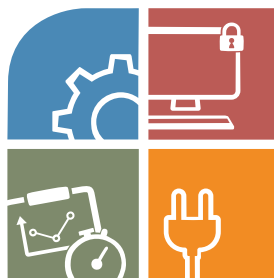


VYŠŠÍ ODBORNÁ ŠKOLA, STŘEDNÍ ŠKOLA,
CENTRUM ODBORNÉ PŘÍPRAVY

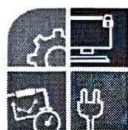


ABSOLVENTSKÁ PRÁCE

Návrh a výroba lodního motoru
z alternátoru

Sezimovo Ústí, 2023

Autor: Patrik Bouška



ZADÁNÍ ABSOLVENTSKÉ PRÁCE

Student: **Patrik Bouška**
Obor studia: 26-41-N/01 Elektrotechnika – mechatronické systémy
Název práce: **Návrh a výroba lodního motoru z alternátoru**
Anglický název práce: **Design and Production of a Boat Engine from an Alternator**

Zásady pro vypracování:

1. Popište součásti a předpokládané technické parametry konstruovaného lodního motoru.
2. Proveďte úpravu alternátoru na elektrický motor a ověřte jeho funkčnost. Změřte jeho parametry a charakteristiky potřebné pro návrh lodního motoru.
3. Ve zvoleném CAD programu vytvořte 3D modely mechanických částí lodního motoru, pomocí kterých spojte motor s převodovkou.
4. Navrhněte a zapojte elektrické komponenty motoru. Vytvořte program pro řídicí jednotku motoru.
5. Proveďte praktické ověření správné činnosti lodního motoru, včetně řídicí elektroniky. Zpracujte příslušnou technickou dokumentaci.
6. Absolventskou práci vypracujte problémově ve struktuře odpovídající vědecké práci.

Doporučená literatura:

- [1] MAŤÁTKO, J. *Elektronika*. Praha: Idea servis, 1995. ISBN 80-85970-00-7.
- [2] ROUBAL, J., HUŠEK, P. A KOL. *Regulační technika v příkladech*. Praha: BEN – technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-260-2.
- [3] RUSIŇÁK, M. *Solid Edge*. Praha: Computer Press, 1998. ISBN 80-7226-105-3.


Vedoucí práce: Mgr. Bc. Miroslav Hospodářský, VOŠ, SŠ, COP
Sezimovo Ústí

Odborný konzultant práce: Ing. Jiří Roubal, Ph.D., VOŠ, SŠ, COP Sezimovo Ústí


Oponent práce: Ing. Jiří Bumba, VOŠ, SŠ, COP Sezimovo Ústí

Datum zadání absolventské práce: **2. 9. 2022**

Datum odevzdání absolventské práce: **12. 5. 2023**


Mgr. Bc. Miroslav Hospodářský
(vedoucí práce)




doc. PhDr. Lenka Hrušková, Ph.D.
(ředitel školy)

V Sezimově Ústí dne 2. 9. 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou absolventskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Sezimově Ústí dne 5.5.2023



_____ podpis

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil své upřímné díky všem, kteří mi pomohli s přípravou této absolventské práce. Bez vaší podpory a pomoci bych nedokázal dosáhnout tohoto úspěchu.

Především bych chtěl poděkovat panu Mgr. M. Hospodářskému, vedoucímu této práce, za jeho odborné vedení, cenné rady a trpělivost při řešení problémů. Jeho podpora byla pro mě klíčová při dosahování výsledků.

Dále bych rád poděkoval firmě VOPSS Řepeč s.r.o., která můj projekt podpořila, svým kolegům a spolužákům za jejich podporu, nápady a konstruktivní kritiku, které mi pomohly rozšířit moje pohledy na dané téma a posunout mou práci vpřed.

Velké díky patří také mé rodině a přátelům, kteří mě podporovali a motivovali po celou dobu studia. Bez jejich neustálé podpory bych nebyl schopen dosáhnout takových výsledků.

Nakonec bych chtěl vyjádřit své uznání všem, kteří se podíleli na tvorbě literatury, databází a nástrojů, které jsem použil při psaní této práce. Bez vaší práce bych nedokázal dosáhnout takového úspěchu.

Je pro mě velkou ctí, že jsem mohl tuto práci dokončit a děkuji vám všem za vaši podporu a pomoc.

Anotace

Hlavní myšlenkou této absolventské práce je ukázat způsob, jak lze poměrně snadno a levně vyrobit lodní motor z alternátoru a použít ho k pohonu plavidla. V první části práce je popsán postup přeměny alternátoru na elektromotor, jehož výkonnost je následně testována. Poté jsou v softwaru CAD navrženy a vyrobeny díly pro propojení elektromotoru s lodní nohou. Následně je sestavený lodní motor zapojen podle navrženého elektrického schématu. Motor je dále programován a využívá k řízení PID regulaci. Po dokončení a ověření správné funkčnosti celého lodního motoru je lodní motor esteticky upraven. Celkově tedy tato práce přináší praktickou ukázkou, jak lze využít alternátor k výrobě lodního motoru a poskytuje návod pro jeho sestavení a programování.

Klíčová slova: Arduino; lodní motor; BLDC; alternátor; bezkartáčové motory

Annotation

The main idea of this thesis is to demonstrate how to easily and cheaply produce a boat motor from an alternator and use it to power a vessel. The first part of the thesis describes the process of converting the alternator into an electric motor, with its performance subsequently tested. Parts for connecting the electric motor to the boat propeller are then designed and manufactured using CAD software. The assembled boat motor is then connected according to the designed electrical diagram. The motor is further programmed and utilizes PID control to manage its operation. After completing and verifying the proper functionality of the entire boat motor, the motor is aesthetically refined. Overall, this thesis provides a practical demonstration of how to utilize an alternator to manufacture a boat motor and provides instructions for assembly and programming.

Key words: Arduino; Outboard Motor; BLDC; Alternator; Brushless Motors

Obsah

Seznam použitých zkratk	xi
Seznam obrázků	xiii
Seznam tabulek	xvii
1 Úvod	1
1.1 Popis řešeného problému a zdůvodnění výběru	1
1.2 Cíl práce a očekávané výsledky	2
2 Teorie pro daný problém a popis součástí	3
2.1 Přívěsný motor	3
2.1.1 Historie přívěsných motorů	5
2.1.2 Elektrické přívěsné motory	6
2.2 Alternátor	7
2.2.1 Historie alternátoru	7
2.2.2 Složení alternátoru	8
2.2.3 Stator a rotor alternátoru	8
2.3 BLDC motory a jejich řízení	9
2.3.1 Parametry, vlastnosti a výhody BLDC motorů	9
2.3.2 Konstrukce a princip BLDC motorů	11
2.4 Řídicí jednotka motoru	15
2.5 Řízení motoru bez senzorů	17
2.5.1 Měření pomocí průchodu zpětné elektromotorické síly nulou	17
2.6 Alternátor přestavěný na hybridní střídavý motor	19
2.7 Návrh PID regulátoru metodou Ziegler – Nichols	20
2.7.1 Postup nastavení PID regulátoru pomocí metody Ziegler – Nichols	21

3	Realizace	23
3.1	Stanovení postupu řešení	23
3.2	Opatření komponentů pro realizaci	24
3.2.1	Alternátor	24
3.2.2	Lodní noha	25
3.2.3	BLDC jednotka	26
3.2.4	Měnič 72 V na 12 V	29
3.2.5	Vývojová deska Arduino UNO	29
3.2.6	Induktivní snímač Balluff	31
3.2.7	Výkonový spínač MOSFET	32
3.3	Přestavba alternátoru na elektrický motor	33
3.4	Měření a diagnostika předělaného alternátoru na motor	35
3.4.1	Připojení motoru k řídicí jednotce a jeho diagnostika	36
3.4.2	Naměřené hodnoty	37
3.5	Příprava lodní nohy pro montáž motoru	38
3.6	Modelování a výroba potřebných součástí v CAD softwaru	40
3.6.1	Solid Edge	40
3.6.2	Výroba příruby	40
3.6.3	Výroba motorové spojky	41
3.7	Sestavení mechanických částí lodního motoru	42
3.7.1	Montáž příruby a motorové spojky k alternátoru	42
3.7.2	Montáž příruby k lodní noze	43
3.7.3	Uchycení elektronických komponentů	44
3.8	Instalace elektronických součástí včetně řídicí jednotky	45
3.8.1	Umístění řídicí jednotky a jejího příslušenství	45
3.9	Zapojení elektronických komponentů do řídicí jednotky	47
3.9.1	Konektory	48
3.9.2	Krabička na Arduino	49
3.10	Programování řídicí jednotky Arduino UNO	50
3.10.1	Zvolený programovací software	51
3.10.2	Práce s programem FLProg	52
3.10.3	Zvolený způsob regulace	54
3.10.4	Hodnoty v PID bloku	56
3.10.5	Kompletní program ve FLProg	56
3.10.6	Kompletní program v C++	56

3.10.7 Testování lodního motoru a doladění programu v řídicí jednotce	57
3.11 Krytování a povrchová úprava dílů lodního motoru	57
4 Vyhodnocení	59
5 Závěr	65
5.1 Největší komplikace při výrobě	66
Literatura	67
A Obsah přiloženého DVD	I
B Použitý software	III
C Časový plán absolventské práce	V
D Rozpočet projektu	VII
E Výkresová dokumentace	IX
F Schéma zapojení	XIII
G Zapojení funkčních bloků	XV
H Zdrojový kód pro Arduino IDE	XVII

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
AC	Alternating Current (střídavý proud)
AD	Analog/digital (analogově/číslicový)
BEMF	Back Electromotive Force (zpětné elektromotorické napětí)
BLDC	Brushless DC (bezkomutátorový stejnosměrný motor)
CAD	Computer Aided Design (počítačem podporované navrhování)
DC	Direct Current (stejnoseměrný proud)
ECM	Electronically Commutated Motor (elektronicky komutovaný motor)
EMF	Electromotore Force (elektromotorické napětí)
IGBT	Gate Bipolar Transistor (bipolární tranzistor s izolovaným hradlem)
<i>LiFePO₄</i>	Lithium-železo-fosfátový akumulátor
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor (synchronní motor s permanentními magnety)
PWM	Pulse Width Modulation (šířková modulace)

Seznam obrázků

2.1	Části lodního motoru	4
2.2	Ukázka lodního motoru Yamaha	4
2.3	Nejstarší lodní motor Evinrude	5
2.4	Trollingový motor Minn Kota	6
2.5	Elektrický motor Evoy	6
2.6	Alternátor	7
2.7	Díly alternátoru	8
2.8	Fáze alternátoru	9
2.9	Momentová rychlostní charakteristika BLDC motoru	11
2.10	Porovnání typů BLDC motorů	12
2.11	Třífázové zapojení do hvězdy	13
2.12	Střídání spínání fází	14
2.13	Trapezoidní tvar průběhu induovaného napětí BLDC motoru	15
2.14	Schéma kontroléru motoru	16
2.15	Zobrazené signály průchodem nulou	18
2.16	Schémata zapojení pro měření průchodu nulou BEMF	18
2.17	Asynchronní motor	20
2.18	Bezkartáčový motor	20
3.1	Pořízený alternátor	24
3.2	Lodní motor s defektem	25
3.3	BLDC řídicí jednotka 1500 W	27
3.4	Popis vodičů od výrobce	27
3.5	Step down měnič	29
3.6	Vývojová deska Arduino UNO	30
3.7	Induktivní snímač Balluff BES02N3	31
3.8	MOSFET modul IRF520	32

3.9	Díly rozebraného alternátoru	33
3.10	Ultrazvuková čistička	33
3.11	Ložiska a rotor alternátoru	34
3.12	Kartáče komutátoru bez regulátoru	34
3.13	Předělaný alternátor na elektromotor	35
3.14	Schéma zapojení pro měření předělaného alternátoru	36
3.15	Měření altrnátoru	36
3.16	Snímek obrazovky osciloskopu	37
3.17	Průběh signálů v PC software	37
3.18	Ukázka umístění šroubů lodního motoru	38
3.19	Zubové čerpadlo lodního motoru	38
3.20	Kompletní díly lodní nohy	39
3.21	Vodící ložisko hřídele	39
3.22	Vodící ložisko hřídele namontované	39
3.23	Logo Solid Edge	40
3.24	Příruba lodního motoru	41
3.25	Motorová spojka lodního motoru	41
3.26	Tváření závitů do čela alternátoru	42
3.27	Montáž příroby k čelu alternátoru	43
3.28	Montáž příruby k lodní noze	43
3.29	Utažení aretačních šroubů	44
3.30	Montáž indukčního snímače Balluff	45
3.31	Umístění BLDC jednotky	45
3.32	Umístění step-down měniče	45
3.33	Umístění krabičky s Arduinem	46
3.34	Panel s ovládacími prvky	47
3.35	Topologické zapojení komponentů	48
3.36	Logo ProfiCAD	48
3.37	GPH lisovací spojka	49
3.38	Konektor XT90	49
3.39	Lámací svorkovnice	49
3.40	Krabička s Arduinem, mosfet modulem a optočlenem	50
3.41	Převodní charakteristika buzení rotoru a rychlost otáček	51
3.42	Časový průběh zaznamenávaných hodnot otáček	51
3.43	Logo FLProg	52

3.44	Logo Arduino IDE	52
3.45	Práce v programu FLProg - definice vstupů a výstupů	53
3.46	Práce v programu FLProg - vkládání funkčních bloků na pracovní plochu	53
3.47	Práce v programu FLProg - kompilace programu do Arduino IDE	54
3.48	Úprava hodnot PID regulátoru v terénu	55
3.49	Ustálení budícího proudu rotoru	55
3.50	Hodnoty zapsané v PID bloku	56
3.51	Logo firmy VOPSS	57
4.1	Přední strana lodního motoru	60
4.2	Ovládací panel lodního motoru	61
4.3	Sklopná ovládací páka lodního motoru	62
4.4	Umístění samolepky firmy	63

Seznam tabulek

D.1 Finanční rozpočet projektu	VII
D.2 Hodinový rozpočet projektu	VIII

Kapitola 1

Úvod

Mnoho lidí vyrazí za svými zážitky k vodě, ať už rybáři, chataři či turisté. Jednou z nejčastější atrakcí u vody je plavba lodí. Avšak pořídit si takové plavidlo s vlastním pohonem je poměrně drahé, proto v této absolventské práci nalezneme poněkud levnější variantu, a to vytvořením lodního motoru pro menší plavidla, jako je rybářská pramice nebo nafukovací člun.

1.1 Popis řešeného problému a zdůvodnění výběru

V práci řeším výrobu elektrického lodního motoru. Rozebírám zde, jak si v domácích podmínkách vyrobit svůj vlastní lodní motor nejlevnějším způsobem.

V absolventské práci využívám převážně znalost elektrotechniky, elektromechaniky, automatizace a programování. Pro výrobu používám poměrně levné a dostupné součástky a nechybí ani mikroprocesorové řízení, z důvodu snadné změny nebo vylepšení programu pro lepší odladění elektrického řízení motoru. Práce obsahuje poměrně dost mechanických dílčích kroků.

Toto téma jsem si vybral dobrovolně, a to na základě vlastních zkušeností. Jelikož hodně rybařím a plavba na vodě mě baví, chtěl jsem si na své plavidlo pořídit pohon. Ceny lodních motorů jsou příliš vysoké, a proto jsem se rozhodl, že si lodní pohon vyrobím sám za příznivější cenu. Dlouho jsem hledal možnosti, jak takový pohon vyrobit a zda bude motor spalovací či elektrický. Bylo spoustu předpokladů, návrhů, pokusů, a nakonec z toho sešlo z důvodu nedokonalé konstrukce nebo vysoké pořizovací ceny. Zkoušel jsem například sestrojít lodní motor z motorové pily, tento pohon byl sice funkční, ale poměrně

nedokonalý, kvůli špatné efektivitě. Nyní po pár letech a zkušeností jsem si nastudoval možné varianty, další funkce lodních motorů, a nakonec na toto téma udělal i absolventskou práci.

1.2 Cíl práce a očekávané výsledky

Cílem absolventské práce je předělání alternátoru na elektromotor, vytvoření a ověření elektroniky lodního motoru, sestava lodního motoru a v neposlední řadě vytvoření příslušné technické dokumentace.

Prvním krokem, co udělat, bylo nastudovat specifika lodních motorů a alternátorů z hlediska funkčnosti. Dalším krokem bylo zjištění možnosti předělání alternátoru na elektromotor. Následující činností bylo vymyšlení a navrhnutí součástí pro propojení lodní nohy s elektromotorem. Když bylo jasné, jaké součástky budou použity, tak jsem musel součástky sehnat, případně objednat. Zásadní činností bylo předělání alternátoru na elektromotor, a nakonec po sestavení a zapojení všech komponentů se musel naprogramovat mikropočítač a vše se řádně vyzkoušet v praxi. Na závěr se musela vytvořit technická dokumentace.

Projekt by měl spolehlivě fungovat, proto se musí postupovat precizně a zbytečně příliš nezpěchat. Sehnané a objednané součástky se pro správnou funkčnost musí precizně otestovat. Předělaný alternátor na elektromotor je nutno změřit pomocí vhodných měřících přístrojů. Nutné je také ověření správné funkčnosti převodovky u lodní nohy. V CAD softwaru je zapotřebí vymodelovat, a poté i zhotovit dílce pro spojení lodní nohy s elektromotorem. Nezbytnou činností je oživení a následné naprogramování řídicí jednotky pro ovládání a regulaci otáček lodního motoru. V poslední řadě se vše musí otestovat a dodat lodnímu motoru estetický vzhled. Od projektu se očekává, že lodní motor bude spolehlivě fungovat a pohánět vodní plavidlo. Motor by měl jít bez problému přidělat na pramici či vodní člun a měla by fungovat regulace otáček. Nakonec by motor měl být zakrytován a v rámci možností esteticky upraven.

V této absolventské práci je jako hlavní zdroj použit Internet. Ať už použití online odborných knih nebo článků.

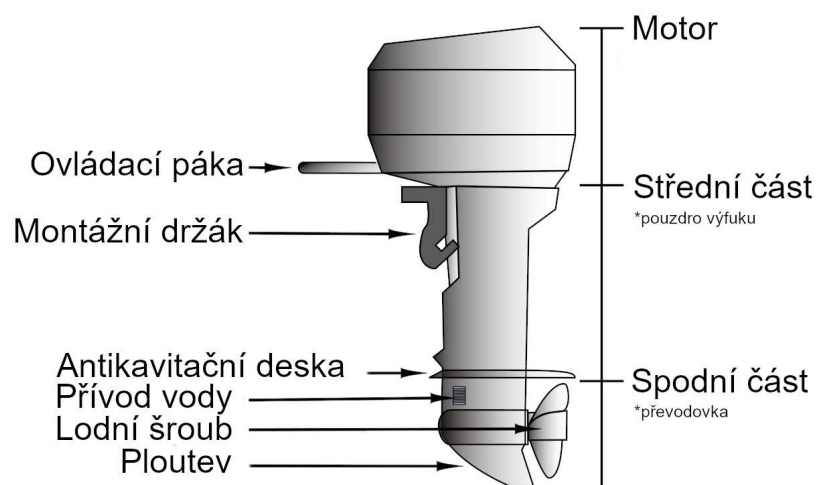
Kapitola 2

Teorie pro daný problém a popis součástí

V následujícím textu je proveden stručný popis přívěsného lodního motoru, alternátoru, funkce řídicí jednotky a také popis součástí používané pro realizaci lodního motoru. Tato kapitola obsahuje historii lodních motorů a porovnání dvou typů elektrických lodních motorů. Následně je zde uveden popis alternátoru, jeho možnosti, historie, složení a způsoby jeho zapojení. Nedílnou součástí této kapitoly je popis BLDC motorů a jejich způsob řízení. V poslední řadě je popsán způsob fungování alternátoru jako elektromotoru a způsob ladění PID regulátoru.

2.1 Přívěsný motor

Přívěsný motor je pohonný systém pro loď, který se skládá ze samostatné jednotky, která zahrnuje motor, převodovku a vrtuli nebo tryskový pohon, konstruovaný tak, aby byl připevněn k vnější příčce plavidla.



Obrázek 2.1: Části lodního motoru

Jedná se o nejběžnější motorizovanou metodu pohonu malých plavidel. Kromě pohonu poskytují vnější paluby také kontrolu nad řízením, protože jsou navrženy tak, aby se otáčely nad svými úchyty a tím řídily směr tahu. Ploutev také funguje jako kormidlo, když motor neběží. Na rozdíl od vestavěných motorů lze přívěsné motory snadno vyjmout pro skladování nebo opravy.



Obrázek 2.2: Ukázka lodního motoru Yamaha

2.1.1 Historie přívěsných motorů

Prvním známým přívěsným motorem byla malá elektrická jednotka o hmotnosti 5 kilogramů (11 lb) navržená kolem roku 1870 Gustavem Trouvém a patentovaná v květnu 1880. Později mohlo být v roce 1896 vyrobeno asi 25 benzínových přívěsů společností American Motors Co, ale zdá se, že ani jedna z těchto dvou průkopnických snah neměla velký dopad.

Nejúspěšnější lodní přívěsný motor, byl vytvořen norskou-americkým vynálezcem Ole Evinrudem v roce 1909. Většina historických přívěsných motorů byla dvoutaktních s karburátorem, a to kvůli jednoduchosti, spolehlivosti, nízké ceně a nízké hmotnosti konstrukce. Nevýhody byly hlavně ve zvýšeném znečištění ovzduší a to v důsledku vysokého objemu nespáleného benzínu a oleje v jejich výfukových plynech a také hlasitější zvuk.



Obrázek 2.3: Nejstarší lodní motor Evinrude

2.1.2 Elektrické přívěsné motory

Elektrické přívěsné motory jsou samostatné pohonné jednotky pro loď, poprvé vynalezené v roce 1973 Mortonem Rayem z Ray Electric Outboards. Ty by neměly být zaměňovány s trollingovými motory, které nejsou navrženy jako primární zdroj energie.

Hlavní funkcí trollingových motorů je udržet loď v konzistentním chodu, to znamená nízkou rychlostí vhodnou pro trolling neboli lovení ryb. Trollingové motory jsou často zvednuty z vody, aby se snížil odpor, když je primární motor lodi v provozu. Slouží především jako pomocná síla pro přesné manévrování lodi, která umožňuje rybáři nahodit návnadu tam, kde se ryby nacházejí. Trollingové motory jsou obvykle namontovány v přídi lodi.



Obrázek 2.4: Trollingový motor Minn Kota



Obrázek 2.5: Elektrický motor Evoy

Většina elektrických přívěsných motorů obsahuje stejnosměrné elektromotory (DC) o výkonu 0,5 až 4 kW, které pracují při napětí 12 až 60 V DC. Nedávno vyvinuté přívěsné motory jsou napájeny střídavým proudem (AC) a mají podobné vlastnosti jako spalovací lodní motory.

S tímto nastavením může motor produkovat výkon 10 kW nebo více a je schopen nahradit benzínový motor o výkonu 15 HP nebo více.

2.2 Alternátor

Alternátor neboli synchronní generátor je stroj, který přeměňuje pohybovou energii na energii elektrickou pomocí elektromagnetické indukce. Pokud dochází v blízkosti vodiče ke změnám magnetického pole, tak se v něm indukují napětí. Alternátor je třífázový generátor střídavého proudu, který je usměrněný diodovým můstkem. (PACH, P., 2021)



Obrázek 2.6: Alternátor

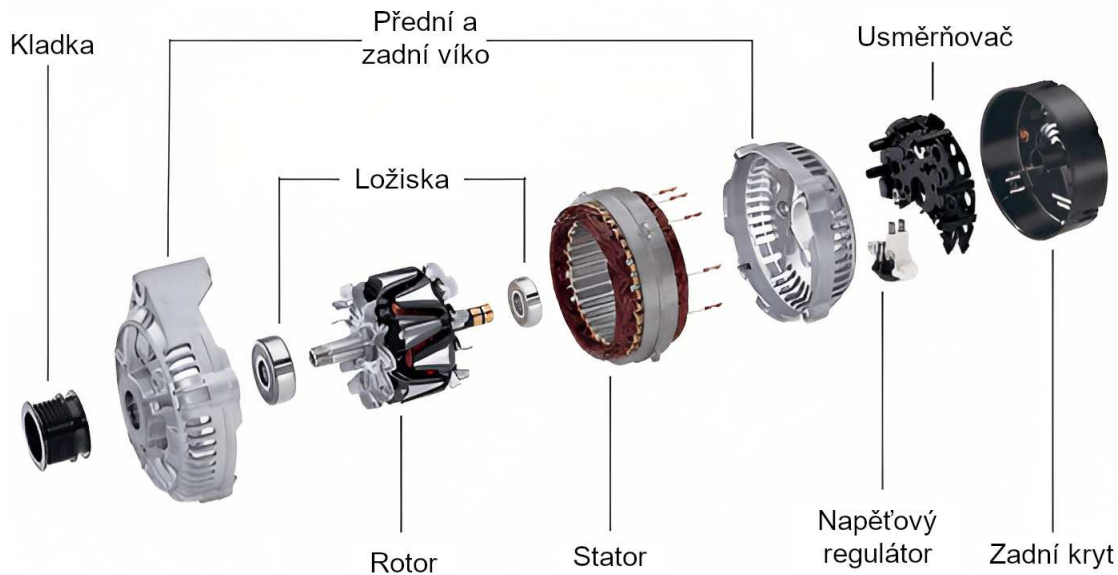
2.2.1 Historie alternátoru

Francouz Hippolyte Pixii bývá historickými prameny uznáván autorem prvního alternátoru. První funkční prototyp navrhl Angličan James Edward Henry Gordon v roce 1886. Lord Kelvin a Sebastian Ferranti postavili alternátor, který uměl pracovat až s 300 Hz. Nikola Tesla uvedl do provozu alternátor zvládající až 15 kHz. Po roce 1890 se objevily i alternátory, které dodávaly proud ve více fázích. (PACH, P., 2021)

O zdokonalení alternátorů se zasloužil britský vynálezce Elihu Thomson, který si spolu s E. J. Houstonem nechal patentovat generátor s třífázovým vinutím. Byl také jedním ze zakladatelů General Electric (spolu s Thomasem Alvou Edisonem a Edwinem J. Houstonem). (PACH, P., 2021)

2.2.2 Složení alternátoru

Obecně platí, že každý alternátor se skládá z těchto hlavních částí: přední a zadní víko, přední a zadní ložisko, rotor, stator, regulátor, diodový můstek, řemenice a ventilátor. (HRŮZA, E., 2019)

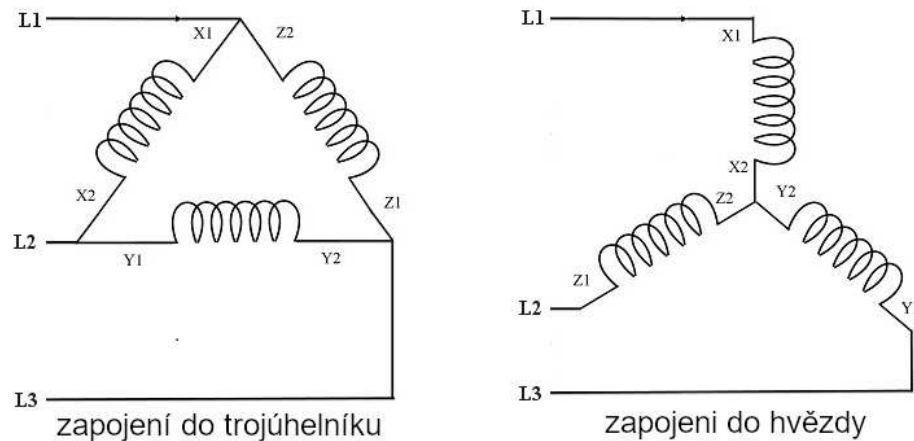


Obrázek 2.7: Díly alternátoru

2.2.3 Stator a rotor alternátoru

Rotor je pohyblivou částí alternátoru. Na hřídeli je navinuta klasická cívka, jejíž dva konce jsou připojeny na sběrací kroužky a dále po obvodu cívky se nacházejí pólové nástavce, ke kterým je připevněn interní ventilátor. Na sběrací kroužky dosedají uhlíky regulátoru, přes které dochází k nabuzení rotoru. Na obou koncích hřídele rotoru jsou nalisována ložiska, ve kterých dochází k otáčení rotoru rychlostí až 8 - 10 tisíc $ot. min^{-1}$.

Stator alternátoru je statickou elektrickou částí, nejčastěji se třemi cívkami. Výkon statoru je dán průřezem drátu vinutí, případně počtem vinutí jedné cívky. Např. může být vyroben se třemi jednoduchými vývody o průřezu $1 mm^2$, nebo se třemi dvojitě vinutými dráty o průřezu $0,5 mm^2$. Cívky statoru mohou být zapojeny tzv. „do trojúhelníku” nebo „do hvězdy”. Zapojení „do hvězdy” se používá nejčastěji. (HRŮZA, E., 2019)



Obrázek 2.8: Fáze alternátoru

2.3 BLDC motory a jejich řízení

Bezkartáčové stejnosměrné motory, známé také jako BLDC motory nebo ECM, jsou relativně novou skupinou synchronních motorů. Tyto motory jsou napájeny stejnosměrným napětím a k jejich správnému chodu je nezbytná řídicí jednotka, která zajišťuje elektronickou komutaci. Tento proces zahrnuje přepínání polarity cívek v přesně stanoveném pořadí, aby se vytvořilo rotační magnetické pole. Pro správnou funkci těchto motorů je tedy nezbytná přesná kontrola a regulace řídicí jednotkou, která je někdy označována jako střídač nebo regulátor. I když je terminologie a zařazení těchto motorů do určitých kategorií stále diskutabilní, společnými znaky BLDC motorů zůstávají jejich elektronická komutace a nutnost řídicí jednotky pro jejich správný chod. (ČERNÝ, J., 2015)

2.3.1 Parametry, vlastnosti a výhody BLDC motorů

S rostoucím vývojem v oblasti výkonových spínacích polovodičů a mikroelektroniky, jako jsou mikrokontroléry, mikropočítače a DSP, získávají elektronicky komutované motory (ECM) stále větší popularitu. Tento vývoj umožňuje snižování nákladů na kontroléry, zjednodušování návrhu a otevírá nové, efektivnější možnosti řízení. BLDC motory se díky těmto výhodám stávají konkurenceschopnějšími a získávají přednost před klasickými motory. Hlavní výhody těchto motorů zahrnují:

- Lepší momentová a otáčková charakteristika oproti obyčejným DC
- Vysoká účinnost
- Vysoká dynamika
- Výborný poměr moment, výkon vs. vlastní hmotnost
- Dlouhá životnost a bezúdržbovost
- Tichý chod
- Vyšší dosahované otáčky
- Lineární odezva
- Menší rušení (EMI)

BLDC motory se díky svým výhodám stávají stále populárnějšími a nalézají uplatnění v široké škále aplikací, jako jsou například nízkonapěťové motůrky, průmyslová zařízení s konstantní i proměnlivou zátěží a bateriová zařízení. Mezi hlavní výhody patří lepší poměr výkon/hmotnost, vyšší dynamika a efektivita. Nevýhodou však je vyšší pořizovací cena, teplotní omezení při provozu a riziko demagnetizace rotoru. Při výběru bezkartáčového motoru bychom se měli zaměřit na mechanické a elektrické parametry. (ČERNÝ, J., 2015)

Mezi elektrické parametry patří klasické údaje jako jmenovité napětí, jmenovitý proud, špičkový záběrný proud, odpor a indukčnost vinutí. Motorová konstanta

$$K_M = \frac{M}{\sqrt{P}} \left[\frac{N.m}{W} \right]$$

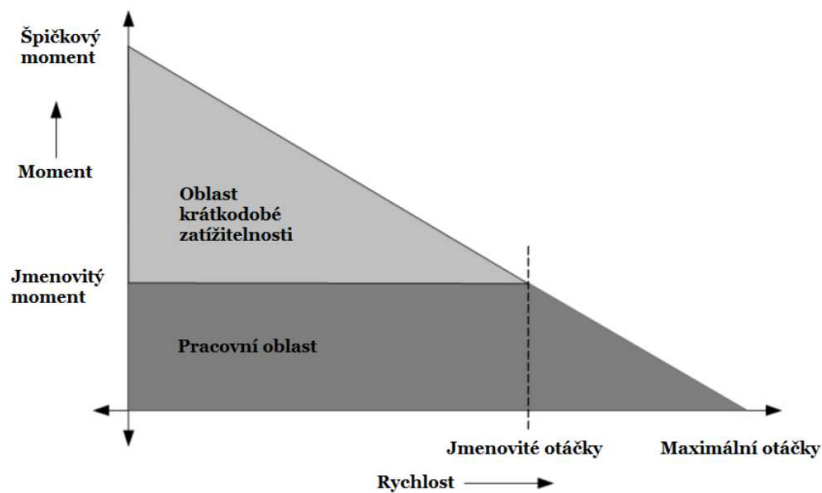
vyjadřuje schopnost motoru přeměnit elektrickou sílu na mechanickou, kde M je produkováný moment motoru a P jsou rezistivní ztráty motoru. Tato konstanta je užitečná ve chvíli, kdy je třeba nahradit jeden motor jiným a to i napříč použitou technologií motoru. Druhá z konstant je rychlostní konstanta

$$K_n = \frac{EMF}{n} \left[\frac{V}{x1000 \text{ ot/min}} \right]$$

kde EMF je indukované elektromotorické napětí a n jsou otáčky v tisících za minutu. Rychlostní konstanta je důležitá z hlediska návrhu obvodu pro monitorování rychlosti motoru, protože nám dává do souvislosti rychlost otáčení a velikost generovaného zpětného elektromotorického napětí. Zpětné elektromotorické napětí vzniká na vinutí při otáčení rotorem. Polarita tohoto napětí je opačná než napětí napájející právě sepnutou fázi a vzniká

v důsledku Lenzova zákona. Velikost zpětného elektromotorického napětí je spjata s velikostí magnetického pole generovaného rotorem, úhlovou rychlostí rotoru a počtu závitů na cívce statoru. (ČERNÝ, J., 2015)

„Mezi mechanické parametry patří jmenovité otáčky motoru, jmenovitý moment, špičkový moment, provozní teplota, setrvačné hmoty rotoru a momentová konstanta, která dává do vztahu odebíraný proud a vytvářený moment. U mechanických vlastností stojí za zmínku momentová otáčková charakteristika, která leccos napoví o chodu motoru, viz obr. 2.9. Z charakteristiky lze vypožorovat, že motor je schopen překonat i při nízkých otáčkách velké momenty. Tato vlastnost je využívána právě u polohovacích zařízení či v jiných aplikacích, kde jsou vyžadovány rychlé změny směru nebo nárazové zatížení. Při použití malého zatěžovacího momentu zase potěší poloha maximálních otáček, která se běžně pohybuje okolo 150% jmenovitých otáček.“ (ČERNÝ, J., 2015)



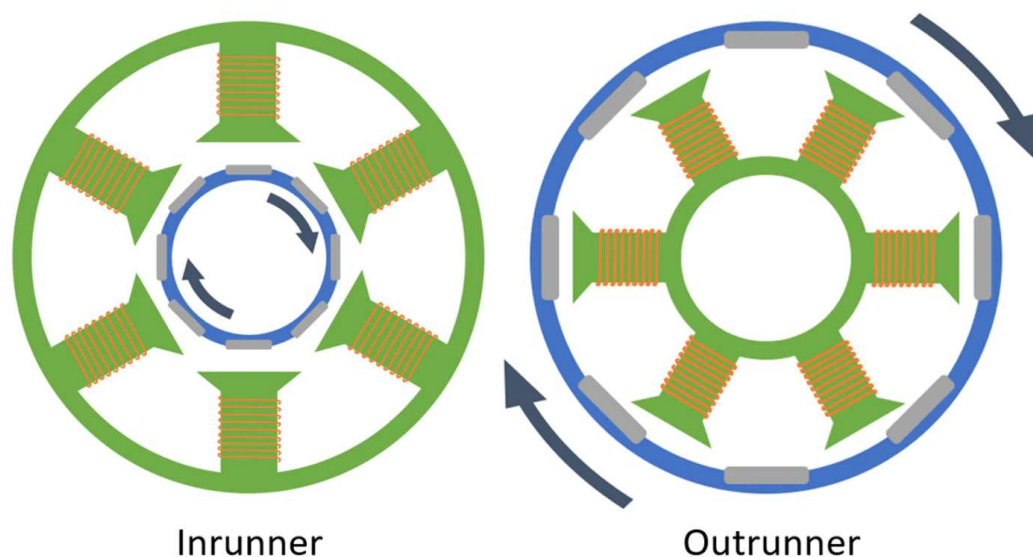
Obrázek 2.9: Momentová rychlostní charakteristika BLDC motoru

2.3.2 Konstrukce a princip BLDC motorů

„Motor je konstrukčně tvořen rotorem z permanentních magnetů a statorem z cívek navinutých na pólových nástavcích. Motor může být ve dvou provedeních, a to tzv. „inrunner“ nebo „outrunner“. První zmíněný má statorové cívky umístěné tak, že obklopují rotor, který se tedy uvnitř konstrukce otáčí. Druhý zmíněný má rotor otáčející se po vnějším obvodu statorové konstrukce. Oba případy jsou znázorněny na obr. 2.10.“

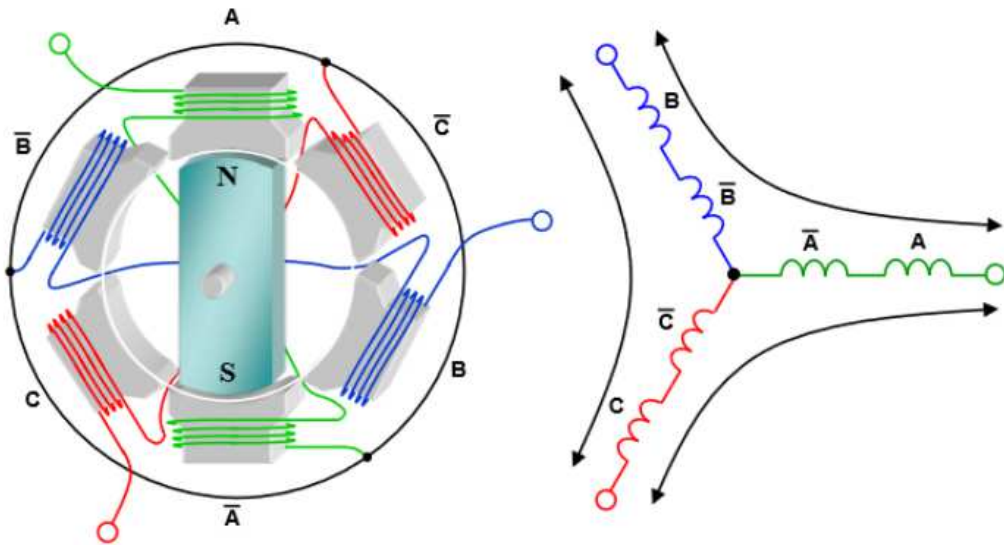
„Motory se také rozlišují podle typu vinutí na sinusové a lichoběžníkové. Od sebe se

odlišují průběhem elektrického napětí, které generují na svých svorkách, pokud fungují v režimu generátoru. Výrobci často označují sinusové motory za tzv. PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) a lichoběžníkové za běžné BLDC, ačkoliv oba motory mají rotor tvořen z permanentních magnetů.“ (JIRÁT, D., 2019)



Obrázek 2.10: Porovnání typů BLDC motorů

„Základní a nejčastěji používané zapojení BLDC motorů je třífázové do hvězdy, ačkoliv výjimkou nejsou ani konfigurace do trojúhelníku nebo s rozdílným počtem fází. Základní zapojení ilustruje obr. 2.11. Na protilehlých pólových nástavcích jedné fáze jsou navinuty cívky do série za sebou tak, aby při aktivaci právě této fáze vytvořily magnetickou pólovou dvojici sever-jih působící na rotor. Všechny tři fáze jsou vyvedeny na společný bod. Cívky jsou vůči sobě posunuty elektricky o 60° . V praxi se většinou konstruují kvůli větší efektivitě motory s větším počtem pólů na rotoru i statoru.“ (JIRÁT, D., 2019)”

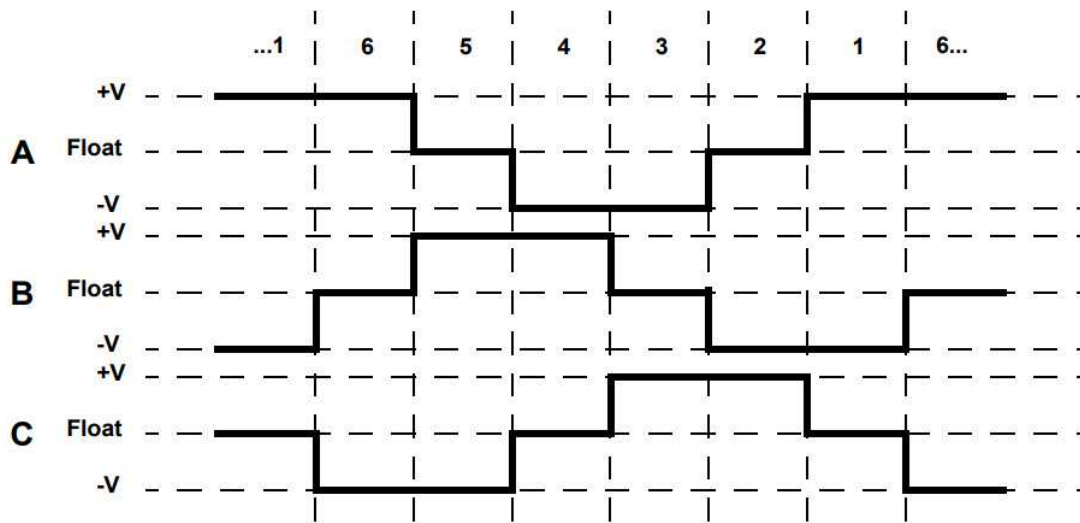


Obrázek 2.11: Třífázové zapojení do hvězdy

Mechanismus, který umožňuje bezkartáčovým stejnosměrným motorům přeměnit elektrickou energii na mechanickou, funguje na principu magnetických sil. Na rotoru se nacházejí permanentní magnety, které jsou přitahovány rotujícím magnetickým polem vytvořeným pomocí statorového vinutí. Tento proces vytváří rotační pohyb, což umožňuje využití BLDC motorů v široké škále aplikací. Díky tomuto mechanismu jsou tyto motory velmi účinné a výkonné.

Většina BLDC motorů je zapojena třífázově do hvězdy, což znamená, že má vždy dvě fáze vybuzené najednou. Elektrická komutace mezi těmito fázemi se provádí pomocí střídače řízeného pulsy přiváděnými na tranzistory. Statorová vinutí jsou umístěna 120° od pozice permanentního magnetu rotoru, a když se rotor nachází 60° od sepnutého vinutí, dochází k elektrické komutaci a spíná se další kombinace vinutí. Poloha rotoru se zjišťuje pomocí různých senzorů, jako jsou Hallovy sondy nebo měření BEMF na fázi. Tento proces umožňuje přeměnu elektrické energie na mechanickou pomocí magnetických sil mezi permanentními magnety na rotoru a rotujícím magnetickým polem vytvořeným pomocí statorového vinutí. (KRCH, R., 2019)

Spínání fází se pro lepší ilustraci střídá po 60° úhlových stupních otáčení, ale pro největší moment platí, že sepnutá fáze má být 90° od pozice permanentního magnetu na rotoru.

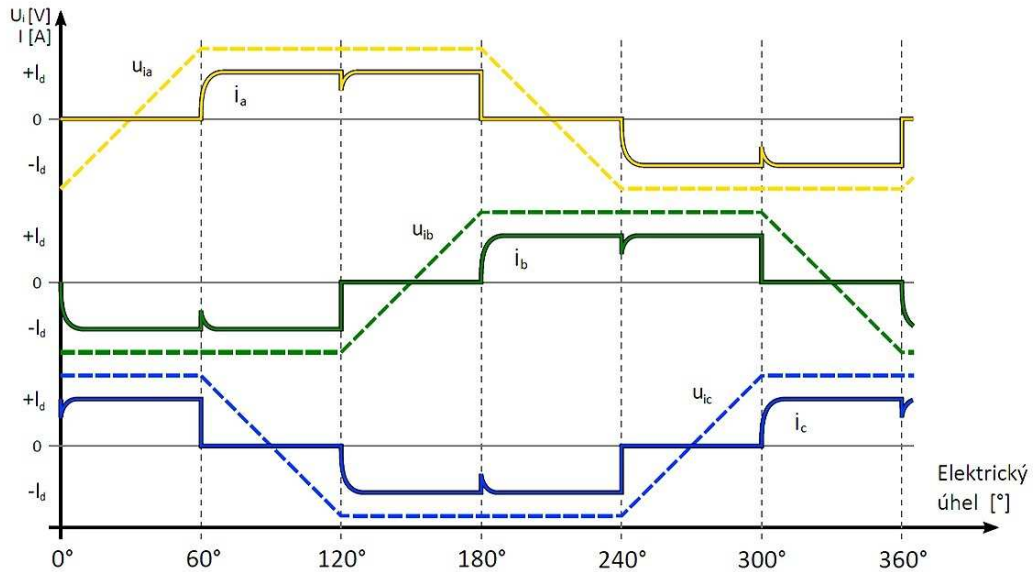


Obrázek 2.12: Střídání spínání fází

Podle tvaru průběhu indukovaného napětí (Back-EMF), lze elektronicky komutované motory s permanentními magnety dělit na dva základní typy. Indukované napětí BLDC motoru je napětí, indukované do nezatíženého statorového vinutí vlivem otáčení permanentních magnetů rotoru. Průběh tohoto napětí může mít trapezoidní nebo sinusový průběh a dělí se následovně:

- trapezoidní – brushless direct current motor (BLDC)
- sinusové – permanent magnet synchronous machine (PMSM)

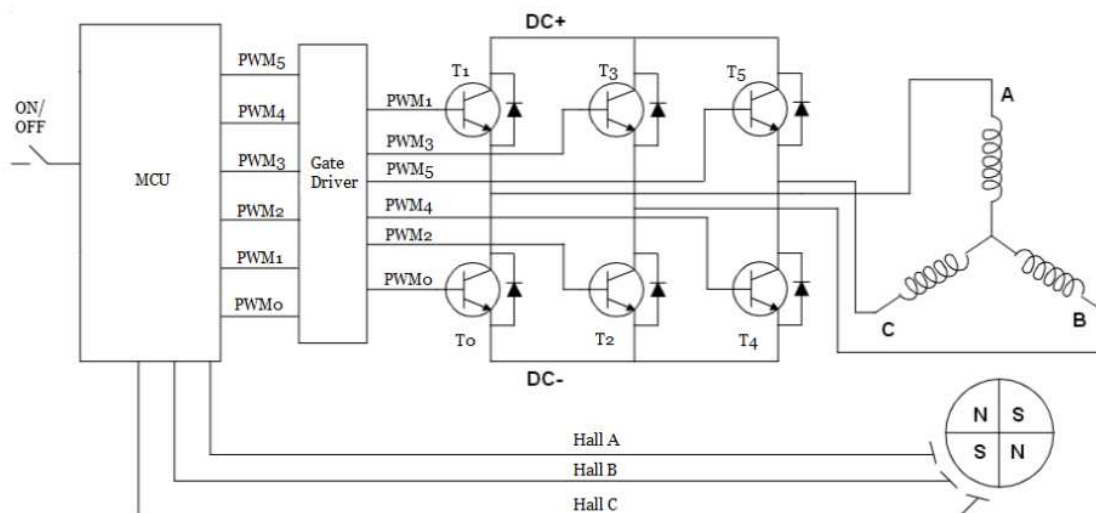
Amplituda indukovaného napětí je úměrná úhlové rychlosti otáčení rotoru. Tvar průběhu napětí se s rychlostí otáčení nemění, je závislý pouze na poloze rotoru, rozložení statorového vinutí a tvaru magnetického pole motoru.



Obrázek 2.13: Trapezoidní tvar průběhu induovaného napětí BLDC motoru

2.4 Řídicí jednotka motoru

„Elektronicky komutované motory ke svému chodu nezbytně potřebují řídicí jednotku, jejíž blokové schéma je vidět na obr. 2.14. Řídicí jednotka je obvykle tvořena dvěma částmi: výpočetní a výkonovou spínací. Výpočetní jednotka má za úkol generovat řídicí signály v závislosti na sensorové zpětné vazbě. Vytvořené signály mají dvojí účel, zaprvé umožňují vlastní komutaci, a tedy rotaci motoru, to se děje připojením správné polarity napájení na správnou fázi. Druhou funkcí je regulace výkonu, která se děje pomocí pulsně šířkové modulace (PWM). Výpočetní část je tvořena například obyčejným složeným hradlovým polem, klasickým 8bitovým mikrokontrolérem, oblíbeným 32bitovým mikrokontrolérem, digitálním signálovým procesorem, nebo programovatelným hradlovým polem. Výpočetní jednotka je volena dle náročnosti aplikace. Důležitou roli při volbě hraje také cena. Náročnost aplikace můžeme zhruba určit podle zvolené metody řízení motoru a podle dalších periférií, které je nutné obsloužit. K hrubému odhadu mohou sloužit propagační materiály jednotlivých výrobců.“ (ČERNÝ, J., 2015)



Obrázek 2.14: Schéma kontroléru motoru

„Výkonová spínací část, označovaná jako střídač, je tvořena nejčastěji do můstku zapojenými MOSFET tranzistory s antiparalelními diodami. Pro nízké výkony v řádech wattů až několik desítek wattů jsou na trhu integrované můstky na čipu. Pro větší výkony je nutné si můstek vytvořit z jednotlivých tranzistorů, které v sobě již dnes mají integrovanou zpětnou diodu. Pro velmi vysoké výkony a vysoké napájecí napětí se s oblibou využívají IGBT tranzistory. IGBT tranzistor je součástka využívající výhod unipolárních i bipolárních tranzistorů. Pro konstrukci třífázového střídače je třeba minimálně šest tranzistorů. Topologii můstku lze pozorovat na obr. 2.14. Mezi hlavní parametry, které hrají důležitou roli při výběru výkonových tranzistorů patří proudová zatížitelnost, odpor tranzistoru při otevřeném kanálu tzv. $R_{DS(ON)}$, maximální velikost napětí $R_{DS(ON)}$ a celková vstupní kapacita. Nízký odpor $R_{DS(ON)}$ je důležitý kvůli tepelným ztrátám při otevřeném tranzistoru protékáním proudem. Typické hodnoty se dnes pohybují v řádech $m\Omega$. Vstupní kapacita se jako negativní jev projevuje při rychlém spínání a vypínání tranzistoru, což je přesně případ motorového kontroléru. Pokud chci tranzistor spínat s naprosto minimálním zpožděním, je nutné rychle nabít vstupní kapacitu gate pomocí vyššího proudu. Tento fakt je omezující či dokonce neslučitelný s přímým spínáním tranzistoru pomocí logických signálů z výpočetní jednotky, proto se v tomto případě používá jako mezičlánek tzv. gate driver obvod. Gate driver se vyskytuje nejčastěji ve formě integrovaného čipu, na jehož vstup jsou přivedeny logické úrovně, které jsou následně upraveny do podoby, ve které již lze spínat výkonové tranzistory.“ (ČERNÝ, J., 2015)

2.5 Řízení motoru bez senzorů

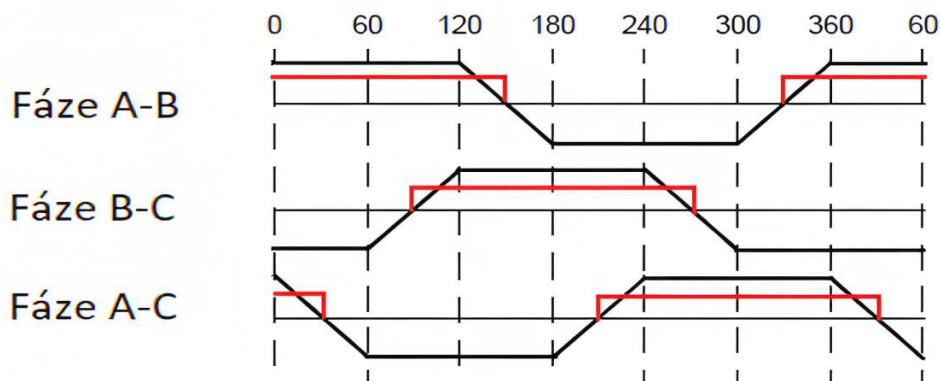
Bezsenzorové řízení motorů má několik výhod, jako je snížení ceny motoru a eliminace potřeby speciálních úchytů pro senzory. Navíc je toto řízení spolehlivější pro provoz v nepříznivých podmínkách. Nicméně, hlavní nevýhodou je menší škála rychlostí, pro které je možné senzory vynechat. Kromě toho vyžaduje bezsenzorové řízení motorů další součástky, jako jsou převodníky, filtry a komparátory. Tyto součástky jsou nutné pro detekci polohy rotoru a generování řídicích signálů, což může zvýšit náklady na výrobu motoru a jeho řídicí jednotky. (KRCH, R., 2019)

Pro bezsenzorové řízení se používají čtyři základní skupiny:

- kontrola průchodu zpětné elektromotorické síly BEMF nulovou hladinou
- integrace zpětné elektromotorické síly BEMF
- měření třetí harmonické zpětné elektromotorické síly BEMF
- měření proudu v antiparalelní zapojení dvou diod paralelně se střídačem

2.5.1 Měření pomocí průchodu zpětné elektromotorické síly nulou

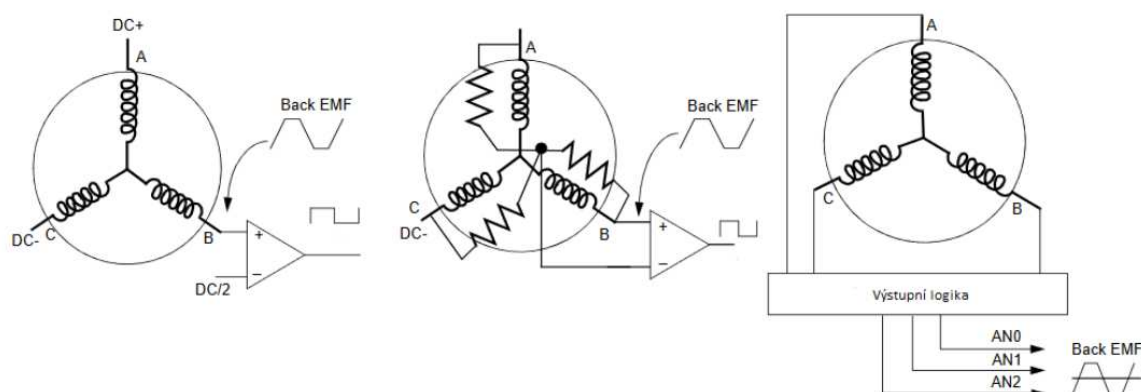
Metoda nazývaná jako "Zero Crossing Point Detection" umožňuje získat informaci o pozici rotoru BLDC motoru pomocí signálů, které jsou fázově posunuty o 30° oproti signálům Hallových sond. Každá fáze poskytuje signál o délce 120° a v každém okamžiku jsou dvě fáze ve vodivém stavu a třetí je odepnutá. Zpětná elektromotorická síla (BEMF) je měřena právě na této třetí fázi. Signál je spínán při průchodu BEMF nulou a vypnut při poklesu na nulovou hodnotu. Detekci průchodu nulou lze provést pomocí komparátoru nebo pomocí AD převodníku. Tato metoda poskytuje spolehlivé měření pozice rotoru a je často využívána v bezsenzorových řízeních BLDC motorů. (KRCH, R., 2019)



Obrázek 2.15: Zobrazené signály průchodem nulou

Metoda detekce průchodu nulou se používá k zjištění pozice rotoru v BLDC motoru. Při této metodě jsou měřeny signály BEMF na vypnuté fázi, která je fázově posunuta o 30° od signálů Halloových sond. Když BEMF na vypnuté fázi prochází nulou, je generován signál, který může být detekován pomocí komparátoru nebo AD převodníku. Další možností je využití virtuálního nulového uzlu, který umožňuje porovnávání hodnoty BEMF s nulovou hodnotou v uzlu. Tyto signály jsou poté zpracovány řídicím systémem pro kontrolu rychlosti a směru otáčení motoru. Nevýhodou použití komparátoru je menší přesnost a nutnost zajištění, aby všechny fáze měly stejné parametry. Proto může být vhodnější použít AD převodník pro přesnější měření BEMF. (KRCH, R., 2019)

Schéma zapojení pro měření průchodu nulou BEMF zleva a) porovnávání s $DC/2$ b) porovnání s virtuální nulou c) použití AD převodníku je vyobrazeno na obr. 2.16



Obrázek 2.16: Schémata zapojení pro měření průchodu nulou BEMF

Metoda s průchodem BEMF nulou se ukázala jako spolehlivý způsob řízení BLDC motorů, avšak není vhodná pro nulové nebo malé otáčky. Důvodem je, že BEMF je veličina, která je silně závislá na magnetických vlastnostech motoru a na rychlosti otáčení rotoru. Při nízkých rychlostech by signál BEMF dosahoval hodnot, které by byly špatně rozeznatelné a tedy nepoužitelné pro řízení motoru. Pro účely rozběhu motoru se proto využívá metoda asynchronního rozběhu, kdy se vinutí spínají postupně v předem stanovených časových intervalech, aby se dosáhlo požadované rychlosti otáčení. (KRCH, R., 2019)

2.6 Alternátor přestavěný na hybridní střídavý motor

Alternátory používají levný a výkonný elektromagnet, který je levnější a spolehlivější než permanentní magnety ze vzácných zemin, které se používají v bezkartáčových motorech. Elektromagnet je spolehlivější, protože nepodléhá demagnetizaci a nemá riziko odletu z rotoru při vysokých otáčkách jako permanentní magnety ze vzácných zemin používané v motorech BLDC.

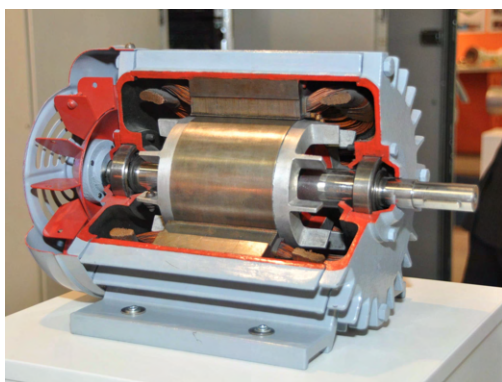
Hnací proud prochází pouze statorem a neprochází žádnými kartáči. Pouze malý proud pole prochází kartáči a hladkými sběracími kroužky do rotoru. Jedná se o vysoce spolehlivou konstrukci s minimálním třením (na rozdíl od komutátorů v konvenčních stejnosměrných motorech), které se obvykle používá pro resolvery a synchronní motory například v letadlech nebo na vysoce spolehlivé průmyslové aplikace. Tento motor nazveme hybridní střídavý motor, protože využívá kombinaci bezkartáčového proudové pohony a malého komutátorového proudu v elektromagnetickém poli.

Tento hybridní střídavý motor je funkčně velmi podobný obvyklému bezkartáčovému motoru s tím rozdílem, že má nastavitelné pole, na rozdíl od tradičního bezkartáčového motoru, který má pole pevné. Toto pole se nastavuje použitím malého stejnosměrného proudu, obvykle 0,5 A – 4 A. To může poskytnout lepší výkon než běžný bezkartáčový motor tím, že produkuje plný točivý moment při nízkých i vysokých otáčkách, ve srovnání s konvenčním bezkartáčovým motorem, který má tendenci ztrácet točivý moment při vysokých rychlostech.

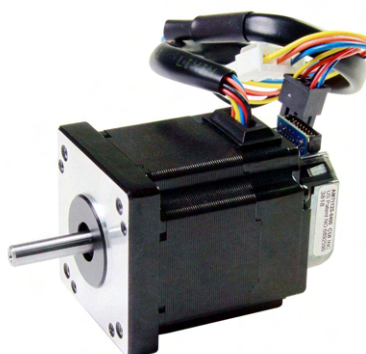
Automobilový alternátor přestavěný na motor může dokonce překročit výkon kartáčových i bezkartáčových motorů a to díky kombinaci jeho bezkartáčového hnacího proudu a nastavitelného pole. Automobilový alternátor předělaný na motor může mít více než

1,0 HP v mnoha použitích, záleží na typu alternátoru, na způsobu předělání a na typu řízení.

Automobilový alternátor přestavěný na motor je mnohem levnější než bezkartáčový motor se stejným výkonem. Automobilový alternátor, který lze předělat na výkonný motor, je asi 5x levnější než konvenční bezkartáčový motor. Tyto motory často mají dlouhou dodací lhůtu nebo se na trhu hůře shánějí.



Obrázek 2.17: Asynchronní motor



Obrázek 2.18: Bezkartáčový motor

Kromě toho má automobilový alternátor fungující jako elektromotor všestrannější ovládání než bezkartáčový motor a díky svému nastavitelnému poli může mít větší výkon a i vyšší točivý moment než konvenční bezkartáčový motor o podobné velikosti.

2.7 Návrh PID regulátoru metodou Ziegler – Nichols

Ziegler-Nicholsova metoda je metoda nastavení PID regulátoru pro stabilizaci systémů s přesností. Tato metoda se často používá v průmyslové automatizaci, aby se dosáhlo stabilního a přesného řízení procesů.

Metoda Ziegler-Nichols spočívá v tom, že se nejprve zjistí kritická frekvence, při které dochází k oscilaci neřízeného systému. Poté se použijí určité koeficienty pro výpočet parametrů PID regulátoru. Tyto koeficienty jsou založeny na zjištění kritické frekvence a amplitudy oscilace.

Podle této metody jsou tři základní typy PID regulátorů - P, PI a PID. Každý z těchto regulátorů má specifické koeficienty, které jsou vypočteny na základě kritické frekvence

a amplitudy oscilace.

Regulátor P je nejjednodušší a obsahuje pouze člen proporcionality. Regulátor PI obsahuje členy proporcionality a integrace a regulátor PID obsahuje členy proporcionality, integrace a derivace.

V případě použití Ziegler-Nicholsovy metody pro nastavení PID regulátoru by měl být sledován výstup regulátoru a reakce systému na změny vstupního signálu. Pokud regulátor není dostatečně přesný nebo když se systém chová nestabilně, je třeba provést další úpravy parametrů regulátoru a opakovat proces až do dosažení požadované úrovně stability a přesnosti.

2.7.1 Postup nastavení PID regulátoru pomocí metody Ziegler – Nichols

1. Nastavte regulátor tak, aby měl pouze člen proporcionality (P). Nastavte hodnotu koeficientu proporcionality na nulu.
2. Postupně zvyšujte hodnotu koeficientu proporcionality, dokud systém nezačne oscilovat nekontrolovaně.
3. Zaznamenejte kritickou frekvenci oscilace (f_c) a amplitudu oscilace (A_c).
4. Podle toho, zda používáte regulátor P, PI nebo PID, použijte jednu z následujících formulí k výpočtu koeficientů:
 - P-regulátor: Koeficient proporcionality (K_p) = $0,5 K_u$
 - PI-regulátor: Koeficient proporcionality (K_p) = $0,45 K_u$
Koeficient integrace (T_i) = $0,85 T_c$
 - PID-regulátor: Koeficient proporcionality (K_p) = $0,6 K_u$
Koeficient integrace (T_i) = $0,5 T_c$
Koeficient derivace (T_d) = $0,12 T_c$

kde K_u je hodnota koeficientu proporcionality, při které systém začne oscilovat nekontrolovaně, a T_c je perioda oscilace.

5. Nastavte koeficienty PID regulátoru na vypočtené hodnoty.

6. Otestujte regulátor v reálném systému a sledujte jeho výstup a odezvu systému. Pokud je odezva nestabilní nebo nedostatečně přesná, proveďte další úpravy koeficientů a opakujte testování, dokud nebude dosaženo požadované úrovně stability a přesnosti.

Je třeba mít na paměti, že Ziegler-Nicholsova metoda není vždy optimální pro nastavení PID regulátoru a mohou být použity i jiné metody. Mezi další metody nastavení PID regulátoru patří:

1. Cohen-Coonova metoda: Tato metoda je založena na modifikaci Ziegler-Nicholsovy metody pro použití s nestabilními systémy. Využívá se lineární regrese pro určení koeficientů PID regulace.
2. IMC (Internal Model Control) metoda: Tato metoda využívá matematický model regulovaného systému pro výpočet koeficientů PID regulace. Je vhodná pro složitější a nestabilní systémy.
3. Chien-Hrones-Reswickova metoda: Tato metoda kombinuje frekvenční analýzu s identifikací amplitudové a fázové odezvy systému, aby určila optimální hodnoty koeficientů PID regulace.
4. Lambda metoda: Tato metoda používá minimální hodnotu průměrného času odezvy jako kritérium pro stanovení koeficientů PID regulace.
5. Trial and error metoda: Tato metoda spočívá v ručním nastavování koeficientů PID regulace a postupném testování a úpravě hodnot až do dosažení požadovaného výsledku. Tato metoda je vhodná pro jednoduché systémy, ale může být velmi časově náročná pro složitější systémy.

Kapitola 3

Výroba a zprovoznění lodního motoru

V této části bych rád více přiblížil problematiku vlastní výroby lodního motoru a uvedl základní kroky k realizaci. Hlavním cílem absolventské je předělání alternátoru na elektromotor, sestava lodního motor, vytvoření a ověření elektroniky lodního motoru a v neposlední řadě vytvoření příslušné technické dokumentace.

3.1 Stanovení postupu řešení

Pro naplnění hlavního cíle projektu jsem stanovil tyto cíle – postupné kroky řešení:

- I. Opatření komponentů pro realizaci
- II. Přestavba alternátoru na elektrický motor
- III. Měření a diagnostika tohoto motoru
- IV. Příprava lodní nohy pro montáž motoru
- V. Modelování a výroba potřebných součástí s CAD softwaru
- VI. Sestavení mechanických částí lodního motoru
- VIII. Zapojení všech elektronických komponentů do řídicí jednotky
- IX. Programování řídicí jednotky

- X. Testování lodního motoru a doladění programu v řídicí jednotce
- XI. Krytování a lakování dílů lodního motoru

3.2 Opatření komponentů pro realizaci

Pro realizaci tohoto projektu je potřeba si opatřit nezbytné komponenty, které jsou následně uvedené v této kapitole.

3.2.1 Alternátor

Je potřeba si sehnat alternátor, který odpovídá parametry požadovanému výkonu okolo 1000 W pro pohon našeho lodního motoru. Při výběru alternátoru je dobré hledět na nejpoužívanější typy alternátorů, a to hlavně kvůli dostupnosti a nákladům na pořízení. Nejrozšířenějšími alternátory jsou alternátory s napětím 12 V a proudem okolo 100 A. V projektu je použit alternátor od značky Valeo a označením 038 903 023 R s proudem 90 A.



Obrázek 3.1: Pořízený alternátor

Alternátory s podobným výkonem se dají jednoduše pořídit koupí z druhé ruky za pár stovek korun.

3.2.2 Lodní noha

Pro zajištění lodní nohy s úhlovou převodovkou jsem zvolil možnost pořídit rozbitý kompletní spalovací lodní motor. Z kompletního lodního motoru se musí demontovat spalovací motor. Lodní noha je pak připravená pro montáž našeho předělaného elektromotoru z alternátoru za pomoci příruby a motorové spojky. Závada porízeného lodního motoru s defektem v mém případě byla v zadřeném spalovacím motoru, u kterého je oprava poměrně drahá a lidem se proto oprava nevyplatí, většinou zvolí možnost pořídit si nový lodní motor a starého se zbavit za pár stovek korun. Spalovací motor po demontáži byl ekologicky zlikvidován. Podrobnější popis přípravy lodní nohy je uveden v kapitole 3.5



Obrázek 3.2: Lodní motor s defektem

3.2.3 BLDC jednotka

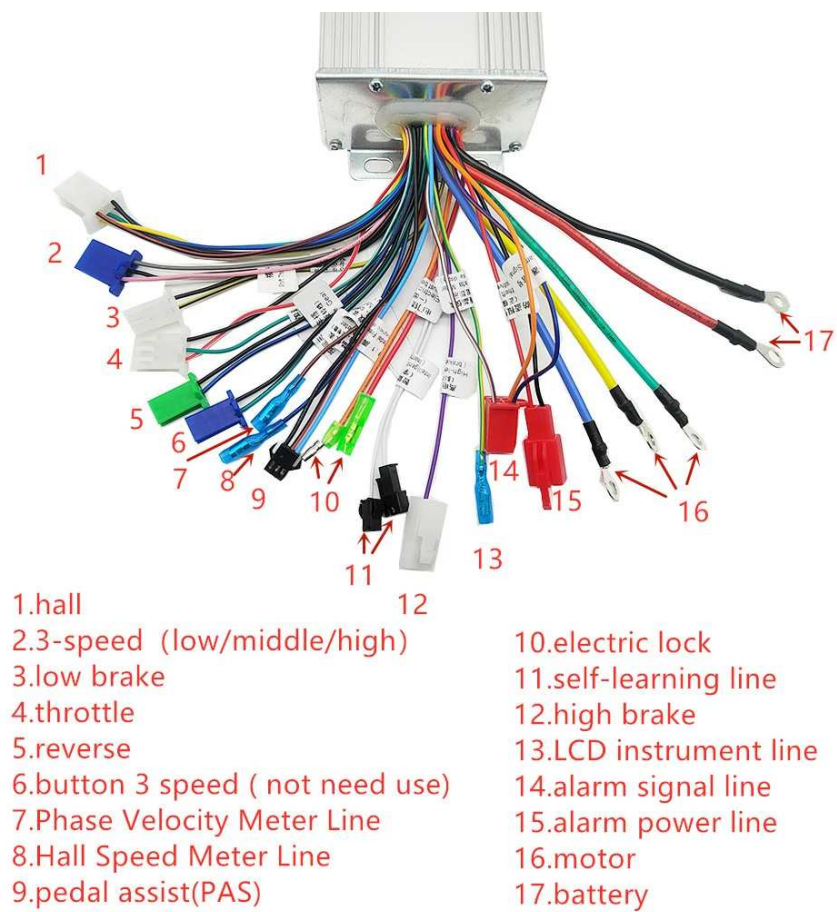
Pro řízení elektromotoru jsem zvolil BLDC jednotku od čínského výrobce s maximálním výkonem 1500 W. Parametry a vlastnosti jednotky uváděny výrobcem:

- Napětí: 48-74 V
- Min. napětí(vypínací): 40 V
- Max proud: 20 A
- Výkon: 1500 W
- Materiál: Hliníková slitina
- Váha: 650 g
- Úhel fází motoru: 60° / 120°
- Výkonný rozběh motoru
- Malý hluk motoru při běhu
- Udržování konstantního proudu při poklesu napětí pro udržení normálního chodu
- Ochrana baterie a prodloužení její životnosti
- Automatické rozpoznání fázového úhlu motoru
- Ochrana proti přehřátí (Pokud je teplota nad vrcholem regulátor sníží napětí a pokud je teplota normální regulátor se automaticky restartuje)
- Automatické odpojení regulátoru od motoru (pokud bude nehybný déle než 2 s nebo při odpojení či poškození jedné z fází)
- Možnost provozu bez Hallových senzorů



Obrázek 3.3: BLDC řídicí jednotka 1500 W

Výrobce popisuje vodiče na obrázku č.



Obrázek 3.4: Popis vodičů od výrobce

Potřebné vodiče pro naši realizaci:

- Power+ - napájení z akumulátoru + (64 V)
- Power- - napájení z akumulátoru - (64 V)
- Motor A - 1. fáze U
- Motor B - 2. fáze V
- Motor C - 3. fáze W

- f - Throttle line

analogový vstup pro jednotku 5V

zapojení potenciometru - řízení výkonu jednotky (otáček motoru)

červený - (+5 V)

černý - (GND)

zelený - analogový vstup do jednotky

- g - Three speed plug

Výběr ze 3 možný výkonů jednotky:

Černý-zelený=stupeň 1 (50%)

Nezapojeno=stupeň 2 (80%)

Černý-šedý=stupeň 3 (100%)

- i - Reversing the plug

Reverzace otáček motoru (spojení černého a žlutého vodiče – reverzace otáček motoru + omezení výkonu jednotky na 50%)

- k - Switch plug

Uvedení jednotky do provozu pomocí napětí z baterie (+64 V)

3.2.4 Měníč 72 V na 12 V

V projektu je použit výkonný snižující měnič, který nám až ze 72 V převede na ustálených 12 V s maximálním proudem 10 A. Toto napětí slouží k napájení komutátoru rotoru v předělaném alternátoru a dále také slouží k napájení induktivního snímače a vývojové desky Arduino.

Parametry udávané výrobcem:

- Rozměry: 9 x 5,1 x 3,3 cm
- Vstupní napětí: 36 V-72 V
- Výstupní napětí, proud a výkon: 12 V / 10 A, 120 W



Obrázek 3.5: Step down měnič

3.2.5 Vývojová deska Arduino UNO

Arduino Uno je mikropočítačová vývojová deska založená na jednočipovém mikropočítači ATmega328. Deska obsahuje 14 digitálních vstupních / výstupních pinů (z toho může být 6 použito jako výstupy PWM), 6 analogových vstupů, 16 MHz krystal, připojení pomocí USB, napájecí konektor, ICSP rozhraní a resetovací tlačítko.



Obrázek 3.6: Vývojová deska Arduino UNO

Specifikace:

- MCU: ATmega328
- Pracovní napětí: 5 V
- Vstupní napětí: 7-12 V
- Vstupní napětí max.: 6-20 V
- I/O digitální: 14 (6 použitelných jako PWM výstup)
- Analog. vstupy: 6
- Flash: 32 KB (ATmega328) 0.5 KB použito pro bootloader
- SRAM 2 KB (ATmega328)
- EEPROM 1 KB (ATmega328)
- Krystal: 16 MHz

3.2.6 Induktivní snímač Balluff

Induktivní snímač od firmy Balluff BES02N3 je v projektu využit na snímání otáček motoru. Je napájen 12 V step down měničem a jeho výstup přes odporový dělič je připojen do mikro počítače Arduino.



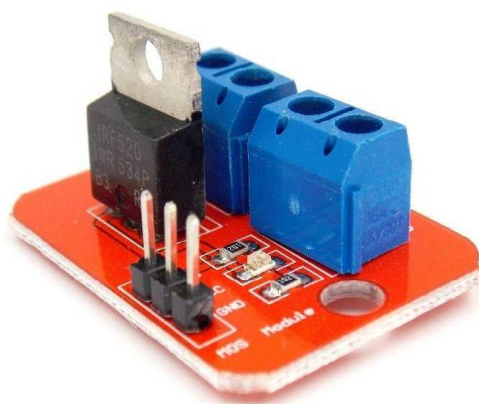
Obrázek 3.7: Induktivní snímač Balluff BES02N3

Specifikace:

- Rozměr: M8 x 65 mm
- Dosah: 2 mm
- Spínací výstup: NPN spínací kontakt (NO)
- Spínací frekvence: 750 Hz
- Materiál: Ušlechtilá ocel
- Připojení: Konektor M12 x 1, 3 pólový
- Provozní napětí: 10–30 V DC
- Teplota prostředí: -25...70°C

3.2.7 Výkonový spínač MOSFET

Pro ovládání komutátoru rotoru je v projektu zvolen výkonový spínač MOSFET IRF520. Tranzistor je přidělán na plošném spoji a je opatřen šroubovací svorkovnicí pro vstup a výstup. Modul také obsahuje indikační LED diodu. Modul je přímo kompatibilní s vývojovou deskou Arduino. Není proto nutno vyrábět plošný spoj. K MOSFETU je potřeba namontovat chladič, protože tranzistor používáme v proudovém rozmezí od 0 A až 4 A a tranzistor se od proudu 1 A samovolně neuchladí.



Obrázek 3.8: MOSFET modul IRF520

Specifikace:

- Napětí zátěže: 0-24 V
- Výstupní proud: <5 A (při proudu >1 A se musí přidat chladič)
- Ovládací napětí: 5-10 V
- Rozměry: 33x24 mm
- Váha: 10 g

3.3 Přestavba alternátoru na elektrický motor

Alternátor jsem sehnal použitý z druhé ruky. Ten bylo potřeba rozebrat a vyčistit.



Obrázek 3.9: Díly rozebraného alternátoru

Pro kvalitní očištění jsem zvolil ultrazvukovou čističku.



Obrázek 3.10: Ultrazvuková čistička

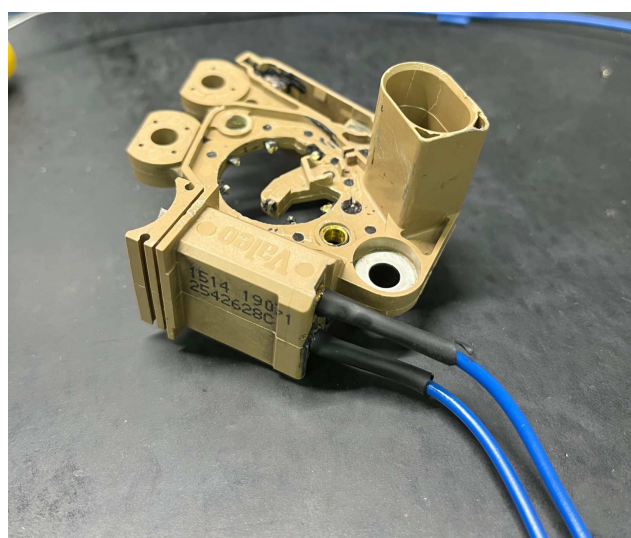
Po vyčištění alternátoru byla zjištěna závada tuhosti ložisek, která bylo potřeba vyměnit. Při výměně ložisek jsem nejprve zjistil původní typ označení: 6202 DWS a BB1-3065 AE, tato ložiska jsem objednal nové. Ložiska po pár letech používání mají větší

valivý odpor a snížila by se tak účinnost našeho motoru. Tomuto všemu se dá vyhnout koupí nového či repasovaného alternátoru, ale zbytečně se zvýší jeho pořizovací cena.



Obrázek 3.11: Ložiska a rotor alternátoru

Po dokončení těchto dvou kroků jsem se pustil do demontáže regulátoru alternátoru, regulátor je potřeba odstranit z plastového držáku. Při neprovedení tohoto kroku by na komutátoru bylo stabilní napětí a nedalo by se regulovat. Následně ke 2 kartáčům alternátoru připevníme vodiče o průřezu $0,75\text{ mm}^2$ pájeným spojem a přetáhneme smršťovací bužírkou.

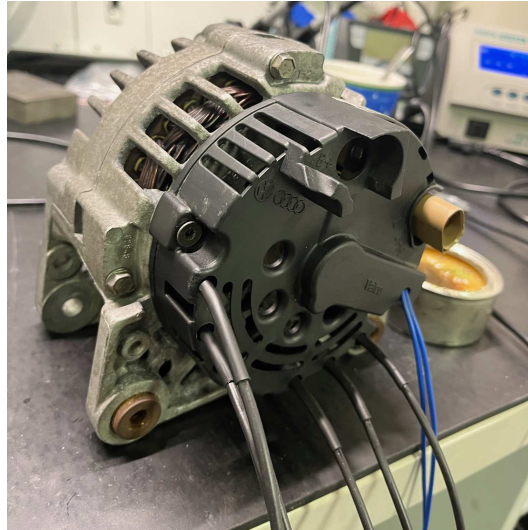


Obrázek 3.12: Kartáče komutátoru bez regulátoru

3.4. MĚŘENÍ A DIAGNOSTIKA PŘEDĚLANÉHO ALTERNÁTORU NA MOTOR35

Pro sestavení našeho elektromotoru použijeme téměř všechny díly, kromě usměrňovacích diod a řemenice. Na 6 drátů ze setatoru připevníme vodiče o průřezu 4 mm^2 , opět pomocí pájeného spoje a instalací smršťovací bužírky. Zadní část alternátoru zakryjeme krytem.

Nyní je alternátor připraven pro připojení elektrické energie a pro jeho testování.



Obrázek 3.13: Předělaný alternátor na elektromotor

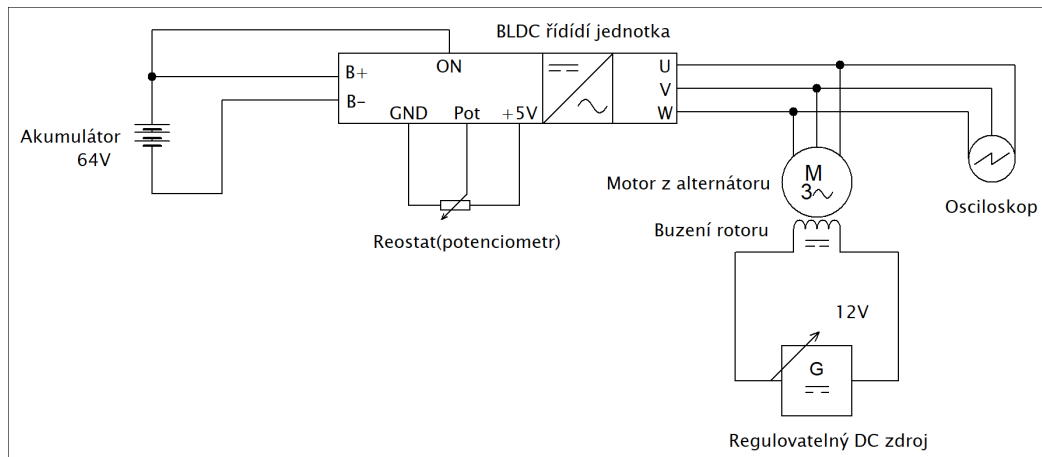
3.4 Měření a diagnostika předělaného alternátoru na motor

Před zapojením předělaného alternátoru k jednotce bylo provedeno měření základních veličin: odpor vinutí statoru a rotoru, izolační odpor statoru a rotoru, průřez vinutí na statoru a rotoru.

Měřené veličiny	Naměřené hodnoty
Odpor vinutí statoru	3Ω
Odpor vinutí rotoru	$0,6 \Omega$
Izolační odpor statoru	$2,2 \text{ G}\Omega$
Izolační odpor rotoru	$2 \text{ G}\Omega$
Průřezu vinutí statoru	$0,6 \text{ mm}^2$
Průřezu vinutí rotoru	$0,2 \text{ mm}^2$

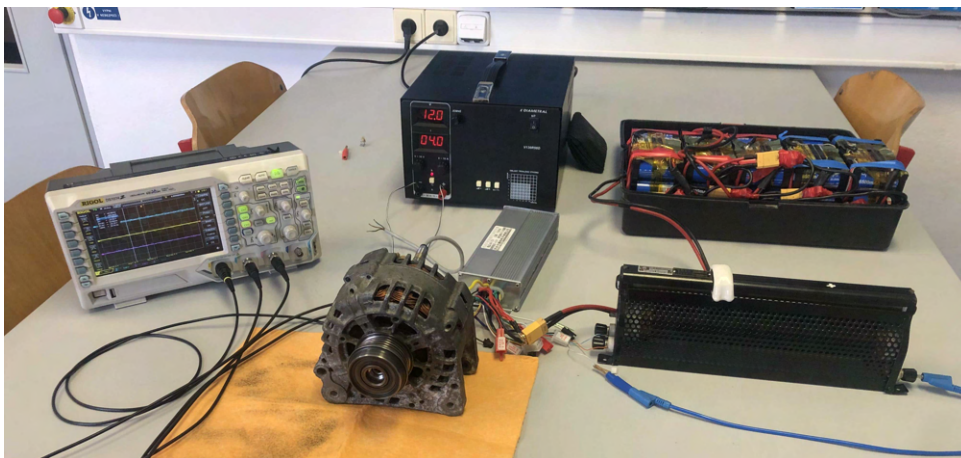
3.4.1 Připojení motoru k řídicí jednotce a jeho diagnostika

Před kompletním zapojením všech elektronických komponentů bylo provedeno pouze zapojení samotného předělaného alternátoru k řídicí jednotce podle schématu pro měření viz obr. 3.14



Obrázek 3.14: Schéma zapojení pro měření předělaného alternátoru

Tato realizace sloužila pro ověření teorie v praxi. Pro měření signálů z řídicí jednotky sloužil kalibrovaný osciloskop RIGOL DS1074Z a pro nabuzení komutátoru byl použit DC zdroj DIAMETRAL V130R50D. Pro ovládání analogového vstupu BLDC jednotky je v měření použit reostat pro snazší manipulaci při ovládaní BLDC jednotky. Jako zdroj napájení pro řídicí jednotku je byl použit akumulátor $LiFePO_4$ o nominálním napětí 64 V s proudovým omezením do 100 A.

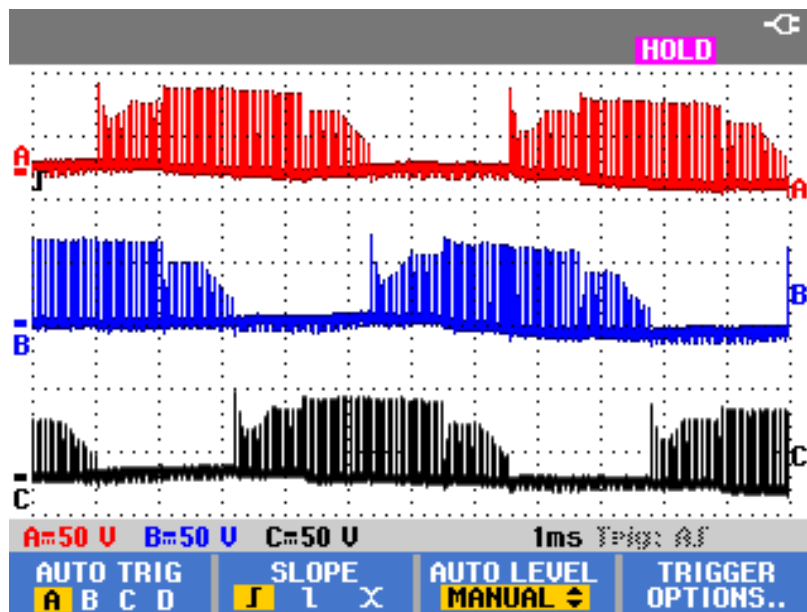


Obrázek 3.15: Měření altrnátoru

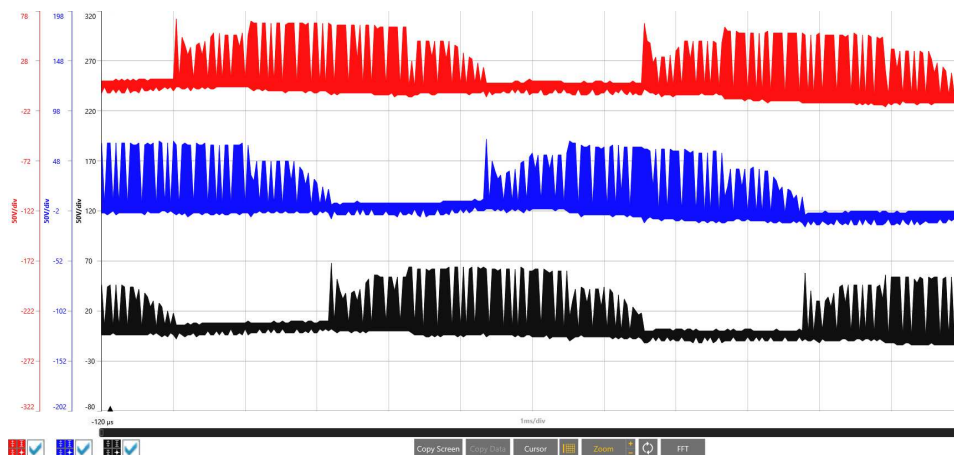
3.4. MĚŘENÍ A DIAGNOSTIKA PŘEDĚLANÉHO ALTERNÁTORU NA MOTOR37

3.4.2 Naměřené hodnoty

V této kapitole je zobrazen printscreen osciloskopu z měření průběhů 3 fází předělaného alternátoru na elektromotor. Naměřené hodnoty jsou měřené při maximálně nabitém akumulátoru a při nastavených maximálních 12V na DC zdroji pro buzení komutátoru rotoru, napětí na komutátoru bude následně řízeno mikropočítačem. Dále je na obr. 3.17 pořízen snímek obrazovky, kde je signál z osciloskopu počítačově upraven.



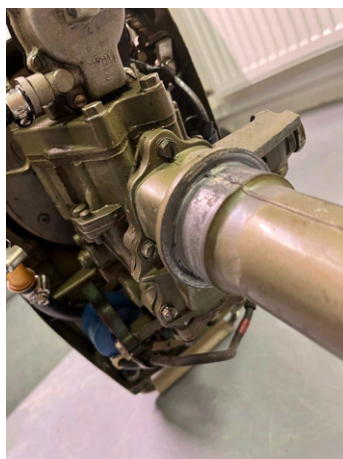
Obrázek 3.16: Snímek obrazovky osciloskopu



Obrázek 3.17: Průběh signálů v PC software

3.5 Příprava lodní nohy pro montáž motoru

Ze starého spalovacího lodního motoru je potřeba demontovat motor. Lodní noha je do motoru připevněna 5 šrouby, které jsou umístěné ve spodní části nohy pod spalovacím motorem.



Obrázek 3.18: Ukázka umístění šroubů lodního motoru

Po demontáži spalovacího motoru demontujeme také zubové vodní čerpadlo a jeho trubičku pro rozvod vody. Vodní čerpadlo je umístěno ve spodní části lodní nohy, a to v prostoru úhlové převodovky, slouží k chlazení spalovacího motoru, to však v předělávce potřebovat nebudeme.



Obrázek 3.19: Zubové čerpadlo lodního motoru



Obrázek 3.20: Kompletní díly lodní nohy

Na vrchní části hřídele obr. 3.22 byl vytvořen díl, který slouží jako ochranný prvek elektromotoru. Jedná se o vodící ložisko hřídele společně s těsněním hřídele, a to z důvodu zabránění proniknutí vody z lodní nohy do elektromotoru. Díl byl vymodelován a následně vytvořen na 3D tiskárně Prusa SL1S SPEED. Je složen z vytisknutého dílce, ložiska a gufera. Prvek není nutnou součástí provozu lodního motoru.



Obrázek 3.21: Vodící ložisko hřídele



Obrázek 3.22: Vodící ložisko hřídele namontované

3.6 Modelování a výroba potřebných součástí v CAD softwaru

Pro spojení elektromotoru s lodní nohou je potřeba vyrobit přírubu a motorovou spojku. Díly jsou nejprve navrženy v CAD softwaru Solid Edge a následně vyrobeny na CNC stojích.

3.6.1 Solid Edge

Solid Edge je 3D CAD systém primárně určený pro návrh strojírenských konstrukcí. Jeho funkce však umožňují vytvářet mnohem více. Od designu nábytku až po 3D modelování komplexních ploch. Solid Edge je dnes, stejně jako při svém uvedení v dubnu 1996, nositelem pokrokových technologií, které se postupem času stávají standardem v oblasti 3D modelování. Solid Edge nabízí výkonné objemové i plošné modelování, vertikální nástroje pro plechové díly, svařence a formy, práci s neomezeně rozsáhlými sestavami a automatické generování výrobních výkresů.



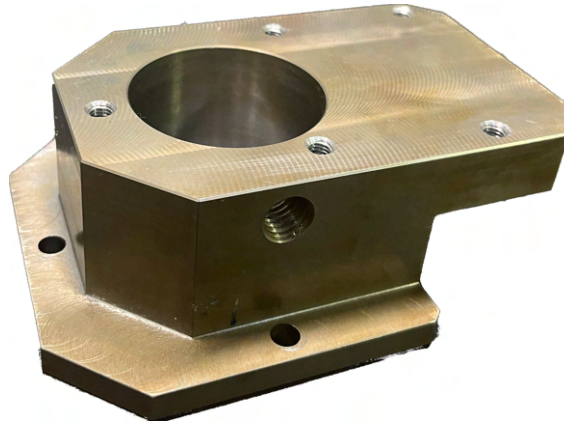
Obrázek 3.23: Logo Solid Edge

3.6.2 Výroba příruby

V CAD softwaru Solid Edge byla vymodelována příruba a vytvořen výkres, viz příloha č.1. Příruba přesně pasuje na otvory lodní nohy po původním spalovacím motoru a je přichycena šrouby M6. Na přírubu se poté umístí alternátor předělaný na elektromotor a ten se do příruby upevní pomocí šroubů M6. Jako materiál pro výrobu této příruby byla zvolena ocel, a to z důvodu dobré obrobitelnosti. Ze zadní strany příruby je připraven otvor se závitem M8 na montáž indukčního snímače sloužícího k identifikaci otáček motoru.

3.6. MODELOVÁNÍ A VÝROBA POTŘEBNÝCH SOUČÁSTÍ V CAD SOFTWAREU41

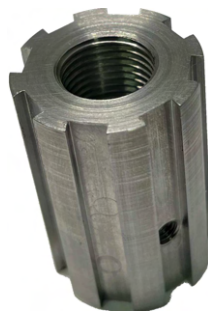
Na straně příruby nalezneme otvor pro pozdější montáž motorové spojky a následně bude zaslepen plastovou zátkou M12, lze použít i šroub. Příruba lodního motoru byla vyrobena na CNC stroji MCV1000 SPEED.



Obrázek 3.24: Příruba lodního motoru

3.6.3 Výroba motorové spojky

Opět v CAD softwaru Solid Edge byla vymodelována motorová spojka a vytvořen výkres, viz příloha č.2. Spojka je vytvořena z válce se dvěma otvory o průměru závitu hřídele alternátoru M16 a vodící tyčí úhlové převodovky s průměrem 10,9 mm. Zajištění proti protočení vodící tyče úhlové převodovky je vyřešeno pomocí dvou zajišťovacích šroubů ("červíků") velikosti M5, které jsou umístěné proti sobě a po dotažení svírají hřídel úhlové převodovky z obou dvou stran. Na motorové spojce jsou vyfrézované drážky pro vytváření pulzů pro indukční snímač otáček. Tento díl byl vyroben na CNC stroji MASTURN 50 a SP 280.



Obrázek 3.25: Motorová spojka lodního motoru

3.7 Sestavení mechanických částí lodního motoru

Po dokončení výroby všech potřebných dílů můžeme provést mechanickou sestavu. Prvním krokem je montáž příruby a motorové spojky k alternátoru následně je celek nasazen na lodní nohu a zajištěn proti protáčení hřídele. Při konání těchto mechanických kroků je potřeba dbát na přestnost. Všechny díly by měly být v ose hřídele. Po nesprávném namontování by hrozilo námáhání motorové spojky, zničení vodícího ložiska nebo k vibračnímu chodu celého lodního motoru.

3.7.1 Montáž příruby a motorové spojky k alternátoru

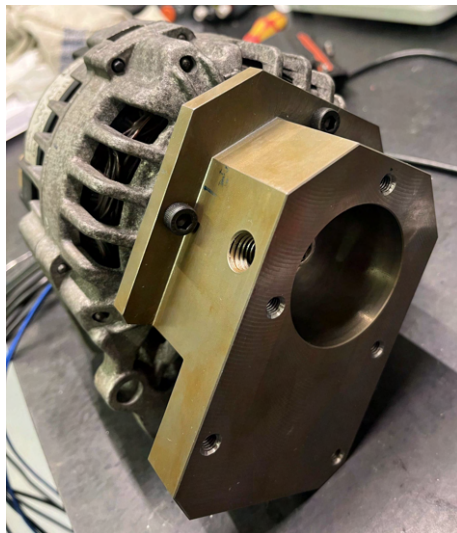
V první řadě je potřeba si do předního čela alternátoru vytvořit 3 závity pomocí závitníku M6. Otvory jsou zde už od výrobce tohoto alternátoru, proto je není potřeba vrtat. Na obr. 3.26 je čelo alternátoru ještě v rozebraném stavu. Závity je možno udělat přímo na sestaveném alternátoru. Při ručním tváření závitu je potřeba osu závitu směřova kolmo ke středové kruhové ploše.



Obrázek 3.26: Tváření závitů do čela alternátoru

Následně přírubu přichytíme pomocí 3 šroubů M6 k alternátoru. Otvory v přírubě mají menší vůli, proto přírubu směřujeme co nejpřesněji na střed osy hřídele. Následně na hřídel alternátoru je natočena a utažena motorová spojka. Při nesprávném dotažení závitu mezi spojkou a hřídelí alternátoru může při zpětném chodu motoru dojít k samovolnému

vyšroubování spojky ze závitu. Pro zajištění tohoto závitu je zde proto použito lepidlo na závity LOCTITE 243.



Obrázek 3.27: Montáž příruby k čelu alternátoru

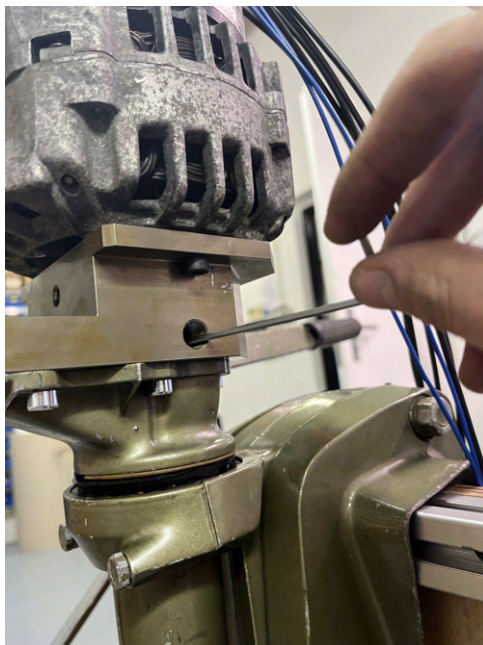
3.7.2 Montáž příruby k lodní noze

Přírubu s alternátorem a upevněnou motorovou spojkou nyní můžeme připevnit k lodní noze. Vodicí tyč z úhlové převodovky zastrčíme do motorové spojky a celý celek dotáhneme 5 šrouby M6 s válcovou hlavou.



Obrázek 3.28: Montáž příruby k lodní noze

Nesmíme však zapomenout na utažení motorové spojky k vodící tyči úhlové převodovky. To provedeme pomocí dotažení zajišťovacích šroubů ("červíků") velikosti M5 skrz otvor ze strany příruby. Po utažení jisticích šroubů zakryjeme otvor závitovou zátkou.



Obrázek 3.29: Utažení aretačních šroubů

3.7.3 Uchycení elketronických komponentů

Pro uchycení elektronických komponentů je k přírubě lodního motoru přichycen rám vyrobený z 2mm pásového plechu. Plechové pásy jsou k sobě přivařené a k přírubě přichyceny šrouby s velkoplošnou podložkou. Do příruby proto byly dle potřeby dodělány závity o velikosti M6. Z přední části je ohnutý plech pro montáž komponentů sloužících k ovládání motoru. Samotný rám slouží především pro připevnění řídicí jednotky a jejího příslušenství a později k možnosti uchycení krycího plechu.

3.8 Instalace elektronických součástí včetně řídicí jednotky

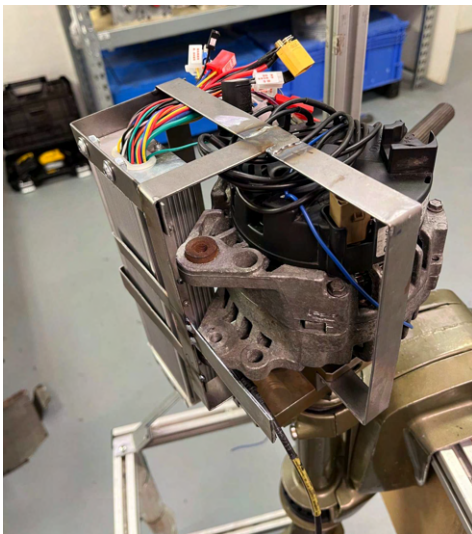
Po montáži mechanických částí lodního motoru je potřeba nainstalovat elektronické komponenty. Zapotřebí je instalace induktivního snímače, řídicí jednotky a komponenty pro ovládání komutátorového napětí.



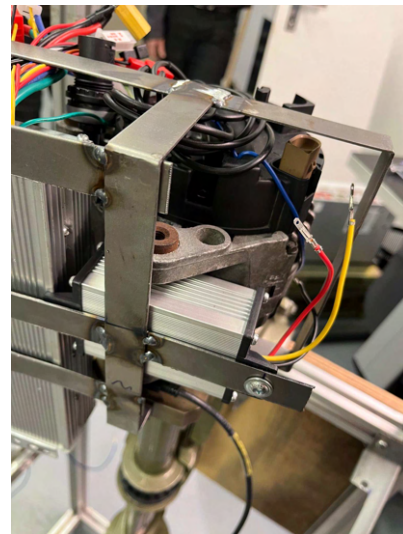
Obrázek 3.30: Montáž induktivního snímače Balluff

3.8.1 Umístění řídicí jednotky a jejího příslušenství

Na vytvořený rám motoru jsou následně připevněné elektronické komponenty. Řídicí jednotka je umístěna vertikálně v přední části lodního motoru, zatímco způsob uložení step down měniče je horizontální.

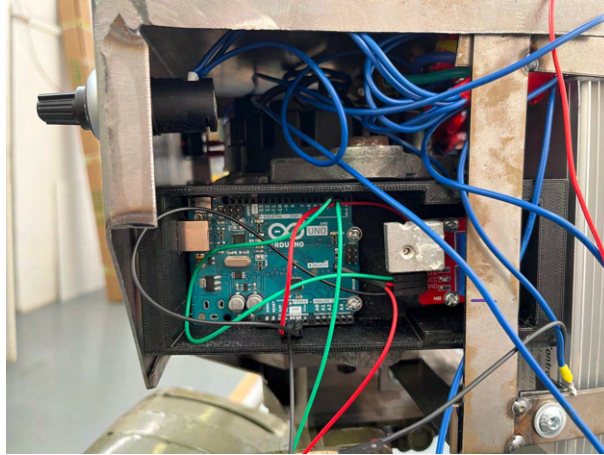


Obrázek 3.31: Umístění BLDC jednotky



Obrázek 3.32: Umístění step-down měniče

Krabička s vývojovou deskou Arduino se spínacím tranzistorem je napasována z boku lodního motoru.



Obrázek 3.33: Umístění krabičky s Arduinem

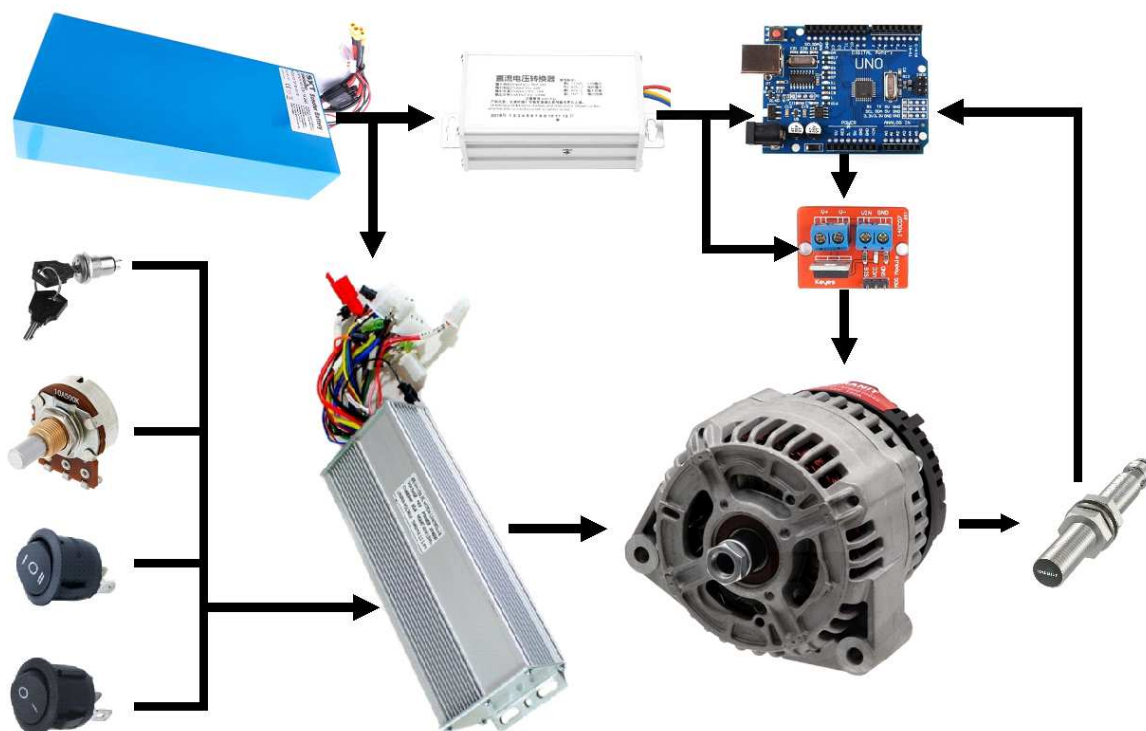
Ze předu lodního motoru se nachází řídicí panel. Je vyroben z plechu a jsou v něm umístěny prvky na ovládání motoru. Na ovládacím panelu jsou umístěny 3 přepínače sloužících: na provoz lodního motoru, na určení výkonu řídicí jednotky, na směr otáčení motoru. Poslední použitou součástí na panelu je potenciometr sloužící k ovládání otáček motoru.



Obrázek 3.34: Panel s ovládacími prvky

3.9 Zapojení elektronických komponentů do řídicí jednotky

V této kapitole je ukázka topologického zapojení všech elektronických komponentů. Mezi elektronické komponenty patří LiFePo₄ akumulátor 64V, alternátor předělaný na elektromotor, Step-down měnič, BLDC jednotka, indukční snímač Balluff, vývojová deska Arduino UNO, optočlen 12V - 5V, kolébkové spínače, kolébkový přepínač a potenciometr.



Obrázek 3.35: Topologické zapojení komponentů

Kompletní schéma zapojení nalezneme v příloze č.3, schéma bylo vytvořeno v PC programu KiCAD EDA.



Obrázek 3.36: Logo ProfiCAD

3.9.1 Konektory

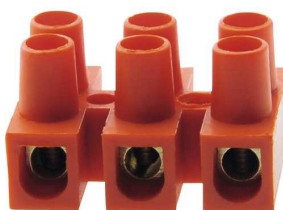
Ovládací panel je s BLDC kontrolérem propojen pomocí vodičů o průřezu $0,75 \text{ mm}^2$ za použití lisovacích kabelových spojek GPH. Lisovací kabelová spojka je pohodlná především na montáž a dobře drží spoj. Tento způsob spojení je využit také pro zapojení step

3.9. ZAPOJENÍ ELEKTRONICKÝCH KOMPONENTŮ DO ŘÍDICÍ JEDNOTKY 49

down měniče a napájení komutátoru. Na ovládací prvky jsou vodiče připevněné pomocí FASTON spojek.

Přívod z baterie je vyřešen použitím konektoru XT90, který je stavěn na vysoké proudové zatížení až 100A. Tento konektor se k vodiči přidělá metodou pájení. Spoj je dobré opatřit přetažením smršťovací bužírky, kvůli náhodnému dotknutí dvou vodičů, zamezit tak zkratu akumulátoru.

K motoru na připojení 3 fází je zde použita lámací svorkovnice známá jako „čokoláda“ a vodiče o průřezu 4 mm².



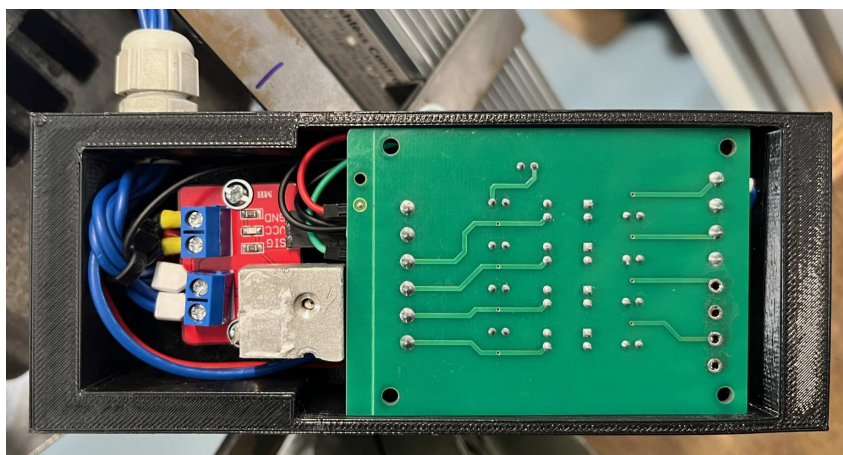
Obrázek 3.37: GPH lisovací spojka

Obrázek 3.38: Konektor XT90

Obrázek 3.39: Lámací svorkovnice

3.9.2 Krabíčka na Arduino

Vývojová deska Arduino společně a modul MOSFET IRF520 jsou umístěné v krabíčce vytisknuté na 3D tiskárně Creality Ender-3. Zabráníme tak k poškození řídicí jednotky vodou. Do krabíčky byl dodatečně ještě přidán modul s optočlenem, který je umístěn nad Arduinem. Důvod instalace optočlenu byl takový, že když do vývojové desky Arduino byl přiveden signál z indukčního snímače, který mění podle otáček svoji frekvenci, docházelo tak k rušení kmitočtu mikropočítače. Vodiče jsou do krabíčky přivedeny skrze těsnící vývodku, která je následně dotažena.



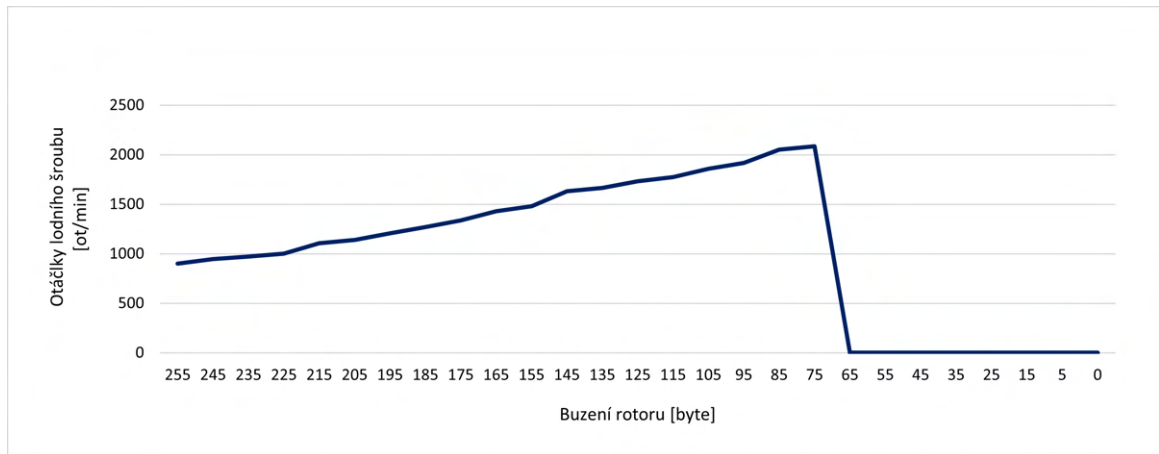
Obrázek 3.40: Krabička s Arduinem, mosfet modulem a optočlenem

Po montáži a zapojení komponentů v krabičce je nyní přiklopena víkem a dotažena šrouby. K vývojové desce je možno se připojit pomocí datového kabelu USB B i bez demontáže krytu, protože do krabičky byl vytvořen přesný otvor na konektor vyvedený z Arduina.

3.10 Programování řídicí jednotky Arduino UNO

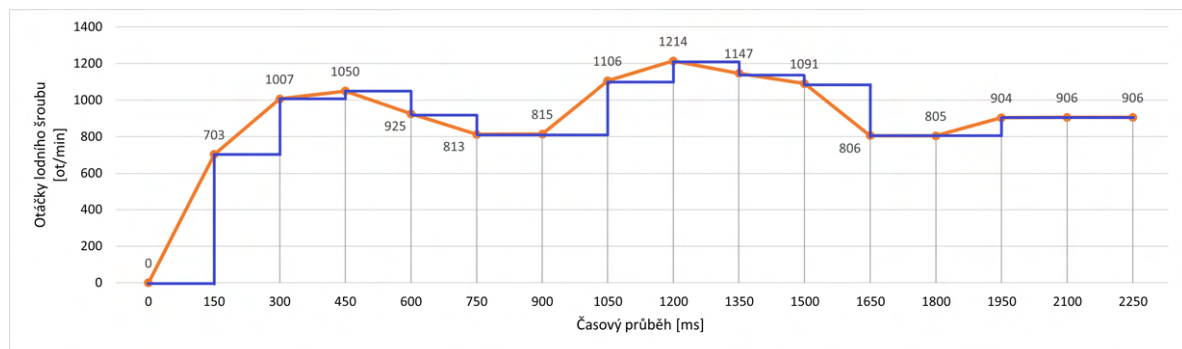
Následně je potřeba naprogramovat a odladit program pro řízení komutátorového proudu alternátoru a zajistit tak nejlepší magnetické pole v rotoru pro vyvážený chod motoru. Před zahájením programování, pomocí osciloskopu zjistíme, zda indukční snímač při otočení motoru generuje pulzy. Následně s výstupním signálem z induktivního snímače pracuje mikropočítač Arduino.

Pro správné řízení rotoru alternátoru je potřeba zjistit převodní charakteristiku pro buzení rotoru a rychlosti otáček. Tu provádíme následovně: Víme, že PWM výstup z Arduina se pohybuje od minimální hodnoty 0 byte do maximální hodnoty 255 byte. Nastavíme největší hodnotu výstupu (plné nabuzení) a postupně po zvoleném kroku 20 byte ubíráme, až se dostaneme na hodnotu, kdy BLDC jednotka, která řídí statorový proud ztratí magnetické pole a otáčky se zastaví. Měření provádíme s maximálním nastavením výkonu BLDC jednotky.



Obrázek 3.41: Převodní charakteristika buzení rotoru a rychlost otáček

Mikropočítač si zaznamenává hodnotu počtu pulzů (otáček) za časový interval 150 ms viz. modrý průběh na obr. 3.42, kterou zapisuje v intervalu 200 ms do datové struktury (pole) a následně starou hodnotu odečítá od aktuální. Tím řídicí systém zjistí rozdíl dvou hodnot. Oranžový průběh značí aktuální hodnotu počtu pulzů (otáček). Systém PID se snaží udržovat výstupní hodnotu pro buzení rotoru alternátoru na takové hodnotě, kdy se otáčky ustálí a rozdíl staré hodnoty počtů pulzů a aktuální hodnoty počtu pulzů je nulový.

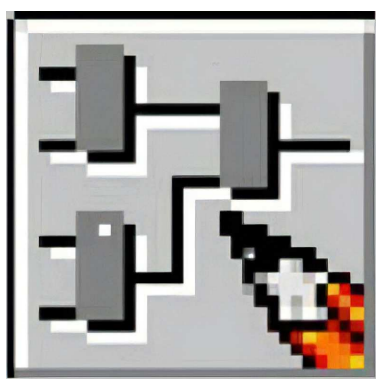


Obrázek 3.42: Časový průběh zaznamenaných hodnot otáček

3.10.1 Zvolený programovací software

Pro naprogramování mikroprocesoru Arduino jsem zvolil neobvyklý, avšak uživatelsky přívětivý program FLProg. FLProg je bezplatný projekt nezávislých vývojářů, který

vám umožní pracovat s funkčními bloky nebo kontaktními schémata. Toto prostředí je vhodné pro lidi zajímaví se o elektroniku, kteří nemusí být dobří programátoři. To umožňuje vizuálně a graficky vidět algoritmus pomocí diagramů a funkčních bloků. Proto zde nebude použit klasický známý vývojový diagram, ale právě zmíněný diagram pomocí funkčních bloků. Dále bude vytvořený program ve FLProgu převeden do programovacího jazyku C++ v programu Arduino IDE.



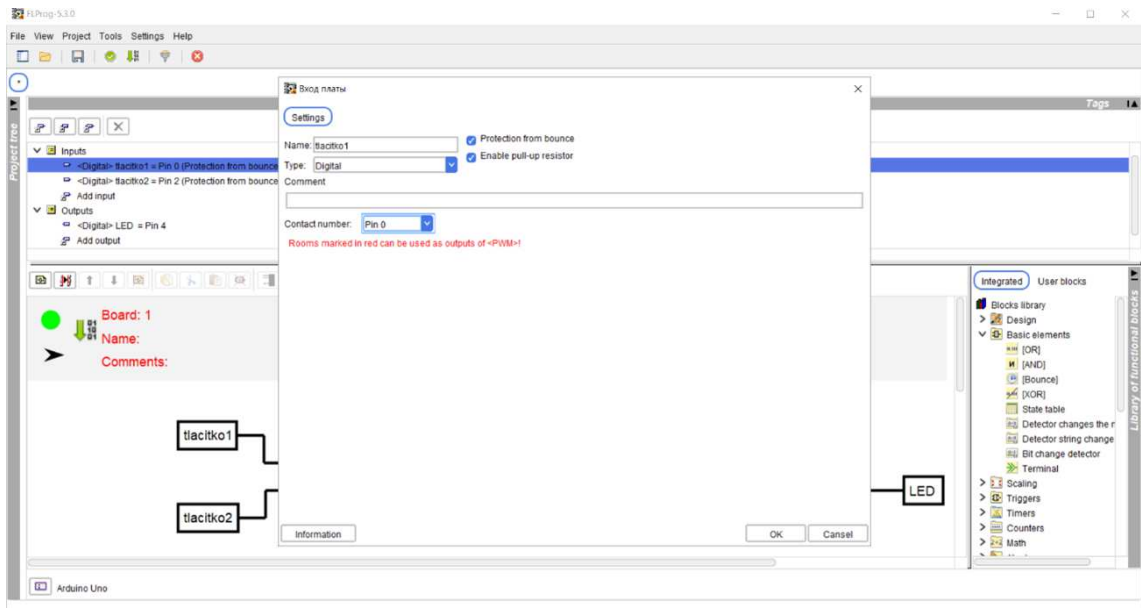
Obrázek 3.43: Logo FLProg



Obrázek 3.44: Logo Arduino IDE

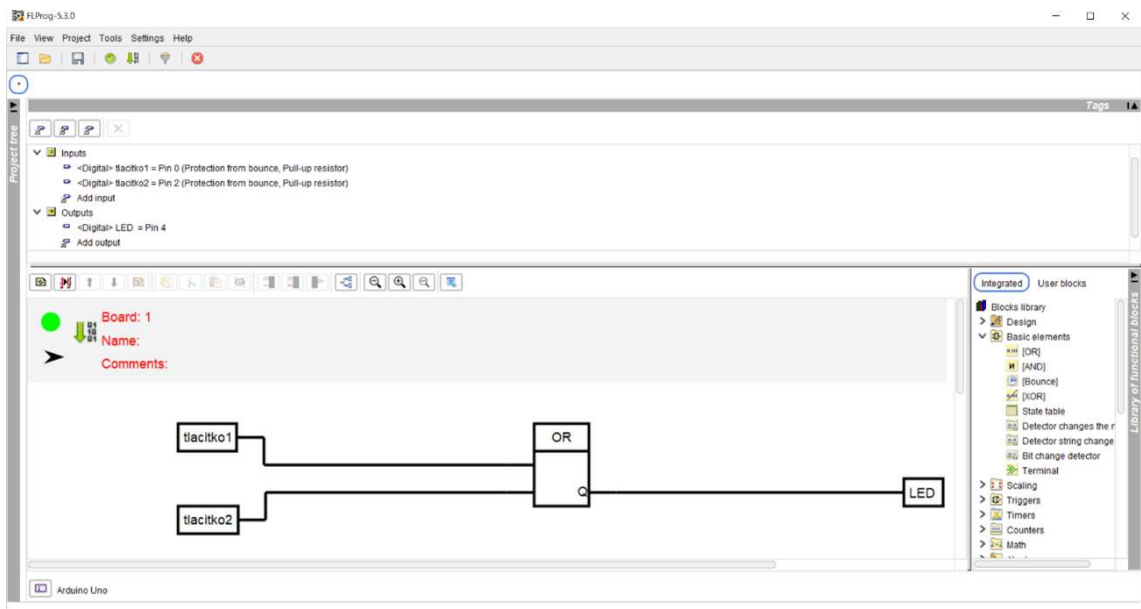
3.10.2 Práce s programem FLProg

Nejdříve je potřeba si v aplikaci vybrat správný mikropočítač, který chceme progamovat, v našem případě Arduino UNO, dále je nutno si definovat potřebné vstupy a výstupy mikroprocesoru, kterým přiřadíme název. U vstupů je možnost použití interních pull-up rezistorů.



Obrázek 3.45: Práce v programu FLProg - definice vstupů a výstupů

Poté se na pracovní plochu vkládají funkční bloky a vytvářejí se elektronické zapojení a různé logiky.



Obrázek 3.46: Práce v programu FLProg - vkládání funkčních bloků na pracovní plochu

Po spojení všech funkčních bloků na pracovní ploše můžeme vykompilovat soubor.

```

pr1 | Arduino 1.8.9
Soubor Úpravy Projekt Nástroje Návěsta
pr1
void setup()
{
  pinMode(0, INPUT_PULLUP);
  pinMode(2, INPUT_PULLUP);
  pinMode(4, OUTPUT);
  _bounceInputD00 = digitalRead(0);
  _bounceInputD00 = digitalRead(2);
}
void loop()
{
  bool _bounceInputTapD0 = (digitalRead(0));
  if (_bounceInputD00)
  {
    if (millis() >= (_bounceInputD00 + 40))
    {
      _bounceInputD00 = _bounceInputTapD0; _bounceInputD00=0;
    }
  }
  else
  {
    if (_bounceInputTapD0 != _bounceInputD00)
    {
      _bounceInputD00=1; _bounceInputD00 = millis();
    }
  }
  bool _bounceInputTapD2 = (digitalRead(2));
  if (_bounceInputD02)
  {
    if (millis() >= (_bounceInputD02 + 40))
    {
      _bounceInputD02 = _bounceInputTapD2; _bounceInputD02=0;
    }
  }
  else
  {
    if (_bounceInputTapD2 != _bounceInputD02)
    {
      _bounceInputD02=1; _bounceInputD02 = millis();
    }
  }
}

//Boards:
digitalWrite(4, (_bounceInputD00 || _bounceInputD02));

```

Informace uložena
 Projekt zabírá 1250 bytů (3k) uložného místa pro program. Maximum je 32236 bytů.
 Globální proměnné zabírají 21 bytů (3k) dynamické paměti, 2027 bytů sčítává pro lokální proměnné. Maximum je 2048 bytů.

Obrázek 3.47: Práce v programu FLProg-kompilace programu do Arduino IDE

Po kompilaci vytvořeného zapojení je vytvořený kód v jazyce C++ v počítačovém softwaru Arduino IDE. Z tohoto softwaru se program nahraje do vývojové desky.

3.10.3 Zvolený způsob regulace

Pro plynulou regulaci komutátorového proudu je zde využita PID regulace. Metoda Ziegler-Nichols byla použita k určení hodnot P, I a D složek. Pomocí této metody se povedlo dostat systém na kritickou frekvenci, čas periody byl zaznamenán a hodnoty byly dopočítány. Nicméně po mnoha testech lodního motoru v provozu se ukázalo, že nastavené hodnoty PID regulátoru nebyly vhodné, protože vypočtené hodnoty se pokaždé lišily kvůli nepříznivým podmínkám, jako je například proud vody nebo vítr, který se opírá o konstrukci pramice a tím plavidlo značně zatíží. Proto byly hodnoty experimentálně upraveny a doladěny přímo na lodi.



Obrázek 3.48: Úprava hodnot PID regulátoru v terénu

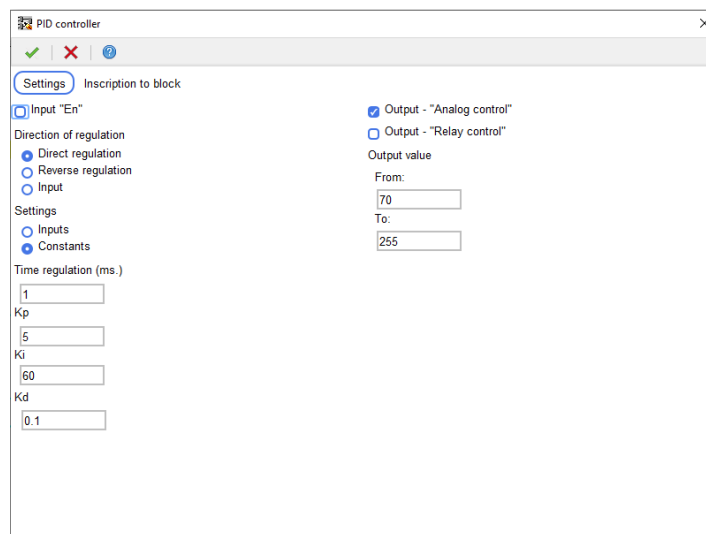
Výsledný průběh regulace buzení rotoru po zatížení lodního šroubu (klesnutí otáček) je vyobrazen na snímku obr. 3.49



Obrázek 3.49: Ustálení budícího proudu rotoru

3.10.4 Hodnoty v PID bloku

V programu FLProg rozklikneme funkční blok s názvem PID, do kterého zapisujeme hodnoty P, I, D. V bloku je také potřeba nastavit čas intervalu regulace. Pro nejrychlejší možnou regulaci v tomto softwaru zvolíme čas 1ms . Dále je možnost nastavit, zda bude výstup řešen pomocí relé obvodu nebo analogového výstupu. Naše regulace využívá výstupu PWM, proto zvolíme "Analog control". Výstupní hodnotu nastavíme jako bytový výstup pro PWM signál od 70 byte do 255 byte. Hodnoty jsou zjištěny z převodní charakteristiky viz. graf 3.41.



Obrázek 3.50: Hodnoty zapsané v PID bloku

3.10.5 Kompletní program ve FLProg

Kompletní program v PC softwaru FLProg včetně komentářů nalezneme v příloze G.

3.10.6 Kompletní program v C++

Příloha H obsahuje kompletní program v programovacím jazyce C++. Program lze pomocí zmíněného počítačového softwaru Arduino IDE nahrát do naší vývojové desky s mikropočítačem ATmega328P.

3.10.7 Testování lodního motoru a doladění programu v řídicí jednotce

Pro správné otestování byl lodní motor namontován a připevněn na rybářskou pramici a spuštěn na řece. Hodnoty PID regulátoru se doladily přímo na místě pomocí přenosného počítače. Motor je tak plně otestován a funguje podle představ. Krátké video na ukázkou funkčnosti lze shlédnout v elektronické příloze s názvem: *Lodni_motor.mp4*

3.11 Krytování a povrchová úprava dílů lodního motoru

Na zakrytí lodního motoru byl z 0,5 mm plechu vytvořen kryt a ten následně vytvarován tmelem podle požadovaných tvarů. Zadní část jsem chtěl více zakulacenou, tak se muselo tmelu použít více a ten následně vybrousit vibrační bruskou. Jako povrchovou úpravu jsem zvolil použití nalepení černé karbonové fólie. Na ovládacím panelu jsou nalepené popisky ovládacích prvků. Při povrchové úpravě krytu lodního motoru nesmíme zapomenout na nálepku firmy VOPSS, která můj projekt podpořila a opatřila mi možnost výroby potřebných dílů.



Obrázek 3.51: Logo firmy VOPSS

Kapitola 4

Vyhodnocení

Po dokončení krytování a estetické upravě lodního motoru je lodní motor v konečné fázi výroby. Dokáže s pramicí o hmotnosti 250 kg včetně posádky dvou členů jet rychlostí až 13 km/h. Použitá baterie LiFePo₄ s nominálním napětím 64 V a kapacitou 18 Ah vydrží plavidlo pohánět cca 2 h, záleží na povětrnostních podmínkách, především odporu vzduchu a hlavně na protiproudu řeky. Teplota motoru lehce přesahuje hranici 60°C.

Otáčky elektromotoru jsou vůči otáčkám lodního šroubu v převodovém poměru. Proto otáčky nezjistíme identifikací počtu pólů z hřídele motoru. Pro změření maximálních otáček lodního šroubu byl tak zvolen způsob využití otáčkoměru UNI-T UT373. Maximální otáčky motoru jsou 2000 Ot/min.

Váha celého lodního motoru činí 16 kg.

Na následujících obrázcích je finální podoba lodního motoru.



Obrázek 4.1: Přední strana lodního motoru



Obrázek 4.2: Ovládací panel loďního motoru



Obrázek 4.3: Sklopná ovládací páka lodního motoru



Obrázek 4.4: Umístění samolepky firmy

Kapitola 5

Závěr

Absolventská práce byla rozsáhlým projektem, který zahrnoval mnoho fází a úkolů. Hlavním cílem bylo předělat alternátor na elektromotor, což byl poměrně náročný úkol, který si vyžádal nejen technické znalosti, ale také značné úsilí a pečlivost. Projekt dále zahrnoval vytvoření a ověření elektroniky lodního motoru, což byla další klíčová oblast, která si vyžádala mnoho práce a úsilí.

První kapitola se věnovala důvodu výběru tématu a stanovení cílů práce, které byly nezbytné pro úspěšné dokončení projektu. V této kapitole bylo také uvedeno, jaké výsledky se očekávají po dokončení projektu.

Druhá kapitola byla věnována potřebné teorii pro realizaci projektu, včetně specifik lodního motoru a jeho historie. Tato kapitola byla velmi důležitá, neboť poskytla základní znalosti, které byly nezbytné pro úspěšnou realizaci projektu.

Ve třetí kapitole byl stanoven postup návrhu, výroby a zprovoznění lodního motoru. Tato kapitola obsahovala mnoho detailů, které byly nutné pro úspěšné dokončení projektu, jako například vystižení potřebných dílů pro samotnou výrobu, diagnostika potřebných komponentů, výroba dílců a nakonec kompletní sestavení lodního motoru.

Čtvrtá kapitola obsahovala zjištěné parametry zkonstruovaného lodního motoru a obrázky finální podoby lodního motoru. Tato kapitola ukázala, jak úspěšným se projekt stal a jak vysokou kvalitu měl konečný produkt.

V přílohách se nachází veškerá dokumentace pro návrh projektu, která byla nezbytná pro jeho úspěšné dokončení. Jednalo se například o schémata, výkresy a zdrojové kódy. Všechny tyto přílohy byly klíčové pro výrobu a ověření lodního motoru.

Celkově lze říci, že tato absolventská práce byla velmi náročným, ale zároveň velmi zajímavým projektem, který přinesl nejen užitečné znalosti, ale také velkou spokojenost z úspěšného dokončení. Úspěšný dokončení projektu bylo spojeno s naplněním stano-

veného cíle. Díky správnému předělání alternátoru na elektromotor, sestavení potřebných součástí lodního motoru, správnému zapojení elektroniky a naprogramování řídicí jednotky, byl dosažen výsledek, kdy je alternátor plně funkční jako elektromotor, který dokáže spolehlivě pohánět lodní šroub a umožnit tak plavidlu pohyb.

5.1 Největší komplikace při výrobě

Během realizace projektu jsem narazil na několik výzev. Jako elektrotechnik jsem se musel věnovat modelování součástek v CAD systému, což mi zabralo mnoho času. Další výzvou bylo doladění PID regulátoru, který jsem musel nastavit na místě, přímo na plavidle. Kvůli různým třecím odporům plavidla způsobeným povětrnostními podmínkami, jsem musel najít optimální hodnoty, při kterých byl lodní motor spolehlivý a účinný.

Literatura

HRŮZA, E. (2019), 'Funkce a komponenty alternátoru', *ALLSTAR TRADING s.r.o.*
p. 1.

URL: <https://obchod.autoelektrika.cz/cs/blog/clanek/funkce-a-komponenty-alternatoru>

JIRÁT, D. (2019), Modelování a analýza BLDC motoru pro pohon sportovního letadla, (Diplomová práce), České vysoké učení technické v Praze, Praha.

KRCH, R. (2019), Řízení BLDC motoru pomocí platformy ST Nucleo, (Bakalářská práce), České vysoké učení technické v Praze, Praha.

PACH, P. (2021), 'Alternátor: jak funguje a jaké jsou jeho nejčastější poruchy', *Autonorma* p. 1.

URL: <https://www.autonorma.cz/blog/post/21-alternator-jak-funguje-a-jake-jsou-jeho-nejcastejsi-poruchy>

ČERNÝ, J. (2015), Mikrokontrolérem řízený regulátor třífázového BLDC motoru, (Diplomová práce), České vysoké učení technické v Praze, Praha.

Příloha A

Obsah přiloženého DVD

K této práci je přiloženo DVD s následující adresářovou strukturou.

- Absolventská práce v \LaTeX 2 ϵ
- Videodokumentace
- Schéma zapojení elektroniky
- Výkresová dokumentace a 3D modely
- Projekt v programu FLProg
- Zdrojový kód pro Arduino IDE
- Bouska_AP_2022_2023.pdf – absolventská práce ve formátu PDF

Příloha B

Použitý software

L^AT_EX 2_ε [⟨http://www.miktex.org/⟩](http://www.miktex.org/)

WinEdt11.0 [⟨https://www.winedt.com/⟩](https://www.winedt.com/)

Solid Edge 2022 [⟨https://solidedge.siemens.com/cs/⟩](https://solidedge.siemens.com/cs/)

FLProg [⟨https://flprog.ru/en/⟩](https://flprog.ru/en/)

Arduino IDE 2.0.3 [⟨https://www.arduino.cc/en/software/⟩](https://www.arduino.cc/en/software/)

KiCad EDA 7.0.2 [⟨https://www.kicad.org/⟩](https://www.kicad.org/)

GIMP 2.10.34 [⟨https://www.gimp.org/⟩](https://www.gimp.org/)

Software z výše uvedeného seznamu je buď volně dostupný, nebo jeho licenci toho času vlastní Vyšší odborná škola, Střední škola, Centrum odborné přípravy, Sezimovo Ústí, Budějovická 421, kde autor téhož času studoval a vytvořil tuto práci.

Příloha C

Časový plán absolventské práce

Činnost	Časová náročnost	Termín ukončení	Splněno
objednávka potřebných komponentů	2 týdny	12.03.2022	10.03.2022
dodání potřebných komponentů	3 týdny	24.04.2022	24.05.2022
návrh a výroba komponentů	3 měsíce	02.08.2022	19.07.2022
předělávka alternátoru na elektromotor	3 měsíce	02.10.2022	26.09.2022
sestavení a zapojení komponentů	2 měsíce	02.11.2022	25.10.2022
programování řídicí jednotky	1 měsíc	02.12.2022	02.04.2023
testování lodního motoru	1 měsíc	05.02.2023	15.04.2023
AP: kapitola Úvod	2 týdny	10.03.2023	09.03.2023
AP: kompletní text	2 měsíce	30.03.2023	20.04.2023

Příloha D

Rozpočet projektu

Následující tabulka uvádí finanční rozpočet modelu zahrnující nákupy jednotlivých součástí a zakázky realizované mimo školu. Ceny jsou uvedeny včetně DPH a obvykle včetně poštovného a balného.

Tabulka D.1: Finanční rozpočet projektu

Komponenta	Kusů	Cena za kus	Cena celkem
Alternátor Valeo 038 903 023 R - použitý	1	200,-	200,-
Sada ložisek na opravu alternátoru	1	180,-	180,-
Spalovací lodní motor s defektem	1	700,-	700,-
BLDC řídicí jednotka	1	856,-	856,-
Step down měnič	1	220,-	220,-
Vývojová deska Arduino UNO	1	325,-	325,-
Indukční snímač Balluff BES02N3 - použitý	1	300,-	300,-
Modul MOSFET	1	42,-	42,-
Modul optočlen	1	37,-	37,-
Ovládací prvky	4	40,-	160,-
Materiál kov	-	-	689,-
Materiál 3D tisk	-	-	250,-
Karbonová folie	-	-	100,-
Vodiče a konektory	-	-	300,-
Celkem	-	-	4 359,-

Pro ilustraci, elektrické lodní motory s podobnými parametry a výkonem se na in-

ternetu obvykle prodávají za cenu okolo 18 000,- Kč a jsou většinou dostupné pouze na objednávku ze zahraničí.

Následující tabulka uvádí hodinový rozpočet práce na výrobě modelu realizované v rámci školy. Tabulka obsahuje zkratky, které znamenají: AP – absolventská práce

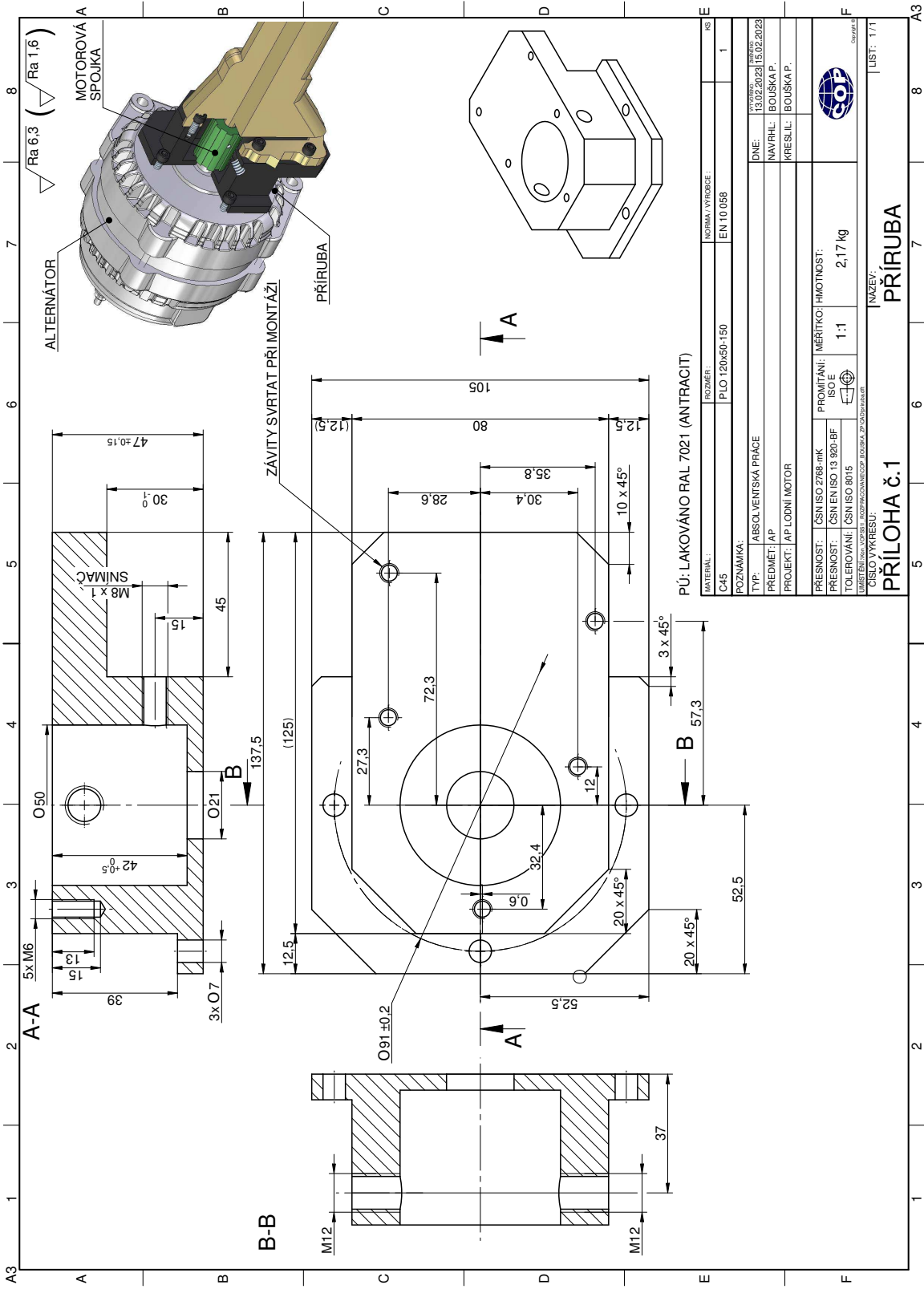
Tabulka D.2: Hodinový rozpočet projektu

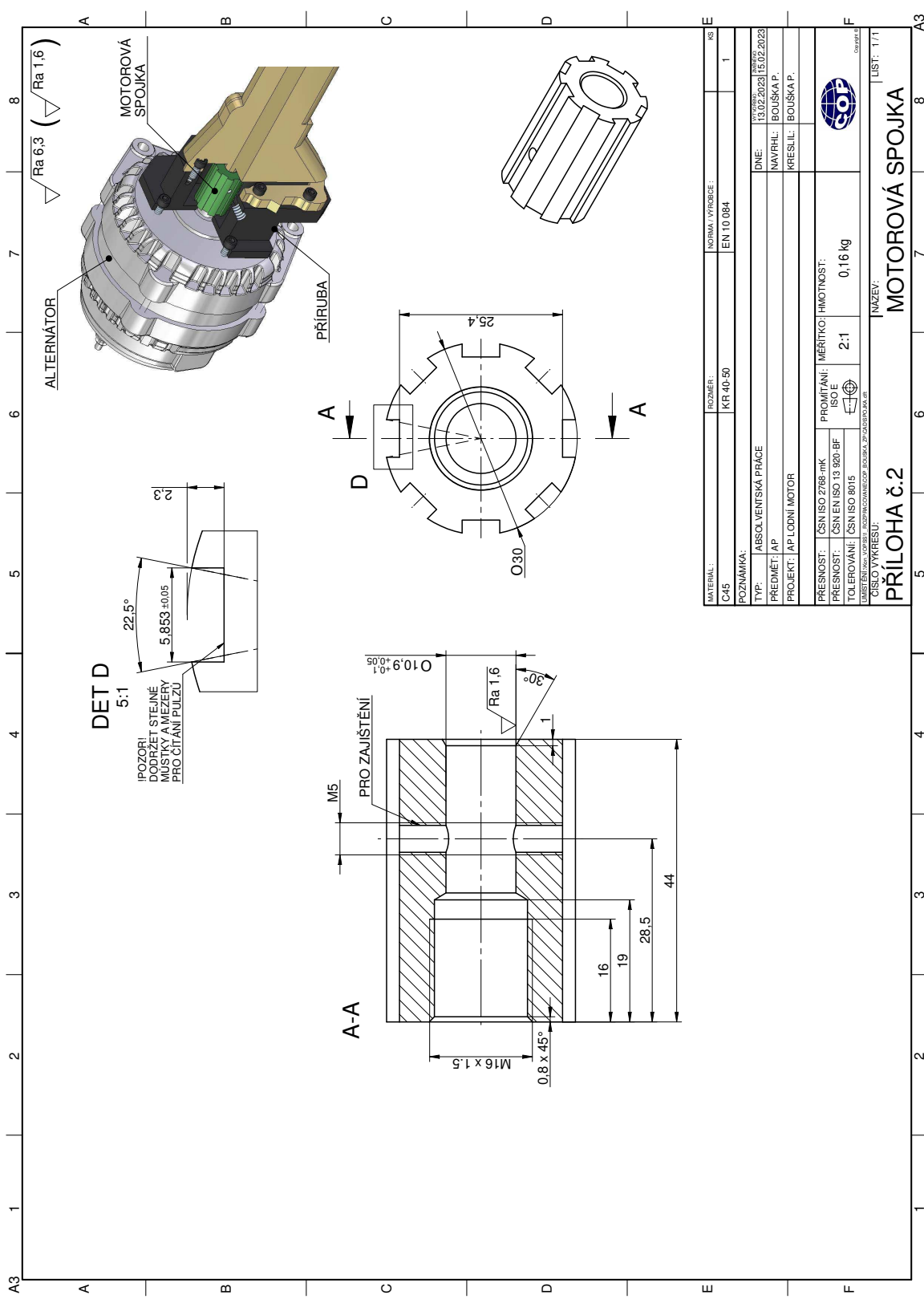
Práce	Člověko- hodin	Pracovník
Vytipování a objednávka dílů	16	autor AP
Přestavba alternátoru	12	autor AP
Test předělaného alternátoru	18	autor AP
Příprava lodní nohy	15	autor AP
Výkresová dokumentace	42	autor AP
Výroba dílů	38	autor AP
Sestavení lodního motoru	30	autor AP
Návrh elektroniky	22	autor AP
Realizace elektroniky	41	autor AP
Programování řídicí jednotky	54	autor AP
Estetická úprava lodního motoru	18	autor AP
Testování funkčnosti lodního motoru	30	autor AP
Text AP	220	autor AP, vedoucí AP
Celkem	556	-

Příloha E

Výkresová dokumentace

Na následujících stránkách je kompletní výkresová dokumentace vytvořená v programovém prostředí Solid Edge. Výkres Příloha č.1 pro součást s názvem PŘÍRUBA je stejně tak jako výkres Příloha č.2 pro součást s názvem MOTOROVÁ SPOJKA ve formátu A3.



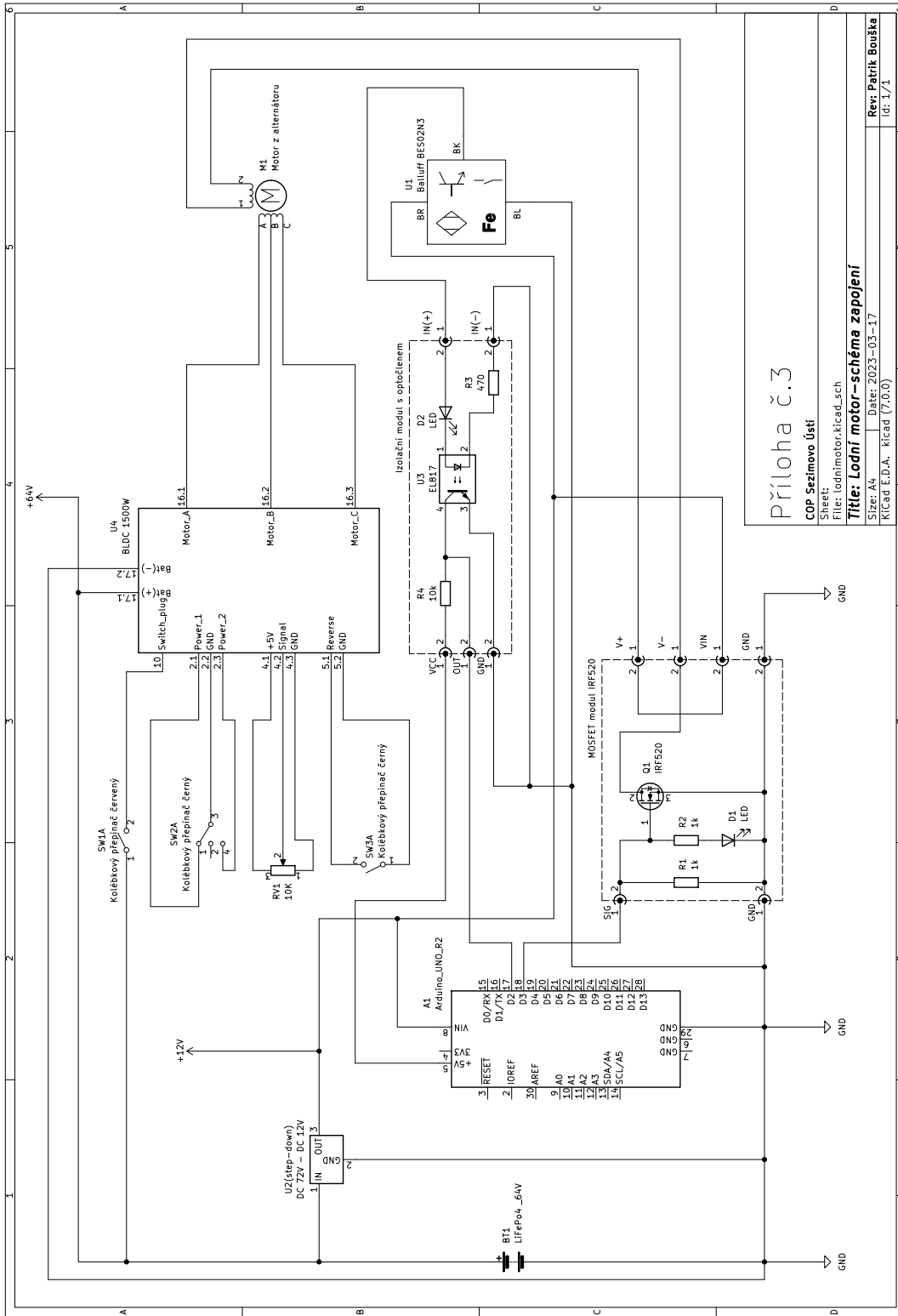


MATERIAL:	ROZMĚR:	NORMA VÝROBCE:	KS
C45	KR 40-50	EN 10 084	1
POZNÁMKA:			
TYP:	ABSOLVENTSKÁ PRÁCE	DNE:	13.02.2023 15.02.2023
PŘEDMĚT:	AP	NAVŘHL:	BOUŠKA P.
PROJEKT:	AP LODNÍ MOTOR	KRESLIL:	BOUŠKA P.
PŘESNOST:	CSN ISO 2768-mK	PROMĚTÁNÍ:	MĚŘITKO HMOTNOST:
TOLEROVÁNÍ:	CSN EN ISO 13 920-BF	ISO E	2:1 0,16 kg
ČÍSLO VÝKRESU:	030	ČÍSLO VÝKRESU:	030
LISTERIA VÝROBIL: ROZVOJNÁKOVOPR. JIŠKA, ZP. ČADCOVSKA 88			
NAZEV: PŘÍLOHA č.2 MOTOROVÁ SPOJKA			
LIST: 1/1			

Příloha F

Schéma zapojení

Následující stránka obsahuje kompletní elektro schéma zapojení lodního motoru vytvořená v programovém prostředí KiCAD EDA.

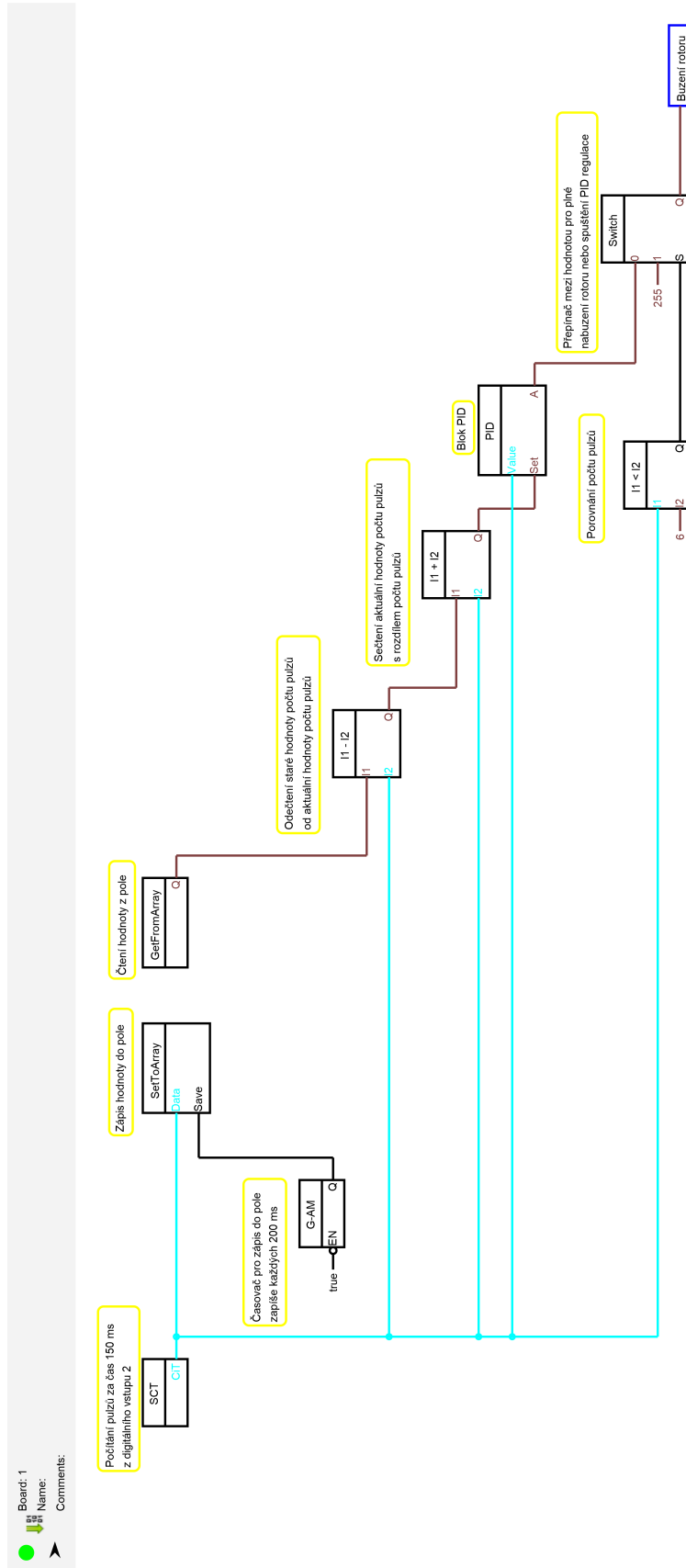


Rev. Patrik Bouška
Idr: 1/1

Příloha G

Zapojení funkčních bloků

Následující stránka obsahuje printscreen obrazovky zapojení funkčních bloků v programovém prostředí FLProg.



Příloha H

Zdrojový kód pro Arduino IDE

```
#include <PID_v1.h>
double _PID_1_Out=0.0;
double _PID_1_SP=0.0;
double _PID_1_In=0.0;
PID _PID_1(&_PID_1_In, &_PID_1_Out, &_PID_1_SP, 5, 60, 0.1, DIRECT);
float _FLPArray151277014[1];
unsigned long _SCT_1 = 0UL;
unsigned long _SCT_1IC = 0UL;
unsigned long _SCT_1P = 0UL;
float _swi1;
bool _gen2I = 0;
bool _gen2O = 0;
unsigned long _gen2P = 0UL;
void setup()
{
  pinMode(2, INPUT);
  _SCT_1P=micros();
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt (2), _SCT_1coutFunction, FALLING);
  _PID_1.SetOutputLimits(70, 255);
  _PID_1.SetMode(AUTOMATIC);
  _PID_1.SetSampleTime(1);
}
void loop()
{
  //Board:1
  if(((micros()-_SCT_1P) >150000)||((micros()-_SCT_1P) <0))
  {
    _SCT_1 = _SCT_1IC;
```

```
_SCT_1IC=0;
_SCT_1P = micros();
}
if (!0)
{
    if (!_gen2I)
    {
        _gen2I = 1;
        _gen20 = 1;
        _gen2P = micros();
    }
}
else
{
    _gen2I = 0 ;
    _gen20= 0;
}
if (_gen2I)
{
    if (_gen20)
    {
        if (_isTimerMicros(_gen2P , 1))
        {
            _gen2P = millis();
            _gen20 = 0;
        }
    }
    else
    {
        if (_isTimer(_gen2P , 200))
        {
            _gen2P = micros();
            _gen20 = 1;
        }
    }
}
if(_gen20)
{
    _FLPArray151277014[0] = _SCT_1;
}
_PID_1_In = _SCT_1;
_PID_1_SP = (((_FLPArray151277014[0]))-(_SCT_1))+(_SCT_1);
```

```
_PID_1.Compute();
if((_SCT_1) < (6.00))
{
    _swi1=255.00;
}
else
{
    _swi1=_PID_1_Out;
}
analogWrite(3, _swi1);
}
bool _isTimer(unsigned long startTime, unsigned long period)
{
    unsigned long currentTime;
    currentTime = millis();
    if (currentTime>= startTime)
    {
        return (currentTime>=(startTime + period));
    }
    else
    {
        return (currentTime >=(4294967295-startTime+period));
    }
}
bool _isTimerMicros(unsigned long startTime, unsigned long period)
{
    unsigned long currentTime;
    currentTime = micros();
    if (currentTime>= startTime)
    {
        return (currentTime>=(startTime + period));
    }
    else
    {
        return (currentTime >=(4294967295-startTime+period));
    }
}
void _SCT_1coutFunction()
{
    _SCT_1IC++;
}
```