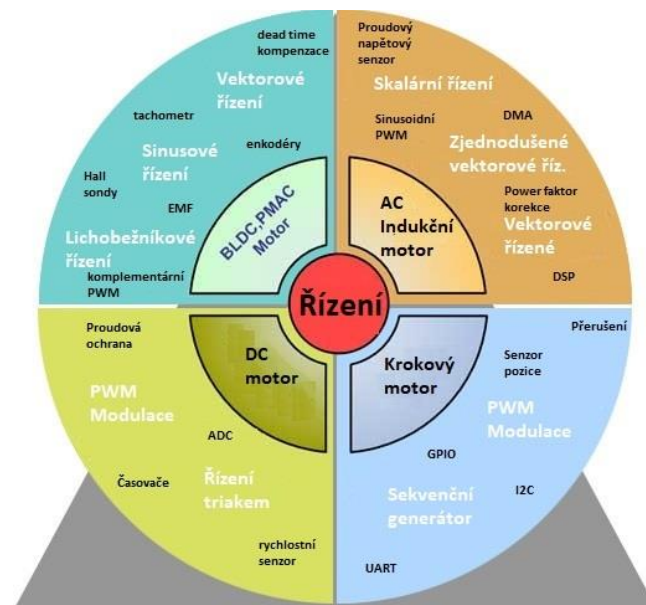
Pro každý motor existuje několik vhodných způsobů řízení, kde každý má své výhody a nějaké nevýhody. BLDC motor může využívat tyto tři typy řízení a regulace:

- 1.) Lichoběžníkové
- 2.) Sinusové
- 3.) Vektorové

BLDC motory pro svůj chod a regulaci vyžadují složitější elektroniku, než je tomu u bezkartáčových motorů, jelikož nemají zabudovaný komutátor.

Algoritmy pro řízení a regulaci motorů lze dělit následujícími třemi způsoby:

- a) Pomocí tvaru budicího signálu (lichoběžník, sinus)
- b) Podle informace o stavu polohy motoru (senzorové, bezsenzorové)
- c) Podle použitého vyhodnocovacího členu (procesor, komparátory)

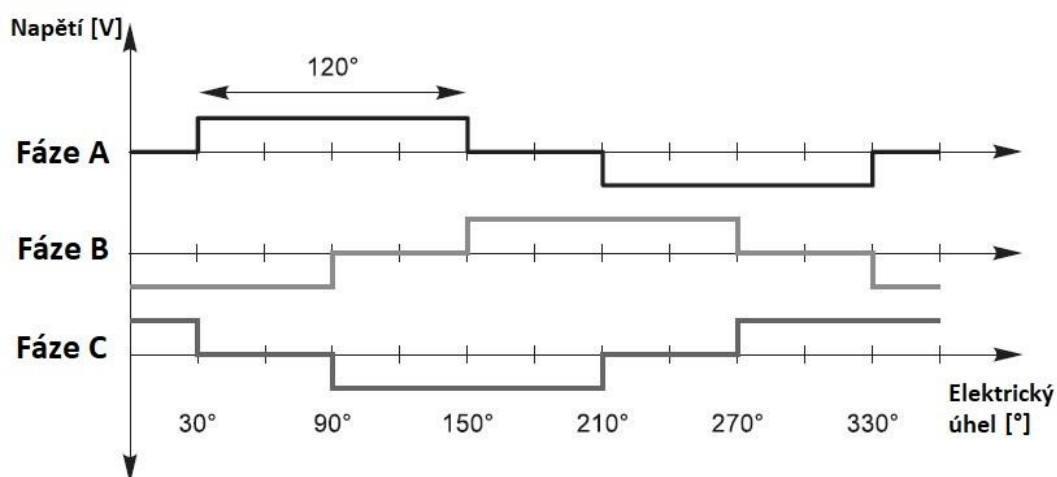


Obrázek 6: Přehled algoritmů pro řízení motorů [4].

Rychlost otáčení BLDC motoru lze řídit za pomoci velikosti přiloženého napětí na svorkách motoru a točivý moment velikostí proudu do cívek statoru, viz sekce 2.1. Nejčastěji se pro toto řízení používá elektronické zapojení zvané střídač, který se skládá z šesti výkonových spínačů, kde každé dva řídí jednu fázi. Rychlost otáčení motoru lze tedy řídit za pomoci střídače, kde měníme dobu sepnutého stavu kombinací dvou spínačů v periodě (střída). Točivý moment v tomhle případě lze pouze změnou velikostí modulační frekvence spínání.

2.2.1. Lichoběžníková PWM

Budicí signál má tvar lichoběžníků, který v závislosti na poloze motoru pouští do daných fází motoru. Proud prochází skrz jeden pár ze tří cívek a třetí je vždy odpojena od zdroje. Jelikož je tento proud v obou těchto fázích stejný a třetí fáze je odpojena, lze elektronicky spínat (komutovat) pouze v šesti spínacích stavech. To dokáže natočit hřídel v každém spínacím kroku pouze o 60°. U více pólových motoru se tato hodnota natočení může snížit díky většímu počtu párů cívek statoru (například motor se 4 póly dokáže otočit hřídel motoru o 30°).



Obrázek 7: Řízení BLDC lichoběžníkovým signálem [5].

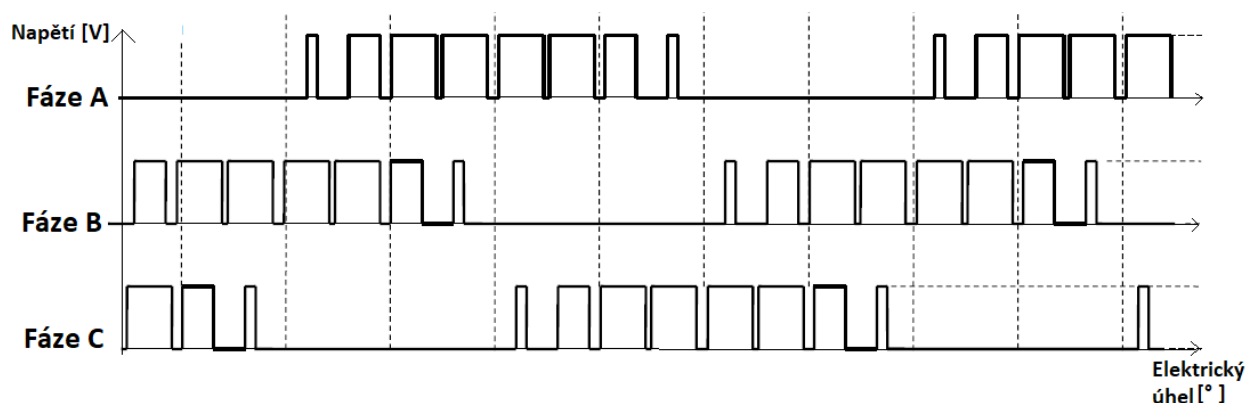
Z těchto šesti možných stavů sepnutí spínačů, například ve střídači, vznikne takzvaná komutační tabulka, viz Tabulka 1. Ta určuje, do jakých dvou cívek se má pouštět proud, aby se rotor motoru natáčel ve správném směru. Prohozením těchto stavů vzestupně se bude motor otáčet obráceně. Tato metoda je jedna z nejpoužívanějších díky své jednoduchosti a hardwarové implementaci.

Tabulka 1: Komutační tabulka [5].

Krok	HAL C	HAL B	HAL A	S1	S3	S5	S2	S4	S6
1	1	0	0	0	PWM	0	0	0	1
2	1	1	0	PWM	0	0	0	0	1
3	0	1	0	PWM	0	0	0	1	0
4	1	0	1	0	PWM	0	1	0	0
5	0	0	1	0	0	PWM	1	0	0
6	0	1	1	0	0	PWM	0	1	1

2.2.2. Sinusová PWM

Sinusová PWM modulace má podobu obdélníkových průběhů se změnou střídy v závislosti na velikosti amplitudy sinusového průběhu v daném okamžiku. Mají tu výhodu, že mají hladší a přesnější natočení rotoru převážně při nízkých otáčkách, kde může docházet k tikům motoru malou schopností natočení elektrického úhlu. Důležitou součástí je přesná poloha o úhlu natočení rotoru. Halové sondy jsou v tomto případě nedostačující a musí se použít rotační enkodéry (například optický). Důležitou součástí je také tabulka hodnot, která obsahuje pro každý úhel délku sepnutí každého spínače. Tyto sinusové průběhy musí také od sebe být posunuty o 120°, aby se neovlivňovali mezi sebou ve fázích. Budicí průběhy lze názorně vidět na Obrázek 8.



Obrázek 8: Řízení BLDC sinusovým signálem [7].

2.2.3. Bezsenzorová metoda řízení

Bezsenzorová metoda je výhodná díky tomu, že nepotřebuje senzory na motoru a vodiče navíc mezi jednotkou a motorem. Funguje na principu detekce průchodu nulou, která spustí komutaci určitých fází motoru. Lze ji realizovat měřením elektromotorického napětí z jedné fáze v momentě, kdy ostatní dvě fáze jsou buzeny, viz Obrázek 9. Řekněme, že fáze A a B jsou buzeny a fáze C je odpojena (žádný proud touto fází neprochází). Platí tedy, že:

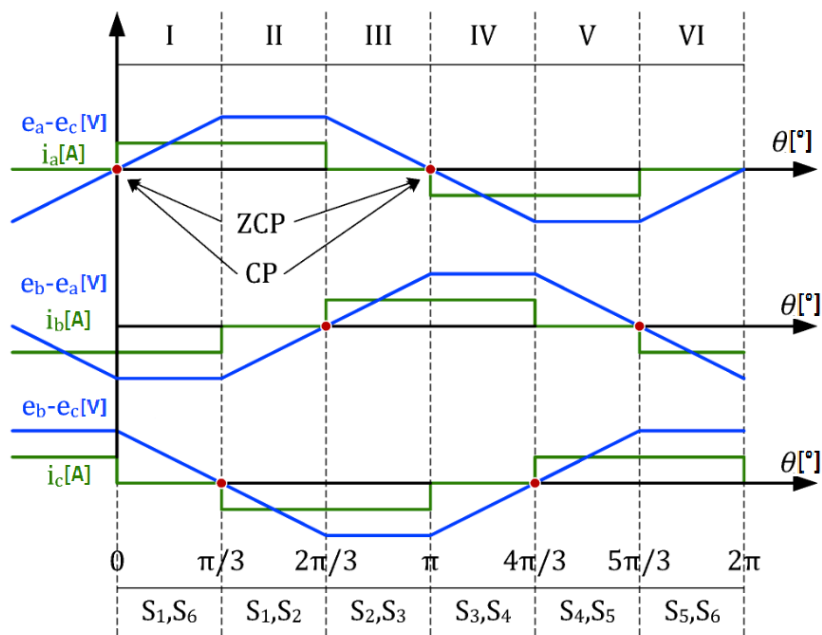
$$\begin{aligned}u_{VA} &= u_{VB} = \pm \frac{1}{2} U_{CC} \\ i_a &= -i_b, i_c = 0 \\ u_{ia} + u_{ib} + u_{ic} &= 0\end{aligned}\tag{2.2.1}$$

Platí-li tyto podmínky, napětí na třetí fázi je rovno:

$$u_{VC} = \frac{3}{2} u_{ic}\tag{2.2.2}$$

Lze tedy předpokládat, že k průchodu nulou dojde pokaždé v momentě, kdy na některé z fází objeví poloviční napětí DC linku (připojený střídač).

Realizace této metody lze několika operačními zesilovači v zapojení komparátorů. Problémy vznikají při pomalých otáčkách, kdy elektromotorické napětí je velmi malé a detekce je velice obtížná, zde musí regulátor řídit matematickým odhadem. Proto tato metoda vyžaduje výkonný signálový procesor.



Obrázek 9: Bezsenzorová metoda řízení [8].

2.2.4. Skalární řízení

Tento způsob řízení vyplývá ze vztahu pro řízení otáček motoru změnou frekvence buzení motoru:

$$n[RPM] = \frac{60 * f}{p} * (1 - s) \quad (2.2.3)$$

kde s je skluz motoru, p počet pólů motoru.

Otáčky jsou v tomto případě přímo úměrné frekvenci. Jde tedy o metodu řízení otáček pomocí změny frekvence. Pokles otáček při větším momentu lze kompenzovat proudovou zpětnou vazbou. S frekvencí se musí také měnit lineárně napětí. Zde vzniká tzv. lineární závislost napětí na frekvenci (U/f křivka).

Tato křivka má v ideálním případě lineární tvar průběhu napětí při rostoucí frekvenci, ale u pohonů s charakteristikou zátěže se můžeme setkat s kvadratickou podobou (ventilátory). Nejčastěji se toto řízení vyskytuje u asynchronních motorů a jde většinou o bezsenzorové řízení. Jedná se tedy o jednoduchý způsob řízení a regulace v otevřené smyčce.

2.2.5. Vektorové řízení

Jde o metodu řízení, kde je odděleno řízení točivého momentu a magnetického toku (vektory jsou na sebe kolmé – neovlivňují se). Používají se tam, kde je nutná vysoká přesnost regulace otáček, regulace momentu, nebo úhlu natočení.

Pro rozběh motoru se zde objevují tzv. rozběhové rampy (frekvence se zvětšuje s časem), které zabraňují nežádoucímu průběhu pod zatížením (výtahy apod.)

Vyskytuje se zde i alternativa v podobě přímého řízení momentu (DTC). Jde o metodu, kdy z naměřených hodnot napětí a proudu, dle matematického modelu motoru, procesor vypočítává požadované hodnoty a ty porovnává se skutečnými. Jejich rozdílem pak najde požadovaný napěťový vektor pro dosažení žádaného toku a momentu.

Tato regulace vyžaduje přesné řízení, regulaci a má výhodu vysoké dynamiky pohonu.

Nedochází zde k přesycení magnetického obvodu, jenž má za následek vyšší účinnost a zmenšení teploty na statoru motoru. Jeho hlavní nevýhodou je nutnost procesoru, jenž se projeví na ceně.

2.3. Typy regulací

Existují pouze dva typy regulačních smyček pro motory. Jednou z nich je tzv. regulace v uzavřené smyčce. Výhodou této regulace je ta, že je motor neustále monitorován a lze detailně reagovat na jakoukoliv změnu v systému. Zde se nejčastěji používají tzv. PID kontrolér. Druhou metodou je regulace v otevřené smyčce. Zde regulátor řídí motor „naslepo“.

2.3.1. Regulace v otevřené smyčce

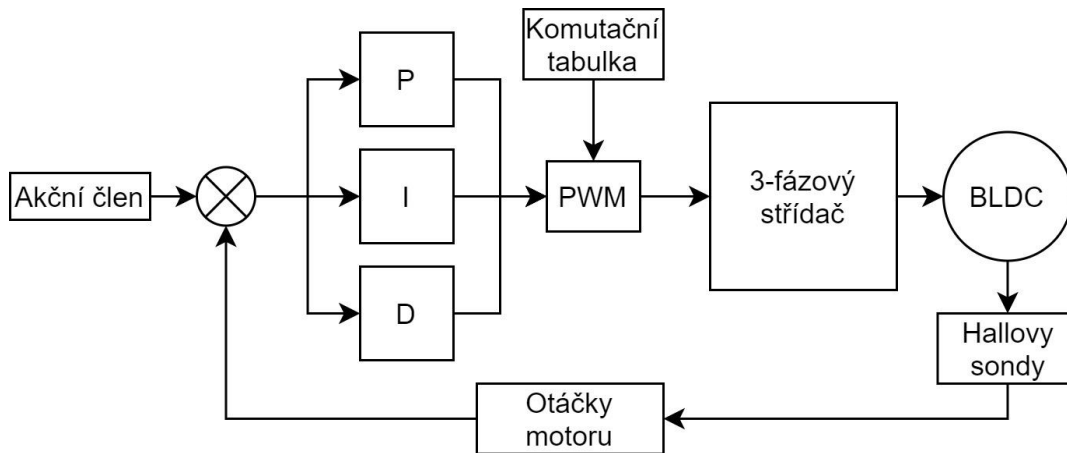
Předpoklad pro realizace této regulace je ten, že musíme znát přesnou velikost zatížení motoru. Systém také vyžaduje přesnou optimalizaci a jedná se o regulaci bez zpětné vazby. Tento systém může být nestabilní, způsobený například zablokováním motoru, kdy může dojít i k poškození výkonových prvků (stává se to ale zřídka). Hlavní výhodou této regulace jsou nízké náklady. Této regulace se využívá hlavně u skalárního řízení motoru, viz sekce 2.2.4.

2.3.2. PID regulace

Umístění tohoto regulátoru je vždy před regulovanou soustavou a kompenzuje chyby způsobené přenosem signálu (napětí a proudu) do motoru. Je tvořen třemi složkami proporcionální, integrační a derivační. Jeho přenos lze pospat rovnicí:

$$u(t) = k_p * e(t) + k_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.2.3)$$

Tyto složky regulátoru se dají realizovat za pomoci obvodů s operačními zesilovači. Proporcionální složka, zde slouží pouze jako zesílení vstupního signálu. Integrovační složka eliminuje chybovost systému. V tomhle případě kompenzuje odchylku skutečných otáček motoru od požadovaného počtu otáček. Derivační složka se používá pouze pro urychlení regulačního děje, ale zavádí zde šum, což může vést k nestabilitě regulační smyčky.



Obrázek 10: PID regulace otáček motoru.

Funkci PID regulátoru u dražších systému nahrazuje mikroprocesor. Této regulace využívá vektorové řízení motoru, viz sekce 2.2.5.

2.4. Typy rekuperací a brždění

Základem pro zabrzdění motoru je odebrat veškerou energii z cívek motoru, která je použita pro jeho rozběh a stále na rotor působí stejnou silou. Maximální hodnota točivého momentu během brždění nemusí být rovna hodnotě momentu jako při jeho rozběhu. Motor sám o sobě brzdí svým vnitřním odporem cívek a setrvačností.

Je-li na DC linku připojen nějaký zdroj s vnitřním odporem, uzavírá se tento obvod skrze ochranné diody tranzistorů ve střídači a odpory těchto zdrojů. Ty tedy brzdí svými vnitřními odpory a produkují teplo (ohřívání baterie, kondenzátoru). Proto je vhodné se této energie zbavit jiným způsobem.

Motor lze brzdit spínáním střídače s opačnou komutací proudů do cívek statoru. Spínáním jednoho tranzistoru ve střídači jsme schopni brzdit úhlovou rychlostí následovně:

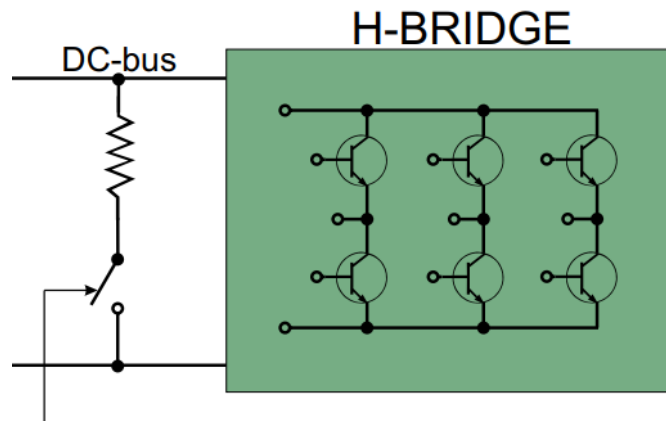
$$\frac{d\omega}{dt} [\text{rad/s}] = -\frac{k_M * D(2 * e_{MOT})}{J(R_{BAT} + 2 * R_{MOT})} \quad (2.3.1)$$

Kde k_M konstanta motoru, D střída spínání, e_{MOT} elektromotorické napětí, J moment setrvačnosti, R_{BAT} vnitřní odpor zdroje, R_{MOT} vnitřní odpor cívky motor.

Touto metodou je ale nutné hlídat teploty na baterii (dochází k opotřebení) a motoru. Toto řeší dynamické brždění nebo rekuperační.

2.4.1. Dynamická

Nevýhodou této metody je, že se užitečná energie spotřebuje tepelnou energií nadále nevyužitou. Nejčastěji se používá tzv. brzdový měnič, který pálí energii v odporu za pomoci spínání tranzistoru v sérii, viz Obrázek 11.



Obrázek 11: Dynamická brzda [9].

Úhlová rychlost brždění je dána podobně jako ve vzorci 2.3.1. Důležitou informací je množství spálené energie, potřebné pro zabrzdění motoru viz vzorec 2.3.2. U motorů se brzdná energie počítá jako rotační energie, která je uložena v motoru vykonávající pohyb.

$$RE[J] = \frac{J * \omega^2}{2} = \frac{\left(\frac{m * r^2}{2}\right) * \left(\frac{n}{60}\right)^2}{2} \quad (2.3.2)$$

kde m je váha kola na hřídeli, r poloměr kola a n otáčivá rychlost kola.

Pro minimální hodnotu brzdícího odporu lze vyjít z Ohmova zákona a maximálního výkonu, který lze v danou chvíli spálit v odporu.

$$R_{MIN}[\Omega] = \frac{U_{DClink}^2}{P_{Rmax}} \quad (2.3.3)$$

Zvětšíme-li velikost odporu, sníží se brzdící energie a zvětší doba, kdy se motor zastaví. Je taky důležité hlídat teplotu na odporu, aby nedošlo k jeho poškození například při častém brždění.

U vyšších výkonů brždění jako je tomu například u trakčních měničů pro pohony tramvají, se používají tzv. brzdové odporníky. Ty jsou tvořeny nejčastěji paralelními kombinacemi velkých výkonných odporů.

2.4.2. Rekuperační

Tato metoda se začala objevovat až někdy na začátku 21. století, kdy se technologie energetických uložišť (lithiové baterie, superkondenzátory) zdokonalila natolik, že se vyplatilo tuto energii zpětně zálohovat.

Nejčastěji tento systém obsahuje energetické uložisko spolu s elektronickým obvodem, který řídí přesun energie z jedné části obvodu do druhé a naopak.

K tomu slouží tzv. obousměrné DC/DC měniče. Tento obvod musí hlídat napětí i proudy na jednotlivých člancích, jelikož mají superkondenzátory malý vnitřní odpor řádově do 1 Ω a může dojít k jejich explozi. Tyto měniče mohou být provozovány ve dvou módech:

- a) Snižovač napětí (BUCK) – spíná horní tranzistor
- b) Zvyšovač napětí (BOOST) – spíná spodní tranzistor

Energie uložená v kondenzátoru se dá spočítat následujícím vzorcem:

$$E_C = \frac{U^2 * C}{2}, \text{ kde } C = \frac{\epsilon * S}{d} \quad (2.3.4)$$

Pro nepřekročení maximálních hodnot napětí dané uložiskem, lze spočítat maximální střídy pro spínání obou tranzistorů:

$$D_{BUCK} = \frac{U_{uložiště}}{U_{DClink}} \quad D_{BOOST} = 1 - \frac{U_{uložiště}}{U_{DClink}} \quad (2.3.5)$$

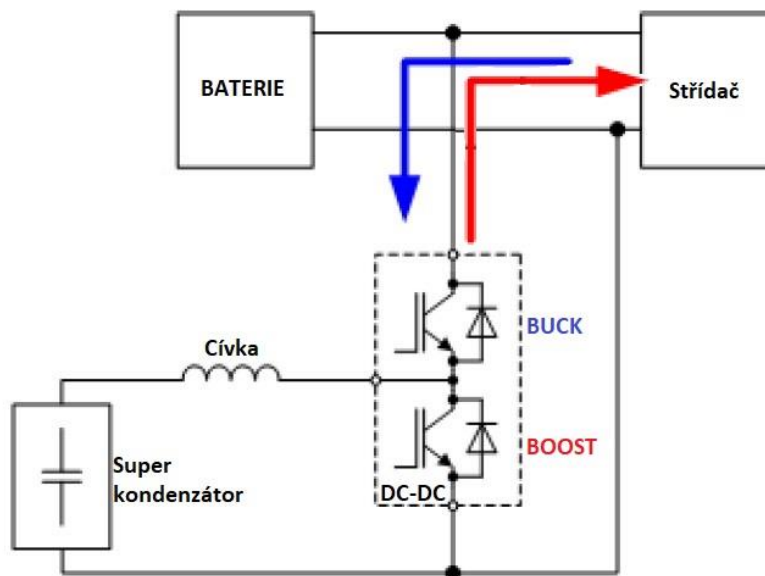
Chceme-li zjistit minimální spínací frekvence, je nutno znát velikost indukčnosti cívky, která vyhlazuje průběh napětí z měniče při snižovacím módu. Cívka se totiž uplatňuje pouze v tomto módu. Známe-li spínací frekvenci, lze hodnotu cívky pro hladký průběh na výstupu určit z následující rovnice:

$$L_{MAX} = \frac{U_{DClink} * D(1 - D)}{\Delta I_L * f_{PWM}} \quad (2.3.6)$$

Superkondenzátory mají tu výhodu, že na úkor své ceny dokážou pojmout velké množství energie a jsou schopny okamžitě dodat vysoké výkony (proudy) nazpět. Také se nepřehřívají díky svému malému vnitřnímu odporu. Musíme si dát ale pozor při různých sériově-paralelních kombinacích, kdy dochází ke špatné bilanci ukládání energie (různá napětí), kde může dojít k poškození určitých článků a oprava je v těchto případech náročná.

Jako rekuperační uložisko můžou sloužit například baterie, kondenzátory nebo superkondenzátory. Existují také mechanické uložisko energie v podobě speciálních setrvačnicků.

Zapojení takového DC/DC měniče je názorně ukázáno na Obrázek 12. Zde můžeme vidět snižovací mód, kde dochází k ukládání energie (modře) a zvyšovací mód, který dodává obnovitelnou energii do uložení (červeně).



Obrázek 12: Oboustranný DC/DC měnič [10].

2.4.3. Kombinované

Obě metody (dynamická, rekuperační) se různě kombinují v různých systémech, kde každá má své výhody. Třeba vezmeme-li příklad, kdy superkondenzátory budou plně nabitě a nelze energii kde ukládat, spálí se přebytek v teplo a naopak. Technologie uložení se neustále zdokonalují a začínají se implementovat do veškerých nových pohonných systémů (zvětšují totiž účinnost). Tyto systémy jsou ale dražší a u většiny novodobých zakázek jsou tyto kombinace nepoužity kvůli hlavnímu požadavku na nízkou cenu.

2.5. Výkonové spínací prvky

Motory pro svůj chod vyžadují řízení směru proudu (komutaci) a správný výběr řídicího prvku může hrát v některých systémech klíčovou roli. Nejčastěji je požadováno, aby měl prvek co nejmenší statické ztráty, dynamické ztráty a malý vnitřní odpor při sepnutí (produkce tepla).

Tam kde jsou vyžadovány vysoké výkony, hraje také klíčovou roli spínací frekvence, která ovlivňuje velikosti a hmotnosti indukčních prvků (transformátory, tlumivky). Například u trakce (tramvaje, vlaky) se nejčastěji používají IGBT tranzistory, kvůli možnému vysokému proudovému zatížení (nevýhoda velkých transformátorů a tlumivek).

2.5.1. MOSFET

Tyto prvky ve výkonové sféře nahradili bipolární tranzistory, které vyžadovali neustálý proud tekoucí do báze tranzistoru pro jejich otevření (závislost na proudovém činiteli β). Bipolární tranzistory mají také nevýhodu v pomalých vypínacích charakteristikách a negativním teplotním koeficientu (s rostoucí teplotou klesá jejich vnitřní odpor).

MOSFET tranzistory jsou přesným opakem, mají kladný teplotní koeficient, takže se nemusíme bát proudového zničení, které je samo o sobě omezeno maximálním saturačním proudem tranzistoru. Ten lze snímat jako úbytek napětí budičem a chránit tak tranzistor před nebezpečnými vyššími proudy tekoucí do zátěže.

Jsou to tzv. napětově řízené prvky, které vynikají převážně svou rychlostí spínání a malými spínacími ztrátami. Jejich odpory při sepnutí se pohybují řádově do jednotky ohmů a jde o kombinaci vodiče, izolace a polovodičů.

2.5.2. IGBT

Tento prvek je kombinací předchozích dvou výkonových prvků, bipolárního tranzistoru a MOSFET tranzistoru. Má spínací a vodivostní charakteristiky jako bipolární tranzistor, ale je řízen napětím jako MOSFET. Proto je tento prvek znám svým vysokým výkonem a jednoduchým řízením. Hlavní nevýhodou tohoto prvku je dlouhý průběh vypínání (vyšší spínací ztráty). Dalo by se říci, že tyto prvky nahradily vysoko proudové tyristory.

U obou prvků jak už MOSFET, tak u IGBT se neustále zdokonalují výrobní procesy a vznikají nové technologie. Jedna z těchto technologií je tzv. oblast WideBandGap, kde dochází za použití kombinací jiných materiálů při výrobě (SiC, GaN) k zlepšení určitých vlastností (vodivost, spínání).

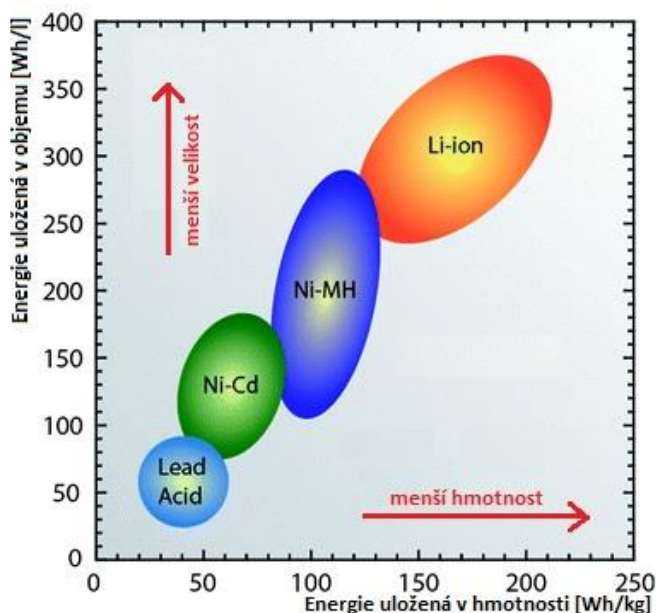
Tabulka 2: Porovnání IGBT a MOSFET tranzistorů [10].

	Spínací frekvence	Průrazné napětí	Výkony	Odpor při sepnutí
MOSFET (Si)	100 kHz ~ 0,5 MHz	> 1000 V	1 W~10 kW	~ 100 mΩ
IGBT(Si)	1 kHz~30kHz	> 250 V	1 kW~1 MW	~ 100 mΩ
SiC	500 Hz~0,8 MHz	> 1200 V	3 kW~10 MW	~ 1 mΩ
GaN	20 kHz~8 MHz	> 600 V	1 W~25 kW	~ 10 mΩ

2.6. Zdroje energie pro pohonné systémy

Každý pohonný systém pro svou funkci vyžaduje zdroj energie. V dnešní době se můžeme nejčastěji setkat s akumulátorovými olovenými bateriemi, jenž má každý automobil. Větší systémy jako jsou tramvaje a vlaky vyžadují neustálý přísun vysoké energie, proto se využívají tzv. sběrače, které přesunují energii z drátů nad vozidlem, nebo v kolejkách, přímo do trakčního měniče pro pohon.

Za posledních několik desetiletí se vývoj soustředil převážně na lithiové baterie, které se začínají používat v dnešních elektromobilech, nebo elektrokoloběžkách. Tyto zdroje se ale neustále musejí dobíjet a jejich životnost je přibližně kolem 2000 cyklů (nabíjení/vybíjení). Lithiové baterie jsou dobré převážně díky tomu, že oproti ostatním typům baterií jsou lehké a lze do nich uložit velké množství energie, viz porovnání typu baterií na Obrázek 13. Dalším aspektem je jejich rychlá doba nabíjení a nízká údržba.



Obrázek 13: Porovnání různých typů baterií [11].

I přes všechny výhody lithiových baterií, je jejich největší nedostatek, že při větším seskupení článků vyžadují ochrannou jednotku zvanou BMS. Baterie jsou totiž složeny ze sériovo paralelních kombinací stejných článků a musí se energie ukládat do všech stejně. Tyto jednotky kontrolují veškerá napětí na každém z nich a hlídají navíc jejich teplotu. U větších baterií například u trolejbusů, jsou tyto jednotky vybaveny i komunikačním rozhraním (CAN).

Dojezd například takové elektrokoloběžky, je tedy dán účinností jednotky a velikostí kapacity připojené baterie v závislosti na terénu jízdy.

2.6.1. Parametry baterií

Nejdůležitějším parametrem baterie je její kapacita. Ta nám určuje, jaký výkon je schopná baterie dodávat do zátěže po určitou dobu. Proto se označuje jednotkou ampérhodina (A. h.). Velikost kapacity baterie určuje, kolik je schopna v sobě uložit energii náboje:

$$Q = I * t = C * U \quad (2.5.1)$$

Sériovou kombinací článků baterie, lze dosáhnout většího napětí s maximálním proudovým zatížením nejslabšího článku. Kdežto u paralelní kombinace se sčítá proudová zatížitelnost všech článků, ale maximální velikost napětí je rovna napětí jednoho článku. V obou případech však platí, že články musí být co nejvíce shodné parametry, obzvláště při větších počtech. Různé sériovo paralelní kombinace jsou často označovány jako XSXP, kde X značí počet článků v dané kombinaci.

Dalším důležitým parametrem je také vnitřní odpor baterie. Ten lze změřit za pomoci úbytku napětí na externím odporu připojený k baterii jako zátěž.

$$R_i = \frac{U_0 - U_z}{I} \quad (2.5.2)$$

kde I je měřený proud ampérmetrem, U_0 napětí baterie bez zátěže a U_z napětí na odporu. Ideální je, aby tento zdroj měl co nejmenší vnitřní odpor a zvládl tak vyšší zátěž (tvrdý zdroj).

Všechny lithiové články jsou převážně označovány pod jejich reálnými rozměry. Nejpoužívanější články mají označení 18650 (18x65x50mm). Jejich maximální pracovní napětí je okolo 2,7 V. Můžeme se také setkat s bateriemi v podobě mincí.

2.6.2. Nabíjení baterie

Baterii nejčastěji škodí vlivy jako jsou vlhko, nadměrné teplo anebo špatný návrh BMS. Záleží také na správném průběhu nabíjení baterie. Pro zvýšení životnosti baterie, je lepší nabíjet s menšími proudy delší dobu než vysokými proudy v krátkém čase. Je také doporučeno neustále držet baterii v nabitém stavu mezi 30 až 80 % své kapacity.

Většina typických nabíjecích obvodů je konstruována tak, aby při startu nabíjení byl proud do baterie konstantní, spolu s rostoucím napětím. Při určité úrovni napětí (~80 % kapacity) se začne proud exponenciálně zmenšovat, aby nedošlo k ohřívání baterie. Tento typ nabíjení je znám jako CC/CV.

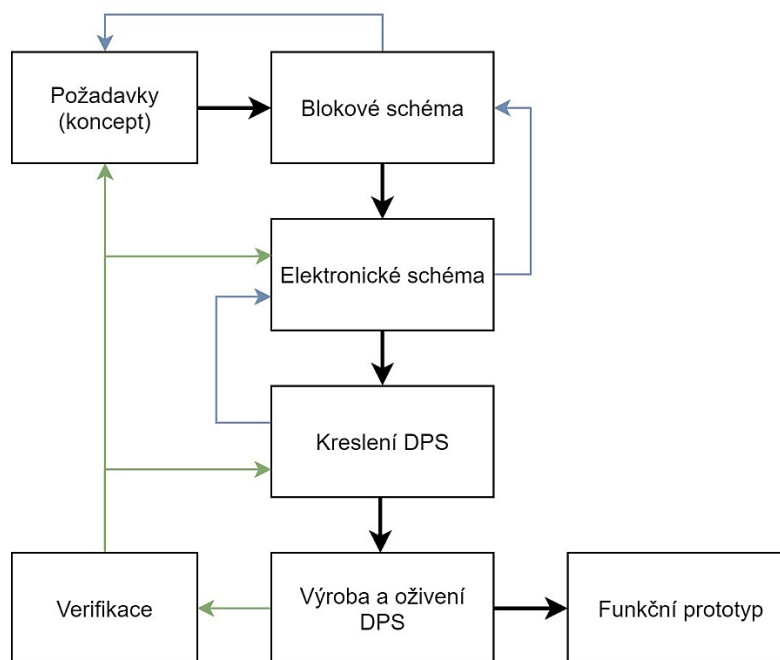
3. Návrh jednotky

Při návrhu jednotky jsou převážně použita již existující, funkční, poupravená zapojení z různých odborných časopisů a knih o teoriích obvodů. Jak program, tak i hardware byl navržen v různých softwarech, přístupné pro studenty. Zhotovení a oživení bylo provedeno v domácí dílně a otestováno v laboratoři. Při návrhu jednotky jsem se zaměřoval na nízkou cenu, nízké spínací ztráty a vysokou účinnost.

3.1. Postup při návrhu jednotky

Detailní postup při návrhu této jednotky je vidět na Obrázek 14. Ideální postup při návrhu této jednotky bez komplikací znázorňuje tučné černé propojení mezi bloky. V reálném světě ale tomu tak není, jelikož se u vytváření nového zařízení mnohokrát vracíme o určité kroky zpět.

Návrh jakéhokoliv zařízení začíná pokaždé konceptem a definováním požadavků na rozhraní mezi jednotkou a příslušenstvím, které chceme obsloužit. Většina konceptů je dána detailním znázorněním za pomoci blokového schématu, viz Příloha F.



Obrázek 14: Design flow návrhu jednotky.

Dalším krokem je z blokového schématu vytvářet postupně části elektronického schématu, kde přitom tyto obvody musíme simulovat, nebo testovat na nepájivém poli. V tomhle případě také hraje velkou roli správný výběr součástek a počítání teplotních ztrát.

Po zhotovení první verze elektronického schématu následuje kreslení layoutu PCB. Zde se rozhoduje o tom kolika vrstvý spoj zvolit. Vícevrstvé spoje se převážně používají ve vysokonapěťových, nebo u více pinových součástek, kde je zapotřebí bezpečně oddálit cesty spojů od sebe. V tomhle případě jsem zvolil klasickou dvouvrstvou variantu (nízká cena). Je také důležité si dát pozor na rozmístění součástek generující nadměrné teplo. Dalším aspektem je správné umístění rozlité mědi, kterou se většinou rozlévá zem kvůli EMC komptabilitě a lepšímu odvodu tepla.

Po zhotovení layoutu DPS následuje poslání do výroby a postupné oživování částí jednotky. Oživování u této jednotky probíhá od napájecí části, přes procesorovou a nakonec výkonovou část. Postupným oživováním jsou zjištěny různé drobné chyby (nastavení velikosti odporů, chybějící spoje apod.), které jsou zpětně opravené a zavedené zpět do schémat.

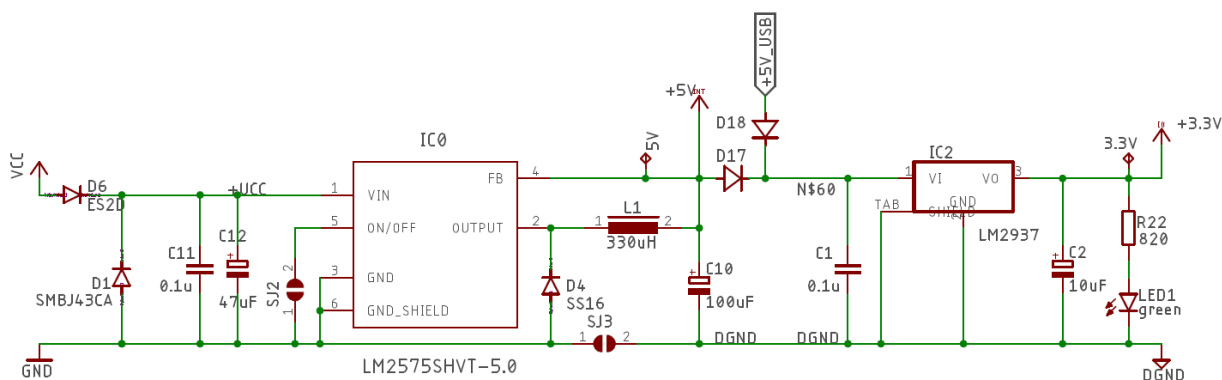
Celý postup je ukončen tehdy, až jsou všechny vstupní definované požadavky splněny.

3.2. Hardware

Simulace obvodů jsou prováděná v programu LTSpice a následně otestována na nepáživém poli. Elektronické schéma a deska DPS je nadále navržena v programu Eagle od firmy Autodesk a zhotovena, viz Příloha A. Ta byla nadále osazena a oživena. Po oživení bylo provedeno ještě dodatečné ladění určitých obvodů a následovně byly otestovány elektrické parametry.

3.2.1. Napájení

Tato část je tvořena snižujícím DC/DC měničem a lineárním regulátorem, viz Obrázek 15: Napájecí část jednotky.. Obě se starají o napájení procesorové části a příslušných periférií jako jsou: displej, akcelerometr, Hallové sondy a Bluetooth modul. Před lineárním regulátorem je navíc přivedeno napětí 5 V z externího zdroje (USB) pro funkčnost slabo proudové částí včetně procesoru pro programování a ladění, bez připojené baterie v silové části.



Obrázek 15: Napájecí část jednotky.

Energetickou bilancí byl určen typ čipu měniče a jeho obvodové přizpůsobení.

Tabulka 3: Energetická bilance napájení.

Hallový sondy	Procesor	Akcelerometr	Bluetooth modul	Displej (ILI9341)	USB	Převodník	Celkem
30 mA	160 mA	4 mA	40 mA	80 mA	500 mA	22 mA	836 mA

Měnič se skládá z čipu LM2575, který na svém výstupu dává stabilních 5 V s maximálním proudovým omezením 1 A, takže pokryje maximální spotřebu. Jeho součástí je také cívka 330 μ H a vyhlazovací kondenzátor 330 μ F. Rychlost spínače měniče je pevně dána čipem na 52 kHz s účinností 77 %.

Vstupní rozsah napájení je u základní verze dán 40 V, ale zde je lepší použít HVT verzi s rozsahem až 60 V, jelikož je většina BLDC motorů konstruována až do 48 V. Pro omezení napěťových špiček je na vstupu umístěn transil (D1) a pro proudovou ochranu polovodičová dioda (D6).

Pro zabránění buzení měniče a cívky při externím napájení 5 V slouží schottkyho diody s nízkým úbytkem napětí D17, D18.

Lineární regulátor snižuje logickou úroveň z 5 V na 3,3 V, kterou potřebuje procesor a akcelerometr. Správnou funkci napájení (měnič, LRO) indikuje zelená LED1 dioda. Z 5 V části jsou převážně napájeny pouze Hallové sondy. Pro testování funkčnosti napájení jsou na desce také umístěny testovací piny (3.3V,5V,12V).

3.2.2. Procesorová část

Pro řízení motoru a komunikaci s řídicí jednotkou je vybrán procesor od firmy STMicroelectronics, který obsahuje všechny potřebné vstupně výstupní obvody pro obsluhu všech periférií.

Procesor má za úkol hlídat pomocí ADC převodníku veškerá napětí v silovém obvodu a podle toho řídit spínání výkonových prvků jak pro řízení, tak i předbíjení kondenzátoru na mezipotenciálu DC linku.

Jeho z dalších důležitých procesů v reálném čase je číst hodnoty z halových sond a napěťově řízených potenciometrů pro rozjezd a brzdění. Součástí je také předpřipravená komunikace pro modul Bluetooth a vyvedená SPI komunikace pro dotykový displej na konektor.

Procesor je napájen z lineárního regulátoru (3,3 V) na pinech 12, 19, 32, 48, 64, u kterých jsou umístěny 100 μ F filtrační kondenzátory, viz sekce 3.2.1.

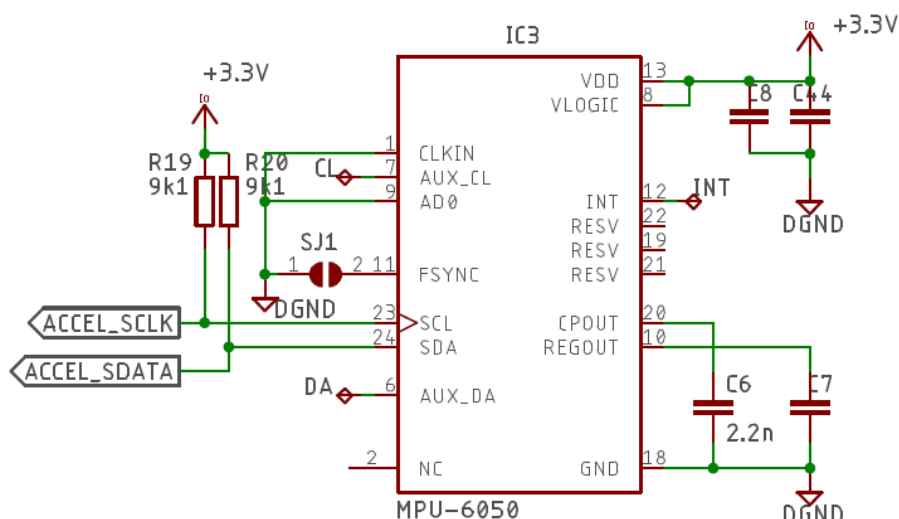
K procesoru jsou připojena dva tlačítka, jedno pro reset a druhé pro skok do zaváděcího módu procesoru. Reset tlačítko je v režimu pull-up a je možné ho použít kdykoliv, kdežto u tlačítka pro zavádění lze přejít do režimu jen za pomoci držení procesoru pod resetem pomocí tlačítka, viz Tabulka 4.

Tabulka 4: Režimy procesoru.

Režim	„Logická 0“ (0 V)	„Logická 1“ (3,3 V)“
BOOT	program	zavaděč
RESET	reset	program

K procesoru jsou spolu s filtračními kondenzátory připojeny dva externí oscilátory, jeden pro reálný čas a druhý pro pomocné funkce jako je například komunikace USB. Reálný čas má navíc pro udržení své hodnoty externí zdroj v podobě mincové baterie přivedený na pin č. 1.

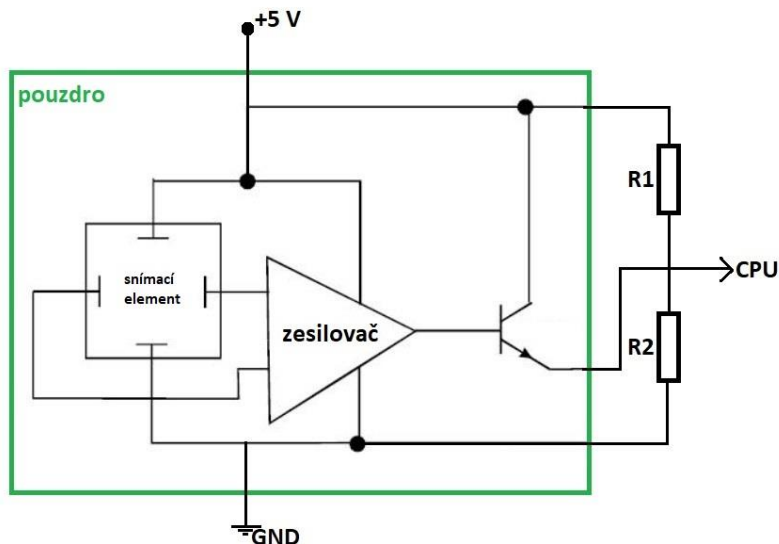
Akcelerometr je napojen pomocí sběrnice I2C, která má na hodinovém a datovém signálu pull-up rezistor. Jedná se o typ MPU 6050, který je jeden z nejpoužívanějších čipů na trhu. Čip má navíc vyvedeny dva signály AUX_CL a UAX_DA (I2C sběrnice) pro externí připojení externích senzorů. Je zde také vyveden pin FSYNC sloužící jako externí synchronizace, zde tato funkce nevyužita (spojeno pájecí ploškou SJ1 s GND), viz Obrázek 16: Zapojení akcelerometru..



Obrázek 16: Zapojení akcelerometru.

Pro ladění a nahrávání programu CPU jsou vyvedeny dva signály SWDIO a SWCLK na piny konektoru X9, viz Příloha B. Pro chybný zavaděč procesoru, nebo poruchu zaváděcího programu CPU je připraveno rozhraní převodníku typu FT230XS (UART-USB). Komunikaci lze kontrolovat dvěma indikačními LED diodami (TX a RX).

Hallovy sondy, které jsou umístěny u hřídele BLDC motoru jsou napojeny do konektoru X3 (viz Příloha B) a jejich výstup je nutno převést na logickou úroveň procesoru 3,3 V (5 V napájení). CPU má rozlišovací schopnost logické jedničky od 1,8 V, proto je za každým výstupem ze sond napěťový dělič, který snižuje toto napětí na rozsah od 1,8 V do 3,3 V. Funkční zapojení je znázorněno na Obrázek 17: Obvod Hallovy sondy. Hodnoty odporů jsou pevně zvoleny na $R1=10\text{ k}\Omega$ a $R2=18\text{ k}\Omega$ (naměřeno 3,21 V na vstupu do CPU).



Obrázek 17: Obvod Hallovy sondy.

3.2.3. Výkonová část

Hlavní část tvoří zapojení osmi tranzistorů přilnuté na pasivní chladič, kde šest z nich tvoří střídač a zbylé dva DC/DC měnič pro rekuperaci do superkondenzátoru. Spolu se vstupní částí tvoří silové schéma, kde protékají velké proudy, viz Obrázek 18: Výkonová část zapojení..

Střídač je tvořen šesti NMOS tranzistory, které jsou spínané optočleny tvořící budicí část. Pro otevření spodních tranzistorů Q2, Q4 a Q6 jsou řídicí hradla buzena 12 V. U horních tranzistorů Q1, Q3 a Q5 je nutnost bootstrap obvodu (dioda a kondenzátor), jelikož není source tranzistoru umístěn na zemi a nelze tak vytvořit větší napětí na řídicím hradle pro jeho otevření.

Kondenzátor lze nabít pouze sepnutím jednoho ze spodních tranzistorů. Ten poté zvětšuje napětí na řídicí svorce o napětí, na které je nabitý (vybíjí se). V tomhle zapojení je vždy sepnut jeden ze spodních tranzistorů v kombinaci s horním, proto jsou kondenzátory pod neustálým nabitím.

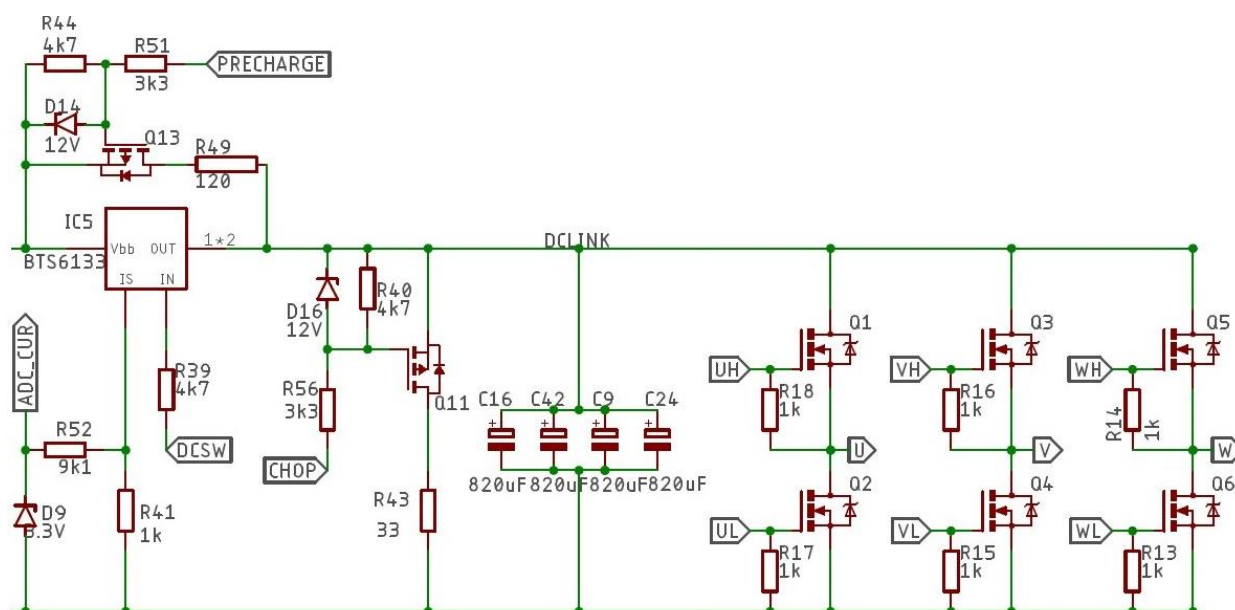
Na vstupní části se nachází výkonový spínač řady BTS spolu s předbíjecím obvodem. Tento obvod tvoří PMOS tranzistor v sérii s předbíjecím odporem, kde jeho source je připojen přes odpor na řídicí hradlo tranzistoru a po připojení baterie se tak jeví jako zavřený. Jeho otevření je docíleno připojením dalšího odporu, tvořící napěťový dělič, který je stahován do nuly a vytváří tak na řídicí svorce nižší napětí než na source (omezeno Zenerovou diodou, maximálně tedy o 12 V).

Pro nejrychlejší čas předbíjení je možné vybrat odpor R49 o velikosti daného maximálním proudem předbíjecího tranzistoru Q13 (1,25 A) a velikostí napětí baterie:

$$R_{MIN} = U_{BAT} * I_{TR} = 30 * 1,25 = 37,5 \Omega \quad (3.2.1)$$

Je potřeba si dát ale pozor na dimenzi tepelného výkonu odporu, který je při této konfiguraci a hodnotě odporu 58,59 W!

Za vstupním spínačem se nachází čtyři filtrační kondenzátory a brzdový blok, tvořený stejným zapojením jako předbíjecí obvod, akorát s rozdílem jiné hodnoty odporu pro brzdění. Tento blok tvoří dynamickou brzdu a velikost odporu se musí nastavit v závislosti na konfiguraci vozidla (váha, max. tepelný výkon odporníku).



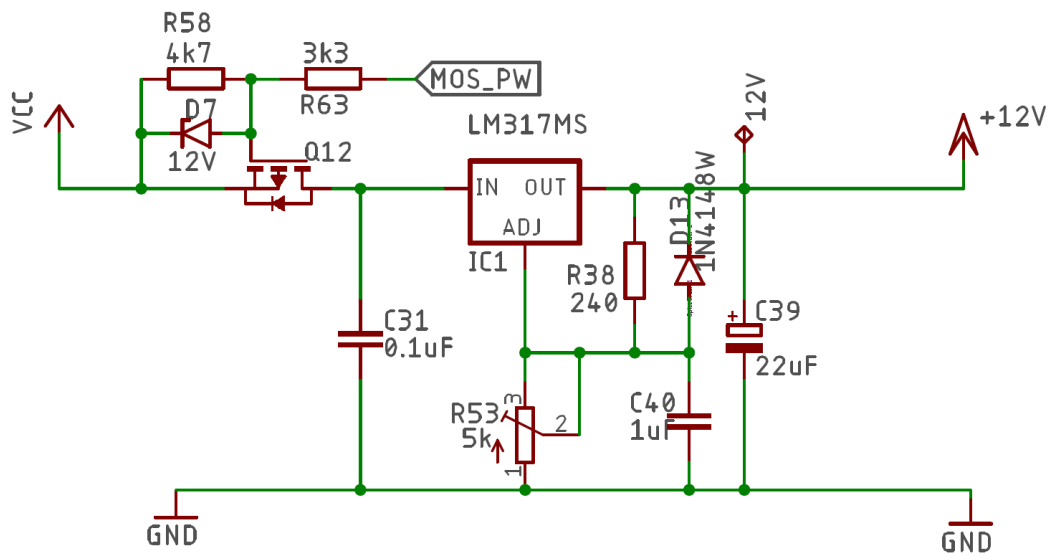
Obrázek 18: Výkonová část zapojení.

Proud do zátěže je snímán jako úbytek napětí na odporu R41, ke kterému je paralelně připojena ochranná Zenerova dioda 3,3 V a do série odpor R52 pro omezení proudu vstupujícího do pinu CPU.

3.2.4. Budiče MOSFET

Napájení budičů je řešeno za pomoci lineárního stabilizátoru LM317 s nastavitelným výstupním napětím pomocí trimru R53. Napájení stabilizátoru je řešeno přes vstupní spínač PMOS. Je zde z toho důvodu, že při rekuperaci a odpojené baterii by docházelo skrze tenhle čip, bootstrap obvody a ochranné diody tranzistorů k odebrání energie do superkondenzátoru (uzavřený obvod). Proto se při rekuperaci tento čip musí odpojit.

Tranzistory mají dané výrobcem maximální napájení 20 V. Hodnota trimru je nastavena tak aby budičí napětí bylo přesných 12 V. U vozidel se moc trimry nepoužívají kvůli otřesům, kde může dojít k rozladění, proto by bylo možná vhodnější je nahradit pevným rezistorem 1,24 k Ω .

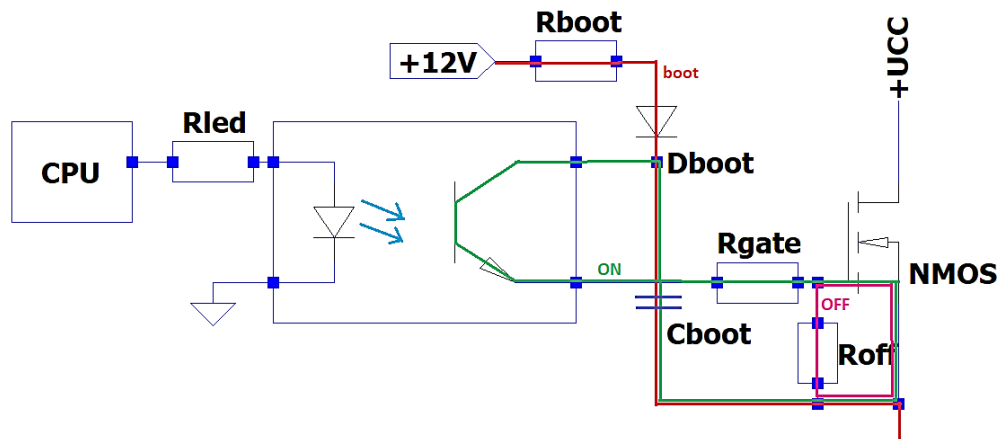


Obrázek 19: Zapojení napájení budičů MOSFET.

Místo klasických drahých budičů je zvolena strategie řízení tranzistorů za pomoci optočlenů. Jedná se o rychlý typ optočlenu s tranzistorem na výstupu. Každý optočlen řídí příslušný tranzistor v zapojení a jeho vstup je řízen z pinu procesoru. Jediným rozdílem každého optočlenu je ten, že je potřeba některé řídicí hradla tranzistorů stahovat do nuly, anebo připínat na ně 12 V.

Pokaždé však platí podmínka pro otevření tranzistoru ta, aby napětí na řídicím hradle tranzistoru bylo větší než na source pinu. Horní tranzistory jsou navíc řízeny optočleny s připnutými bootstrap obvody (nutnost pro otevření tranzistorů).

Zapojení optočlenu s bootstrap obvodem je znázorněn na Obrázek 20. Červená křivka znázorňuje nabíjení kondenzátorů, zelená otevření a růžová zavření.



Obrázek 20: Zapojení optočlenu s bootstrap obvodem.

Pro toto zapojení byly zvoleny hodnoty pro předbíjecí část odporu 100 Ω a kondenzátor o velikosti 1 μF . Pro bootstrap kondenzátor vždy platí, že jeho velikost by měla být minimálně 10 krát větší, než velikost kondenzátoru řídicího hradla pro otevření tranzistoru ($\sim 4\text{nF}$). Pro ochranu a omezení hradlového proudu je před tranzistor vložen odpor o velikosti 10 Ω .

Výpočty ztrát na tranzistorech:

STATICKÉ:

$$P_{SH} = I_{OUT}^2 * R_{dSON} * \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \quad (3.2.2)$$

$$P_{SL} = I_{OUT}^2 * R_{dSON} * \left(1 - \frac{U_{OUT}}{U_{IN}}\right) \quad (3.2.3)$$

DYNAMICKÉ:

$$P_{SW} = \frac{1}{2} * U_{IN} * I_{OUT} * (T_{RISE} + T_{FFALL}) * f_{SW} \quad (3.2.4)$$

Známe-li maximální výstupní proud do motoru (12,5 A), odpor při sepnutí tranzistoru (14 m Ω) a vstupní/výstupní napětí (24 V/27 V), vyjdou $P_{SH}=1,94\text{ W}$ a $P_{SL}=0,243\text{ W}$.

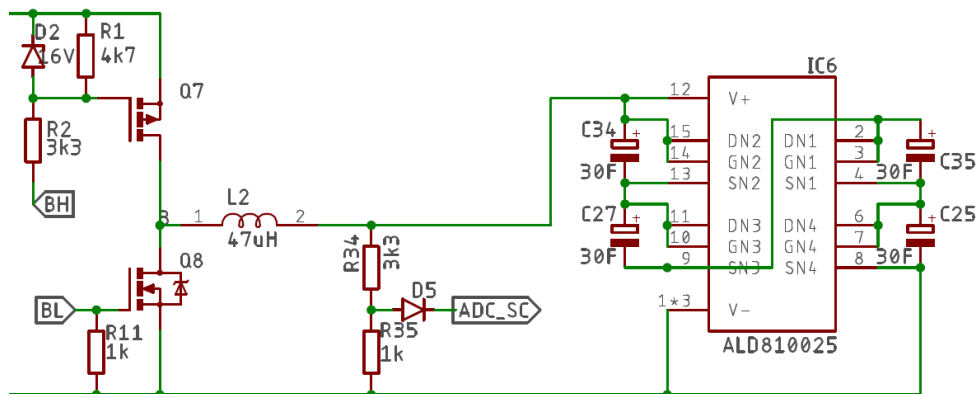
Rychlost náběžné hrany je dána rychlostí reakcí optočlenu a doby nabití hradlové kapacity. Tato hodnota se pohybuje teoreticky u hodnoty 3 μs . Naopak doba sestupné hrany je dána hlavně vypínacím odporem R_{OFF} , která je kolem 10 μs . Zde je problém v tom, že tranzistor má velké ztráty díky tomu, že je bohužel krátkou dobu v lineárním režimu. Po dosazení do rovnice vyjdou spínací ztráty $P_{SW} = 11,8\text{ W}$.

Bude-li motor zatížen na maximum, můžou ztráty dojít až k hodnotám:

$$P_{TOT} = P_{SH} + P_{SL} + P_{SW} = 1,94 + 0,243 + 11,8 \doteq 14\text{ W} \quad (3.2.5)$$

3.2.5.Rekuperace

Rekuperaci tvoří obousměrný DC/DC měnič s dvěma tranzistory (Q7, Q8) a cívkou L2 spolu s rekuperačním uložištěm (4x superkondenzátor v sérii), který je připojen paralelně k DC linku. Horní tranzistor je typu PMOS a je spínán stažením řídicího hradla do nuly přes odporový dělič R1 a R2. Pro snížení napětí spíná horní tranzistor Q7 a pro zvýšení spodní tranzistor Q8. Superkondenzátory jsou zapojeny do série, které tvoří zdroj o napětí 10 V s kapacitou 7,5 F.



Obrázek 21: Zapojení rekuperace.

Pro tento DC/DC měnič je potřeba provést některé výpočty, které zajistí správnou funkčnost a životnost elektronických prvků. Prvním krokem je kalkulace maximální střidy, jelikož víme, že maximální výstupní nesmí být větší než 10 V a vstupní napětí je kolem 24 V \pm 10 % (27,5 V) a s přibližnou účinností 90 %.

$$D = \frac{U_{OUT}}{U_{IN} * n} = \frac{10}{27,5 * 0,9} = 0,4 \quad (3.2.6)$$

Frekvenci lze spočítat, zvolíme-li velikost cívky, která má v SMD verzi velikost indukce 47 μ H a její maximální saturační proud je 8,6 A. Ten vyhovuje i pro superkondenzátory (max. 10A).

$$f_s = \frac{(U_{IN} - U_{OUT}) * D}{\Delta I_L * L} = \frac{(27,5 - 10) * 0,4}{(0,4 * 8,6) * 47 * 10^{-6}} = 43,29 \text{ kHz} \quad (3.2.7)$$

Nevýhodou použití více superkondenzátorů do série je ta, že každý má lehce odlišné parametry a může dojít k rozdílným napětím na každém z nich (destrukce/opotřebení). Proto je použit čip řady ALD s polem MOSFET, který na každém kondenzátoru vytvoří přesně 2,5 V (maximální pracovní napětí kondenzátoru dané výrobcem je 2,7 V). Místo těchto axiálních kondenzátorů je také možné připojit externě superkondenzátory o větší kapacitě na jejich napájecí plošky na desce.

3.3. Software

Při návrhu softwaru je použito programu CubeMX od firmy STM, který umožňuje jednotlivé nastavení jednotlivých pinů na procesoru, viz Příloha D. Aby mohl procesor obsloužit veškeré periférie, je důležité optimalizovat všechny časovače, komunikaci a vnitřní obvody tak, aby nedošlo k zamrznutí procesoru v jedné z nekonečných smyček.

Důležitou součástí je také čtení všech hodnot napětí a proudů na jednotce, aby nedošlo k poškození výkonových prvků. O to se stará zabudovaný aproximační převodník ADC s maximálním rozlišením 12 bitů. Před vstupem do ADC převodníku je nutnost měřená napětí převést na nižší hodnoty, jelikož ADC převádí analogový signál v rozsahu 0 až 3,3 V. Proto je před vstupem do každého pinu ADC zařazen napěťový dělič, který snižuje napětí v poměru dvou rezistorů. Pro ošetření vyššího napětí je možno ke spodnímu odporu dát paralelně Zenerovou diodu 3,3 V, ale z důvodu zkreslení napětí nebyly použity. Pro motory s napětím 36 V a 48 V je nutno tyto poměry děličů změnit, jelikož jsou dimenzovány na 24 V motory (poměr DC linku 9:1, SCAP 5:1).

3.3.1. Stavový diagram systému

Jednotka se spouští v okamžiku připojení externího zdroje na napájecí svorky X1. Jako první v řadě se dostane napájení až k procesoru, který začne načítat svůj program z FLASH paměti. Zabudovaná elektronika je ochráněna v tomto případě pomocí hardwaru (odpojené napájení budičů MOSFET)

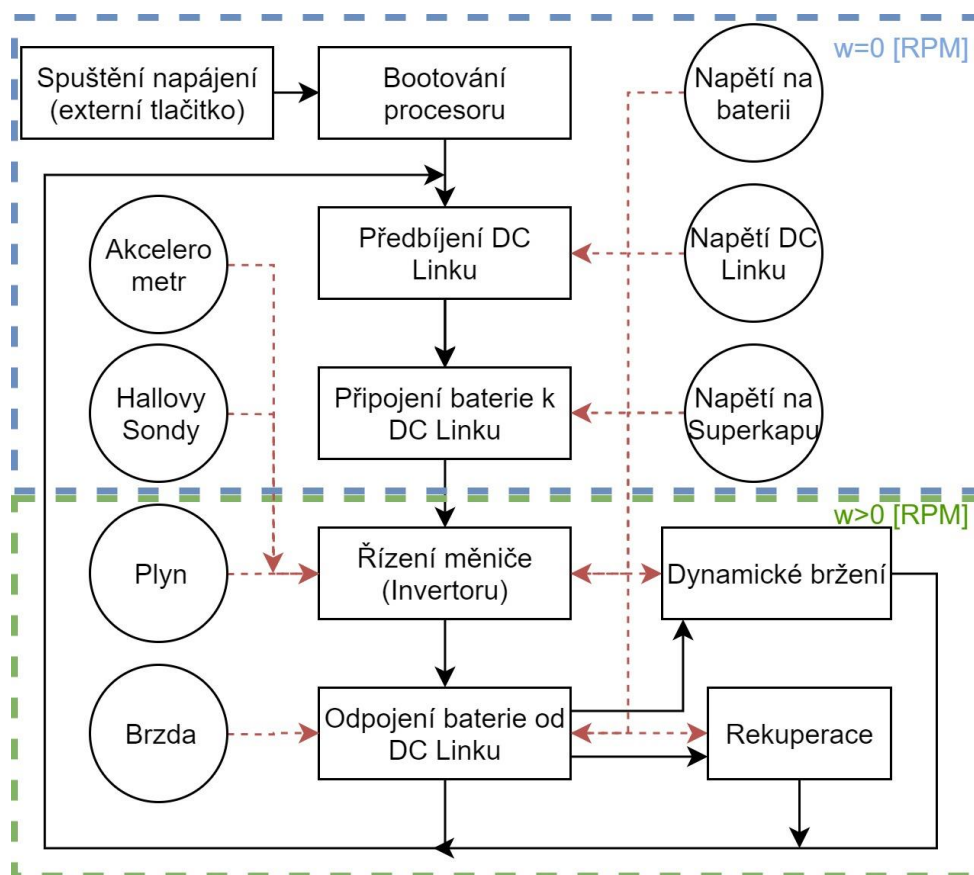
Po naběhnutí programu procesor okamžitě začne převádět informační hodnoty na ADC převodníku: Hallovy sondy (stav motoru), napětí na baterii (stav baterie), napětí na DC Linku a napětí na superkondenzátoru.

Ještě před každým rozjezdem se spouští automatické předbíjení kondenzátorů na DC linku na napětí baterie. Současně se spouští napájení budičů.

Po předbití kondenzátorů (podmínka) se baterie připojí natvrdo na DC link. Doposud byl motor v klidu. Předbíjení se může částečně zúčastnit i energie ze superkondenzátorů.

Jeli vše v pořádku a procesor nevyhodnotí žádnou chybu (Hallovy sondy, napětí v obvodech) začne se pomocí plynu (potenciometru) roztáčet motor do určité rychlosti. Do toho experimentálně zasahuje akcelerometr, který díky informaci o úhlu stoupání dokáže zvětšit výkon do motoru a udržet tak počet otáček. Při jízdě z kopce je navíc možno ukládat energii pro pozdější využití.

Samovolné brždění motoru je docíleno odpojením baterie od DC linku (odpor DC link kondenzátoru), kterému dopomáhá dynamická i rekuperační brzda (potenciometr brzdy). Jeli motor pod otáčkami (například z kopce, při vysoké rychlosti) je nutné přebytečnou energii buďto zužítkovat (rekuperace) nebo spálit v odporu v podobě tepla (dynamická brzda).



Obrázek 22: Stavový diagram systému.

Celý algoritmus je uzavřen v nekonečné smyčce rozjezd, brzda, dokud se napájení jednotky neodpojí. Toho je docíleno za pomoci externího vypínače, který slouží i jako spouštěcí rozhraní.

3.3.2. Nastavení periferií

Interní sběrnice procesoru běží na interním oscilátoru o frekvenci 16 MHz a k procesoru jsou připojeny dva externí. Jeden sloužící jako hodinový zdroj signálu o frekvenci 32,768 kHz a druhý o frekvenci 8 MHz potřebný ke komunikaci USB, nebo k zrychlení procesoru (nevyužito).

Rychlost jednoho taktu procesoru je vypočtena následovně:

$$t_{CPU} = \left(\frac{1}{16 * 10^6} \right) = 62,5 \text{ ns} \quad (3.3.1)$$

Každý časovač řídí jednu z výkonových částí na jednotce, nebo obsluhuje určitou periférii. Nastavení časovačů mají jiné frekvence a jiné střídy.

Tabulka 5: Přehled časovačů v procesoru a jejich využití.

Časovač 1	Časovač 2	Časovač 3	Časovač 4	Časovač 9	Časovač 5,10,11
3 - fázový střídač	Dynamická brzda	DC/DC pro Superkondenzátor.	Jas displeje	Čtení Hallových sond	Nevyužito

Nastavení pro časovač 1 je dáno následujícími HW požadavky:

Doba sepnutí tranzistoru $T_{ON}=3,2 \mu\text{s}$, doba vypnutí tranzistoru $T_{OFF}=20 \mu\text{s}$.

Pro spínání PWM regulace střídače byla zvolena experimentálně frekvence na trojnásobek rychlosti čtení Hallových sond kvůli spínacím ztrátám (dlouhá doba vypínání tranzistorů).

$$f = \frac{f_{SYSCLK}}{(PSC + 1) * (ARR + 1)} \quad (3.3.2)$$

Po dosažení: $4200 = \frac{16 * 10^6}{(PSC + 1) * (100 + 1)} \Rightarrow PSC = 36$ (při $ARR = 100$)

Střída časovače 1 mění svoji hodnotu ARR v závislosti na údaje z ADC (plyn) od 0 do 100 % a mění tím tak pouze úroveň napětí, která mění otáčky motoru.

Časovač 2 má zvolenou frekvenci na pevných 100 Hz ($PSC=1600$, $ARR=100$). To znamená, že doba jednoho sepnutí je 10 ms. Tento časovač je aktivní pouze v případě je-li dynamická brzda zapotřebí. Jeho střída je závislá na hodnotě z ADC (brzda).

U časovače 3 je minimální frekvence omezena DC/DC měničem, kde je filtrační cívka o velikosti 47 μH a musíme dodržet zvlněný proud (40 %), který se prosazuje zejména při snižovacím módu měniče. Dle výpočtů z rovnice 3.1.7 je frekvence zvolena na 40 kHz ($PSC=4$, $ARR=100$).

Střída je závislá na napětí na DC linku dle následujícího vzorce:

$$D_{BUCK} = \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \frac{U_{SC}(\text{max. } 10V)}{U_{DC}} \Rightarrow \frac{10}{U_{IN}} \quad (3.3.3)$$

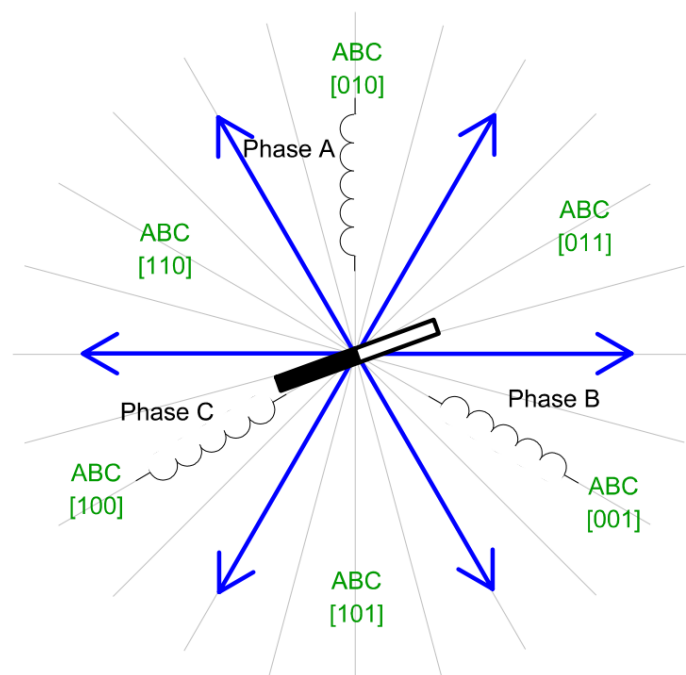
Zde si musíme dát ale pozor na hodnotě z ADC pro brždění a vybitém superkondenzátoru, jelikož by při maximální střídě motor brzdil na 100 % (vybitý kondenzátor se jeví jako nulový odpor). Proto musí být střída v závislosti na těchto údajích vždy nižší.

Časovač 4 mění pouze střídou jas displeje, takže není zapotřebí vysokých frekvencí, proto je zvolená pevně na 100 Hz (PSC=1600, ARR=100). Velikost střídy se nastaví pomocí hodnot na displeji pomocí dotykové plochy displeje.

Časovač 9 má za úkol při každém přetečení vyslat signál, který spustí kontrolu stavů Hallových sondy v hlavním programu. K definování frekvence je zapotřebí znát, jak rychle se může motor otáčet, abychom určili maximální čas, kdy Hallové sondy změní svůj stav, viz vzorec 3.2.4. Zvolený BLDC motor se dokáže otáčet bez zatížení s maximální rychlostí 3600 otáček za minutu. V každé své otáčce změní svůj stav 24krát (3 fáze, 8 pólů).

$$t_{HALL} = \frac{1}{f} = \frac{1}{\left(\frac{3600}{60}\right) * p * NF} = 0,7 \text{ ms } (f = 1440 \text{ Hz}). \quad (3.3.4)$$

Frekvence 1440 Hz je tedy maximální frekvence změn. Jedna komutační tabulka obsahuje 6 stavů pro tři halové sondy, to znamená, že za jedno otočení se vystřídá 4krát stav každé z Halových sond. Pro frekvenci 1440 Hz odpovídají hodnoty registrů PSC=112 a ARR=100.



Obrázek 23: Změna stavů Hallových sond [9].

ADC převodník má za úkol hlídat informace jak interní (napětí, proudy) tak i externí signály pro plyn a brzdu. Tato periférie běží kontinuálně již od startu procesoru.

Citlivost ADC převodníku při daném rozlišení 10bitů je:

$$\frac{U_{ADC}}{2^{10}} = \frac{3.3}{1024} = 3,22 \text{ mV} \quad (3.3.5)$$

Doba jednoho převodu je-li frekvence ADC převodníku pevně zvolena na 2 MHz (PSC=8):

$$t_{S\&H} = \frac{1}{\left(\frac{f_{CLK}}{PSC_{ADC}}\right)} * (Sample + Hold) \quad (3.3.6)$$

Po dosazení: $(1.25 * 10^{-7}) * (10 + 480) = 0,245 \text{ ms}$

Veškerá komunikace s procesorem je za pomoci sběrnic SPI, I2C nebo UART. Některé z těchto komunikací jsou nevyužity, jelikož jsou jejich piny použity na jinou funkci. Kromě těchto komunikací je hardwarově předpřipraveno i rozhraní USB a slot pro Bluetooth modul HC-06.

Tabulka 6: Komunikace procesoru.

I2C1	SPI1	SPI3	UART2	UART6	Serial wire	USB
Akcelerometr	Displej	Dotyková plocha	UART-USB rozhraní	Bluetooth modul HC-06	Ladění	Zařízení

Sběrnice od akcelerometru (I2C) běží na frekvenci 100 kHz. Z akcelerometru jsou brány údaje o zrychlení a polohy v tříosém rozložení (x, y, z). U akcelerometru můžeme nastavit jeho citlivost (2G až 16G), zdroj signálu (interní 8 MHz, externí), filtr dolní propusti (5 Hz až 256 GHz) a maximální rozsah měření.

Citlivost byla zvolena na 8 GHz, zdroj signálu na interních 8 MHz, dolní propust na frekvenci 188 GHz a rozsah měření na 500.

Výrobce displeje uvádí doporučenou frekvenci hodinového signálu na 6,35 MHz. Proto je zvolena frekvence na 4 MHz (PSC=4), dotyková plocha 250 kHz (PSC=64).

Rozhraní UART-USB běží na přenosové rychlosti zvolené pevně na 115200 Mbaud. Pro budoucí verzi jednotky je uvažováno o odstranění této komunikace a nahrazení jinou částí.

3.3.3. Program

Jeho základem je řízení dle stavového diagramu systému. První úkol algoritmu je inicializovat všechny periférie, spustit příslušné komunikace a spustit převod ADC převodníku. Po převodu všech napětí je spuštěno předbíjení. Je-li nějaká energie v superkondenzátoru (>4 V) spínáním tranzistoru Q8 zvedáme napětí na DC linku. Není-li tato energie k dispozici, spustí se klasické předbíjení z baterie spínačem Q13.

Po vyrovnání napětí na DC linku a baterii se tranzistory Q13, Q8 zavřou (zastaví předbíjení) a pomocí výkonového spínače IC5 připojí baterie na DC linku, viz Příloha E.

V tomto stavu jednotka setrvává, dokud nepřijde řídicí signál pro plyn nebo brzdu. Pro točení motoru jsou pevně dány následující podmínky spínačů:

$$\begin{aligned} Q1 &= \bar{A} \text{ AND } B & Q2 &= A \text{ AND } \bar{B} & Q3 &= \bar{B} \text{ AND } C \\ Q4 &= B \text{ AND } \bar{C} & Q5 &= A \text{ AND } \bar{C} & Q6 &= \bar{A} \text{ AND } C \end{aligned} \quad (3.3.7)$$

Tyto podmínky vycházejí po zjednodušení logických funkcí pomocí Karnaughovy mapy z komutační Tabulka 1: Komutační tabulka [5]., kde A, B, C jsou Hallovy sondy. Nutností je také ošetření nechtěných stavů například při poruše sondy nebo jejím odpojení (plovoucí pin).

$$X = A \text{ AND } B \text{ AND } C \quad X = \bar{A} \text{ AND } \bar{B} \text{ AND } \bar{C} \quad (3.3.8)$$

Rychlost motoru je dána střídou časovače č. 1, do kterého je nahrávána hodnota z ADC převodníku (plyn) od 5 do 90 % (změna napětí na motoru).

Chceme-li brzdit, odpoj se baterie pomocí vstupního výkonového spínače a začne se převádět energie z DC Linku do superkondenzátoru za pomoci spínání tranzistoru Q7. Jeli energie superkondenzátoru plná (10 V), začne se přebytečná energie pálit v odporníku (spínání tranzistoru Q11). Po zabrzdění je proces opakován od spouštění předbíjení DC linku.

Po celou dobu napájení jednotky je požadavek, aby DC link udržoval napětí pro případný rozjezd motoru, nepřichází-li žádný signál pro plyn ani brzdu.

Akcelerometr hraje roli pouze v případě při jiném úhlu natočení desky jednotky, kdy zvyšuje lehce modulační frekvenci a tím dodává větší proud do motoru. Motor má tedy dostatek energie pro rozjezd i do kopce. Jeli úhel menší než pod svou svislou osu (jízda z kopce) dělá přesný opak a zmenšuje modulační frekvenci. Zde se snaží částečně ukládat energii spínáním tranzistoru Q7 i při jízdě do superkondenzátorů.

4. Měření vlastností systému

Pro testování byl použit motor s následujícími parametry:

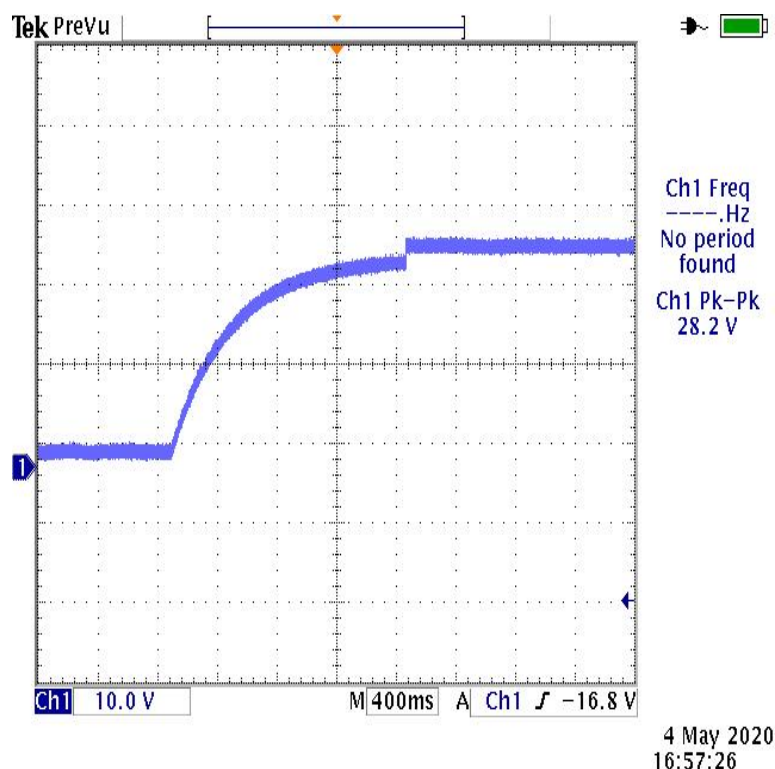
Tabulka 7: Parametry použitého BLDC motoru.

Napětí	Počet pólů	Točivý moment	Maximální proud	Rychlost otáčení	Indukčnost cívky 1 fáze	Odpor cívky 1 fáze
24 V	8	0,955	16 A	3600 RPM	370 μ H	0,3 Ω

Měření probíhalo se zapojenou baterii do konektoru X7 (26,8 V), která slouží jako hlavní zdroj jednotky.

4.1. Průběh předbíjení

V tomhle měření je ověřen průběh předbíjecí části, zdali nedochází k nedostatečnému času pro předbití hlavního filtračního kondenzátoru na DC linku. Testování proběhlo za pomoci připojeného osciloskopu na hlavní DC link po restartu procesoru.



Obrázek 24: Průběh předbíjení DC linku.

Na desce DPS je osazen předbíjecí odpor 120 Ω . Z grafu je patrné, že doba pro nabití na hodnotu baterie je 4 dílky, kde každý má 400 ms. To znamená, že celková doba je 1,6 s. Tuto dobu lze zkrátit snížením předbíjecího odporu, musíme si ale dát pozor na maximální

proud předbíjecím tranzistorem (1,25 A) a také na maximální tepelný výkon odporu.

Graf má exponenciální průběh, jak je očekáváno. Kondenzátor by měl být plně nabit v době pětinasobku časové konstanty tau.

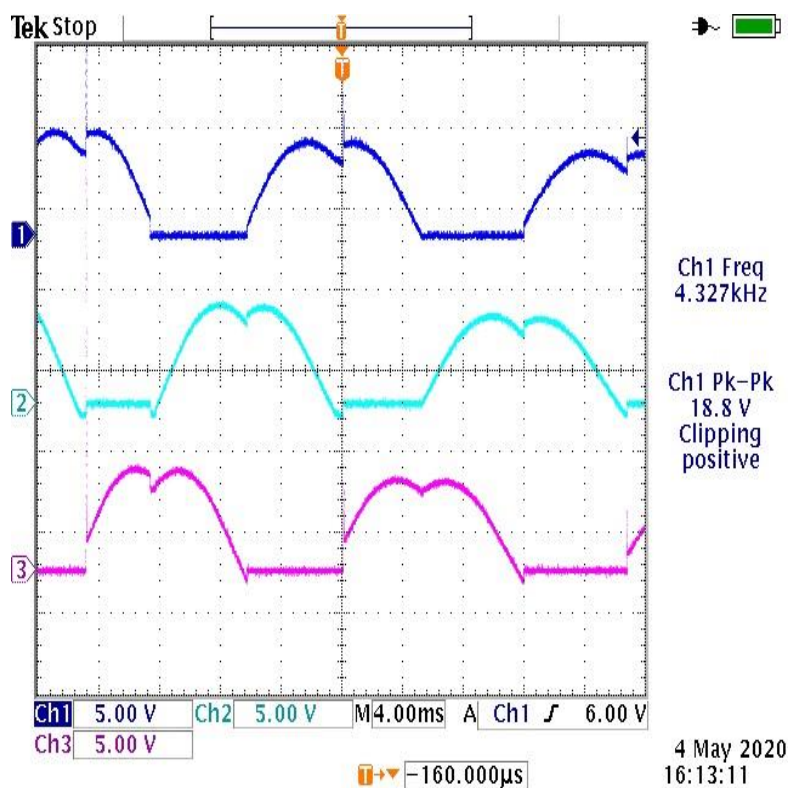
$$t_{CHARGE} = 5 * (R * C) = 5 * (120 * 3,28 * 10^{-3}) = 1,96 s \quad (4.1.1)$$

Z výsledku lze vydedukovat, že chybí ještě 0,36 s pro úplné dobití kondenzátoru, proto lze ve vrchní části průběhu vidět menší skok. Tuto chybu lze vyřešit podmínkou delšího předbíjení v programu jednotky.

Zde je na úvahu myšlenka o zmenšení tohoto odporu a vybrání tranzistoru s možným větším proudem z důvodu rychlejšího předbití a tím i rychlejší reakce přechodu brzda-plyn.

4.2. Charakteristiky motoru

Nejvíce informací lze zjistit přímo ze svorek jednotky na jednotlivých fázích motoru. BLDC motor by měl mít charakter sinusových křivek od sebe posunutých o 120 ° jak je tomu na Obrázek 27: BEMF z BLDC motoru.. Měření je prováděno osciloskopem Tektronix spolu s připojeným motorem k řídicí jednotce. Z naměřených hodnot je patrné, že se motor snaží této podoby držet, ale při saturaci cívek dojde k mírnému poklesu napětí, způsobené komutací, pomalým vypínáním tranzistorů a následným ovlivnění jinou fází.



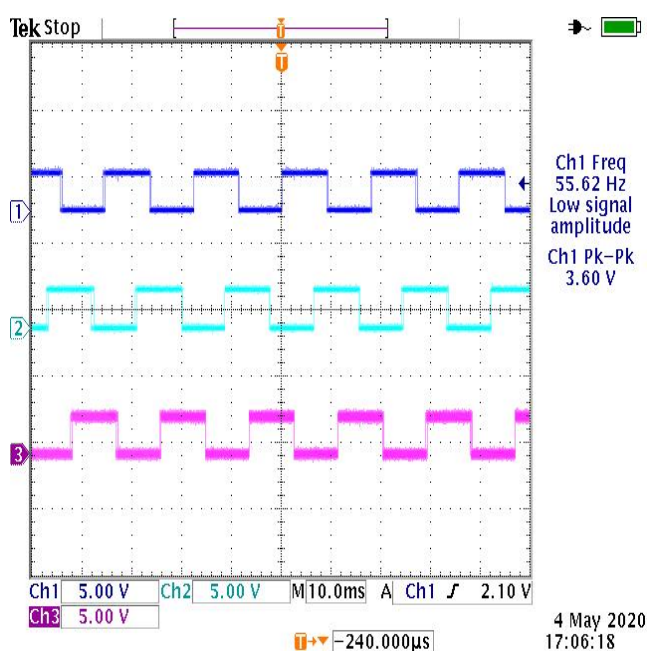
Obrázek 25: Průběh napětí na svorkách BLDC motoru.

Tady se začíná projevovat nevýhoda řízení tranzistorů optočleny, kde se jejich pomalý náběh a vypnutí ovlivňuje vzájemně ve fázích. Nejlepším vylepšením v tomhle případě by bylo nahradit optočleny budičem MOSFET tranzistorů, ale za to na úkor ceny. Jejich nahrazením by také byla možnost dosažení vyšší modulační pulzně šířkové frekvence (hladší průběh napětí na motoru), která je v tomhle případě omezena pomalým vypínáním přes 1 k Ω rezistor. Výhodou budičů je také zabudovaná saturační ochrana a injekční pumpa pro rychlejší dodání energie do řídicího hradla pro otevření tranzistoru.

Modulační frekvence spínání střídače z CPU (Obrázek 25) odpovídá naprogramovaným hodnotám v programu a splňuje tedy daná očekávání.

Pro hladší průběh napětí se u dražších systému v některých případech nachází za výstupem z každé fáze střídače sinusové filtry (LC). V tomle případě, ale nejsou nutné jelikož je motor navržen tak, aby se vypořádal i s obdelníkovými pulzy. Nevýhody obdelníkového buzení se projevuje převážně při nízkých otáčkách cukáním rotoru.

Průběh Hallových sond můžeme vidět na obrázku č. 14. Při roztáčení rotoru lze vidět, že v závislosti na úhlu natočení rotoru motoru, posílají Hallové sondy logické signály vzájemně posunuté od sebe o 120°. Zde tedy naplňují sondy svou funkci a správně indikují stav motoru. Při jejich výpadku (odpojení sondy) se motor netočí a je tedy jejich funkčnost plně ověřena.



Obrázek 26: Průběh Hallových sond.

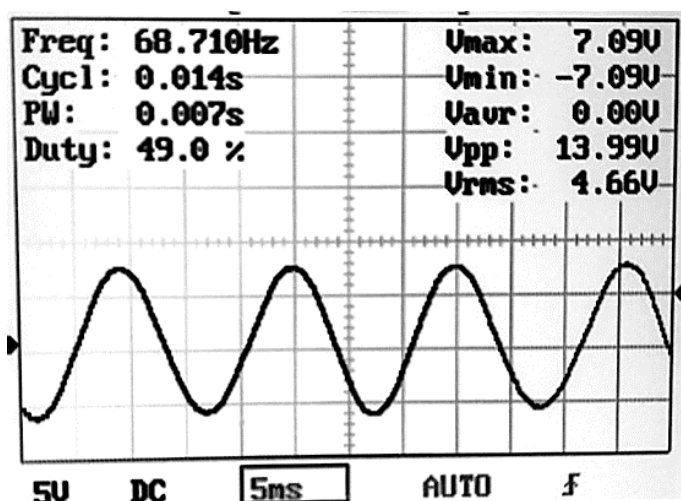
4.3. Rekuperace

Nejprve je nutné zjistit, jaké zpětné elektromotorické napětí dává vybraný motor. Toho lze dosáhnout točením hřídele externím motorem, viz Obrázek 27. Budeme-li toto napětí znát, připojíme motor na jednotku a spustíme rekuperaci bržděním (potenciometrem brždění).

Pro ověření funkčnosti spínání rekuperace byl připojen ruční osciloskop DSO150 na řídicí hradlo tranzistoru Q7. Jeho střída by se měla měnit v závislosti na napětí na DC linku při odpojené baterii. Zde byla ověřena střída pouze do napětí, které je omezeno rychlostí externího motoru úspěšně.

Pro zpětné dodání energie ze superkondenzátorů do DC linku, byl zjištěn identický průběh předbití jako na Obrázek 24, ale s nižším předbíjecím časem (lze nastavit střídou).

Po připojení paralelní kombinace superkondenzátor/ baterie při rozjezdu motoru, bylo zjištěno z odběru proudu z baterie za pomoci ADC převodníku, že odebíraný proud se zmenšil přibližně o 80 % na určitou dobu až do vybití superkondenzátoru.



Obrázek 27: BEMF z BLDC motoru.

Při rekuperaci, kde bylo snímáno napětí na superkondenzátoru (Obrázek 27) došlo ke zjištění, že napětí na DC linku nedokáže z BEMF dodat vyšší napětí jak 7,09 V. Proto bylo napětí na superkondenzátoru pokaždé nižší, než toto napětí z BEMF. Zde hraje ale roli, že hřídel rotoru se roztáčela pouze na 1/3 svého maximálního otáčení, viz vzorec 4.3.1.

Rychlost otáček za pomoci cize buzeného motoru lze spočítat následovně:

$$n = \frac{60 * f}{p} = \frac{60 * 68,71}{4} = 1030 \text{ RPM} \quad (4.3.1)$$

Kde f je frekvence a p je počet páru pólu na fázi.

Při vyšších otáčkách by mělo dojít k zvednutí BEMF a obvod bude schopen nabít vyšší napětí (energii) do superkondenzátorů, než při třetinových otáčkách motoru.

5. Ekonomická rozvaha

Tato část se zabývá úvahou o možném uvedení hotové jednotky do sériové výroby a následným prodejem. Zahrnuje různé kalkulace a potřebné kroky k vyhovění všem normám, které se týkají elektronických zařízení. Shrnu zde náklady a zisky s možným profitem z jednotlivě zhotovených jednotek. Zahrnuju zde také jednoduché srovnáním s konkurencí na trhu.

5.1. Náklady

Aby bylo možné jakékoliv elektronické zařízení nabídnout zákazníkovi, musí se nejprve udělat odhad ceny. Ta závisí na použitém materiálu, době návrhu a času pro dokončení a vyladění celého systému jako celku. U kvalitního výrobku je také cílem zajistit dlouhodobou záruku při poruše, nebo selhání různých komponent. Důležitou součástí jsou také kusové, typové zkoušky a oživení jednotky.

Tabulka 8: Odhad ceny jedné řídicí jednotky.

Materiál (Součástky)	Výroba DPS	Osazení DPS	Typová zkouška	Záruka na 2 roky	Celkem
2500,-	200,-	500,-	500,-	500,-	4200,-

Po cenové kalkulaci je patrné, že náklady na výrobu jedné jednotky se pohybují kolem 4300 korun českých. Přidáme-li k této sumě 800 korun za návrh a programování dostaneme se na 5000,- rovných.

Srovnám-li tuto částku s konkurencí, leží někde v nadprůměru, ale to jen díky tomu, že jednotka nabízí větší množství interakcí s uživatelem (displej, Bluetooth).

5.2. Zisky

Lze říci, že při sériové výrobě by se tato cena mohla snížit o čtvrtinu na 3750,-. Nejprve je, ale nutné odladit zbylé prvky (komunikace) a vylepšit stávající účinnost pomocí budičů MOSFET. Teprve pak se může uvažovat o prodeji v komerční sféře. Nesdílno součástí jsou také normy, které jednotka musí po elektrických parametrech splňovat a každá něco stojí. Proto je jednodušší nabídnout kompletně odladěnou jednotku firmám, kterým se líbí a jsou schopny ji odkoupit, popřípadě se domluvit na spolupráci a její doladění.

6. Závěr

Výsledkem diplomové práce na téma řídicí jednotka BLDC motoru je funkční hardwarový prototyp spolu s programem, který slouží pro řízení a regulaci BLDC motoru. Pro sestavu jsem vybral motor o výkonu 300 W se jmenovitými otáčkami 3600 ot. /min a jako zdroj jsem zvolil 28 V lithiovou baterii s kapacitou 17 A. h. Motor má na své straně tři Hallovy sondy, které udávají svoji polohu o natočení rotoru, kterou posílají do mikroprocesoru. Jedná se tedy o vektorové řízení motoru s lichoběžníkovým buzením. Jako signálový procesor, který obsluhuje všechny periférie a zpracovává signály, byl zvolen 32bitový procesor od firmy STMicroelectronics typu F401RE. Zde také zastává roli PID regulátoru, který z Hallových sond snímá počet otáček motoru a v závislosti na ní řídí regulační smyčku. Procesor jde programovat přes vytvořené rozhraní převodníku USB-UART, nebo přes piny vyvedené na konektor.

Zapojení silové části je tvořeno třífázovým střídačem napájeny z obvodu, na kterém se nacházejí čtyři velké elektrolytické filtrační kondenzátory, které jsou pravidelně předbíjeny z baterie. Tento střídač tvoří šestice NMOS tranzistorů upevněné na pasivní chladič. K tomuto obvodu je také připojený obousměrný DC/DC měnič pro ukládání energie do série čtyř superkondenzátorů, který tvoří rekuperační část jednotky. Budiče tranzistorů MOSFET jsou řízeny netradičním způsobem, a to za pomoci rychlých optočlenů s bootstrap obvody. Ty slouží pro vyzdvižení řídicího napětí pro otevření horních tranzistorů. Na vstupní straně obvodu se nachází výkonový spínač spolu s předbíjecím obvodem a proudovou pojistkou. Jako akční členy systému zde sloučí dvě klapky (plyn a brzda) v podobě potenciometrů, které ovládají motor.

Při měření elektrických parametrů bylo zjištěno, že řízení a regulace vykazuje docela hladký průběh otáčení motoru. Ten se otáčí správně v závislosti na dané úrovni natočení plynové klapky. Bylo tedy dosaženo toho, že řízení tranzistorů optočleny je jedna z ekonomických možností, ale pro lepší účinnost a ochranu tranzistorů by bylo vhodnější použít budiče MOSFET. U zpětného ukládání energie do superkondenzátorů bylo zjištěno, že pro správnou a efektivní rekuperaci je důležité, aby se motor nacházel ve vysokých otáčkách. Zde by totiž dokázal nabít superkondenzátory na jejich maximální možnou kapacitu.

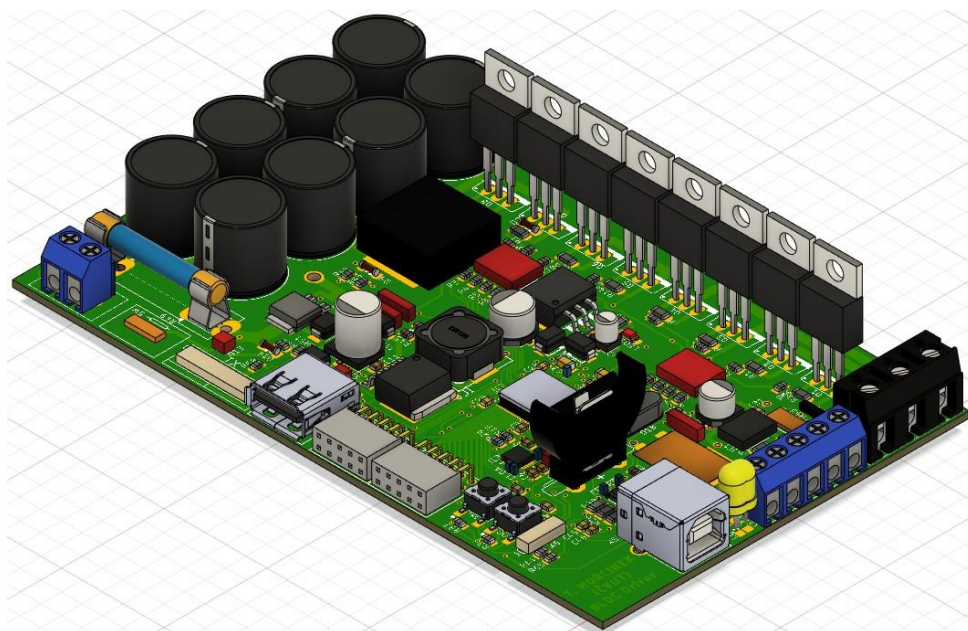
Na závěr je provedena ekonomická rozvaha a bylo zjištěno, že jedna jednotka by mohla při sériové produkci stát 3750,-.

7. Použitá literatura

- [1] **Hughes, Austin a Drudy, Bill.** Electric motors and drives 5th. ed. Newnes : Elsevier, 2019. ISBN: 978-0-08-102615-1.
- [2] **Hanselman, Duane.** Brushless Permanent Magnet Motor design. Ohio : Magna Physics Publishing, 2003. ISBN: 1-881855-15-5.
- [3] **Groschopp.** Compare motor types. [Online] 2018
<https://www.groschopp.com/resources/compare-motor-types/>
- [4] **Renesas.** Motor Control Algorithms. [Online] 2010.
<https://www.renesas.com/us/en/solutions/key-technology/motor-control/motor-algorithms.html>.
- [5] **Prokop, Libor a Chalupa, Ieos.** 3-Phase BLDC Motor control with sensorless back EMF. [Online] 2005. <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN1914.pdf>.
- [6]. **Lin, Chun Liang a Hung, Hao Che.** Active Control of Regenerative Brake for Electric Vehicles. Taiwan : Department of Electrical Engineering, 2018.
- [7] **Gieras, Jacek F.** Permanent magnet motor technology 3th. ed. New York : CRC Press, 2010. ISBN: 978-1-4200-6440-7.
- [8] **Karnavas, Yannis a Topalidis, Anestis.** Brushless DC Motor Sensorless Controller. [Online] 2019. <https://doi.org/10.3390/electronics8121456>.
- [9] **Brejč, Milan a Princ, Michal.** BLDC Motor with Speed Closed. [Online] 2006.
<https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN3007.pdf>.
- [10] **Čihák, Tihomir a Jakopović, Željko.** Supercapacitors in power converter DC link. [Online] 2015. https://bib.irb.hr/datoteka/517277.MEET_Cihak.pdf.
- [11] **Epec technologies.** Battery cell comparison. [online] 2020.
<https://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html>
- [12] **Blake, Carl a Bull, Chris.** IGBT or MOSFET: Choose Wisely. [Online] 2018.
https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IGBT_or_MOSFET_Choose_Wisely-Article-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d462533600a40153574048b73edc.
- [13] **Battery university.** Series and parallel battery configuration. [online] 2019.
https://batteryuniversity.com/learn/article/serial_and_parallel_battery_configurations
- [14] **Kobrlé, Pavel a Pavelka, Jiří.** Elektrické pohony a jejich řízení 3 ed. Praha : ČVUT, 2016. ISBN: 978-80-01-06007-0.
- [15] **Timko, Jaroslav, Žilková, Jaroslava a Dudřík, Jaroslav.** Elektrické pohony a výkonový elektronika. Košice : Technická univerzita , 2008. ISBN: 978-80-553-0093-1.
- [16] **Kobrlé, Pavel.** Elektrické pohony a výkonová elektronika. Ústí nad Labem : UJEP, 2013.
- [17] **Biskup, Tomasz.** Recovery braking of variable-structure electronic commutator for BLDC motor. Gliwice : Faculty of Electrical Engineering, 2012. DOI: 10.2478/v10171-012-0043-x.
- [18] **Godfrey, Joseph.** A new electric braking system with energy regeneration for a BLDC motor driven electric vehicle. Tiruchirappalli : Department of Electrical and Electronics Engineering, 2018.

- [19] **Nelson, V. P.** C programming for embedded microcontroller systems. [Online] 2014. https://www.eng.auburn.edu/~nelsovp/courses/elec3040_3050/.
- [20] **Leuchter, Jan a Bojda, Petr.** Bi-directional DC-DC converters for supercapacitor. Brno : Univerzita obrany, 2007. ISBN: 9789075815108.
- [21] **Rohm.** Calculation of power loss. [Online] 2016. http://rohms.rohm.com/en/products/databook/applinote/ic/power/switching_regulator/power_loss_appli-e.pdf.
- [22] **STMicroelectronics.** Getting started with STM32F4xxxx MCU hardware development. [Online] 2018. https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00115714-getting-started-with-stm32f4xxxx-mcu-hardware-development-stmicroelectronics.pdf.
- [23] **STMicroelectronics.** STM32 Cortex®-M4 MCUs and MPUs programming manual. [Online] 2020. https://www.st.com/resource/en/programming_manual/dm00046982-stm32-cortexm4-mcus-and-mpus-programming-manual-stmicroelectronics.pdf.
- [24] **Mitsubishi electric.** Bootstrap circuit design manual. [Online] 2016. https://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/files/manuals/dipipm_bootstrap_circuit_e.pdf.
- [25] **Toshiba.** DC-AC Inverter circuit. [Online] 2018. <https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semiconductor/application/mega-solar-inverters/articles/inverter-circuit.html>.

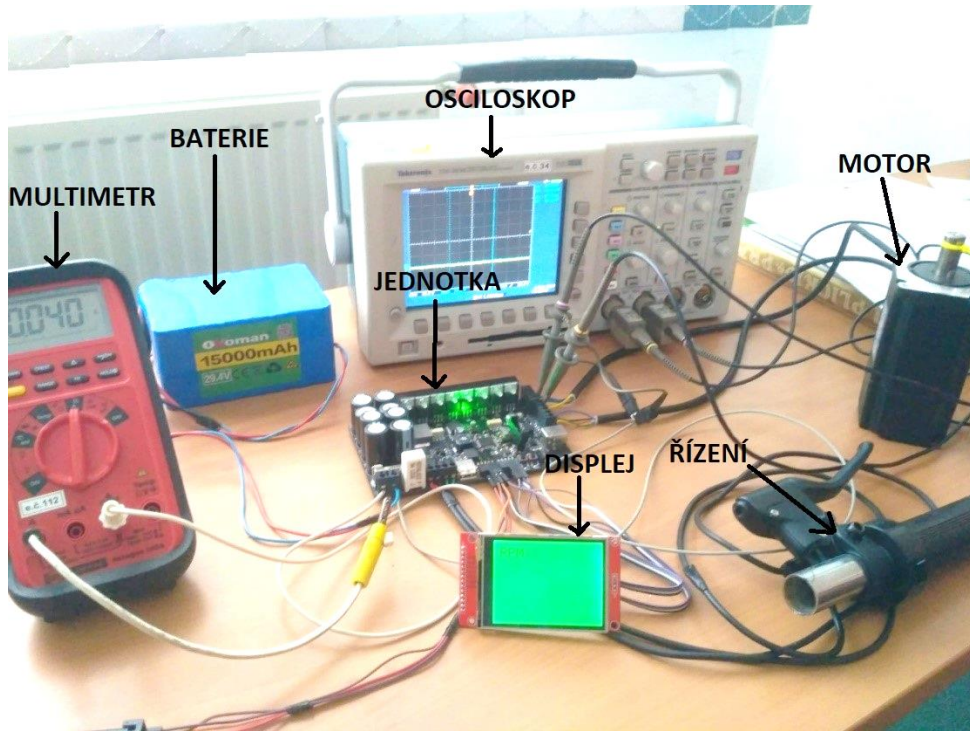
Přílohy



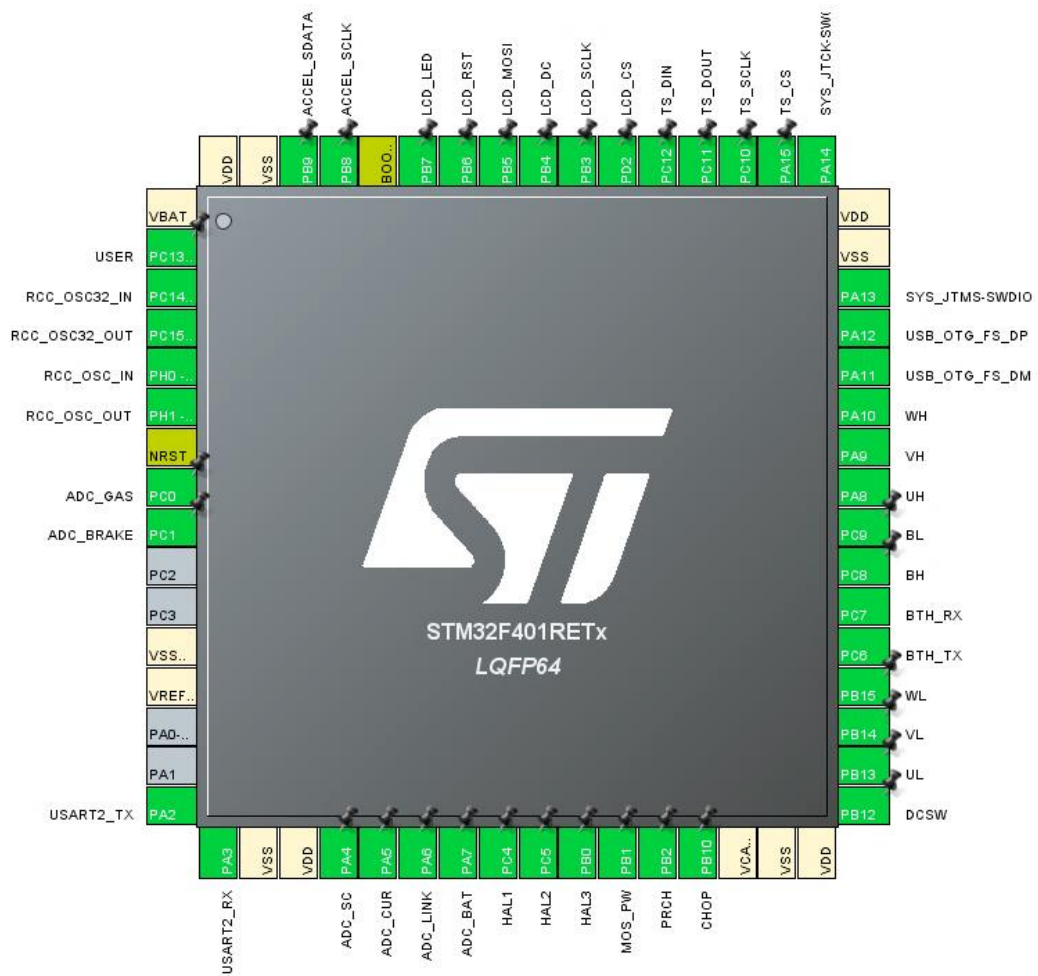
Příloha A: Zhotovená jednotka ve 3D. Převzato z Fusion360.

Příloha B: Přehled konektorů jednotky.

Konektor	Pin	Význam	Konektor	Pin	Význam
X7 (napájení)	1	+12 V~48 V	X2	1-5	USB (volitelné)
	2	GND	X5	1-4	USB (ladění)
X1 (plyn, brzda)	1	+3,3 V	X6 (BTH)	1	+3,3 V
	2	GND		2	GND
	3	Brzda (0~3,3 V)		3	BTH_RX
	4	Plyn (0~3,3 V)		4	BTX_TX
X3 (Hallové sondy)	1	HAL1	X9	1,2	+3,3 V
	2	HAL2		3,4	DGND
	3	HAL3		5	SWCLK
	4	+5 V		6	SWDIO
	5	GND		7	+5V_USB
X4 (motor BLDC)	1	Fáze U	X8	8	VBAT
	2	Fáze V		1-6	LCD
	3	Fáze W		7-10	TS



Příloha C: Zkušební sestava.



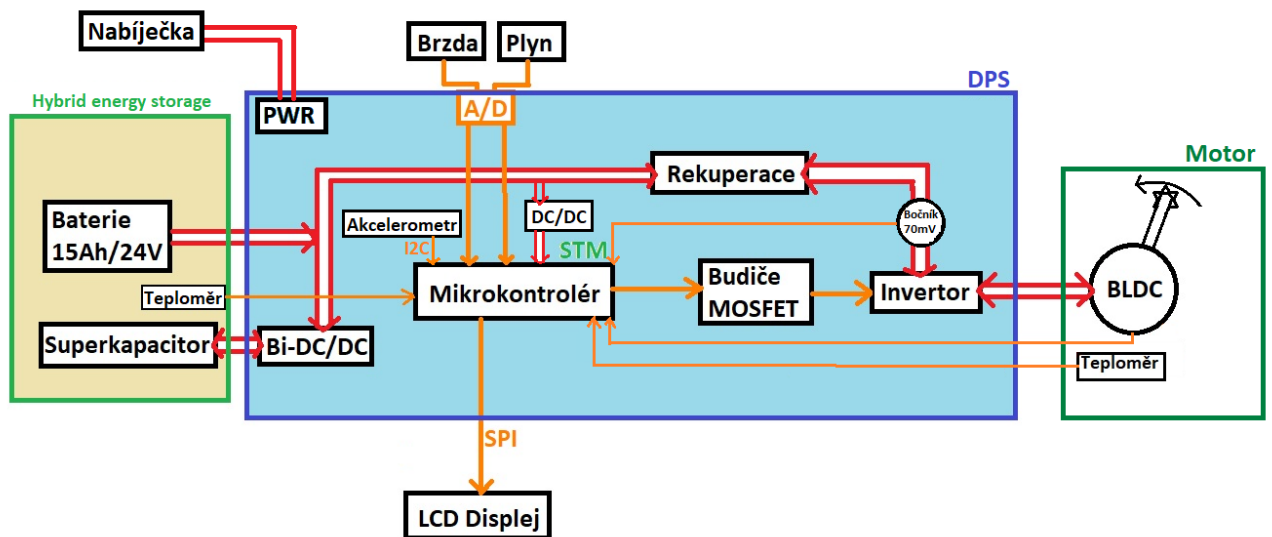
Příloha D: Piny procesoru.


```

//predbijeni
counter=counter+1;
if(counter>10000||firstprch==true){
firstprch=true;
while(prch==true){
if(dclink<(baterie-2)){
HAL_GPIO_WritePin(PRCH_GPIO_Port,PRCH_Pin,GPIO_PIN_SET);
HAL_GPIO_WritePin(DCSW_GPIO_Port,DCSW_Pin,GPIO_PIN_RESET);
}
else{
HAL_GPIO_WritePin(PRCH_GPIO_Port,PRCH_Pin,GPIO_PIN_RESET);
HAL_GPIO_WritePin(DCSW_GPIO_Port,DCSW_Pin,GPIO_PIN_SET);
prch=false;}
}}
//nastaveni frekvence a stridy pro timer1(plyn)
if(plyn>10&&plyn<95){
htim1.Instance->CCR1=plyn;
htim1.Instance->CCR2=plyn;
htim1.Instance->CCR3=plyn;}
else{
htim1.Instance->CCR1=0;
htim1.Instance->CCR2=0;
htim1.Instance->CCR3=0;}

```

Příloha E: Vzorový kód programu.



Příloha F: Blokové schéma konceptu řídicí jednotky.

Elektronické přílohy

- | | |
|-------------------------------------|-------------|
| 1. Elektronické schéma | .pdf soubor |
| 2. CAM data pro výrobu DPS | .zip soubor |
| 3. Seznam součástek | .pdf soubor |
| 4. Software v CubeMX a Keil uVision | .zip soubor |
| 5. Hardware pro EAGLE | .zip soubor |