

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2021

Bc. Jan Picmaus



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

AKUMULÁTOROVÁ SEKAČKA NA TRÁVU

BATTERY SUPPLIED LAWN MOWER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Picmaus

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

BRNO 2021

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Jan Picmaus

ID: 186556

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Akumulátorová sekačka na trávu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Realizujte silové i řídicí obvody měniče pro pohon sekacího nože.
2. Realizujte silové i řídicí obvody měniče pro pojezd sekačky.
3. Oživte oba měniče s příslušnými motory a podle možností na nich proveďte ověřovací měření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Vorel, P., Patočka M.: Průmyslová elektronika. Skriptum FEKT VUT. 2007
- [2] Erickson, R.W., Maksimovic, D.: Fundamentals of Power Electronics. 2004
- [3] Vorel, P.: Řídicí členy v elektrických pohonech. Skriptum FEKT VUT. 2007

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Práce se zabývá přestavbou konvenční sekačky se spalovacím motorem na sekačku poháňanou elektromotory, které jsou napájen lithiovými články. Rozdělení na tři části, porovnávací, strojní a elektrickou, zajišťuje plynulost samotného návrhu i následné realizace. Kapitoly na sebe navazují tak, aby byla zajištěna kontinuita návrhu. Konkrétní výpočty motorů a převodovky, včetně volby konkrétních kusů, jsou jen jednou z mnoha zajímavostí, které lze v práci nalézt. Všechny nové strojní komponenty mají přiloženou výrobní výkresovou dokumentaci s výjimkou komponent upravovaných přímo při výrobě. Elektrická část detailně popisuje navržená schémata včetně vysvětlení funkcí jednotlivých částí. Realizace se věnuje popisu oprav komponent oproti návrhu, výrobě DPS a oživení měničů. V poslední části se práce věnuje měření oteplení při chodu naprázdno.

KLÍČOVÁ SLOVA

Akumulátorová sekačka, motor, baterie, planetová převodovka, měnič, BLDC, Hallova sonda, řízení, momentová charakteristika, MOS-FET, stabilizátor, tranzistor, třífázový můstek, zdroj

ABSTRACT

The thesis deals with a concept of turning a conventional petrol powered lawn mower to a battery powered solution which is powered by lithium cells. A division to three chapters, comparison, mechanical and electrical, provides fluency of the whole design and further realization. The arrangement of chapters is performed so that the continuity of the thesis is maintained. Calculations of parameters of every motor and transmission with choosing particular devices are just a part of much interesting information which can be found in this thesis. All new components have full documentation except those which were changed during manufacturing. The electrical part explains every part of the schematics in detail. The realization contains difference between preliminary design and further production, manufacturing of the PCB and powering up the motor drives. The last part of the thesis contains temperature measurements of the device at no load.

KEYWORDS

Battery powered lawn mower, motor, battery, planetary gearbox, amplifier, BLDC, Hall sensor, controll, torque characteristics, MOS-FET, stabilizer, transistor, three phase bridge, source

PICMAUS, Jan. *Akumulátorová sekačka na trávu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2021, 83 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Bc. Jan Picmaus
VUT ID autora: 186556
Typ práce: Diplomová práce
Akademický rok: 2020/21
Téma závěrečné práce: Akumulátorová sekačka na trávu

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Pavlu Vorlovi, Ph.D. a panu Ing. Janu Martišovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	12
1 Porovnávací sekačka	13
1.1 Data sekačky LC 247 SP	13
1.1.1 Momentová křivka spalovacího motoru 575EX	13
2 Volba motoru nože	15
2.1 Maximální momentově otáčková charakteristika zvoleného motoru	15
2.1.1 Výpočet maximální momentové charakteristiky motoru nože	16
2.2 Volba momentové charakteristiky motoru nože	16
2.2.1 Výpočet momentové charakteristiky motoru nože	17
3 Volba pojezdu	19
3.1 Volba převodovky pojezdu	20
3.2 Volba motoru pojezdu	20
4 Akumulátor	22
4.1 Výpočet akumulátorové kombinace	22
5 Strojní uspořádání sekačky	24
5.1 Uchycovací deska motoru nože	25
5.2 Hřídel nože	26
5.3 Ložisko hřídele nože	27
5.4 Hřídelové pryžové těsnění s kovovou vložkou	27
5.5 Větrák motoru nože	28
5.6 Spodní uchycovací deska	29
5.7 Kryty motoru nože	29
5.8 Uchycení motoru pojezdu	30
5.9 Řemenový převod pohonu kol	30
5.10 Bateriové bloky	31
6 Řídicí elektronika motoru nože	32
6.1 Napájecí zdroj integrovaných obvodů	32
6.2 Regulace	33
6.3 Hlavní řídicí obvod MC33035DW	34
6.4 Výkonová část	35

7	Řídicí elektronika pojezdu	37
7.1	Řídicí část pojezdu	37
7.2	Výkonová část pojezdu	38
8	Změny designu oproti návrhu	40
8.1	Umístění měničů	40
8.2	Změny strojních dílů	41
8.3	Umístění motoru pojezdu	41
8.4	Bateriové bloky	42
8.5	Změna motoru nože	42
9	Návrh DPS	43
9.1	Návrh desky řízení motoru nože	43
9.2	Návrh výkonové desky nože	43
9.3	Návrh desky pojezdu	44
10	Výroba desek	45
10.1	Výroba řídicí desky motoru nože	45
10.2	Výroba výkonové desky motoru nože	45
10.3	Výroba desky pojezdu	46
11	Oživení měničů	47
11.1	Oživení měniče motoru nože	47
11.2	Oživení měniče pojezdu	47
12	Měření oteplovací charakteristiky	49
12.1	Při minimálních otáčkách motoru	49
12.2	Při maximálních otáčkách motoru	50
	Závěr	52
	Literatura	54
	Seznam symbolů a zkratk	55
	Seznam příloh	59
A	Schémata zapojení DPS	60
A.1	Schéma řídicí desky motoru nože	60
A.2	Schéma výkonové desky motoru nože	61
A.3	Schéma pojezdu	62

B	Návrhy DPS	63
B.1	Řídicí deska motoru nože top layer	63
B.2	Řídicí deska motoru nože bottom layer	64
B.3	Výkonová deska motoru nože top layer	65
B.4	Výkonová deska motoru nože bottom layer	66
B.5	Deska pojezdu top layer	67
B.6	Deska pojezdu bottom layer	68
C	Osazovací desky	69
C.1	Řízení motoru nože top layer	69
C.2	Řízení motoru nože bottom layer	70
C.3	Výkonová část motoru nože top layer	71
C.4	Výkonová část motoru nože bottom layer	72
C.5	Pojezd top layer	73
C.6	Pojezdu bottom layer	74
D	Seznamy součástí	75
D.1	Seznam součástí řízení motoru nože	75
D.2	Seznam součástí výkonové desky motoru nože	78
D.3	Seznam součástí měniče pojezdu	80
E	Fotografie finální verze sekačky	83

Seznam obrázků

1.1	Momentová křivka motoru Briggs & Stratton 575EX [2]	14
2.1	Maximální momentově otáčková charakteristika motoru nože	17
2.2	Zvolená momentově otáčková charakteristika motoru nože	18
3.1	Momentově otáčková charakteristika motoru pojezdu	21
5.1	Model uspořádání sekačky	24
5.2	Uchycovací deska	25
5.3	Hřídel nože	26
5.4	Ložisko 3005-2RS [6]	27
5.5	Hřídelové těsnění	28
5.6	Větrák	28
5.7	Spodní uchycovací deska	29
5.8	Držák morotu kola	30
5.9	Řemenový převod	31
6.1	Napájecí zdroj integrovaných obvodů	32
6.2	Regulace	33
6.3	Hlavní řídicí obvod motoru nože	34
6.4	Výstup N-MOS [8]	34
6.5	Výkonová část	36
7.1	Řídicí část pojezdu	37
7.2	Výkonová část pojezdu	38
8.1	Reálné rozložení sekačky	40
8.2	Reálný spodní kryt	41
12.1	Oteplovací charakteristiky při minimálních otáčkách motoru	49
12.2	Oteplovací charakteristiky při maximálních otáčkách motoru	50

Seznam tabulek

1.1	Technické parametry sekačky LC 247 SP [1]	13
2.1	Parametry motoru Flipsky 80100 [3]	15
2.2	Zvolené parametry charakteristiky motoru nože	16
3.1	Požadavky a důležité parametry pojezdu	19
3.2	Parametry převodovky P522U 22.20 [4]	20
3.3	Parametry motoru BLS043.240 [5]	21
4.1	Parametry zvolených akumulátorů	22
5.1	Rozměry hřídelového těsnění	27
8.1	Parametry motoru APS c80100 [9]	42

Úvod

V dnešní době se ve velkém rozmáhá móda akumulátorových zařízení včetně sekaček na trávu. Akumulátorové sekačky se nejběžněji dodávají s motory o výkonu mezi 0,5 a 1,5 kW. Výrobci sekaček nejčastěji používají vlastní unifikovaný systém akumulátorů, při čemž většina výrobců dává možnost použití dvou akumulátorů pro zvýšení doby sečení (obvykle je možné použít i pouze jeden akumulátor). Akumulátory unifikovaných systémů nebývají dimenzovány pro sekačky, které mají mnohem vyšší spotřebu elektrické energie než například vyžinače nebo nůžky na plot. Obvykle se doba sečení u dnes vyráběných sekaček pohybuje kolem 20 až 40 min.

Nedostatky běžně vyráběných sekaček, jako jsou například nízká doba sečení (malá kapacita akumulátorů), vysoká hmotnost, zpoždění náběhu pojezdu po popotážení dozadu, nemožnost couvání (akumulátorovou sekačku bývá obtížné tlačit nebo táhnout), jsou motivací této práce.

Cílem této práce je odstranění značného množství problémů, které nevyhovují běžnému uživateli akumulátorové sekačky. Dalším cílem je přiblížit lidem možnost využití staré sekačky. Místo likvidace se mohou použít šasi a některé díly (nůž, převod, pojezd) ze staré sekačky pro přestavbu na akumulátorovou sekačku za cenu stejnou nebo nižší, než za kterou by bylo možné koupit novou sekačku.

1 Porovnávací sekačka

Základem pro výrobu akumulátorové sekačky je stará vyřazená sekačka Husqvarna ROYAL 47 S. Sekačka byla poháněna čtyřtákním spalovacím motorem od firmy Briggs & Stratton.

Původní dokumentace k sekačce ROYAL 47S neumožňuje zjištění všech potřebných parametrů pro návrh motoru. Pro porovnání bude použita současná sekačka Husqvarna LC 247 SP, u které jsou dostupné veškeré potřebné informace o motoru.

1.1 Data sekačky LC 247 SP

Specifikace bylo možné sehnat jak u výrobce sekačky v uživatelské příručce, tak u výrobce samotného motoru, který u něj dodává i velice důležitou momentovou křivku.

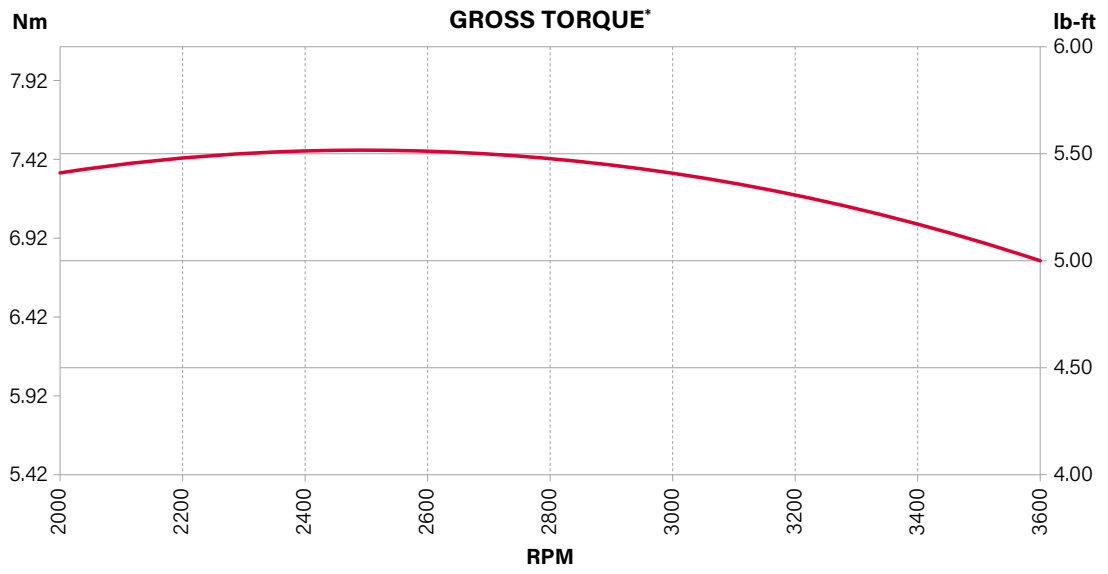
Výrobce motoru	Briggs & Stratton
Typ motoru	575EX
Výkon @2900 RPM	2,1 kW
Objem motoru	140 cm ³
Nominální otáčky	2900 RPM
Rychlost pojezdu	4,5 km/h
Hmotnost	29 kg
Šířka záběru	47 cm
Hladina hluku (LWA)	96 dB(A)

Tab. 1.1: Technické parametry sekačky LC 247 SP [1]

1.1.1 Momentová křivka spalovacího motoru 575EX

Momentová křivka spalovacího motoru je, narozdíl od charakteristiky kteréhokoliv elektrického motoru, nevariabilní. Nedá se vnějšími podněty měnit její tvar (má stálý tvar a konkrétní hodnoty v konkrétních otáčkách).

Jak je možné vidět z charakteristiky (Obr. 1.1), moment spalovacího motoru nabývá maximální hodnoty kolem 2500 RPM, kde přesahuje hodnotu 7,42 Nm. Směrem do nižších otáček zase začíná moment motoru mírně klesat stále s větší strmostí až do nuly (není vidět na charakteristice). Při zvyšování otáček nad 2500 RPM je opět patrné, že moment motoru začíná klesat až k hodnotě kolem 5 Nm při otáčkách 3600 RPM. Jelikož byl motor testován pouze do 3600 RPM, nejsou dostupná data o momentu ve vyšších otáčkách.



Obr. 1.1: Momentová křivka motoru Briggs & Stratton 575EX [2]

2 Volba motoru nože

Jako poháněcí motor nože byl zvolen typ BLDC. Momentová charakteristika tohoto typu motoru se dá posouvat a měnit podle potřeby změnou napětí, proudu a frekvence spínání fází.

Pro návrh pohonu nože byl zvolen motor od firmy Flipsky. Konkrétně byl zvolen motor Flipsky 80100, který má dostatečnou rezervu maximálního momentu oproti požadovanému momentu podle charakteristiky spalovacího motoru (Obr. 1.1). Detailnější parametry tohoto motoru budou zmíněny ještě níže.

Motor se volí podle momentově otáčkové charakteristiky zvoleného porovnávacího spalovacího motoru, který dosahuje hodnoty 7,42 Nm, při lehce zakřivené charakteristice.

2.1 Maximální momentově otáčková charakteristika zvoleného motoru

Momentově otáčková charakteristika vychází ze zvoleného motoru, což jak již bylo zmíněno, je motor Flipsky 80100 o maximálním výkonu 7000 W. Dá se říci, že je potřeba zjistit, jakou momentově otáčkovou charakteristiku motor zvládne.

Maximální napětí je definováno výrobcem jako 14S, což znamená 14 sériově zapojených článků nejčastěji 3,6 V nebo 3,7 V. Vyjádřeno vztahem:

$$U_{max} = 14 \cdot U_{cl} = 14 \cdot 3,6 = 50,4V \quad (2.1)$$

Při návrhu momentově otáčkové charakteristiky se vychází ze známých parametrů motoru:

P_{nmax}	7000 W
I_{nmax}	148 A
U_{nmax}	14S
M_{nmax}	17 Nm
m_n	1,82 kg
k_n	130 RPM/V

Tab. 2.1: Parametry motoru Flipsky 80100 [3]

2.1.1 Výpočet maximální momentové charakteristiky motoru nože

Tato sekce se zabývá návrhem momentové charakteristiky, kterou je motor schopen maximálně zvládnout.

Nejprve je potřeba určit maximální otáčky, kterých je motor schopen dosáhnout. Lze je určit pomocí konstanty otáček motoru na jeden volt a maximálního napětí článků.

$$n_{nmax} = U_{max} \cdot k = 50,4 \cdot 130 = 6552\text{RPM} \quad (2.2)$$

Základním vztahem pro výpočet mechanického výkonu na hřídeli motoru je:

$$P = M \cdot \omega = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} \quad (2.3)$$

Při uvažování maximálního výkonu 7000 W a maximálních otáček 6552 RPM, lze z předešlého vztahu jednoduchou úpravou dojít ke vzorci pro výpočet momentu motoru při maximálních otáčkách.

$$M_{nmaxRPM} = \frac{P_{nmax}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n_{nmax}}{60}} = \frac{7000}{2 \cdot \pi \cdot \frac{6552}{60}} = 10,2\text{Nm} \quad (2.4)$$

Z výpočtu lze vidět, že motor nedosahuje maximálního momentu při maximálních otáčkách. Maximální otáčky, při kterých bude motor dosahovat maximálního momentu, lze spočítat úpravou předešlého vztahu.

$$n_{nmaxM} = \frac{60 \cdot P_{nmax}}{2 \cdot \pi \cdot M_{nmax}} = \frac{60 \cdot 7000}{2 \cdot \pi \cdot 17} = 3932\text{RPM} \quad (2.5)$$

Z tohoto vychází, že se zvyšováním otáček motoru nad 3932 RPM dochází k hyperbolickému snižování momentu, aby byla dodržena podmínka maximálního výkonu 7000 W, který motor zvládne

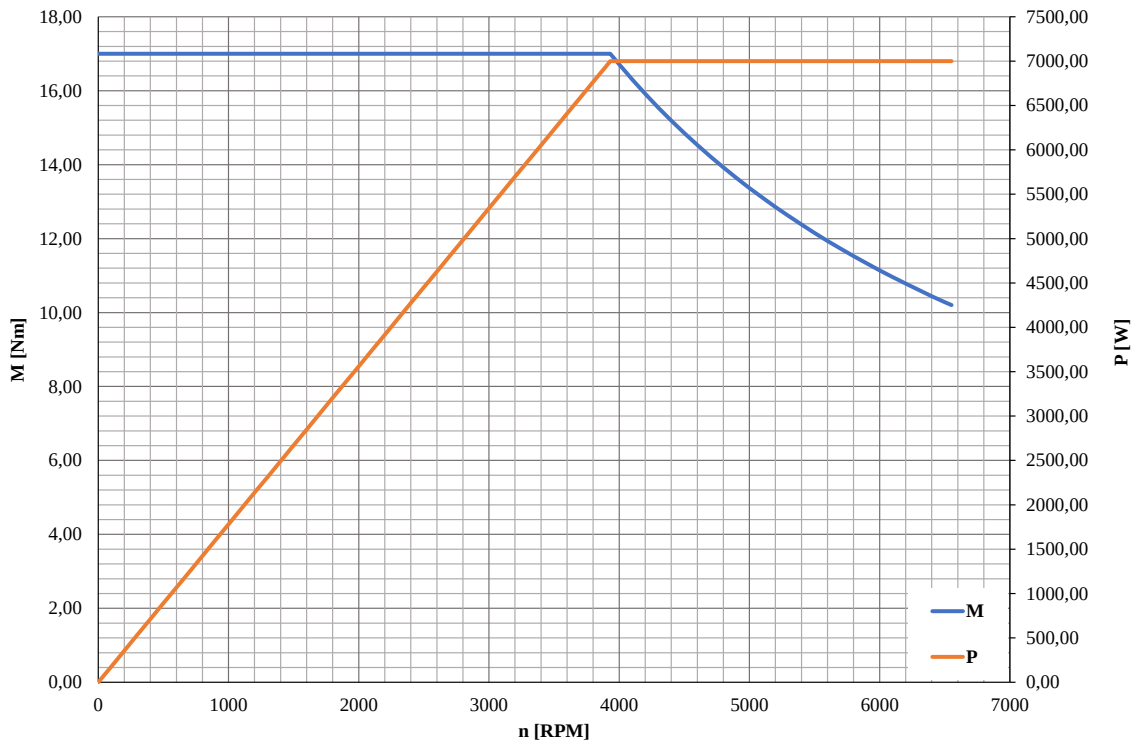
2.2 Volba momentové charakteristiky motoru nože

Následující kapitola se zabývá volbou momentové charakteristiky motoru pro pohon nože sekačky.

Nejprve je nutné určit požadované parametry motoru, aby bylo možné dojít k výsledné momentové charakteristice zařízení.

n_{njm}	3000 RPM
M_{njm}	6,4 Nm

Tab. 2.2: Zvolené parametry charakteristiky motoru nože



Obr. 2.1: Maximální momentově otáčková charakteristika motoru nože

Jmenovité otáčky jsou zvoleny na 3000 RPM, protože veškeré strojní komponenty, které budou zachovány na sekačce, jsou dimenzovány na tyto otáčky. Dalším důvodem volby těchto otáček je zachování aerodynamiky vyhazování usečené trávy do sběrného koše, která by jinými otáčkami mohla být narušena.

Jmenovitý moment motoru nože je zvolen na hodnotu 6,4 Nm, protože porovnávací motor má podle momentové charakteristiky (Obr. 1.1) při 3000 RPM jmenovitý moment kolem 7 Nm. U elektrického motoru se může ve jmenovitém bodě volit nižší moment, neboť s klesajícími otáčkami se oproti spalovacímu motoru moment zvyšuje, a proto pro překonání překážek stačí snížení otáček.

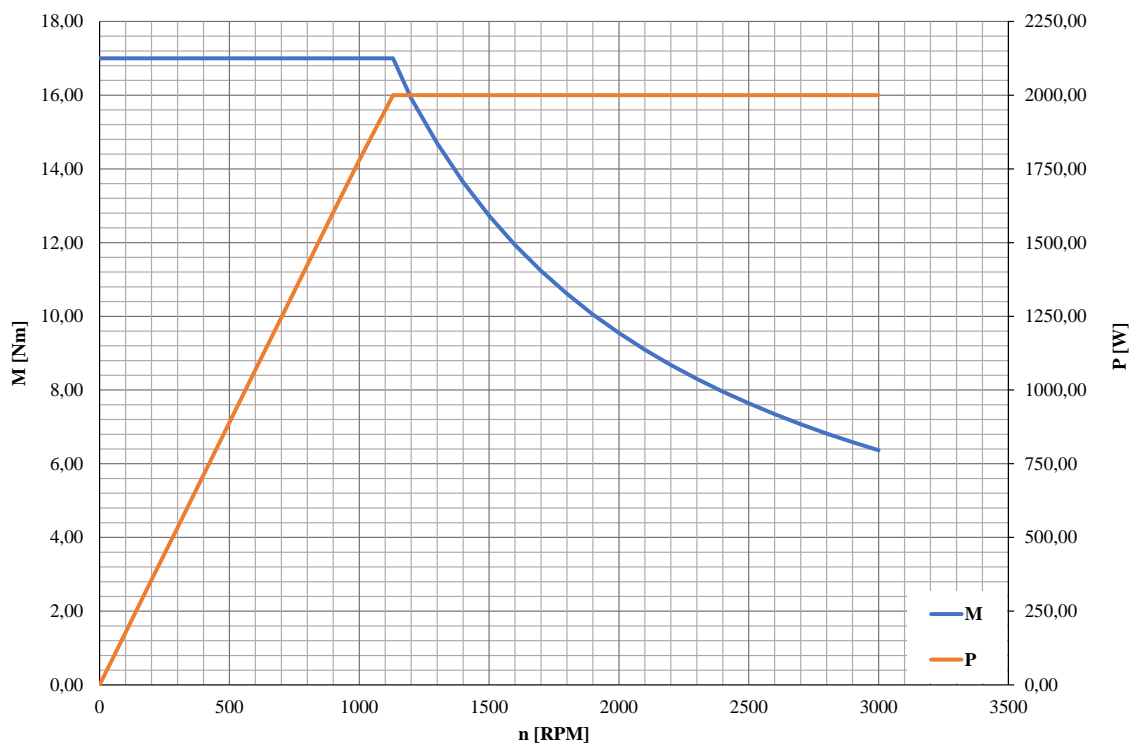
2.2.1 Výpočet momentové charakteristiky motoru nože

Nejprve je potřeba určit maximální výkon, který byl zvolen volbou momentu při jmenovitých otáčkách. Jeho výpočet se provede podle rovnice 2.3.

$$P_{njm} = M_{njm} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_{njm}}{60} = 6,4 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{3000}{60} \approx 2000\text{W} \quad (2.6)$$

Při sestavování momentově otáčkové charakteristiky se vychází ze dvou konstantních oblastí. Je potřeba určit zlomový bod otáček mezi oběma oblastmi (rovnice 2.7).

$$n_{nzl} = n_{njm} \cdot \frac{M_{njm}}{M_{nmax}} = 3000 \cdot \frac{6,37}{17} \approx 1130\text{RPM} \quad (2.7)$$



Obr. 2.2: Zvolená momentově otáčková charakteristika motoru nože

První oblast, v rozsahu otáček 0 až 1130 RPM, se dá nazvat oblast konstantního momentu. Výkon lineárně narůstá až po hodnotu 2000 W, moment je konstantní (19 Nm).

Druhá polovina charakteristiky (1130 až 3000 RPM) se dá nazvat oblastí konstantního výkonu. Moment hyperbolicky klesá až na hodnotu 6,37 Nm při jmenovitých otáčkách 3000 RPM, výkon zůstává konstantní.

3 Volba pojezdu

Pro správný návrh pohonu pojezdu je nejprve potřeba definovat požadavky, které musí pohon bezpodmínečně splňovat. Nejzákladnější požadavky jsou rychlost sekačky a povolené stoupání.

v_{pp}	2 - 5 km/h
φ_{pp}	12°
m_o	35 kg
r_k	100 mm

Tab. 3.1: Požadavky a důležité parametry pojezdu

Z uvedených požadavků a parametrů lze vypočítat minimální moment M_{pp} , který musí motor zvládnout. Pro výpočet momentu je potřeba znát sílu na nakloněné rovině F_g (síla, kterou musí pohon překonat).

Rovnice pro sílu na nakloněné rovině:

$$F_{nr} = F_g \cdot \sin(\varphi_c) = m_o \cdot g \cdot \sin(\varphi_c) \quad (3.1)$$

Rovnice pro minimální moment motoru:

$$M_{pp} = F_{nr} \cdot r_k \quad (3.2)$$

Prostým dosazením rovnice 3.1 do rovnice 3.2 se získá výsledný vztah pro minimální moment motoru.

$$M_{pp} = m_o \cdot g \cdot \sin(\varphi_c) \cdot r_k = 35 \cdot 9,81 \cdot \sin(12^\circ) \cdot 0,1 = 7,1 \text{ Nm} \quad (3.3)$$

Pro výběr motoru je potřeba znát ještě požadované otáčky výstupní hřídele při maximální zvolené rychlosti pojezdu. Otáčky se dají vypočítat z dráhy ujeté za minutu l_{min} a obvodu kola o .

Určení vzdálenosti ujeté za jednu minutu:

$$l_{min} = \frac{v_{pp}}{60} \cdot 1000 = \frac{5}{60} \cdot 1000 = 83,3 \text{ m} \quad (3.4)$$

Obvod kola se vypočítá podle známého vzorce:

$$o = 2 \cdot \pi \cdot r_k = 2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot 10^{-3} = 0,628 \text{ m} \quad (3.5)$$

Pomocí výsledků z rovnic 3.4 a 3.5 se dá spočítat počet otáček za minutu motoru pohonu jednoduchým podílem ujeté vzdálenosti ku obvodu poháněcího kola.

$$n_{kjm} = \frac{l_{min}}{o} = \frac{83,3}{0,628} \approx 133 \text{ RPM} \quad (3.6)$$

3.1 Volba převodovky pojezdu

Pro volbu správné převodovky je nutné správně zvolit převodový poměr (rovnice 3.7). Tento se spočítá jako podíl otáček motoru ku požadovaným otáčkám poháněcího kola. Jmenovité otáčky motoru se předpokládají $n_{pp} = 3000$ RPM.

$$i_p = \frac{n_{pp}}{n_{kjm}} = \frac{3000}{133} = 22,55 \quad (3.7)$$

V tomto okamžiku jsou již známy všechny parametry, které jsou nutné pro určení vhodné převodovky. Jsou to tedy požadovaný moment na výstupní hřídeli M_{pp} a převodový poměr i_p .

n_{1max}	3000 RPM
n_{2max}	135 RPM
$i_{př}$	22,2
M_{2max}	12 Nm
$\eta_{př}$	75%

Tab. 3.2: Parametry převodovky P522U 22.20 [4]

Převodovka je vybírána z katalogu italské firmy TRANSTECNO. Jde o přímou planetovou převodovku. V požadovaném převodu se však převodovka nevyrobí, proto je zvolen nejbližší nižší převodový poměr. Maximální možný moment na výstupní hřídeli M_{2max} se volí nejbližší větší než požadovaný moment na hřídeli M_{pp} .

Převodovka P522U 22.20 plně vyhovuje požadavkům (parametry v Tab. 3.2).

$$n_{2max} = \frac{n_{1max}}{i_p} = \frac{3000}{22,2} = 135\text{RPM} \quad (3.8)$$

3.2 Volba motoru pojezdu

Pro pojezd sekačky byl zvolen běžně vyráběný BLDC motor dodávaný do České republiky firmou RAVEO. Jedná se o motor typu BLS043.240 od italské firmy INTECNO. Základní parametry motoru jsou uvedeny v tabulce 3.3.

Prvním výpočtem je ověření výkonu motoru udávaného výrobcem, který bývá výrobcem měřen a měl by výpočtem vyjít vyšší. Výkon se spočítá podle základní rovnice 2.3.

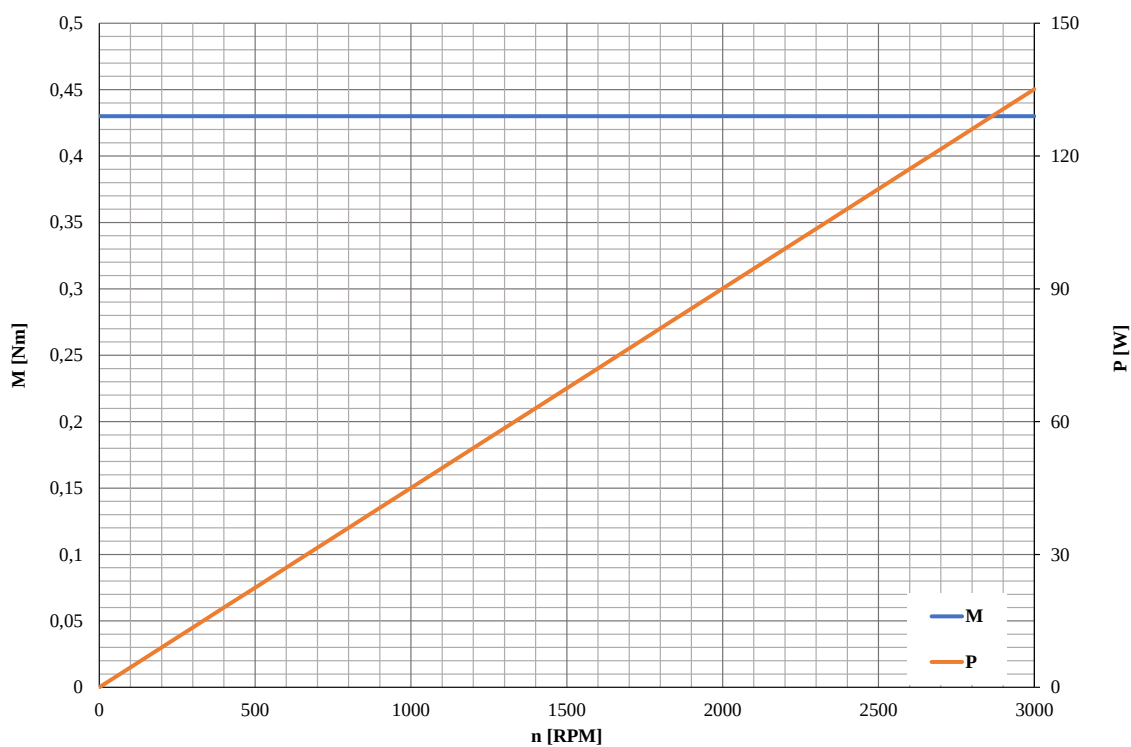
$$P_{pjm} = M_{pjm} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_{pjm}}{60} = 0,43 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{3000}{60} \approx 135\text{W} \quad (3.9)$$

P_{pjm}	130 W
I_{pjm}	6 A
U_{pjm}	24 V
M_{pjm}	0,43 Nm
m_p	1,25 kg
n_{pjm}	3000 RPM

Tab. 3.3: Parametry motoru BLS043.240 [5]

Důvodem, proč vychází výkon na hřídeli výpočtem vyšší, jsou ztráty přenosu výkonu ze statoru na rotor.

Motor pracuje v rozsahu otáček 0 - 3000 RPM. V celém rozsahu otáček dosahuje moment motoru konstantní hodnoty 0,43 Nm. Jak vypadá momentově otáčková charakteristika motoru pojezdu, je možné vidět na obrázku 3.1



Obr. 3.1: Momentově otáčková charakteristika motoru pojezdu

4 Akumulátor

Z mnoha možností a variant akumulátorů byly vybrány Li-Ion válcové články typu 18650 s páskovými vývody. Konkrétní typ článků se jmenuje NCR18650A. Tyto články byly vybrány z důvodu snadné dostupnosti.

U_{cl}	3,6 V
I_{clmax}	4,5 A
cap_{Ah}	3 Ah
l	650 mm
d_c	18,5 mm
m_b	47,5 g

Tab. 4.1: Parametry zvolených akumulátorů

4.1 Výpočet akumulátorové kombinace

Akumulátorová kombinace se navrhuje pouze na motor pro pohon sekacího nože, neboť výkon motoru pojezdu je zanedbatelný v porovnání s motorem nože.

Nejprve je potřeba určit minimální napětí celé kombinace. Toto napětí se určí pomocí konstanty motoru k_n a jmenovitých otáček motoru.

$$U_{batmin} = \frac{n_{njm}}{k_n} = \frac{3000}{130} \approx 23V \quad (4.1)$$

Z toho vychází vztah pro výpočet minimálního počtu sériově zapojených článků. Při výpočtu je potřeba mít na mysli, že tohoto napětí se musí dosáhnout i při vybitých člancích. Napětí vybitého článku U_{clmin} je 3 V.

$$n_s = \frac{U_{batmin}}{U_{clmin}} = \frac{23}{3} = 7,67 \quad (4.2)$$

Z rovnice 4.2 vychází, že pro splnění napěťové podmínky je potřeba použít minimálně 8 článků zapojených sériově. Jelikož se příslušenství pro nabíjení 7 článků zapojených sériově nachází na fakultě, bylo použito pouze 7 článků v sérii. Tímto se sice sníží i otáčky motoru, ale zase ne o tolik, aby to způsobilo potíže.

Reálné minimální napětí kombinace je tedy:

$$U_{batmin} = 7 \cdot U_{clmin} = 7 \cdot 3 = 21V \quad (4.3)$$

Z rovnice 4.3 se vypočítají skutečné jmenovité otáčky motoru.

$$n_{njm} = U_{batmin} \cdot k_n = 21 \cdot 130 = 2730RPM \quad (4.4)$$

Dále je potřeba určit minimální počet paralelně spojených článků pro dodržení podmínky maximálního proudu motoru nože. Tento proud se určí z výkonu vypočítaného v rovnici 2.6, účinnosti systému a minimálního napětí sériově spojených článků. Účinnost systému se uvažuje 90 %.

$$I_{batmax} = \frac{P_{njm}}{\eta \cdot U_{batmin}} = \frac{2000}{0,9 \cdot 21} = 105,8\text{A} \quad (4.5)$$

Z tabulky hodnot článků (Tab. 4.1) je vidět maximální možný proud odebíraný z jednoho článku. Z toho tedy lze jednoduchou úvahou zjistit, kolik článků je potřeba spojit paralelně pro splnění podmínky maximálního proudu.

$$n_p = \frac{I_{batmax}}{I_{clmax}} = \frac{105,8}{4,5} = 23,51 \quad (4.6)$$

Pro splnění maximálního proudového odběru motoru nože je potřeba použít 24 článků zapojených paralelně. Bylo použito 21 článků, neboť není nutné rozbíhat motor plným proudem. V zásadě to znamená, že se zmenší maximální moment, který umí motor vyvinout. To však není problém z důvodu velké momentové rezervy.

Výsledná kombinace splňující minimální požadavky bude vypadat následovně. Půjde o 7 sériově spojených bloků, kde každý blok bude obsahovat 21 článků spojených paralelně. Celkový počet článků se tedy určí jako součin počtu článků paralelně a počtu bloků spojených sériově.

$$n_{cl} = n_p \cdot n_s = 21 \cdot 7 = 147 \quad (4.7)$$

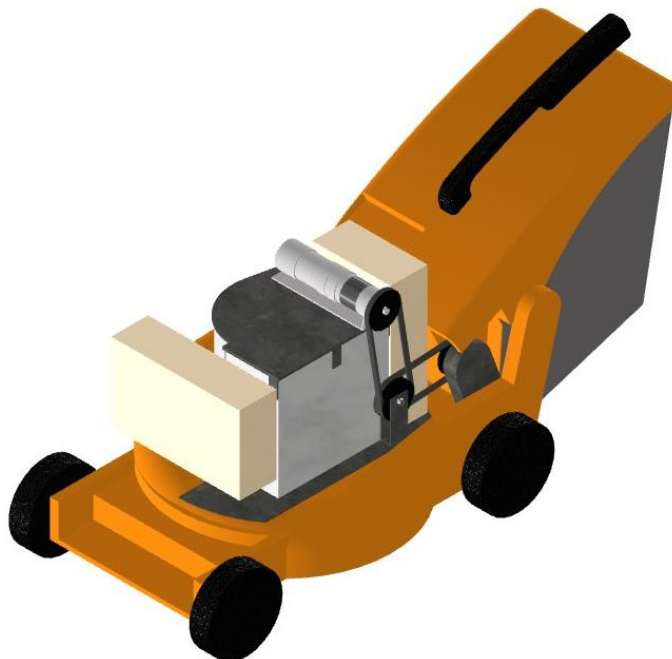
Z parametrů článků (Tab. 4.1) se dá jednoduchým výpočtem přepočítat kapacitu jednoho článku z Ah do Wh.

$$cap_{Wh} = cap_{Ah} \cdot U_{cl} = 3 \cdot 3,6 = 10,8\text{Wh} \quad (4.8)$$

Z těchto parametrů lze určit celkovou kapacitu akumulátorové kombinace součinem počtu akumulátorů a kapacity článku (kapacita musí být přepočítána do Wh) podle následující rovnice.

$$cap_{batWh} = cap_{Wh} \cdot n_{cl} = 10,8 \cdot 147 \approx 1600\text{Wh} \quad (4.9)$$

5 Strojní uspořádání sekačky



Obr. 5.1: Model uspořádání sekačky

Sekačka je vyráběna ze staré sériově vyráběné sekačky, která byla poháněna spalovacím motorem. Záměna spalovacího motoru za elektrický vyžaduje mnoho jednotlivých úprav na šasi sekačky. Všechny úpravy jsou provedeny pro možnost uchycení všech nových mechanismů:

- Uchycovací deska motoru nože
- Hřídel nože
- Ložisko hřídele nože
- Hřídelové pryžové těsnění s kovovou vložkou
- Větrák motoru nože
- Kryty motoru nože
- Spodní uchycovací deska
- Uchycení motoru pojezdu
- Řemenový převod pohonu kol
- Bateriové bloky

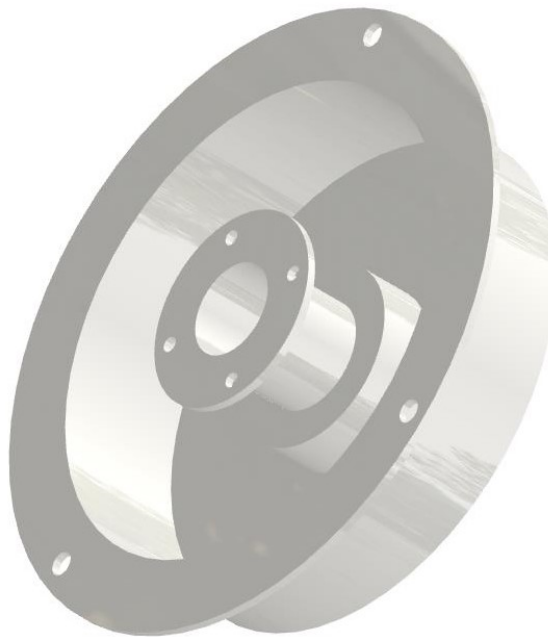
Jak je vidět, je to opravdu velké množství strojních úprav sekačky. Většinu z nich provedl autor práce sám. Jde o jednoduché návrhy, které mohou být realizovány kýmkoliv se základními znalostmi strojírenství a návrhových programů. Výkresy všech strojních částí jsou uvedeny v příloženém souboru. Sekačka byla navrhována

v prostředí programu Autodesk Inventor. Jde o profesionální návrhový program vyšší třídy, kdy se provádí návrhy 3D součástí pomocí základních 2D náčrtů. Jednotlivé díly mohou být skládány do sestav a pak mohou být vytvářeny výkresy jak sestav tak jednotlivých součástí

Všechny součásti jsou navrhovány na míru pro konkrétní sekačku a konkrétní účel. Znamená to, že každý z dílů je originál vyrobený na zakázku, což zvyšuje cenu. Většina těchto součástí lze vyrobit v domácím prostředí pomocí základních strojů.

Původní a normalizované díly nemají přiloženou výkresovou dokumentaci, neboť výkresová dokumentace již byla vytvořena. Vytvoření výkresů pomocí reverzního inženýrství bez použití 3D scanneru se zanedbatelnou odchylkou není možné. Je zcela zbytečné vytvářet již vytvořenou dokumentaci, která je vlastnictvím firmy vyrábějící danou součást (šasi, ložisko, gufero, šrouby).

5.1 Uchycovací deska motoru nože



Obr. 5.2: Uchycovací deska

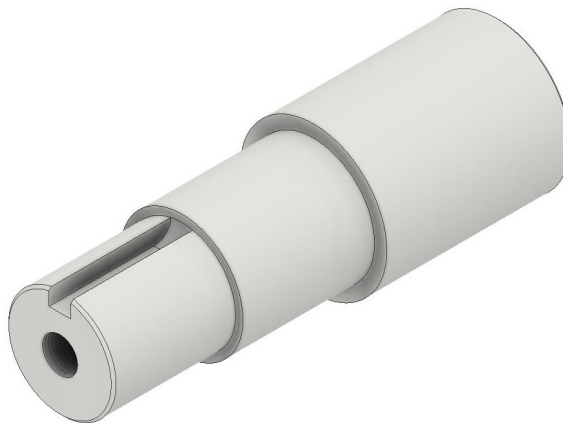
Uchycovací deska motoru nože je složena ze tří částí (Deska, Domeček, Domeček kryt). Každá z částí je navržena pro jednoduchost výroby a instalace. Části Deska a Domeček jsou svařeny dohromady pro zachování souososti. Poslední část (Domeček kryt) je přišroubována ke svařenému dílu z částí Domeček a Deska. Tento kryt slouží jako ukotvení ložiska a jeho těsnění.

Uchycovací deska slouží jako hlavní upevňovací prvek motoru nože, ložiska a gufera. Hloubka desky je nastavena, tak aby nůž dosahoval původní výšky v šasi sekačky ROYAL 47 S.

Součást Deska je vyrobena ze tří kusů plechů svařených dohromady, aby byla výroba jednodušší. Plech použitý pro výrobu má tloušťku 3 mm a materiál plechu je ocel 11 353.

Součást Domeček je soustružena z jednoho kusu materiálu o průměru 70 mm. Součást Domeček kryt je vyrobena pomocí laserového řezání z důvodu sousosti s dílem Domeček.

5.2 Hřídel nože



Obr. 5.3: Hřídel nože

Hřídel nože je vyrobena z jednoho kusu materiálu o průměru 30 mm. Hřídel je dvakrát osoustružena na nižší průměr aby seděla do ložiska a do původního uchycení nože sekačky. Horní strana hřídele má vyvrtanou díru s drážkou pro pero, aby bylo možné vložit zvolený poháněcí motor (Flipsky 80100).

Na nejmenším vnějším průměru je vyfrézována atypická drážka pro pero, neboť původní díl není vyroben podle ČSN. Prakticky to znamená, že nelze použít normalizované pero (bylo použito původní z ROYAL 47 S).

Hřídel je součástí přenášející poháněcí moment motoru na sekací nůž a je zvolena takového tvaru, aby byla co nejjednodušší výroba a byly splněny všechny požadované parametry. Jako materiál hřídele je zvolena ocel 11 500, která je pro takto nízký moment (7 Nm) při zvoleném průměru hřídele naprosto dostačující.

5.3 Ložisko hřídele nože

Velice důležitou součástí mechanismu nože je ložisko, ve kterém se otáčí hřídel. Ložisko slouží ke snížení tření mezi hřídelí a uchycovací deskou.

Je důležité zvolit bezúdržbové a ideálně prachotěsné ložisko. Tyto předpoklady vylučují použití kluzného ložiska a všech otevřených valivých ložisek.

Ložisko není nutné nijak speciálně dimenzovat na axiální síly, neboť nese prakticky pouze hmotnost nože. Není tedy potřeba použít radiálně-axiální ložisko (např. kuželíkové ložisko).

Velké radiální síly na ložisko nejsou předpokládány, avšak může docházet k silnému dynamickému namáhání. Z tohoto důvodu je potřeba zvolit tvrzené kuličkové ložisko.



Obr. 5.4: Ložisko 3005-2RS [6]

Bylo zvoleno normalizované kuličkové ložisko se zakrytými boky typu 3005-2RS. Jde o dvouřadé ložisko z obou stran zakryté pryžovým těsněním. Dvouřadé ložisko nebylo zvoleno z důvodu radiálního namáhání, ale proto, aby bylo zamezeno kývání hřídele. Použití dvou jednořadých ložisek by mělo stejný efekt, avšak poháněcí motor nože by byl usazen příliš vysoko.

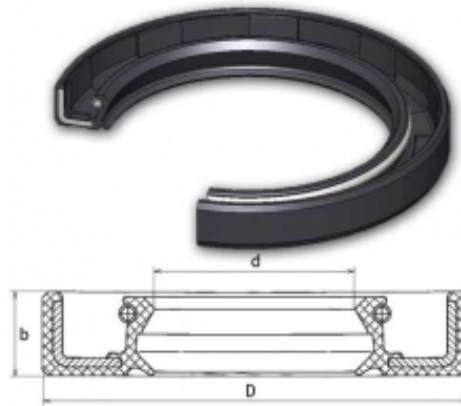
5.4 Hřídelové pryžové těsnění s kovovou vložkou

d	24 mm
D	47 mm
b	7 mm

Tab. 5.1: Rozměry hřídelového těsnění

Přídavné těsnění umístěné pod ložiskem směrem k noži je použito z důvodu absolutního zamezení vnikání prachu do ložiska a k poháněcímu motoru.

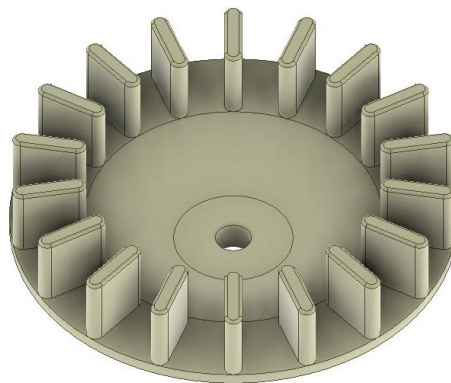
Jedná se o normalizované hřídelové těsnění ČSN 02 9401 - G - 24x47x7 - NBR. Rozměry podle obrázku 5.5 jsou uvedeny v tabulce 5.1.



Obr. 5.5: Hřídelové těsnění

Zamezení vnikání prachu do prostoru motoru a ložiska je nezbytné. Pokud by došlo ke vnikání prachu do prostoru ložiska, mohlo by dojít k rychlému zvyšování opotřebování ložiska nebo až k jeho zadření. Zadřené ložisko by vyžadovalo výměnu, která by byla obtížná z důvodu, že je ložisko zalisováno.

5.5 Větrák motoru nože



Obr. 5.6: Větrák

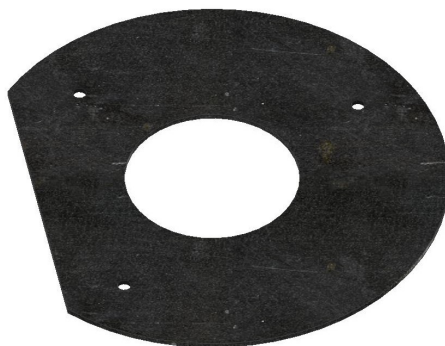
Větrák je navržen pro výrobu na 3D tiskárně. Tvar je zvolen podle standardních větráků určených pro připevnění na hřídeli. Je vyroben z polyetylenu pro 3D tisk standardní kvality.

Je jím zajištěna alespoň nějaká cirkulace vzduchu kolem motoru, čímž dojde ke značnému zlepšení chlazení, neboť uvažováno chlazení skrze stěny krytu bez přívodu venkovního vzduchu k motoru.

Bez větráku by docházelo k mnohem významnějšímu zahřívání motoru nože a mohlo by dojít až k úplnému přehřátí a natavení izolace vodičů na statoru.

5.6 Spodní uchycovací deska

Spodní uchycovací deska je umístěna zespodu jako protikus k uchycovací desce motoru nože. Je vyrobena z plechu tloušťky 3 mm. Materiál plechu je zvolen stejný jako u uchycovací desky motoru nože, tedy ocel 11 353. Jako technologie bylo zvoleno laserové řezání na profesionálním zařízení.



Obr. 5.7: Spodní uchycovací deska

Deska slouží hlavně ke zpevnění plastové konstrukce šasi původní sekačky. Sekundární činností této desky je zamezení přímého pronikání prachu průduchy v šasi původní sekačky, kde tyto průduchy sloužily jako chlazení spalovacího motoru.

5.7 Kryty motoru nože

Celé zakrytí motoru nože se skládá reálně ze tří částí (Spodní kryt, Kryt motoru, Kryt motoru víko). Tyto díly jsou spojeny šrouby. Na výkresech dílů nejsou zobrazena místa k sešroubování dílů dohromady, protože z důvodu praktičnosti je jednodušší vrtat díry současně. Tím je zajištěna přesnost děr pro šrouby na obou dílech.

Spodní kryt je, stejně jako u uchycovacích desek, vyroben z plechu o tloušťce 3 mm ze stejného materiálu (ocel 11 353). Spodní kryt je vyroben technologií svařování a laserového řezání opět ve vystouplých místech.

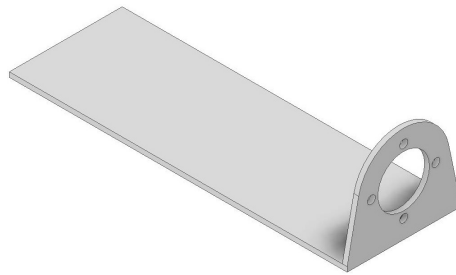
Kryt motoru je vyroben z hliníkového plechu o síle 1 mm. Bylo by možné využít i leteckého duralu kvůli vyšší pevnosti materiálu, avšak nakonec byl zvolen obyčejný

technický hliník z důvodu výrazně nižší ceny. Jelikož svařování hliníku je velmi obtížné, byla zvolena metoda ohýbání plechu s následovným nýtováním švu, kde se překrývají dva konce ohýbaného plechu.

Součástí kryt motoru víko je vyroben opět z technického hliníku. Tentokrát jde o kusový hliník, do kterého byla vyfrézována drážka s vybráním uprostřed. Drážka by eventuálně mohla sloužit jako prostor pro těsnění mezi panely krytů. Vybrání uprostřed je zvoleno z důvodu odlehčení dílu, aby celková hmotnost sekačky nedosahovala zbytečně velké hodnoty.

Kryty motoru nože primárně slouží k zamezení vnikání prachu k motoru. Prach v motoru by mohl způsobit zkrat ve vinutí nebo problémy s ložiskem (popsáno v kapitole 5.4). Sekundární funkcí krytů motoru nože je uchycení motoru pojezdu.

5.8 Uchycení motoru pojezdu



Obr. 5.8: Držák motoru kola

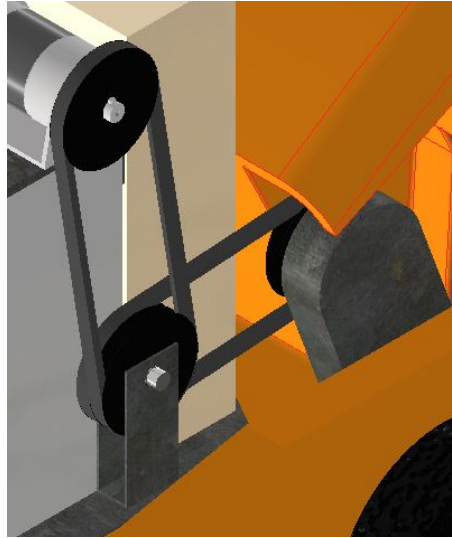
K uchycení motoru pojezdu slouží Držák motoru kola. Tento držák je umístěn na horní straně dílu Kryt motoru víko. Díry pro sešroubování obou dílů nejsou na výkresech uvedeny z důvodu praktičnosti, kdy je jednodušší svrtávat díly naráz, případně použít šrouby typu TEX, které mají na špičce integrovaný vrták. Držák motoru je vyroben z ohnutého plechu o síle 2 mm z oceli 11 353.

Samotný držák je doplněn uchycovací plechovou páskou, která bude držet druhý konec motoru pojezdu, který není přišroubován k držáku.

5.9 Řemenový převod pohonu kol

Umístění motoru pojezdu bylo celkem obtížné s ohledem na to, že koncový převod se musí pohybovat nahoru a dolů. Z tohoto důvodu byl zvolen dvojitý převod s jednou řemenicí navíc, než by teoreticky musela být. Na původně zamýšleném místě se motor délkově nevešel, neboť s převodovkou měří skoro 40 cm. Jelikož byl požadavek

na to, aby byla sekačka vyrobena s pojezdem, byl tedy zvolen nejjednodušší způsob, který nezahrnoval žádné přídatné modifikace původního šasi.



Obr. 5.9: Řemenový převod

Jednotlivé řemenice jsou vyrobeny z pertinaxu. Dvojitá a jednoduchá řemenice na motoru pojezdu jsou navrhovány zvlášť.

Řemeny jsou oproti ROYAL 47 S použity dva. Řemen umístěný u motoru pojezdu byl zvolen typu 10x600 Li 620 Lw a druhý řemen typu 10x438 Li Z 460. Primárně byly řemeny voleny tak, aby seděly do řemenic, a hlavně, aby měly správnou délku. Řemeny jsou zvoleny jako prosté klínové bez ozubení, neboť řemenice ozubených řemenů jsou finančně náročné.

K řemenovému převodu neodmyslitelně patří i držák dvojitě řemenice s čepem. Tento držák je vyroben z ocelového plechu materiálu 11 353 technologií laserového řezání a dvojitým ohnutím na ohraňovacím lisu.

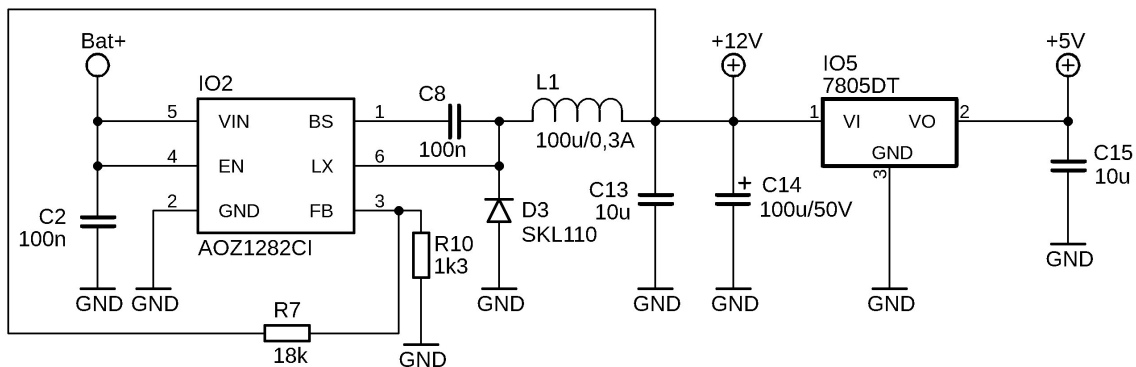
5.10 Bateriové bloky

Na sekačce jsou umístěny dva bateriové bloky. Krabice na články je vyrobena z plechu tloušťky 1,5 mm. Rozměry a složení lze vidět v příložené dokumentaci. Je možné vyrobit krabici přímo na míru na 3D tiskárně nebo vybrat nějakou již vyráběnou, která se bude hodit svými rozměry a pevnostními parametry.

6 Řídicí elektronika motoru nože

Řídicí elektronika nože se skládá z několika v podstatě samostatných bloků, kde každý plní specifickou funkci ve schématu. Schéma je rozděleno na dvě desky (Příloha A.1 a A.2). Propojení desek je popsáno v kapitole 9.1. Hodnoty součástek, konkrétní typy a pouzdra jsou uvedeny v seznamu součástek (Příloha D.1). V seznamu jsou uvedeny také konkrétní informace o jaké součástky se jedná.

6.1 Napájecí zdroj integrovaných obvodů



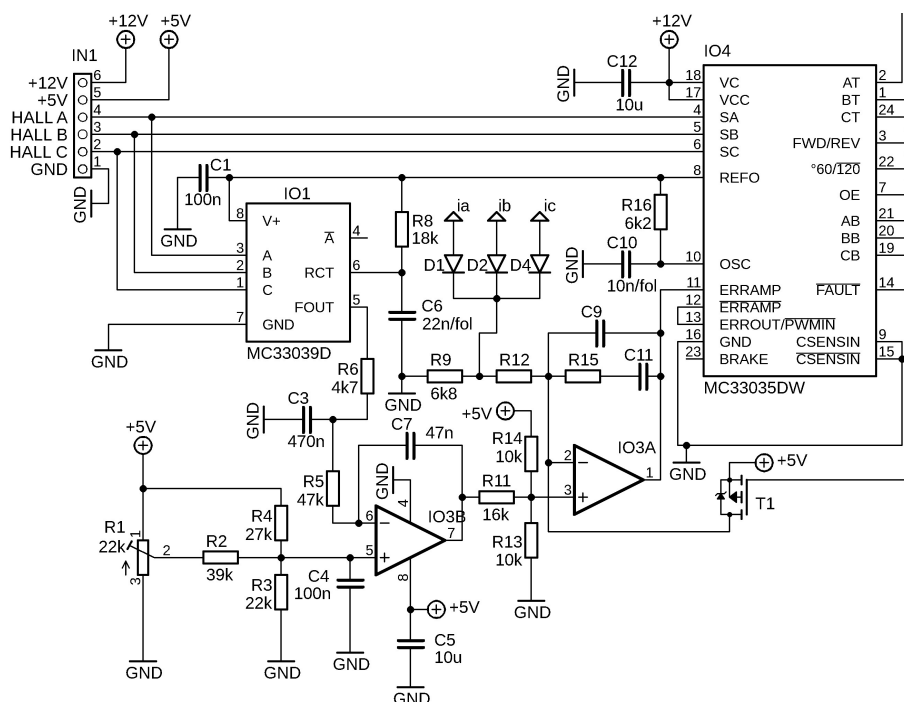
Obr. 6.1: Napájecí zdroj integrovaných obvodů

Jedná se o část celého obvodu, který napájí zbylé integrované obvody požadovaným napětím. Napájení zdroje je zajištěno z přívodu *BAT+*, který napájí spínaný DC/DC měnič (*IO2*). Výstupní napětí měniče *IO2* se nastavuje pomocí děliče napětí *R7*, *R10*. Je nastaveno na hodnotu 12 V. Kondenzátor *C2* slouží jako blokovací k obvodu *IO2*. Na výstupu měniče *IO2* je nastaven LC filtr, který se skládá z SMD cívky *L1* a elektrolytického kondenzátoru *C13*. *D3* je nulová dioda snižujícího měniče. Pro zachování stejné funkce jako má měnič *IO2*, by stačil i jednodušší a levnější stabilizátor typu 7812, ale spínaný měnič byl zvolen záměrně z důvodu výrazně nižšího ztrátového výkonu oproti stabilizátoru 7812.

Jelikož se v celkovém schématu nachází také integrované obvody, které je potřeba napájet 5 V, je nutné vložit za měnič *IO2* ještě stabilizátor typu 7805 (*IO5*). V tomto případě již není nutné používat spínaný měnič, neboť celkový proudový odběr součástek, které jsou napájeny z 5 V, je velmi malý, proto nebude na *IO5* vznikat velký ztrátový výkon.

6.2 Regulace

Regulační struktura je kaskádní. Skládá se z hlavní otáčkové smyčky s podřízenou proudovou smyčkou. Regulační struktura získává hodnoty ze čtyř integrovaných obvodů, jde o převodník otáček z Hallových sond motoru (*IO1*) a tři proudové senzory (*IO9*, *IO10*, *IO11*).



Obr. 6.2: Regulace

Převodník *IO1* (MC33039D) převádí společně s filtrem *R6* a *C3*, obdélníkový signál z Hallových sond motoru na spojitý.

Na neinvertující vstup regulátoru otáček *IO3B* je přivedena požadovaná hodnota otáček. Ta se nastaví pomocí trimru *R1*. Aby bylo dosaženo vyšší citlivosti nastavování otáček, jsou před neinvertující vstup regulátoru otáček *IO3B* připojeny rezistory *R2*, *R3* a *R4*, které jsou zapojeny jako děliče napětí. Kondenzátor *C4* slouží k odfiltrování rušení.

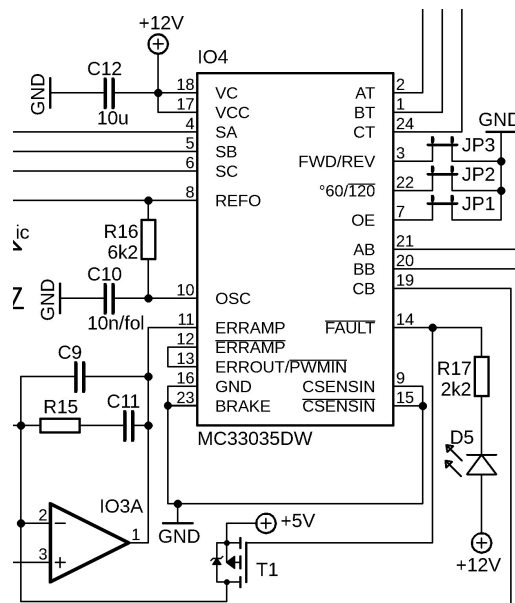
Samotný regulátor otáček *IO3B* je zvolen typu I. Kondenzátorem *C7* se dá nastavovat zesílení I složky regulátoru.

Podřízený proudový regulátor *IO3A* má na neinvertující vstup přiveden signál z otáčkového regulátoru *IO3B*. Signál prochází přes napěťové děliče vytvořené z rezistorů *R11*, *R13* a *R14*, které signál upravují, aby se pohyboval okolo hodnoty 2,5 V. Na invertující vstup *IO3A* je přiveden signál z čidel proudu *IO9*, *IO10*, *IO11*. Diody *D1*, *D2*, *D4* slouží k výběru aktivního čidla. Znamená to, že se v propustném směru nachází pouze dioda, která je připojena k čidlu proudu, kterým prochází

největší proud. Rezistor $R9$ slouží jako pulldown odpor. Rezistor $R12$ je součástí PI regulátoru proudu $IO3A$ (vstupní rezistor). V tomto místě se vyžaduje nulová ustálená odchylka a rychlá odezva na jednotkový skok. U regulátoru proudu $IO3A$ je zaveden ještě bezpečnostní prvek ve formě tranzistoru $T1$, který při vyhodnocení chyby hlavním řídicím obvodem $IO4$ okamžitě zvýší napětí na invertujícím vstupu regulátoru $IO3A$ a výstup regulátoru se změní na hodnotu 0 V.

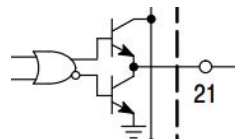
6.3 Hlavní řídicí obvod MC33035DW

Základní funkcí řídicího integrovaného obvodu $IO4$ je vytváření PWM signálu pro řízení tranzistorů třífázového můstku.



Obr. 6.3: Hlavní řídicí obvod motoru nože

Výstupy 2 , 1 a 24 zajišťují spínání P-MOS tranzistorů. Je zajištěno vnitřními NPN tranzistory, které mají emitor spojený s pinem 16 (se záporným pólem baterie). Kolektor je spojen s výstupními piny 2 , 1 a 24 .



Obr. 6.4: Výstup N-MOS [8]

Výstupy 21 , 20 a 19 zajišťují spínání N-MOS tranzistorů. Spínání zajišťují dva interní NPN tranzistory podle obrázku 6.4. Toto zapojení platí pro všechny tři vý-

stupy 21, 20 a 19. Kolektor horního integrovaného tranzistoru je připojen na napájecí napětí integrovaného obvodu 12 V. Gate tranzistorů je připojen na dvojitý výstup obvodu MC33035DW (Obr. 6.4).

Mimo hlavních výstupů má řídicí obvod i mnoho nastavovacích vstupů a nějaké výstupy, které slouží pro dodatečné funkce nebo nastavování parametrů.

Na pinech 3, 22 a 7 jsou připojeny jumpery *JP1*, *JP2* a *JP3* pro diskretní nastavení konkrétních hodnot, které jsou běžné pro BLDC motory. Jumper *JP1* plní funkci přepínání směru otáčení motoru, tedy mění pořadí spínání hlavních výstupů. Jumper *JP2* slouží jako informace, jestli jsou Hallové sondy v BLDC motoru rozmístěny po 60° nebo po 120°. Pomocí jumperu *JP3* se v tomto zapojení ovládá zapínání a vypínání motoru nože. Je zde umístěn proto, aby při testování bylo možné snadno zapínat a vypínat motor podle potřeby.

Výstup 14 slouží jako signalizace chyby, selhání v řídicím obvodu, podpětí, úmyslného vypnutí motoru nebo nouzové zastavení při nestandardním vybočení vstupních hodnot. Na tento výstup je připojena i LED dioda *D5* jako signalizace chyby. Je zde také připojen tranzistor *T1*, jehož funkce je popsána v kapitole 6.2. Pokud svítí LED dioda jsou všechny MOS tranzistory rozepnuty.

Na vstupy 4, 5 a 6 jsou přivedeny signály z Hallových sond motoru, které dávají řídicímu obvodu informaci o poloze rotoru.

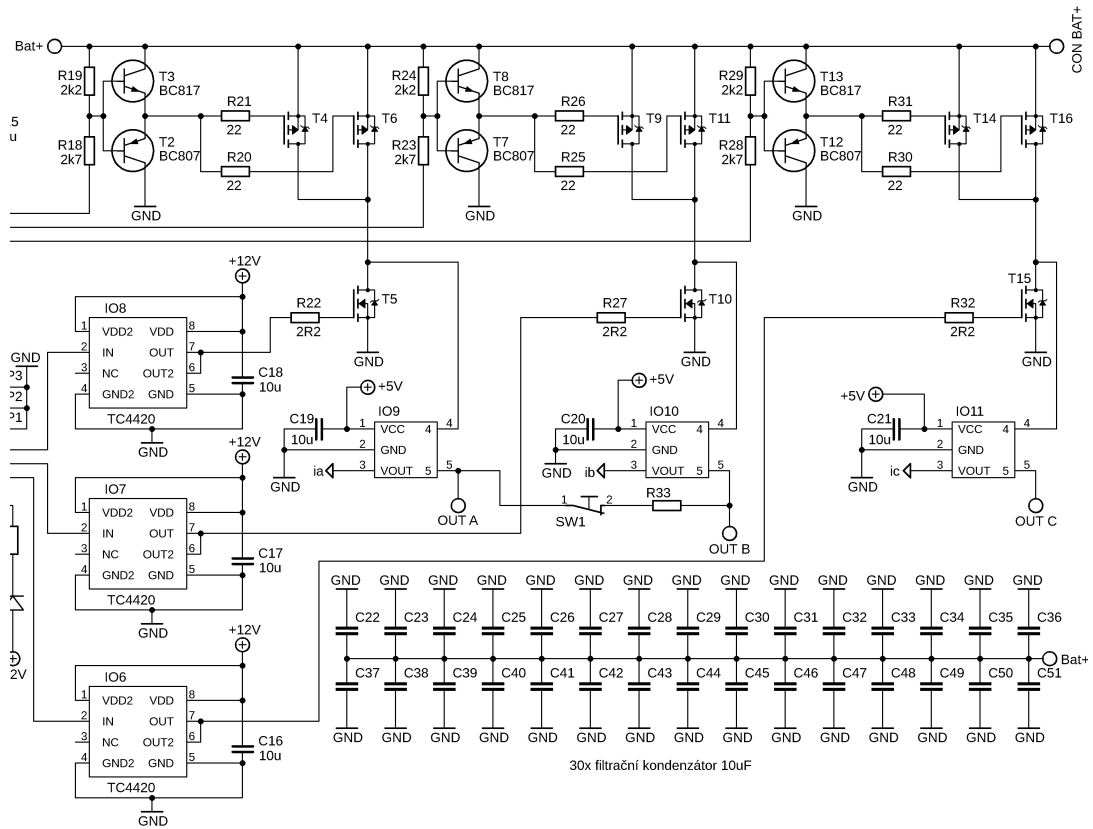
Výstup 8 je vnitřní reference obvodu MC33035DW, která má hodnotu napětí 6,25 V. Slouží také jako napájení integrovaného obvodu *IO1*.

6.4 Výkonová část

Výkonovou částí se rozumí část obvodu, která je v bezprostředním kontaktu s vinutím motoru. Jde o standardní 3f-můstek. Hlavní výkonové prvky jsou rozděleny do tří větví. Každá větev obsahuje Hallův senzor proudu (ACS758ECB-200B), budiče výkonových tranzistorů a samotné výkonové MOS-FET tranzistory. Těsně u výkonových tranzistorů jsou příslušné blokovací kondenzátory (*C22* až *C51*).

Zvolený Hallův senzor proudu má jmenovitý proud ± 200 A. Napětí na výstupu 3 se v intervalu -200 A až 0 A pohybuje v rozmezí 0 V až 2,5 V a v intervalu 0 A až 200 A v rozmezí 2,5 V až 5 V. Měří proud procházející přímo od výkonových tranzistorů do statorového vinutí motoru. Signál z čidla proudu je přiveden na invertující vstup regulátoru proudu, kde je vyhodnocován.

Budič slouží ke spínání výkonových MOS-FET tranzistorů a jako proudové posílení spínacího signálu pomocí vnějšího zdroje. V zapojení jsou přítomny dva typy budičů unipolárních tranzistorů, prostý tranzistorový budič (v první větvi reprezentován rezistory *R18*, *R19* a tranzistory *T2* BC807, *T3* BC817) a elektronický budič (reprezentován integrovaným obvodem *IO8*). Pro spínání tranzistorů P-MOS stačí



Obr. 6.5: Výkonová část

prostý tranzistorový budič, protože spíná pouze na nízké frekvenci (asi 100 Hz). Pro spínání tranzistorů N-MOS byl zvolen elektronický budič TC4420 (IO8), který je velmi rychlý, neboť tyto tranzistory spínají na frekvenci jednotek až desítek kHz. Tranzistory N-MOS zajišťují řídicí PWM motoru.

Výkonový tranzistor na spodní větvi (T5) je typu N-MOS. Je zvolen tranzistor IRFP7718 s maximálním napětím mezi drainem a sourcem $U_{DSmax} = 75 \text{ V}$ a maximálním trvalým proudem drainem $I_{Dmax} = 195 \text{ A}$.

Výkonové tranzistory, které jsou na horní větvi (T4 a T6) jsou typu P-MOS. Zde jsou zvoleny tranzistory IXTH140P10T o maximálním napětí $U_{DSmax} = 100 \text{ V}$ a maximálním trvalém proudem drainem $I_{Dmax} = 140 \text{ A}$.

Důvodem, proč jsou na horní větvi dva tranzistory a ve spodní pouze jeden, je odpor tranzistoru v sepnutém stavu R_{DSon} . U tranzistoru N-MOS (T5) je odpor $R_{DSon} = 1 \text{ m}\Omega$, kdežto u tranzistorů P-MOS (T4 a T6) je odpor $R_{DSon} = 9 \text{ m}\Omega$. Spojením dvou MOS-FET tranzistorů paralelně se tento odpor sníží na polovinu za předpokladu, že jsou oba tranzistory stejné. Tranzistory jsou umístěny na hliníkovém chladiči proto, aby byl zajištěn dostatečný odvod tepla, které vzniká v důsledku ztrátového výkonu, způsobeného odporem v sepnutém stavu R_{DSon} a přepínacími ztrátami tranzistorů.

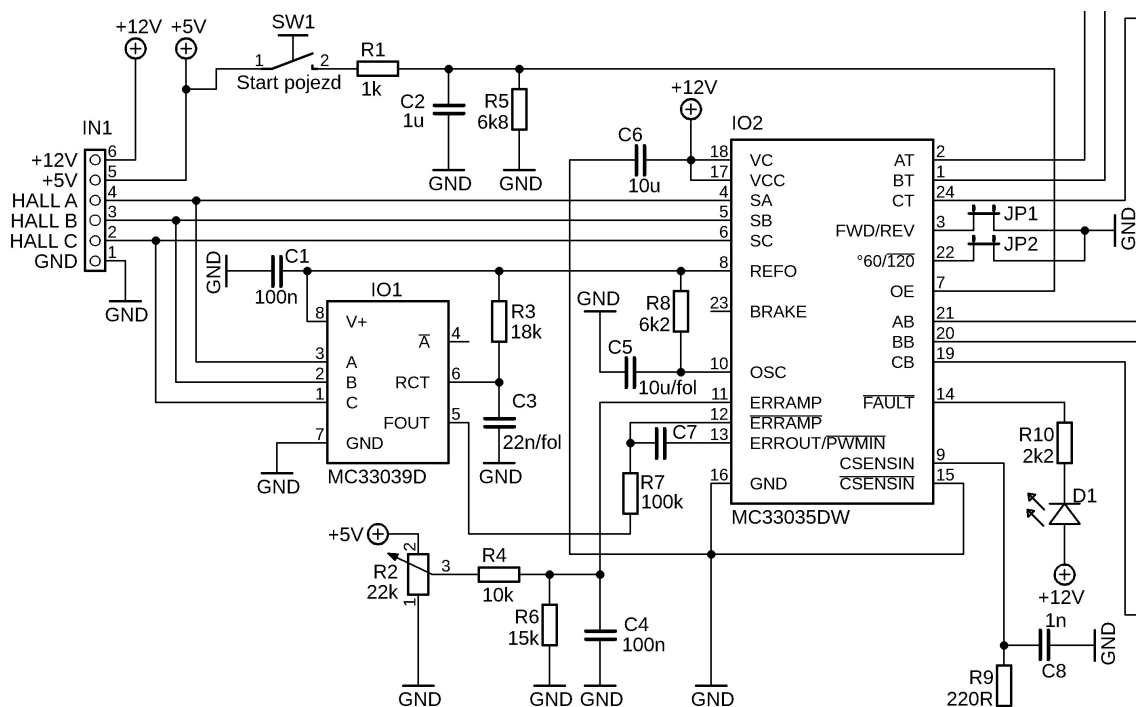
7 Řídicí elektronika pojezdu

Kompletní schéma řízení pojezdu (včetně výkonové části), osazovací desku i samotný návrh desky je možné vidět v příloze A.3. Schéma je rozděleno na dvě základní části, na část řídicí a část výkonovou. Seznam součástek se nachází v přílohách (příloha D.3). Napájení integrovaných obvodů 5 V a 12 V je zajištěno zdrojem uvedeným v kapitole 6.1.

7.1 Řídicí část pojezdu

Schéma řídicí části je možné vidět na obrázku 7.1. Základem řízení pojezdu jsou dva integrované obvody *IO1* a *IO2*.

Integrovaný obvod *IO1* (MC33039D) plní stejnou funkci jako je vysvětleno v kapitole 6.2, pouze s malým rozdílem, kdy není předáván signál z pinu 5 otáčkovému regulátoru, ale udává skutečnou hodnotu otáček hlavnímu řídicímu obvodu *IO2* (MC33035DW).



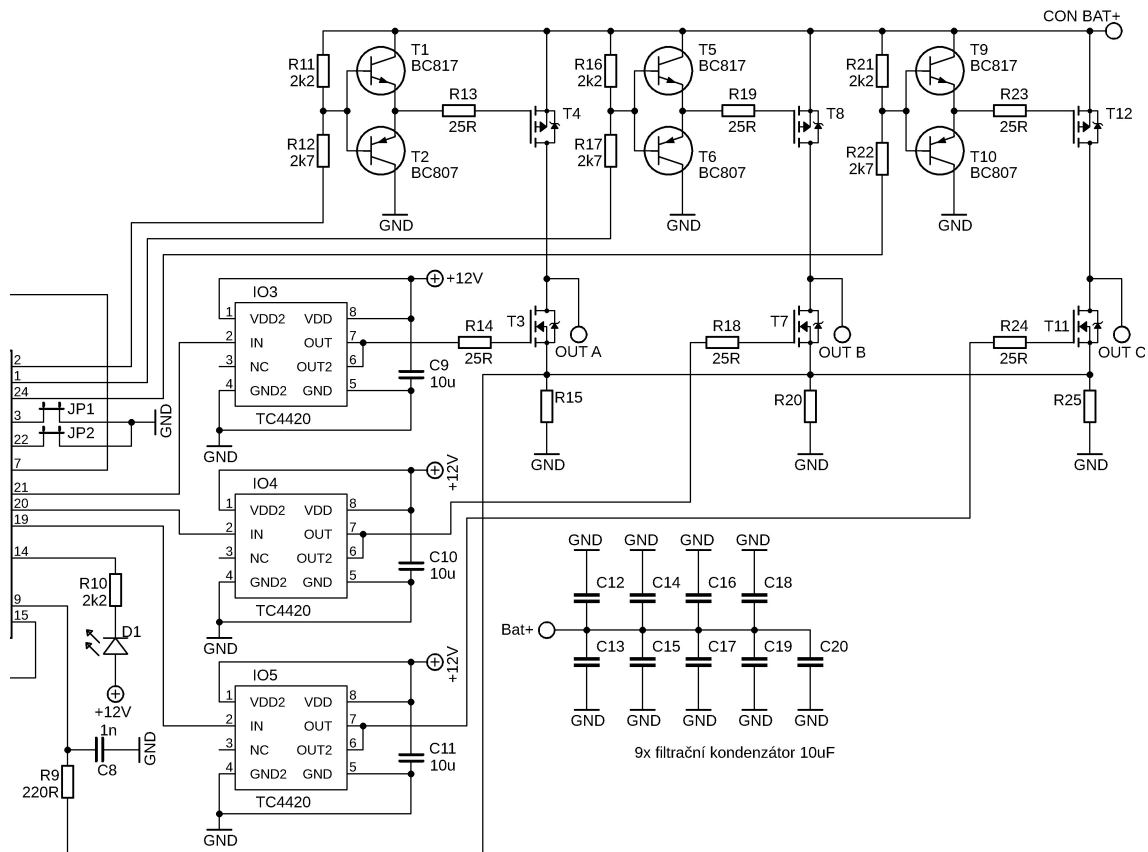
Obr. 7.1: Řídicí část pojezdu

Potenciometr *R2* slouží k nastavení otáček motoru pojezdu. Je umístěn na horní straně řídicí desky pro snadnou úpravu rychlosti pojezdu za provozu. Kondenzátor *C4* filtruje vysokofrekvenční rušení.

Jelikož je hlavní řídicí obvod *IO2* (MC33035DW) stejný jako v kapitole 6.3, funguje jeho ověšení stejně. Označení jednotlivých součástek se liší. Jumper *JP1* plní funkci přepínání směru otáčení motoru pojezdu a jumper *JP2* udává informaci o tom, po jakých úhlech (60° nebo 120°) jsou rozprostřeny Hallovy sondy v motoru, snímající polohu rotoru a rychlost otáčení motoru pojezdu. Hlavním rozdílem je, že oproti tomu, co bylo vysvětleno v kapitolách 6.2 a 6.3, je jinak řešeno přivedení signálu z čidla reálného proudu řídicímu obvodu *IO2*. Ochrana proti přetížení je řešena datasheetovým zapojením a připojením na pin 9.

Spouštění motoru pojezdu (Obr. 7.1) je zajištěno spínačem *SW1*. Rezistor *R5* slouží jako pull down odpor.

7.2 Výkonová část pojezdu



Obr. 7.2: Výkonová část pojezdu

Již podle celkového vzhledu výkonové části pojezdu (Obr. 7.2) se dá odhadnout, že funkce je stejná jako u elektroniky motoru pohánějící nůž podle kapitoly 6.4.

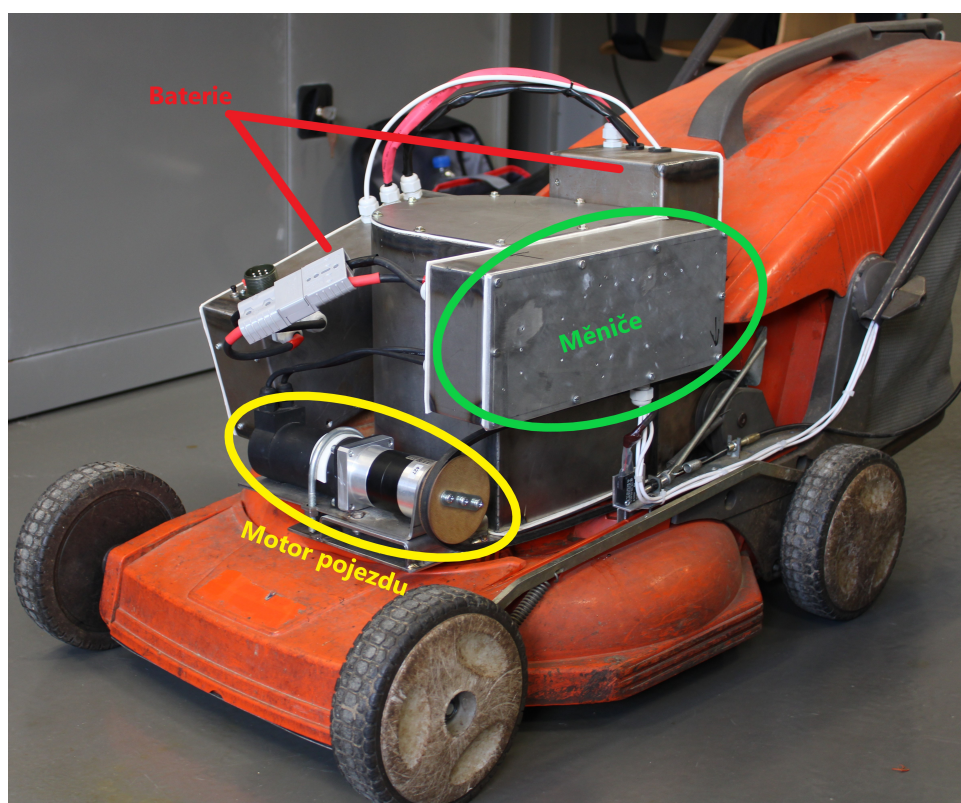
Výkonové MOS-FET tranzistory v pouzdru TO-247 (použito ve schématu na Obr. 6.5) byly na schématu podle Obr. 7.2 nahrazeny tranzistory v pouzdru TO-220.

Výkonové tranzistory typu P-MOS jsou zvoleny IRFR4905PbF, mají maximální napětí mezi drainem a sourcem $U_{DSmax} = 55$ V a maximální trvalý proud drainem $I_{Dmax} = 74$ A. Tranzistory N-MOS jsou zvoleny IRF1405PbF. Mají maximální napětí mezi drainem a sourcem $U_{DSmax} = 55$ V a maximální trvalý proud drainem $I_{Dmax} = 169$ A. Motor by měl mít maximální odebíraný proud 6 A, takže by měla být proudová rezerva dostatečná a tranzistory by se neměly nijak nadměrně zahřívat.

Rezistory $R15$, $R20$ a $R25$ společně s kondenzátorem $C8$ a rezistorem $R9$ tvoří datasheetové zapojení ochrany proti přetížení.

8 Změny designu oproti návrhu

Jelikož se vyskytly potíže při výrobě nepřesným překreslením šasi sekačky, bylo potřeba upravovat součásti přímo při usazování na šasi. Při realizaci se také ukázaly prvotní nápady a návrhy jako nevhodné. Byly nalezeny mnohem vhodnější řešení pro umístění měničů, bateriových bloků a motoru pojezdu. Chladicí větrák hlavního motoru byl upraven, protože nebyl k dispozici vstříkovací lis ani 3D tiskárna.



Obr. 8.1: Reálné rozložení sekačky

8.1 Umístění měničů

V původním návrhu bylo uvažováno umístění měniče pojezdu a měniče hlavního motoru na oddělených chladičích. Měniče měly být umístěny v jedné krabici tak, aby na každé straně byl jeden měnič. Krabice měla být umístěna mezi předními koly sekačky. Tato varianta se ukázala jako nevhodná z důvodu moc dlouhých připojovacích kabelů a velkého množství potřebných kabelových průchodek.

Realizované umístění měničů je na společném chladiči na boku krytu hlavního motoru (Obr. 8.1). Hlavní výhodou tohoto uspořádání jsou krátké připojovací silové

vodiče motoru nože, u kterých by při plném zatížení docházelo k velkým ztrátám. Zároveň nejsou potřeba žádné kabelové průchodky pro připojení motoru nože.

8.2 Změny strojních dílů

Všechny změněné strojní díly jsou uvedeny pod názvy, které lze nalézt na přiloženém médiu (přiloženém souboru). Dále jsou popsány pouze změny bez výkresové dokumentace, kterou není možné jednoduše vytvořit, neboť součásti byly pasovány přímo na šasi podle potřeby a upravovány při sestavování.

První díl, který byl po prvotní výrobě změněn, je spodní kryt (pod bílým těsněním Obr. 8.2), který podle návrhu nepasoval na sekačku z důvodu nepřesného překreslení šasi sekačky. Oproti návrhu na reálném krytu chybí výstupek uprostřed a zakulacení na krajích. Tyto úpravy byly provedeny z důvodu zjednodušení výroby a tím i snížení ceny. Byl také upraven sklon šikmé části (na výkresu $19,5^\circ$) přesně podle šasi sekačky. Na součást byl přidán také držák motoru pojezdu.



Obr. 8.2: Reálný spodní kryt

Další změněnou částí je kryt motoru, který byl pro snadnější výrobu a přebytečnost některých částí upraven. Byl odebrán výstupek na spodní straně a šikmina vlevo nahoře. Jedná se tedy o půlkruh s krátkými nástavci a rovnou plochou, na kterou byla umístěna krabice s měniči. K tomuto dílu samozřejmě přísluší i odpovídající víko změněné podle stejných parametrů. Kryt motoru je možné vidět na Obr. 8.1.

8.3 Umístění motoru pojezdu

Se změnou umístění měničů bylo nutné přemístit také motoru pojezdu, který se nachází téměř mezi předními koly před krytem motoru (Obr. 8.1). S touto změnou

vznikl problém s řemenem, který začal drhnout o povrch spodního krytu. Z tohoto důvodu byl plech zkrácen. Bylo také potřeba pořídit nový delší řemen oproti původnímu návrhu.

8.4 Bateriové bloky

Bateriové bloky se oproti původnímu návrhu liší hlavně dvěma aspekty. První je umístění bateriových bloků a druhý je materiál krabic na akumulátory.

Jelikož byl přesunut motor pojezdu, bylo nutné oproti původnímu návrhu přesunout i jednu krabici. Krabice nacházející se na pření části (Obr. 5.1), byla přesunuta na boční stranu šasi (Obr. 8.1), čímž se posunulo těžiště blíže k ose zadní nápravy. Těžiště se k ose zadní nápravy přesouvá z důvodu lepší ovladatelnosti sekačky. Zatačení sekačkou se provádí stlačením řídek dolů (způsobí zvednutí přední nápravy) a otočením sekačky na zadní nápravě. Váha na přední nápravě by ztěžovala tento proces.

8.5 Změna motoru nože

V původním návrhu byl uvažován motor Flipsky 80100. Nebyl dostupný skladem ani s rozumnou dobou dodání na objednávku, proto byl pro realizaci zvolen podobný motor od firmy Alien Power System, konkrétně APS c80100, který má velice blízké parametry (viz Tab. 8.1).

Tento motor bylo možné dodat do České republiky v horizontu jednoho týdne. Cena za APS c80100 byla mírně vyšší oproti motoru Flipsky 80100.

P_{nmax}	7000 W
I_{nmax}	110 A
U_{nmax}	18S
m_n	1,9 kg
k_n	130 RPM/V

Tab. 8.1: Parametry motoru APS c80100 [9]

U tohoto motoru není výrobcem uveden jeho maximální moment. Z jeho konstrukce, typového označení a maximálního proudu lze odhadnout, že moment motoru bude podobný jako u Flipsky 80100 (bude zřejmě trochu nižší).

9 Návrh DPS

Všechny návrhy DPS, osazovací desky i kompletní seznamy součástek sou uvedeny v přílohách.

Návrh všech desek byl proveden v programu Autodesk Eagle 9.6.2. Měnič motoru nože je rozdělen na dvě desky řídicí a výkonovou. Měnič pojezdu je umístěn na jedné desce, kde je vedle sebe řídicí i výkonová část. Všechny návrhy jsou uvedeny v přílohách (B).

Nejprve se vždy vytvoří schéma v prostředí Eagle. Z tohoto schématu program vytvoří spojení mezi jednotlivými součástkami, které musí uživatel rozmístit po ploše DPS. Propojení součástek cestami může vytvářet uživatel sám nebo má program Eagle implementovaný Autorouter, který vytvoří cesty. Jeho použití se však nehodí pro použití na vysokofrekvenční obvody nebo obvody s motory, jelikož ignoruje pravidla elektromagnetické kompatibility.

9.1 Návrh desky řízení motoru nože

Při návrhu řízení motoru bylo postupováno od nejsložitějšího prvku, kterým je bez pochyby řídicí obvod MC33035DW (IO_4). Tento se stal ústředním prvkem celé desky. Okolní součásti jsou soustředěny kolem řídicích obvodů (IO_1 a IO_4) a regulátoru (IO_3), neboť se jedná o ověšení těchto obvodů. Řídicí obvod motoru nože obsahuje i zdrojový obvod pro napájení integrovaných obvodů 5 V a 12 V.

Řídicí deska má z jedné strany všechny součástky a z druhé strany pouze rozlitý GND a drátové propojky. GND se připojuje ze strany součástek na stranu rozlitého GND měděnými prokovy skrz desku. GND je na desce rozděleno na několik částí. Jedná se o oddělení země řídicích obvodů a budičů výkonových tranzistorů. Země jsou spojeny pouze v jednom bodě úzkou cestou z důvodu, aby se nezarušovala řídicí zem vysokofrekvenčním spínáním budičů a tranzistorů.

Řídicí a výkonová deska jsou propojeny pinovými lištami JP_4 , JP_5 , JP_6 a JP_7 . Označení odpovídá jak na řídicí, tak na výkonové desce.

Na pinovou lištu JP_8 je připojen potenciometr, který řídí požadované otáčky motoru nože.

9.2 Návrh výkonové desky nože

Návrh výkonové desky probíhal bez větších problémů, neboť se jedná o velice jednoduchý obvod. Hlavní proudovodná dráha musela být zesílena připájením měděných pásků, čímž se ztrojnásobila tloušťka DPS. Pro připojení silových vodičů motoru a hlavního přívodu akumulátorů jsou na DPS připájeny mosazné matice, do kterých

jsou následně našroubovány šrouby. Matice bylo potřeba po připájení ještě prořezat závitníkem, neboť se zahřátím stáhly.

9.3 Návrh desky pojezdu

Návrh byl započat umístěním hlavního řídicího obvodu stejně jako u řídicí desky. Kvůli preferenci krátké cesty k vývodu gate N-MOS tranzistoru byly budiče TC4420 umístěny co nejbližší k řídicímu obvodu a gate N-MOS. Toto znamená, že všechny ostatní součástky musely být rozmístěny na opačnou stranu řídicího obvodu.

Nemalé potíže při návrhu sehrála také ochrana proti přetížení, realizovaná třemi bočníky. Najednou vznikla další cesta, křížící GND přes celou šířku DPS. Propojení země budičů se záporným pólem akumulátoru se provedlo přetažením GND na druhou stranu desky přes příčnou cestu a zpět na spodní stranu DPS.

Stejně jako u řídicí desky motoru nože bylo provedeno propojení rozlitého GND řídicích obvodů, budičů a výkonové části pouze v jednom bodě.

Na pinovou lištu *IN2* je připojen potenciometr, který řídí požadované otáčky motoru pojezdu.

10 Výroba desek

Výroba desky je standardizovaný proces, kterým se tato práce nebude zabývat. Budou zde zmíněny pouze zajímavosti nebo důležité postupy, aby se kdokoliv, kdo by chtěl vyrobit stejné nebo podobné desky, vyvaroval zbytečných chyb, které se vyskytly v průběhu výroby desek k této práci.

Při propojování desek motoru nože je nutné dbát na správné spojení řídicí a výkonové desky. Posunutí o jediný pin může způsobit destrukci celého měniče.

10.1 Výroba řídicí desky motoru nože

Při výrobě řídicí desky se nevyskytly žádné větší komplikace. Jenom by bylo vhodné použít konektory s pojistkou místo pinových lišt pro připojení Halloových sond i spínače pro zapínání motoru. Pokud jsou použity pinové lišty, je potřeba je pájet z obou stran desky. Pokud se zhotovitel rozhodne použít jiné konektory, je potřeba pro správné připojení propojit spodní a horní stranu desky dostatečně velkými provky, aby jimi prošly koncovky konektoru.

Pro usnadnění osazování desky je vhodné začít osazováním integrovaných obvodů, potom pokračovat s rezistory a kondenzátory a nakonec připájet připojovací konektory.

10.2 Výroba výkonové desky motoru nože

Výroba výkonové desky je zajímavější, jelikož běžná DPS má příliš tenkou vrstvu mědi, bylo nutné připájet na desku ještě měděné pásky pro zvýšení proudové zatížitelnosti hlavní proudovodné dráhy. Čidla proudu jsou specifická obdélníkovým připojením proudovodné dráhy, to znamená vyvrtání děr a mnoho práce s pilníkem. Výkonové tranzistory musely být připájeny až po přišroubování na chladič. Poté musely být tranzistory společně s deskou odšroubovány a zapájeny z druhé strany desky. Tento proces je nutný z důvodu, aby byla přesně určena vzdálenost tranzistorů od DPS.

K DPS by bylo vhodné připájet měděné pásky jako první, neboť je při pájení vyvíjena značná teplota na plošný spoj. Vysoká teplota by mohla způsobit zničení okolních součástek (čidel proudu a kondenzátorů). Blokovací kondenzátory je nutné pájet na desku až jako poslední, protože jsou velmi náchylné na změny teplot. Vlivem oteplení a následného ochlazení mohou vznikat v kondenzátorech mikrotrhliny, které mohou následně zapříčinit nesprávnou funkci kondenzátorů a vznik vysokofrekvenčního rušení.

10.3 Výroba desky pojezdu

Deska pojezdu neobsahuje žádné zvláštní zajímavosti týkající se výroby. Jedná se o kombinaci výroby řídicí a výkonové desky motoru nože. Stejně jako u řídicí desky motoru nože, je nutné pájet pinové lišty z obou stran DPS. Podobně jako u výkonové desky motoru nože se i zde pájí tranzistory až po přišroubování desky i tranzistorů ke chladiči. Následně se musí odšroubovat desku i tranzistory a pájet z druhé strany DPS.

Pro snadné pájení je vhodné postupovat v souladu s kapitolou 10.1.

11 Oživení měničů

Postup ožívování měničů začíná stejnosměrným ověřením jejich funkčnosti. Toto má za cíl nalézt chyby, které vznikly vrtáním DPS a pájením součástek. Při každé z těchto činností mohlo dojít k vytvoření spoje v místě, kam nepatří.

Druhou částí ožívování je samotné připojení motoru k měniči a ověření správnosti součinnosti měniče s motorem podle předpokladů z kapitol 6 a 7.

11.1 Oživení měniče motoru nože

První oživení měniče motoru nože probíhalo bez větších problémů. Ze stejnosměrného hlediska se obvod choval podle očekávání. Prvním indikátorem nesprávné činnosti by mohl být zvýšený proudový odběr ze zdroje.

V druhé fázi, při připojení nože, bylo zjištěno připojení Hallových sond v nesprávném pořadí. Po vyzkoušení několika kombinací byla nalezena ta správná, při které motor fungoval bez větších problémů. Jelikož nefungoval dobře původně navržený I regulátor otáček *IO3A* (regulátor kmital), bylo k němu potřeba přidat i P složku. U regulátoru proudu bylo nutné upravit časové konstanty, aby se motor rychleji ustálil na konstantních otáčkách. Nastavování regulátorů probíhalo experimentálně.

V průběhu zkoušení správnosti chodu se vyskytla neočekávaná chyba zhotovitele. Byla připojena řídicí deska na výkonovou, která byla pod napětím, což způsobilo průraz v snižujícím měniči *IO2*. Napěťový impuls následně zničil všechny integrované obvody napájené z 12 V. Jelikož došlo k poškození hlavního řídicího obvodu, tak následně došlo k současnému sepnutí všech tranzistorů jedné větve, což způsobilo zkrat ve větvi a destrukci tranzistorů. Po výměně poškozených integrovaných obvodů a zničených tranzistorů, byl měnič opět plně funkční.

11.2 Oživení měniče pojezdu

Při ožívování měniče pojezdu se už v první části vyskytly problémy. Při stejnosměrném testu odebíral měnič, který nebyl připojen na motor, přes 150 mA, což je více než trojnásobek toho, co by měl měnič ze zdroje odebírat. Prvním krokem je zjištění, která součástka se nejvíce zahřívá. Jak se ukázalo, jediná součástka, která se nadměrně ohřívá, byl hlavní řídicí obvod *IO2* (MC33035DW). Byly proměřeny všechny vývody obvodu. Ukázalo se, že na vývodu 7, což je napěťová reference, která napájí obvod *IO1* (MC33039), roste napětí úměrně výstupu zdroje až po napájecí napětí *IO2*, což je 12 V. Tento výstup má mít vždy hodnotu napětí 6,24 V. Proto se přistoupilo k detailnímu vizuálnímu prozkoumání celého měniče. Při tomto prozkoumání nebyly nalezeny žádné nechtěné propoje nebo jiná chyba. Posledním

možným krokem pro nalezení chyby na DPS bylo připojování jednoho vývodu po druhém a ověřování, jestli se objeví na zdroji proudový odběr. Zvýšený proudový odběr se nakonec objevil při připojení vývodu 4. Naštěstí tento vývod je připojen pouze na dvě součástky, čímž se zúžila oblast pro nalezení chyby. Závada byla nalezena pod plastem pinové lišty, kde byl objeven zkrat mezi piny 5 a 6 (*IN1*). Zkrat byl způsoben měděnou šponou, která se dostala mezi tyto cesty při vrtání. Následně byla připevněna na místo nástřikem laku a při pájení byla přehlédnuta. Odstranění této závady zabralo asi 4 dny pečlivé práce.

Při ověřování funkčnosti měniče s připojeným motorem se již nevyskytly výraznější problémy. Pouze bylo nutné několikrát přehodit pořadí Hallových sond, aby se motor točil. Nastavování interního regulátoru pomocí rezistoru *R7* a kondenzátoru *C7* nebylo nutné, neboť prvotní nastavení se ukázalo jako vyhovující.

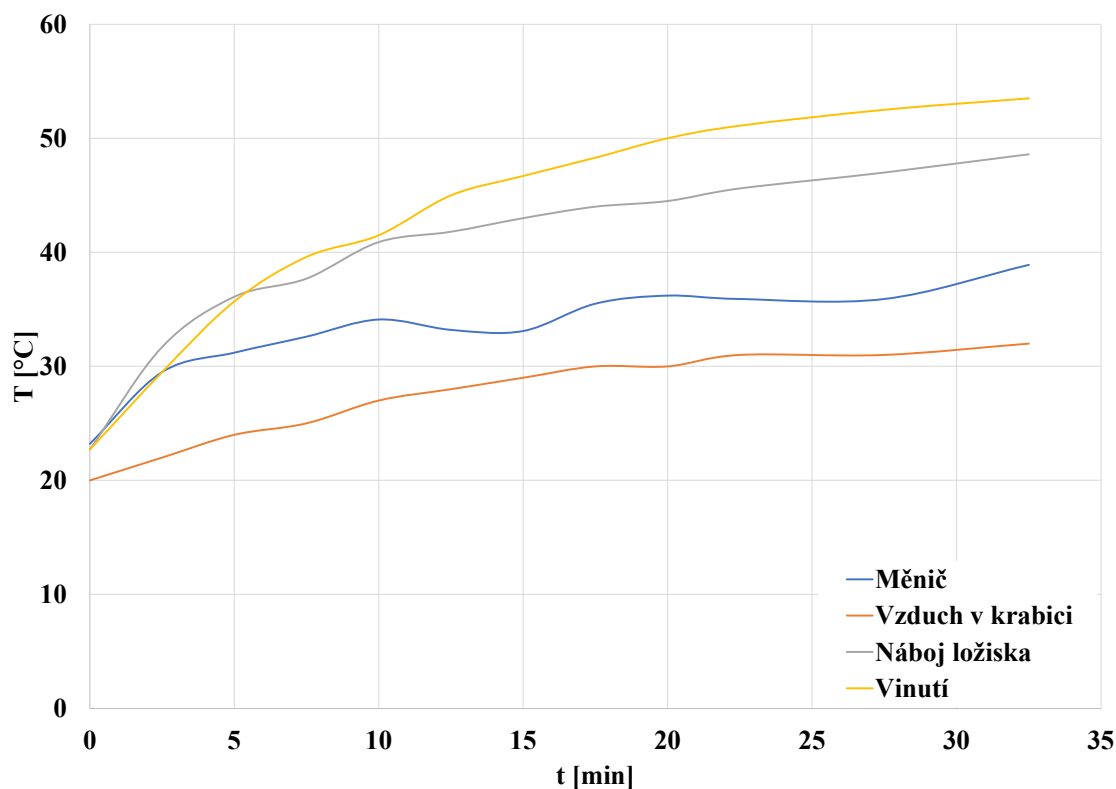
12 Měření oteplovací charakteristiky

Oteplení bylo měřeno ve čtyřech bodech. Konkrétně byly měřeny teploty na chladiči měniče, vzduchu v krabici u motoru, na vinutí motoru a na náboji ložiska. Tři body byly měřeny pomocí termokamery (teplota na chladiči, vinutí motoru a náboje ložiska). Teplota vzduchu v krabici u motoru byla měřena termočlánkem.

Měření oteplovací charakteristiky má význam pouze u motoru nože, který má značný odběr a potenciál k zahřívání. Na motor působily pouze třecí síly v ložisku a aerodynamický odpor nože a větráku.

Měření oteplení při zatížení není možné provést, neboť reálné zatěžování motoru je možné provést pouze vjetím do trávy, při čemž není možné snímat teplotu termočlánkem nebo termokamerou.

12.1 Při minimálních otáčkách motoru



Obr. 12.1: Oteplovací charakteristiky při minimálních otáčkách motoru

Při minimálních otáčkách odebírá motor ze zdroje proud asi 6 A. Teplota byla měřena po 2,5 min. Měření bylo prováděno 32,5 min. Jelikož by bylo nebezpečné měřit teplotu vinutí i náboje ložiska při běžícím motoru, tak byl vždy motor na krát-

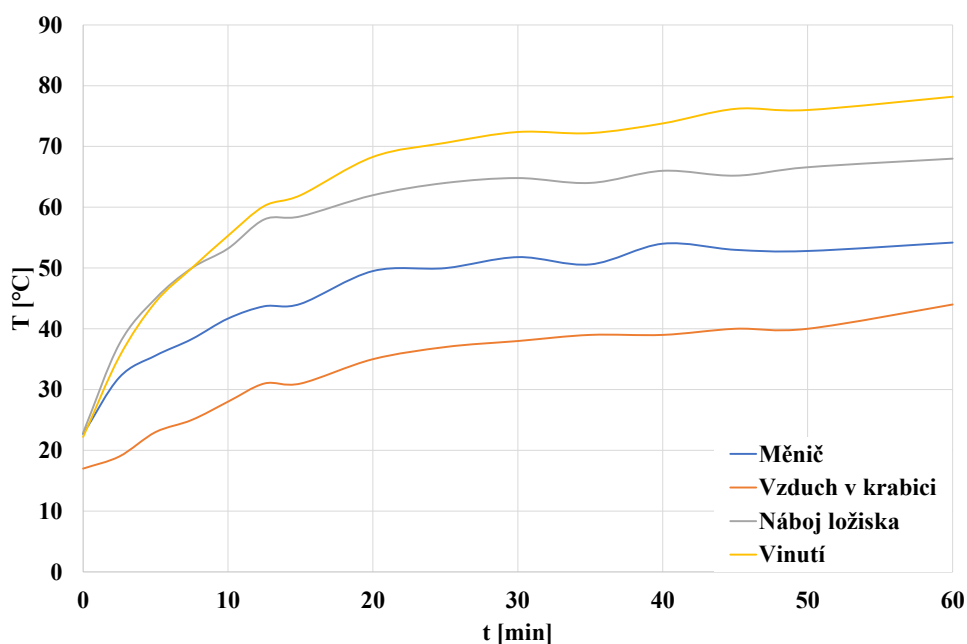
kou dobu zastaven. Pokaždé byl odšroubován horní kryt a byla změřena teplota. Tento proces zanáší značnou chybu do měření oteplení, avšak z hlediska bezpečnosti a praktičnosti se jevila odhadovaná přesnost jako dostatečná.

Vzhled charakteristiky odpovídá exponenciálnímu předpokladu. Ne každá prodeleva na měření teploty byla stejně dlouhá, čímž dochází k zanášení další chyby. Podle charakteristiky se teploty blíží k hodnotě:

- Měníč 40 °C
- Vzduch v krabici u motoru 35 °C
- Náboj ložiska 50 °C
- Vinutí motoru 65 °C

Žádná z těchto teplot z daleka neohrožuje zařízení.

12.2 Při maximálních otáčkách motoru



Obr. 12.2: Oteplovací charakteristiky při maximálních otáčkách motoru

Proudový odběr ze zdroje při maximálních otáčkách motoru je 15 A. Na charakteristikách je, jako v předchozím případě, vidět zvlnění, které je způsobeno stejným přerušovaným chodem a otevíráním krabice motoru. Měření bylo prováděno

po 2,5 minutách při odečítání teplot ze čtyř bodů (měnič, vzduch v krabici nože, náboj ložiska a vinutí) po dobu 60 minut.

Exponenciální vzhled charakteristik je v souladu s předpokladem postupného ustalování teploty. Teploty, kterých dosahuje soustava v konkrétních měřených bodech po hodině měření jsou:

- Měnič 55 °C
- Vzduch v krabici u motoru 45 °C
- Náboj ložiska 70 °C
- Vinutí motoru 80 °C

Tyto teploty jsou vyšší než u běžného asynchronního motoru podobného výkonu, avšak stále ještě neohrožují funkčnost zařízení.

Závěr

Byla provedena přestavba sekačky se spalovacím motorem na akumulátorovou. Sekačka je plně funkční a připravena k provozu.

Mechanické uspořádání je navrženo na šasi sekačky Husqvarna ROYAL 47S. Nové součásti bylo potřeba mírně upravit, aby pasovaly přesně na šasi, protože nebyl k dispozici 3D scanner a ruční odměřování je nepřesné.

Řešení pojezdu vychází z původní konstrukce sekačky, kde je pouze připojen motor s převodovkou pomocí řemenového převodu.

Pro pohon nože je použit motor APS c80100 s výkonem 7000 W a pro pojezd IN-TECNO BLS043.240 o výkonu 130 W. Pro snížení otáček a zvýšení momentu motoru pojezdu byla zvolena převodovka TRANSTECNO P522U 22.20. Maximální otáčky na výstupu převodovky jsou 135 RPM, což odpovídá rychlosti sekačky asi 5 km/h.

Momentově otáčková charakteristika motoru pojezdu je ponechána na maximální podle Obr. 3.1. Charakteristika motoru nože byla snížena omezením maximálního výkonu na 2000 W. Výsledná charakteristika je vyobrazena na Obr. 2.2.

Akumulátory jsou dimenzovány na maximální odebíraný proud a zvolené napětí motoru. Dimenzování je provedeno pouze pro motor nože, neboť proudový odběr motoru pojezdu je zanedbatelný. Napětí je dosaženo sériovým spojením sedmi akumulátorových bloků. Maximální proudový odběr motoru nože při zvolené charakteristice je 105,8 A. Z toho vychází, že se musí paralelně spojit minimálně 24 článků. Bylo použito 21 článků spojených paralelně, neboť není nutné využívat plného momentového potenciálu motoru.

Silové a řídicí obvody jsou navrhovány pro každý motor zvlášť. Zapojení jsou velmi podobná. Silové obvody se skládají z MOS-FET tranzistorů uspořádaných do třífázového můstku. Řídicí obvody se však liší podle motoru. Motor nože má v řídicí elektronice přidány regulátory proudu a otáček pro možnost lepší regulace.

Úpravy designu některých nových součástí byly provedeny z důvodu snadnější výroby. Jednotlivé díly byly upravovány převážně až při montáži na šasi sekačky. Každá z těchto úprav má svůj smysl. Celkově tyto úpravy vedly ke zmenšení a odlehčení celého zařízení. Zároveň bylo posunuto těžiště více k ose zadní nápravy, kvůli zlepšení ovladatelnosti sekačky.

Po výrobě desek, byly oživovány jednotlivé měniče. I přes několik počátečních neúspěchů při rozběhu se nakonec ukázaly plně funkční, včetně regulace otáček potenciometrem.

Poslední fází práce bylo ověření, že se motor nože uchladí i při uzavřených krytech motoru. Bylo zjištěno, že ze všeho nejvíce se zahřívá vinutí motoru, které se při minimálních otáčkách ustaluje na teplotě asi 65 °C a při maximálních asi na 80 °C.

Ani jedna z těchto teplot neohrožuje funkčnost sekačky.

Do budoucna by bylo vhodné věnovat nějaký čas přesnějšímu nastavení regulátorů motoru nože, dále také směrovací kladce, která by zajistila větší styčnou plochu na původní řemenici pojezdu. Bylo by asi dobré zaměnit pinové lišty za konektory se zámkou nebo za šroubovací svorkovnice, které nebudou tolik náchylné na vibrace. Oproti původní hmotnosti je sekačka asi o 7 kg těžší, což by se dalo vyřešit výměnou některých ocelových komponent za hliníkové nebo plastové, případně zmenšením kapacity akumulátorů.

Literatura

- [1] Motorová sekačka HUSQVARNA LC 247 SP. *PT PROLES* [online]. Prachatice: Rostas Design, 2013 [cit. 2020-10-16]. Dostupné z: http://www.ptproles.cz/?921,en_motorova-sekacka-husqvarna-lc-247-sp
- [2] Power Curve 575EX Series. *Briggs & Stratton* [online]. Milwaukee: Briggs & Stratton, 2020 [cit. 2020-10-16]. Dostupné z: <https://www.briggsandstratton.com/content/dam/briggsandstratton/eu/Common/Files/power-curves/09P7.pdf>
- [3] Brushless DC motor 80100 130KV 7000W for Electric Bike | Electric Skateboard. *Flipsky* [online]. Dongguan City: Flipsky technology, 2018 [cit. 2020-10-16]. Dostupné z: <https://flipsky.net/collections/e-skateboard/products/brushless-dc-motor-80100-130kv-7000w-for-electric-bike-electric-skateboard-go-cart>
- [4] PLANETOVÁ PŘEVODOVKA TRANSTECNO - ŘADA P. *Raveo s.r.o.* [online]. Otrokovice: Raveo, 2020 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://www.raveo.cz/planetova-prevodovka-p>
- [5] BEZKARTÁČOVÉ STEJNOSMĚRNÉ MOTORY ŘADY BL/BLS SE ZVÝŠENOU TRÍDOU KRYTÍ. *Raveo s.r.o.* [online]. Otrokovice: Raveo, 2020 [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://www.raveo.cz/BLDC-motory-BL-BLS>
- [6] 3005-2RS - kuličkové ložisko dvouřadé s kosoúhlým stykem oboustranně utěsněné pryžovým těsněním. *INDUSTRIAL CZ* [online]. Praha 9 - Hloubětín: Valenta design, 2015 [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://www.industrial.cz/3005-2rs-kulickove-lozisko-dvourade-s-kosouhlym-stykem-oboustranne-utesnene-pryzovym-tesnenim-detail-NC30000101.aspx>
- [7] Gufero 25x45x7 NBR-WAS Dichtomatik. *Ložiska-gufera.cz* [online]. Hrušovany nad Jevišovkou: Prumex, 2017 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <http://www.loziska-gufera.cz/tesneni/hridelove-krouzky-gufera/s-prachovkou/nbr/gufero-25x45x7-nbr-was-dichtomatik-7168.html>
- [8] MC33035, NCV33035. *ON Semiconductor* [online]. Denver: Literature Distribution Center for ON Semiconductor, 2014 [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MC33035-D.PDF>
- [9] C80100 Sensored Outrunner brushless motor 130KV 7000W. *Alien Power System* [online]. Bootle: Alien Electronics, 2021 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://alienpowersystem.com/shop/brushless-motors/80mm/c80100-sensored-outrunner-brushless-motor-130kv-7000w/>

Seznam symbolů a zkratek

ČSN	Česká státní norma
PWM	Pulzně šířková modulace
DPS	Deska plošných spojů
m_n	Hmotnost motoru nože
m_p	Hmotnost motoru pojezdu
m_b	Hmotnost jednoho článku
m_o	Odhadovaná celková hmotnost sekačky
P_{nmax}	Maximální výkon motoru nože
I_{nmax}	Maximální proud motorem nože
U_{nmax}	Maximální napětí motoru nože
M_{nmax}	Maximální moment motoru nože
U_{cl}	Napětí jednoho článku
I_{clmax}	Maximální proud odebíraný z jednoho článku
U_{clmin}	Napětí jednoho vybitého článku
U_{batmin}	Napětí vybité akumulátorové kombinace článků
I_{batmax}	Maximální proud odebíraný z akumulátorové kombinace článků
k_n	Konstanta otáček motoru nože na jeden volt
n	Otáčky za minutu
n_{nmax}	Maximální otáčky za minutu motoru nože
$M_{nmaxRPM}$	Moment motoru nože při maximálních otáčkách
n_{nmax}	Maximální otáčky za minutu motoru nože
M_{njm}	Moment motoru nože při jmenovitých otáčkách
n_{njm}	Jmenovité otáčky za minutu motoru nože
P_{njm}	Maximální výkon motoru nože při zvolené charakteristice

U_{njm}	Zvolené jmenovité napětí motoru pojezdu
M_{pjm}	Moment motoru pojezdu
n_{pjm}	Jmenovité otáčky za minutu motoru pojezdu
n_{pp}	Předpokládané otáčky za minutu motoru pojezdu
P_{pjm}	Jmenovitý výkon motoru pojezdu
U_{pjm}	Jmenovité napětí motoru pojezdu
I_{pjm}	Jmenovitý proud procházející motorem pojezdu
l	Délka
d_c	Průměr článku
n_s	Počet sériově spojených článků
n_p	Počet paralelně spojených článků
n_{cl}	Celkový počet článků
cap_{Ah}	Kapacita jednoho článku vyjádřená v Ampérhodinách
cap_{Wh}	Kapacita jednoho článku vyjádřená v Watthodinách
v_{pp}	Požadovaná rychlost pojezdu
φ_{pp}	Požadovaný zdolatelný úhel stoupání
r_k	Poloměr poháněcího kola
n_{kjm}	Jmenovité otáčky za minutu poháněcího kola
F_g	Tíhová síla
F_{nr}	Síla na nakloněné rovině
g	Tíhové zrychlení
M_{pp}	Minimální požadovaný moment motoru pohonu
o	Obvod poháněcího kola
l_{min}	Vzdálenost ujetá za minutu
i_p	Požadovaný převodový poměr převodovky pojezdu

M_{2max}	Maximální možný moment na výstupní hřídeli převodovky
n_{1max}	Maximální vstupní otáčky převodovky pojezdu
n_{2max}	Maximální vstupní otáčky převodovky pojezdu
$i_{př}$	Převodový poměr převodovky pojezdu
$\eta_{př}$	Účinnost převodovky pojezdu
d	Vnitřní průměr hřídelového těsnění
D	Vnější průměr hřídelového těsnění
b	Tloušťka hřídelového těsnění
U_{DSmax}	Maximální napětí mezi drainem a sourcem
I_{Dmax}	Maximální trvalý proud drainem
R_{DSon}	Odpor tranzistoru v sepnutém stavu
A	Ampér
mA	Miliampér
V	Volt
W	Watt
Nm	Newton metr
km/h	Kilometr za hodinu
kg	Kilogram
dB(A)	Decibell
cm	Centimetr
m/s^2	Metr za sekundu na druhou
RPM	Otáčky za minutu
cm^3	Kubický centimetr
kW	Kilowatt
RPM/V	Počet otáček za minutu na volt

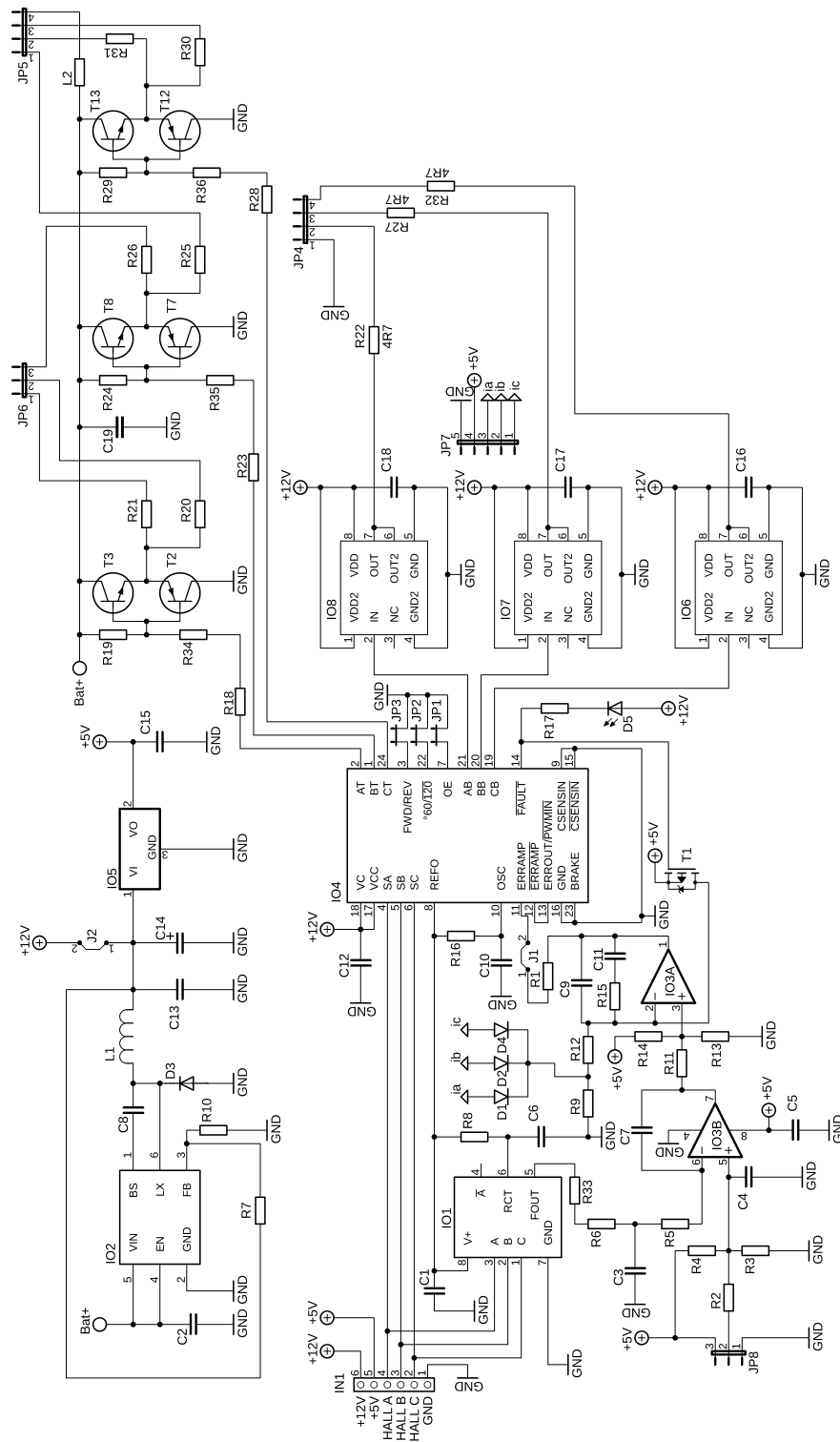
Ah	Ampérhodina
Wh	Watthodina
g	Gram
mm	Milimetr
m	Metr
min	Minuta
mΩ	Miliohm
Hz	Hertz
kHz	Kilohertz

Seznam příloh

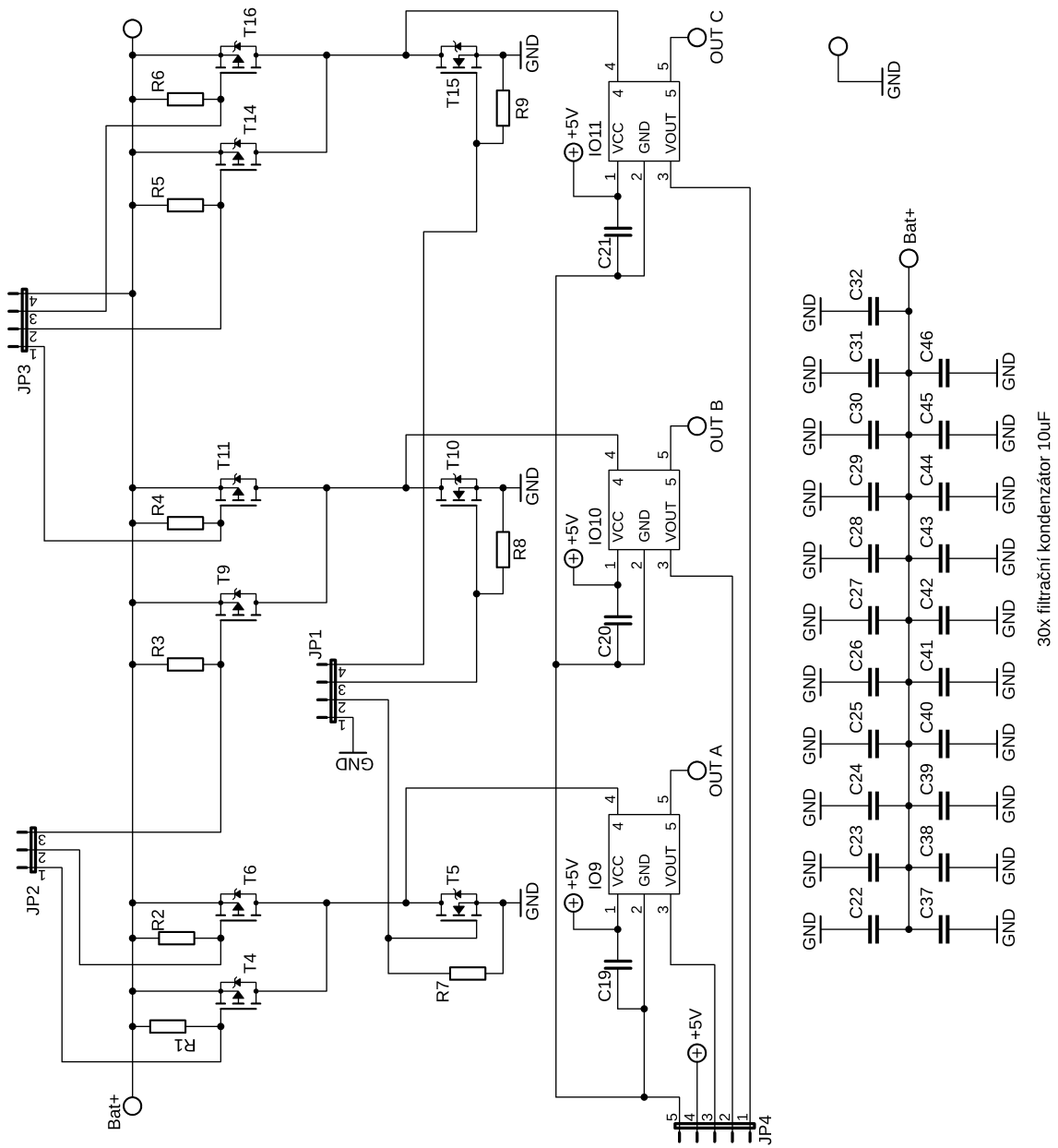
A	Schémata zapojení DPS	60
A.1	Schéma řídicí desky motoru nože	60
A.2	Schéma výkonové desky motoru nože	61
A.3	Schéma pojezdu	62
B	Návrhy DPS	63
B.1	Řídicí deska motoru nože top layer	63
B.2	Řídicí deska motoru nože bottom layer	64
B.3	Výkonová deska motoru nože top layer	65
B.4	Výkonová deska motoru nože bottom layer	66
B.5	Deska pojezdu top layer	67
B.6	Deska pojezdu bottom layer	68
C	Osazovací desky	69
C.1	Řízení motoru nože top layer	69
C.2	Řízení motoru nože bottom layer	70
C.3	Výkonová část motoru nože top layer	71
C.4	Výkonová část motoru nože bottom layer	72
C.5	Pojezd top layer	73
C.6	Pojezdu bottom layer	74
D	Seznamy součástek	75
D.1	Seznam součástek řízení motoru nože	75
D.2	Seznam součástek výkonové desky motoru nože	78
D.3	Seznam součástek měniče pojezdu	80
E	Fotografie finální verze sekačky	83

A Schémata zapojení DPS

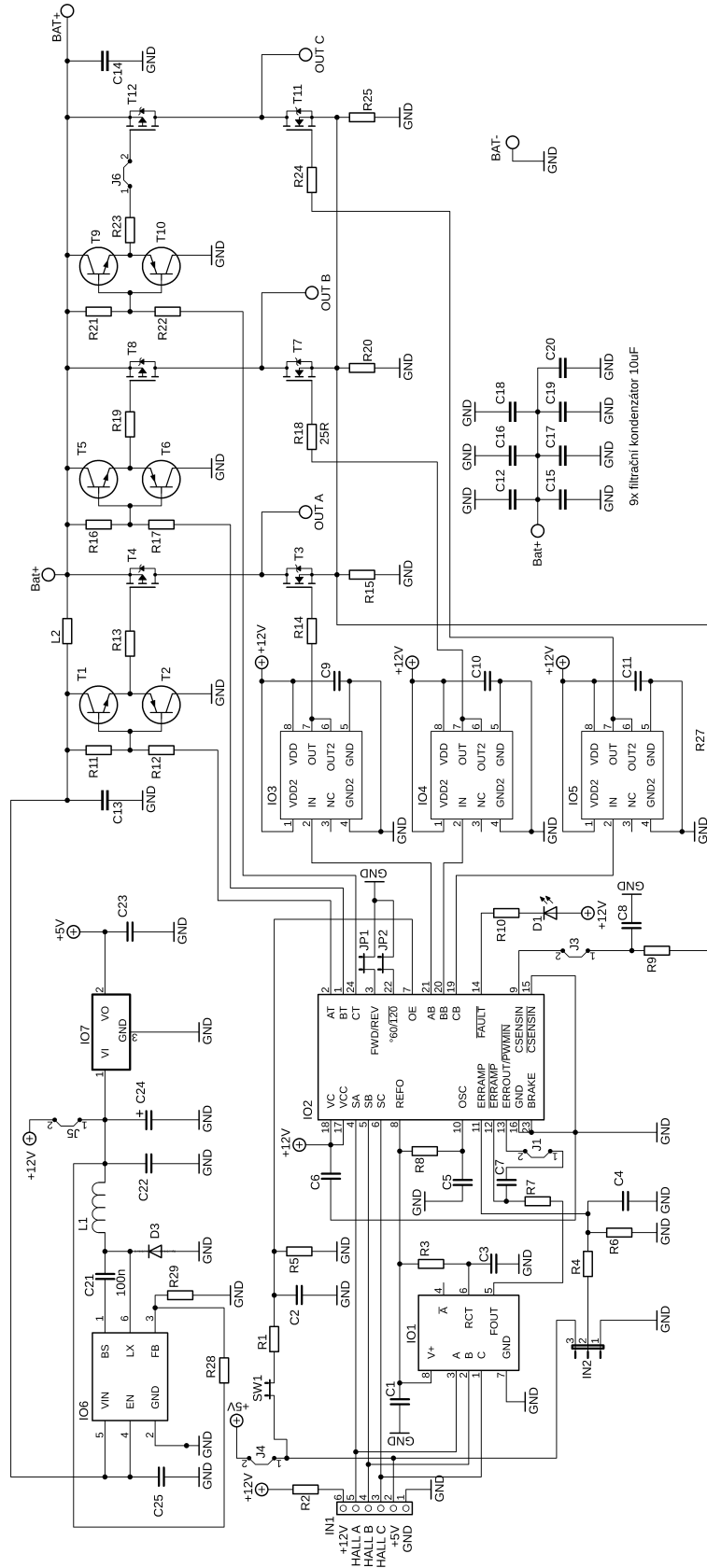
A.1 Schéma řídicí desky motoru nože



A.2 Schéma výkonové desky motoru nože

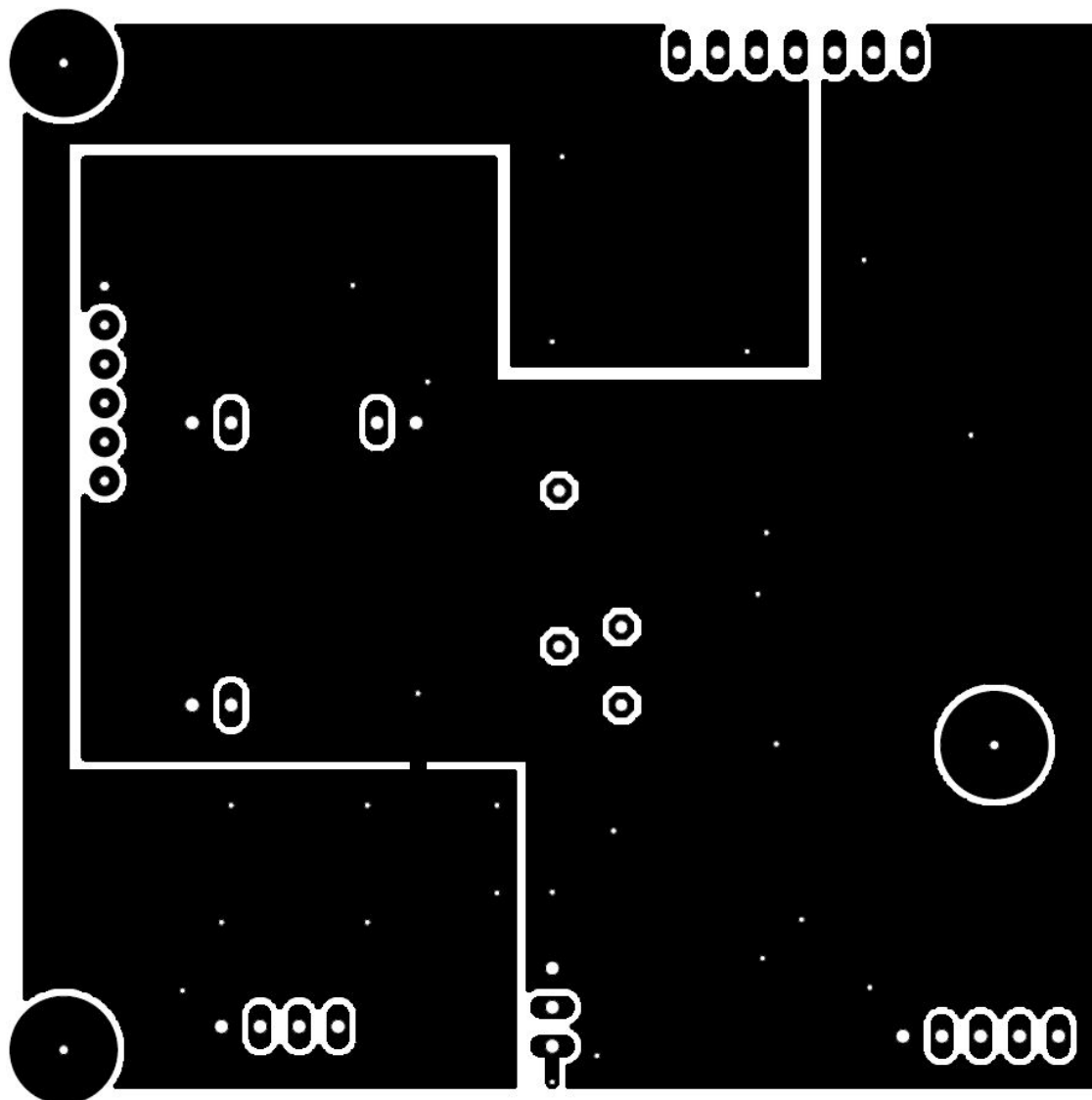


A.3 Schéma pojezdu

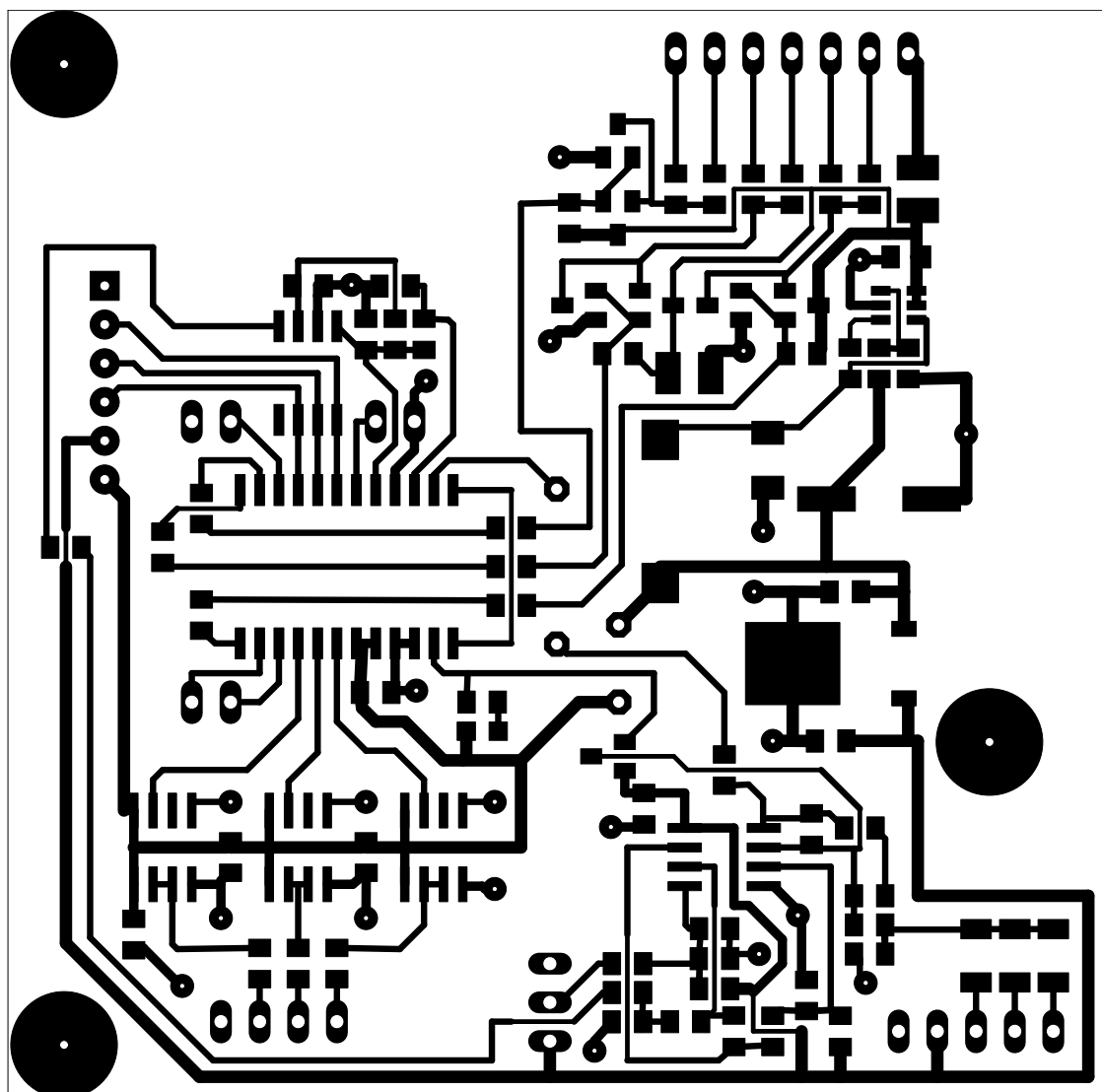


B Návrhy DPS

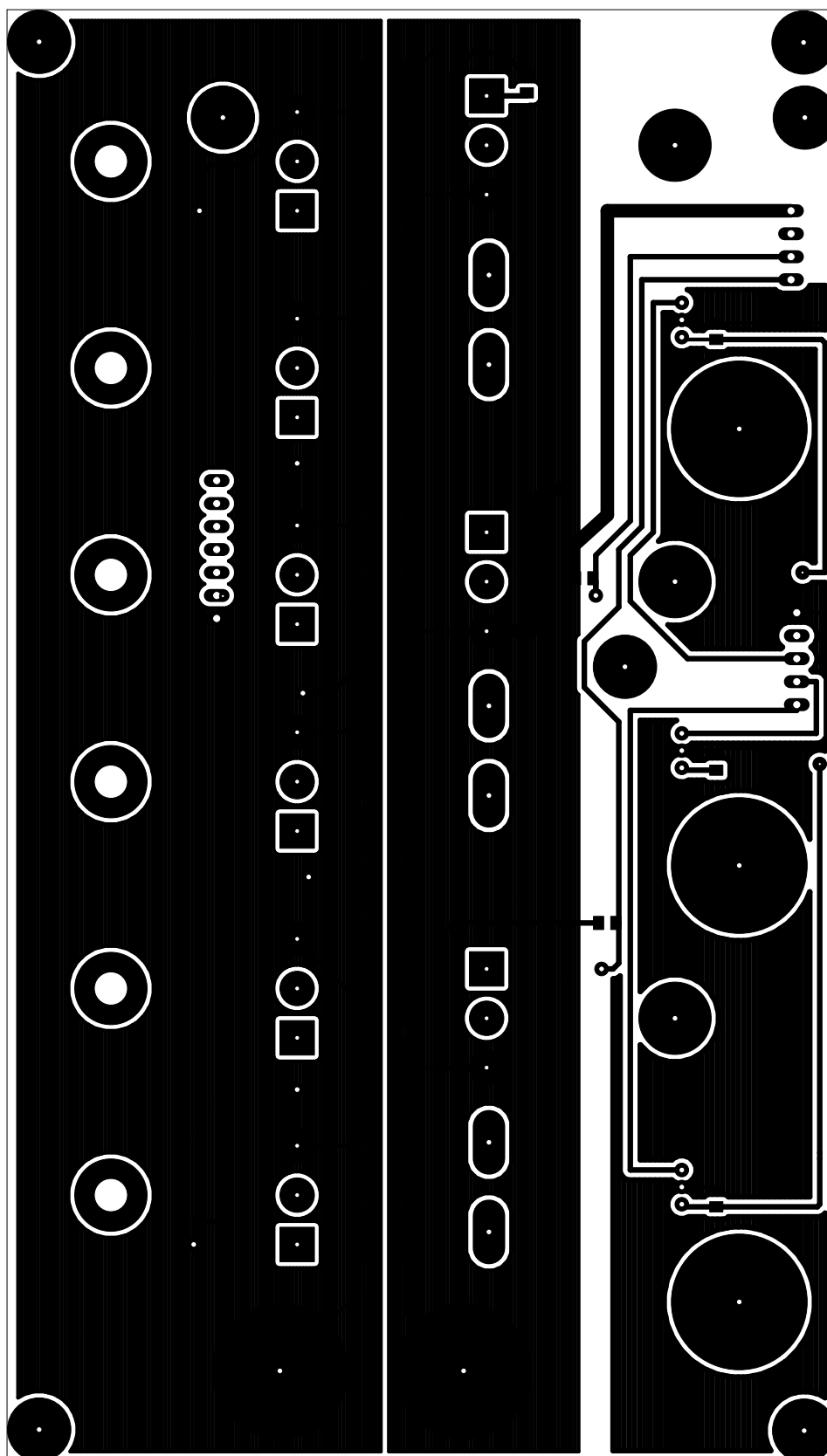
B.1 Řídicí deska motoru nože top layer



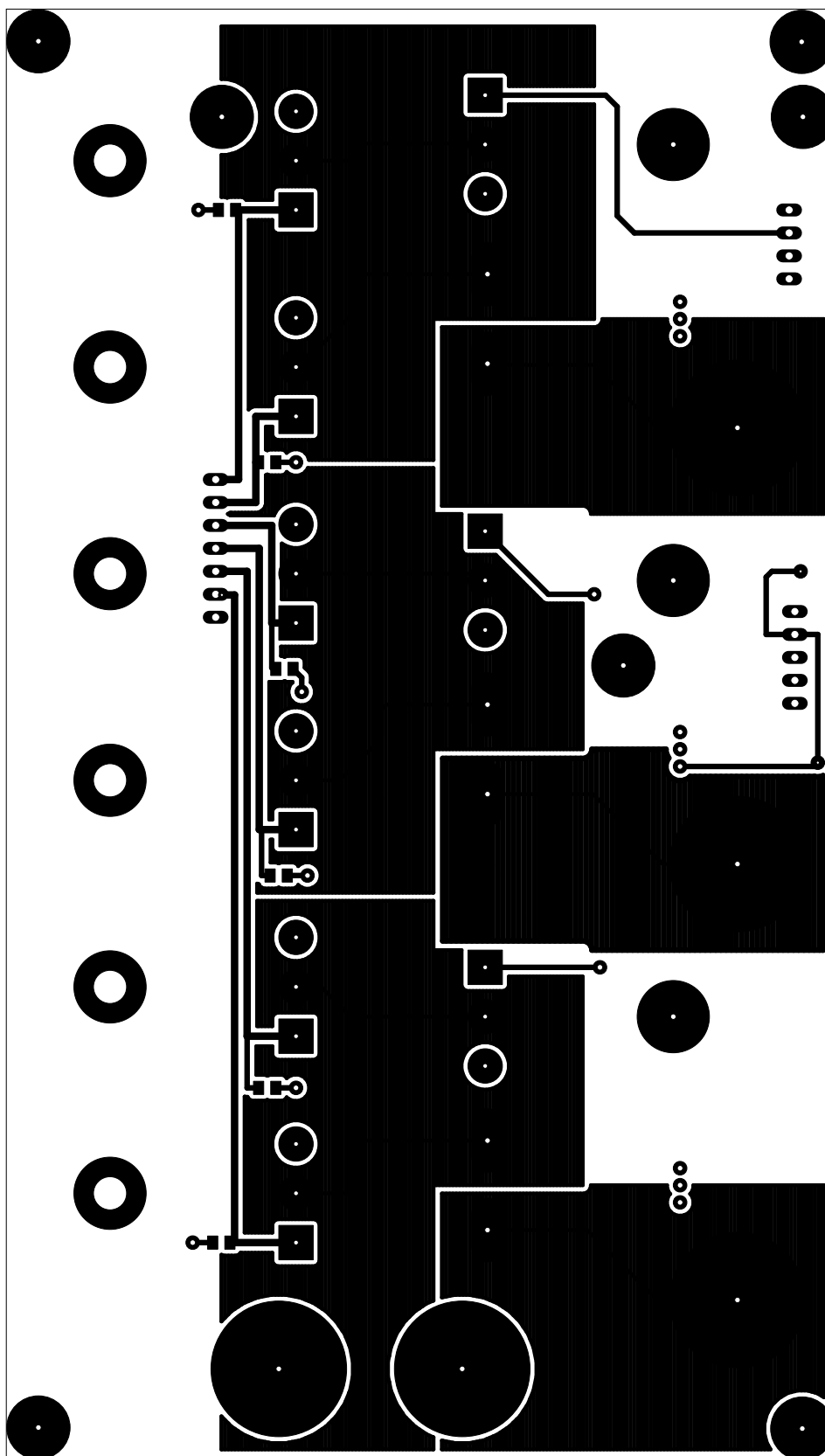
B.2 Řídicí deska motoru nože bottom layer



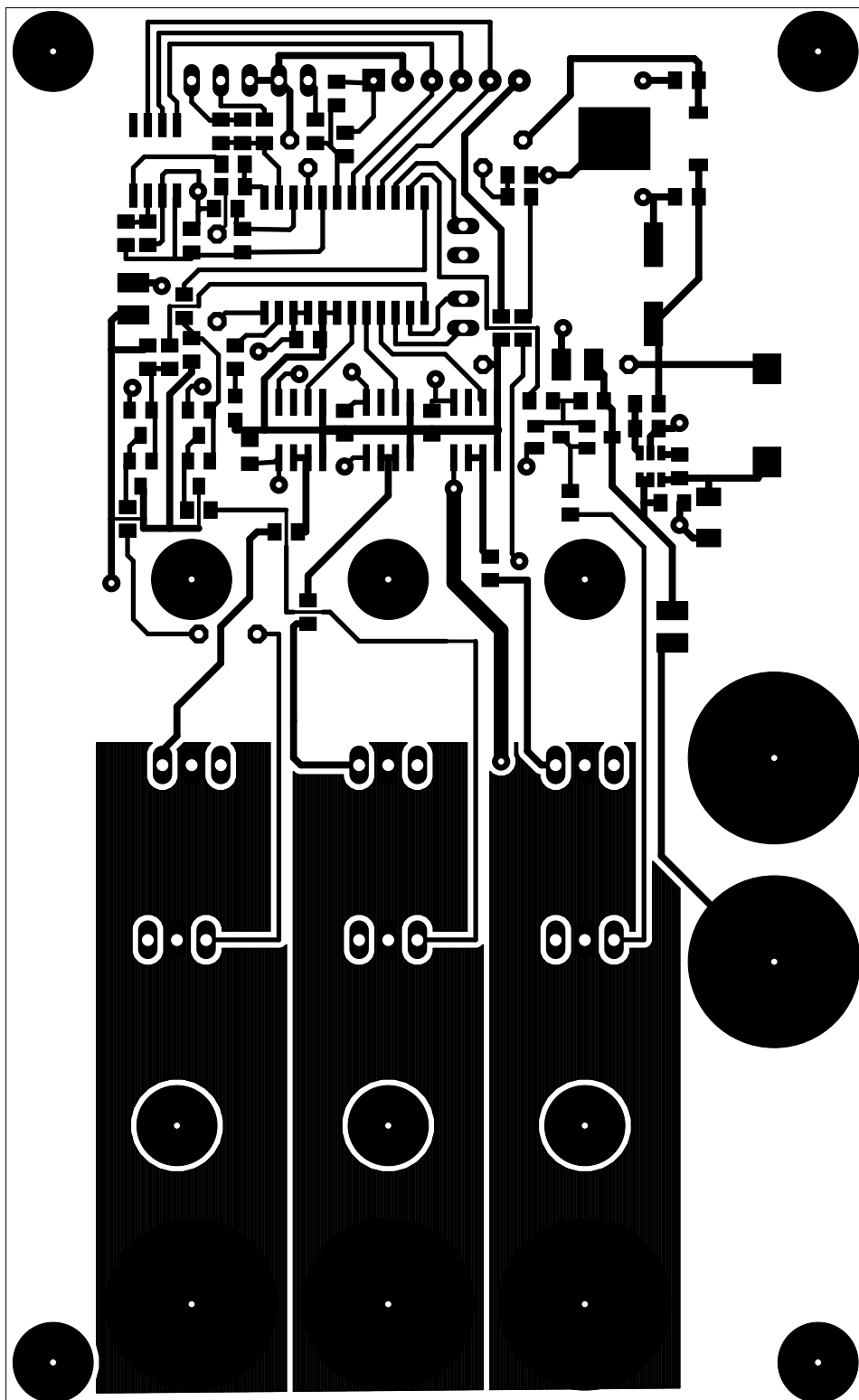
B.3 Výkonová deska motoru nože top layer



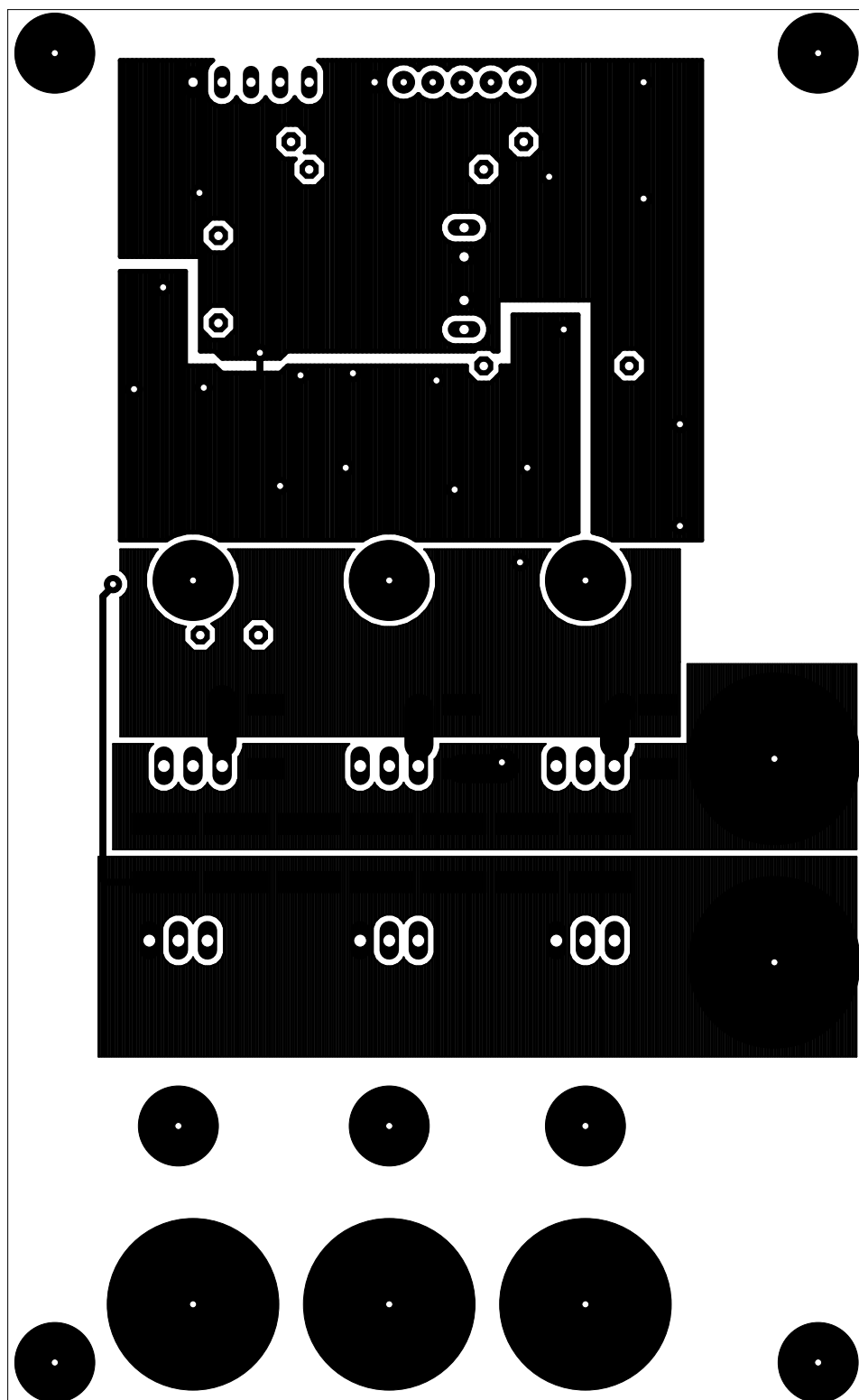
B.4 Výkonová deska motoru nože bottom layer



B.5 Deska pojezdu top layer

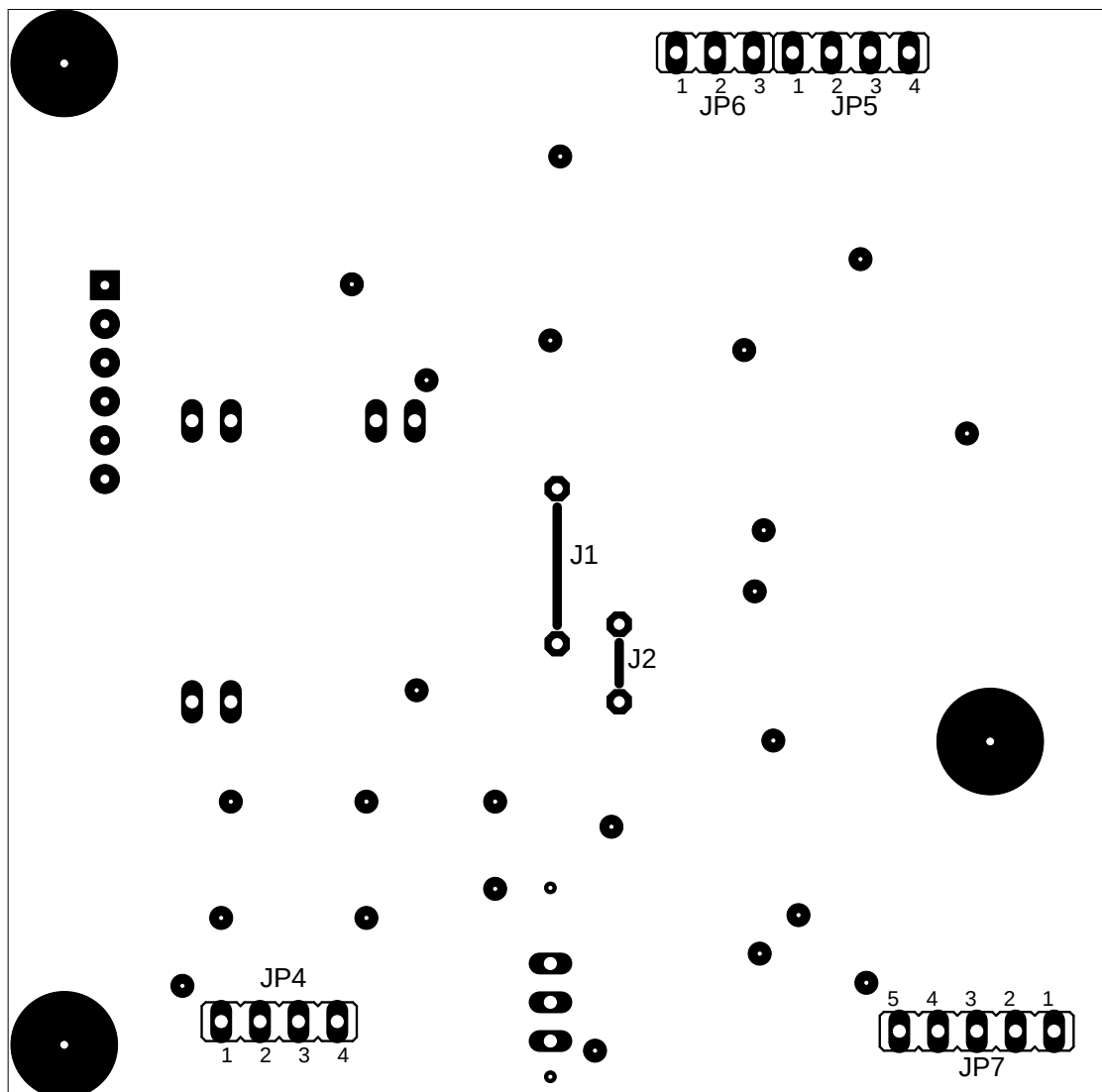


B.6 Deska pojezdu bottom layer

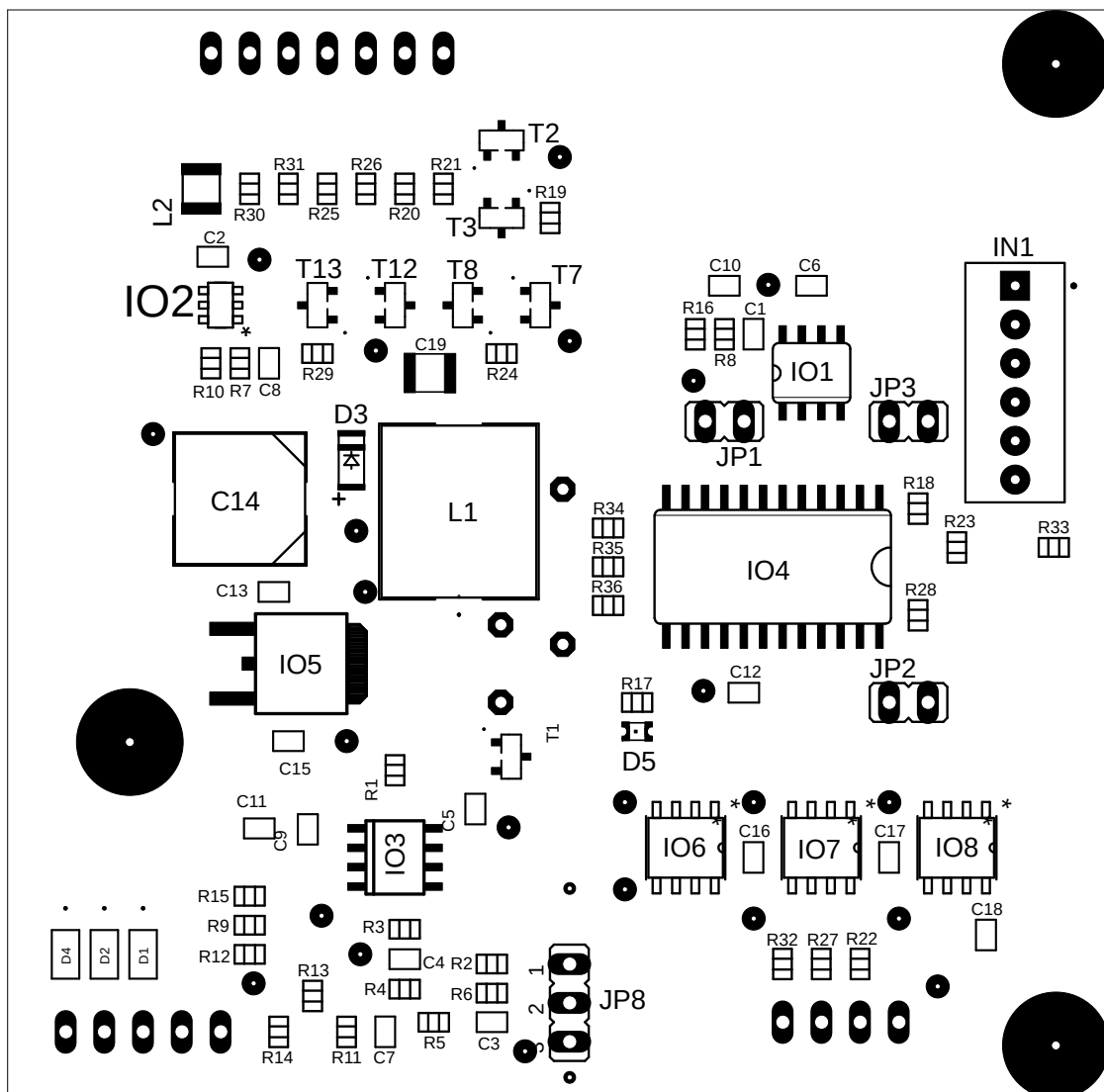


C Osazovací desky

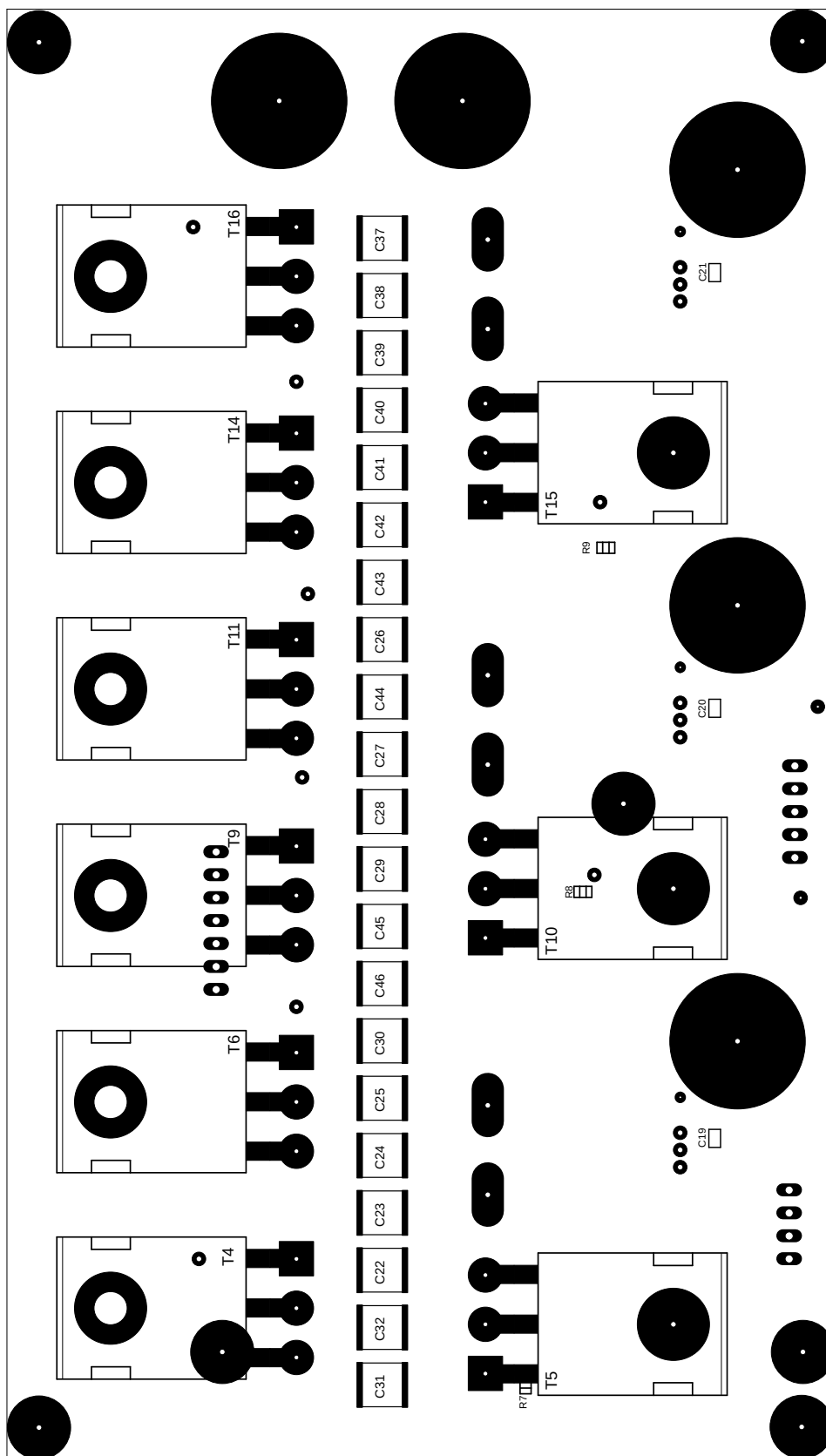
C.1 Řízení motoru nože top layer



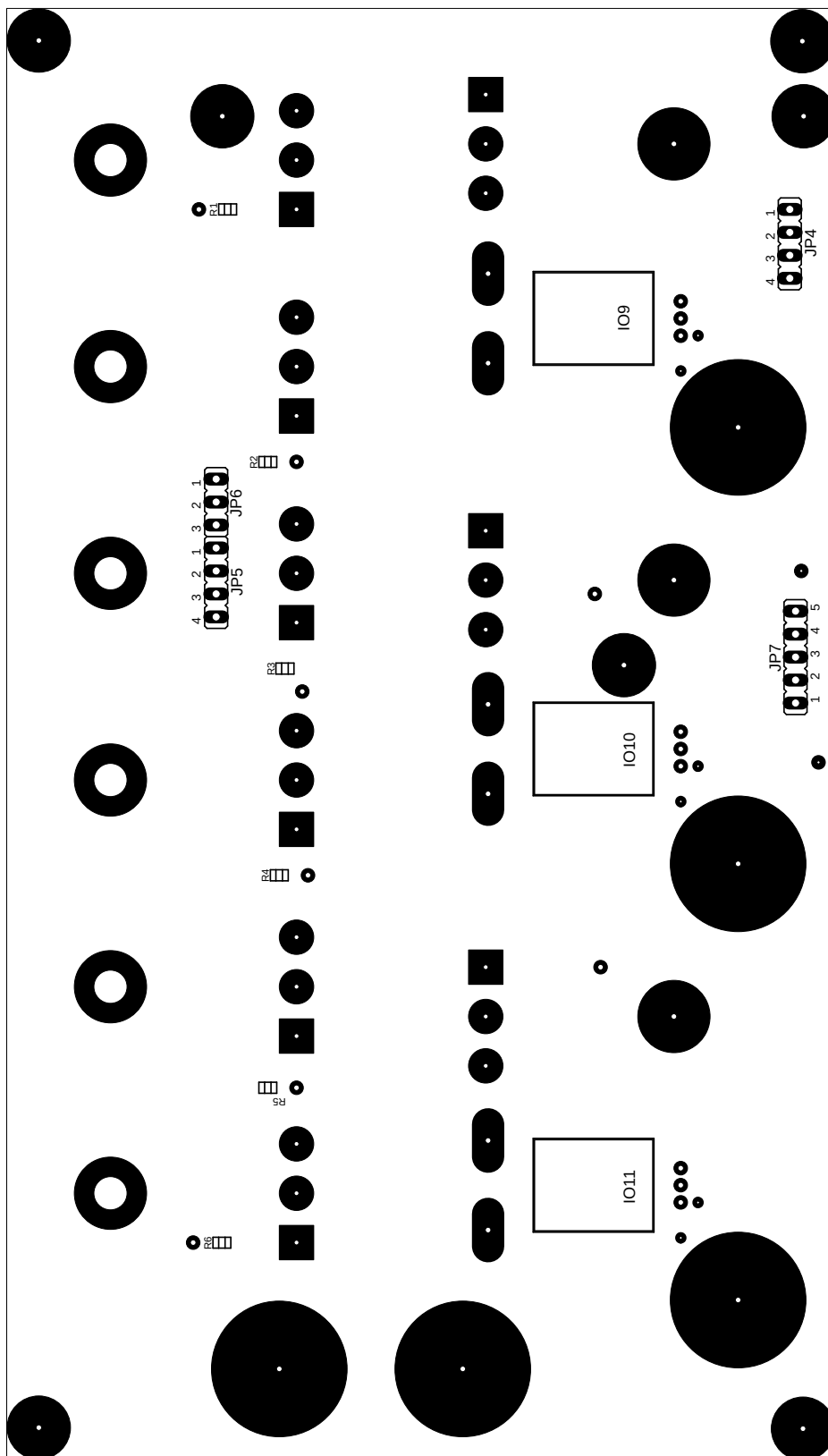
C.2 Řízení motoru nože bottom layer



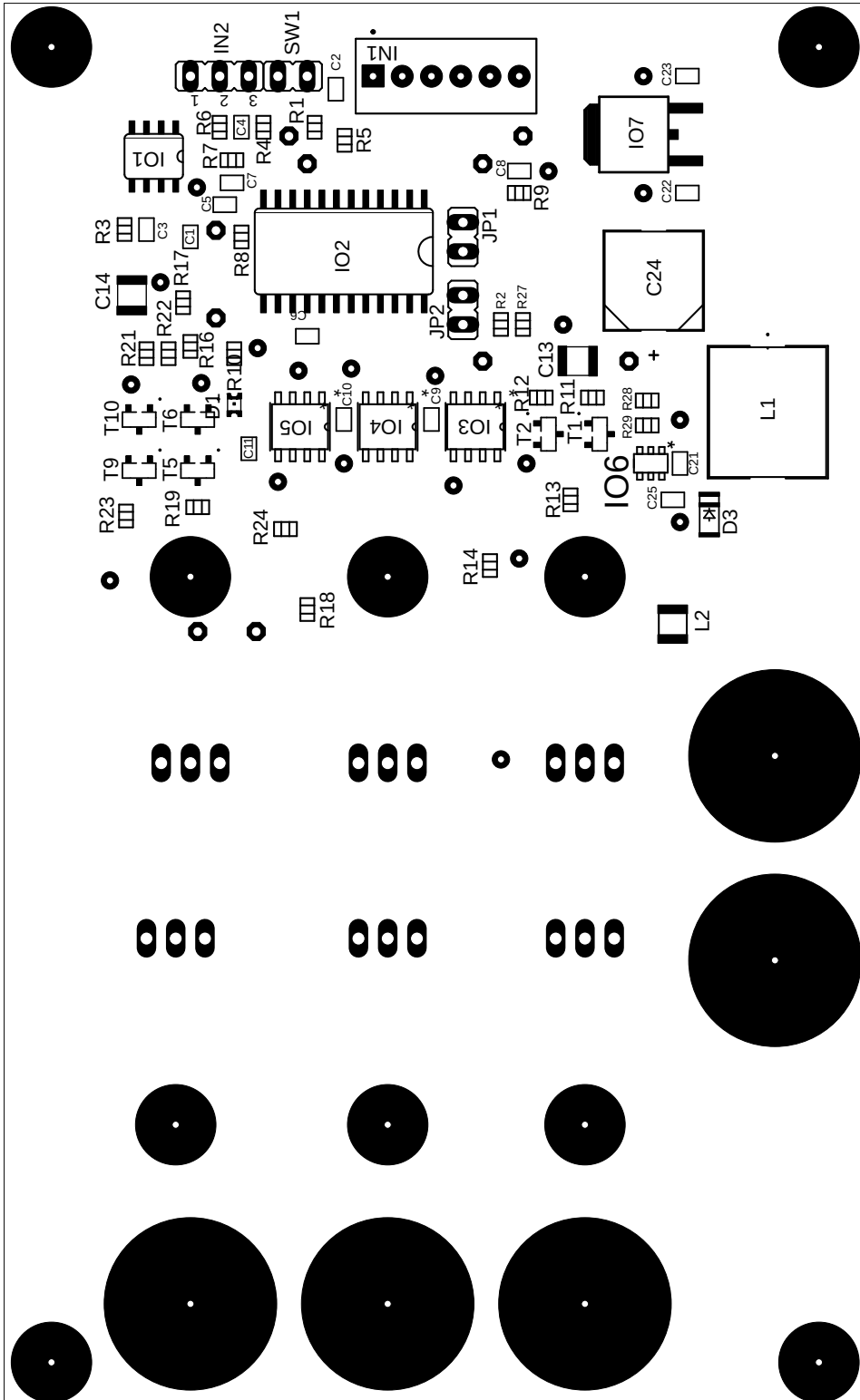
C.3 Výkonová část motoru nože top layer



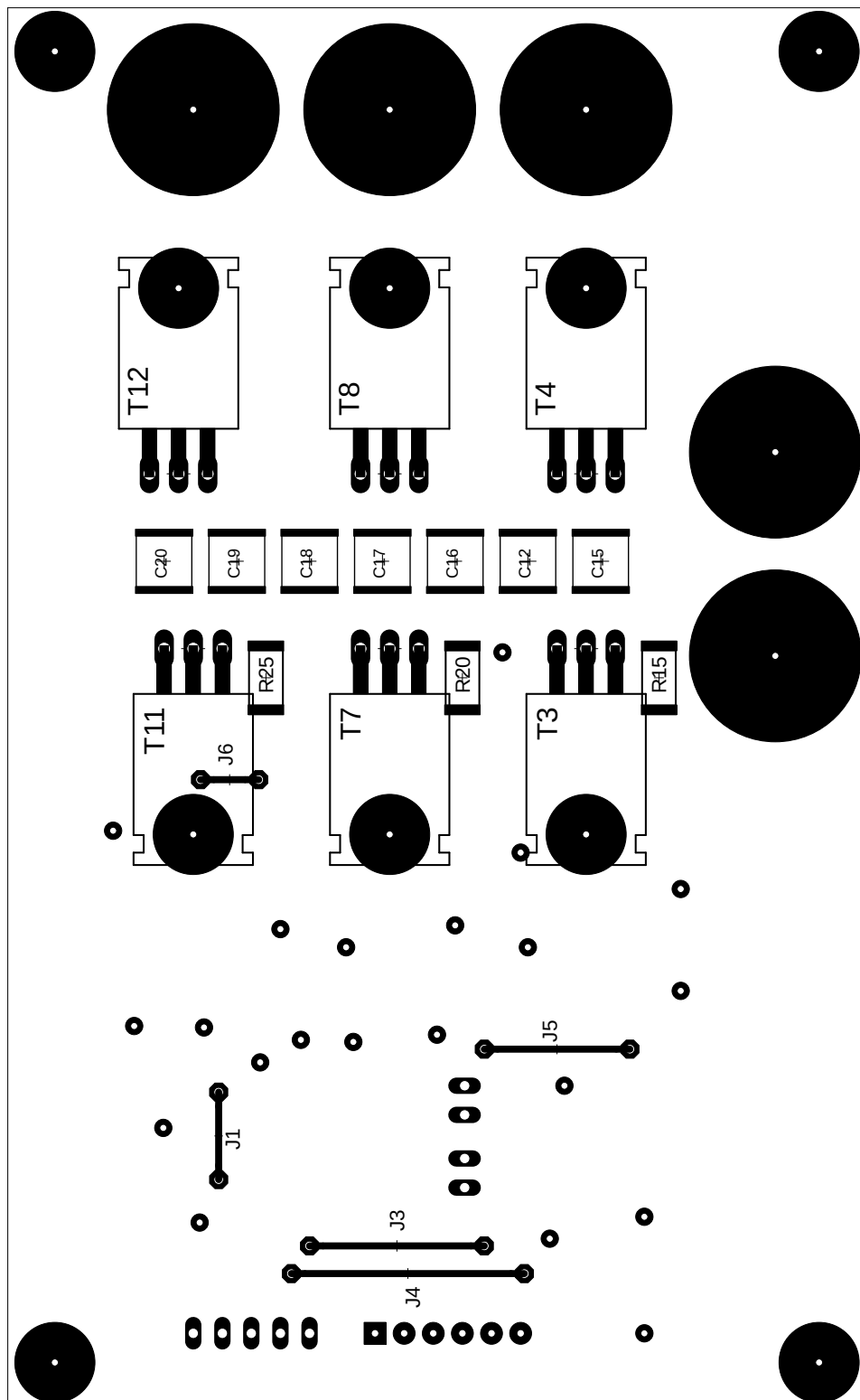
C.4 Výkonová část motoru nože bottom layer



C.5 Pojezd top layer



C.6 Pojezdu bottom layer



D Seznamy součástek

D.1 Seznam součástek řízení motoru nože

Značka	Hodnota	Pouzdro	Typ součástky
R1	0R	0805	SMD rezistor
R2	39k	0805	SMD rezistor
R3	22k	0805	SMD rezistor
R4	27k	0805	SMD rezistor
R5	47k	0805	SMD rezistor
R6	4k7	0805	SMD rezistor
R7	18k	0805	SMD rezistor
R8	18k	0805	SMD rezistor
R9	6k8	0805	SMD rezistor
R10	1k3	0805	SMD rezistor
R11	16k	0805	SMD rezistor
R12	16k	0805	SMD rezistor
R13	10k	0805	SMD rezistor
R14	10k	0805	SMD rezistor
R15	100k	0805	SMD rezistor
R16	6k2	0805	SMD rezistor
R17	2k2	0805	SMD rezistor
R18	2k7	0805	SMD rezistor
R19	2k2	0805	SMD rezistor
R20	22R	0805	SMD rezistor
R21	22R	0805	SMD rezistor
R22	4R7	0805	SMD rezistor
R23	2k7	0805	SMD rezistor
R24	2k2	0805	SMD rezistor
R25	22R	0805	SMD rezistor
R26	22R	0805	SMD rezistor
R27	4R7	0805	SMD rezistor
R28	2k7	0805	SMD rezistor
R29	2k2	0805	SMD rezistor
R30	22R	0805	SMD rezistor
R31	22R	0805	SMD rezistor
R32	4R7	0805	SMD rezistor
R33	0R	0805	SMD rezistor

R34	0R	0805	SMD rezistor
R35	0R	0805	SMD rezistor
R36	0R	0805	SMD rezistor
C1	100n	0805	SMD kondenzátor keramický
C2	100n	0805	SMD kondenzátor keramický
C3	470n	0805	SMD kondenzátor foliový
C4	100n	0805	SMD kondenzátor keramický
C5	2u2	0805	SMD kondenzátor keramický
C6	22n	0805	SMD kondenzátor keramický
C7	220n	0805	SMD kondenzátor foliový
C8	100n	0805	SMD kondenzátor keramický
C9	470p	0805	SMD kondenzátor keramický
C10	10n	0805	SMD kondenzátor keramický
C11	10n	0805	SMD kondenzátor keramický
C12	2u2	0805	SMD kondenzátor keramický
C13	2u2	0805	SMD kondenzátor keramický
C14	100n	8 x 10 mm	SMD kondenzátor elektrolyt
C15	2u2	0805	SMD kondenzátor keramický
C16	2u2	0805	SMD kondenzátor keramický
C17	2u2	0805	SMD kondenzátor keramický
C18	2u2	0805	SMD kondenzátor keramický
C19	10u	1210	SMD kondenzátor keramický
IO1	MC33039D	SOIC-8	Napaječ BLDC motoru
IO2	AOZ1282CI	SOT-23-6	Buck měnič DC/DC
IO3	MCP6002	SOIC-8	Dvojitý operační zesilovač
IO4	MC33035DW	SOIC-24	Řídící obvod BLDC motoru
IO5	7805	TO-252	5 V stabilizátor napětí
IO6	TC4420	SOIC-8	Budič pro MOS-FET
IO7	TC4420	SOIC-8	Budič pro MOS-FET
IO8	TC4420	SOIC-8	Budič pro MOS-FET
L1	100u/0,3A	101KL	SMD cívka
D1	BAT43	SOD123	SMD usměrňovací dioda
D2	BAT43	SOD123	SMD usměrňovací dioda
D3	SKL110	SOD123FL	SMD Schottkyho dioda
D4	BAT43	SOD123	SMD usměrňovací dioda
D5	red	0805	SMD LED dioda
T1	BSS84	SOT-23	SMD MOS-FET P-kanál
T2	BC807	SOT-23	SMD PNP tranzistor

T3	BC817	SOT-23	SMD NPN tranzistor
T7	BC807	SOT-23	SMD PNP tranzistor
T8	BC817	SOT-23	SMD NPN tranzistor
T12	BC807	SOT-23	SMD PNP tranzistor
T13	BC817	SOT-23	SMD NPN tranzistor
IN1		6 pinů	Pinová lišta
JP1		2 piny	Jumper (spouštění motoru)
JP2		2 piny	Jumper
JP3		2 piny	Jumper
JP4		4 piny	Pinová lišta
JP5		4 piny	Pinová lišta
JP6		3 piny	Pinová lišta
JP7		5 pinů	Pinová lišta
JP8		3 piny	Pinová lišta (potenciometr)
J1			Drátová propojka
J2			Drátová propojka

D.2 Seznam součástek výkonové desky motoru nože

Značka	Hodnota	Pouzdro	Typ součástky
R1	36k	0805	SMD rezistor
R2	36k	0805	SMD rezistor
R3	36k	0805	SMD rezistor
R4	36k	0805	SMD rezistor
R5	36k	0805	SMD rezistor
R6	36k	0805	SMD rezistor
R7	36k	0805	SMD rezistor
R8	36k	0805	SMD rezistor
R9	36k	0805	SMD rezistor
C19	2u2	0805	SMD kondenzátor keramický
C20	2u2	0805	SMD kondenzátor keramický
C21	2u2	0805	SMD kondenzátor keramický
C22	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
C23	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
C24	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
C25	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
C26	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
C27	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
C28	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
C29	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
C30	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
C31	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
C32	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
C37	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
C38	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
C39	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
C40	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
C41	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
C42	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
C43	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
C44	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
C45	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
C46	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
IO9	ACS758ECB-200B		Hallův senzor proudu
IO10	ACS758ECB-200B		Hallův senzor proudu

IO11	ACS758ECB-200B		Hallův senzor proudu
T4	IXTH140P10T	TO-247	MOS-FET P-kanál
T5	IRFP7718	TO-247	MOS-FET N-kanál
T6	IXTH140P10T	TO-247	MOS-FET P-kanál
T9	IXTH140P10T	TO-247	MOS-FET P-kanál
T10	IRFP7718	TO-247	MOS-FET N-kanál
T11	IXTH140P10T	TO-247	MOS-FET P-kanál
T14	IXTH140P10T	TO-247	MOS-FET P-kanál
T15	IRFP7718	TO-247	MOS-FET N-kanál
T16	IXTH140P10T	TO-247	MOS-FET P-kanál
JP1		4 piny	Pinová lišta
JP2		3 piny	Pinová lišta
JP3		4 piny	Pinová lišta
JP4		5 piny	Pinová lišta

D.3 Seznam součástek měniče pojezdu

Značka	Hodnota	Pouzdro	Typ součástky
R1	1k	0805	SMD rezistor
R2	0R	0805	SMD rezistor
R3	18k	0805	SMD rezistor
R4	10k	0805	SMD rezistor
R5	6k8	0805	SMD rezistor
R6	15k	0805	SMD rezistor
R7	100k	0805	SMD rezistor
R8	6k2	0805	SMD rezistor
R9	220R	0805	SMD rezistor
R10	2k2	0805	SMD rezistor
R11	2k2	0805	SMD rezistor
R12	2k7	0805	SMD rezistor
R13	25R	0805	SMD rezistor
R14	4R7	0805	SMD rezistor
R15	0R15	2512	SMD rezistor
R16	2k2	0805	SMD rezistor
R17	2k7	0805	SMD rezistor
R18	4R7	0805	SMD rezistor
R19	25R	0805	SMD rezistor
R20	0R15	2512	SMD rezistor
R21	2k2	0805	SMD rezistor
R22	2k7	0805	SMD rezistor
R23	25R	0805	SMD rezistor
R24	4R7	0805	SMD rezistor
R25	0R15	2512	SMD rezistor
R27	0R	0805	SMD rezistor
R28	18K	0805	SMD rezistor
R29	1K3	0805	SMD rezistor
C1	100n	0805	SMD kondenzátor keramický
C2	1u	0805	SMD kondenzátor keramický
C3	22n	0805	SMD kondenzátor keramický
C4	100n	0805	SMD kondenzátor keramický
C5	10n	0805	SMD kondenzátor keramický
C6	2u2	0805	SMD kondenzátor keramický
C7	2u2	0805	SMD kondenzátor keramický

C8	1n	0805	SMD kondenzátor keramický
C9	2u2	0805	SMD kondenzátor keramický
C10	2u2	0805	SMD kondenzátor keramický
C11	2u2	0805	SMD kondenzátor keramický
C12	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
C13	10u	1210	SMD kondenzátor keramický
C14	10u	1210	SMD kondenzátor keramický
C15	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
C16	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
C17	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
C18	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
C19	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
	10u	2220	SMD kondenzátor keramický
C20			
C21	100n	0805	SMD kondenzátor keramický
C22	2u2	0805	SMD kondenzátor keramický
C23	2u2	0805	SMD kondenzátor keramický
C24	100u/50 V	0805	SMD kondenzátor elektrolyt
C25	100n	0805	SMD kondenzátor keramický
D1	red	0805	SMD LED dioda
D3	SKL110	SOD123FL	SMD Schottkyho dioda
L1	100u/0,3 A	KL101	Tlumivka
L2		1210	Tlumivka
IO1	MC33039D	SOIC-8	Napaječ BLDC motoru
IO2	MC33035DW	SOIC-24	Řídící obvod BLDC motoru
IO3	TC4420	SOIC-8	Budič pro MOS-FET
IO4	TC4420	SOIC-8	Budič pro MOS-FET
IO5	TC4420	SOIC-8	Budič pro MOS-FET
IO6	AOZ1282CI	SOT-23-6	Buck měnič DC/DC
IO7	7805	TO-252	5 V stabilizátor napětí
IO3	MCP6002	SOIC-8	Dvojitý operační zesilovač
T1	BC817	SOT-23	SMD NPN tranzistor
T2	BC807	SOT-23	SMD PNP tranzistor
T3	IRF1405PbF	TO-220	MOS-FET N-kanál
T4	IRFR4905PbF	TO-220	MOS-FET P-kanál
T5	BC817	SOT-23	SMD NPN tranzistor
T6	BC807	SOT-23	SMD PNP tranzistor

T7	IRF1405PbF	TO-220	MOS-FET N-kanál
T8	IRFR4905PbF	TO-220	MOS-FET P-kanál
T9	BC817	SOT-23	SMD NPN tranzistor
T10	BC807	SOT-23	SMD PNP tranzistor
T11	IRF1405PbF	TO-220	MOS-FET N-kanál
T12	IRFR4905PbF	TO-220	MOS-FET P-kanál
JP1		2 piny	Jumper
JP2		2 piny	Jumper
IN1		6 pinů	Pinová lišta
IN1		3 piny	Pinová lišta (potenciometr)
SW1		2 piny	Jumper (spouštění pojezdu)
J1			Drátová propojka
J3			Drátová propojka
J4			Drátová propojka
J5			Drátová propojka
J6			Drátová propojka

E Fotografie finální verze sekačky

