

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrických pohonů a trakce

Diplomová práce
ADIP25

**Návrh a realizace modulu řízení motoru pro
Citroën Berlingo Electric**



2016

Bc. Pavel SKAROLEK

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrických pohonů a trakce

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Pavel Skarolek**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony

Název tématu: **Návrh a realizace modulu řízení motoru pro Citroën Berlingo Electricque**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte studii literatury a dostupných technických podkladů k problematice řízení trakčních motorů.
- 2) Navrhněte regulační strukturu.
- 3) Proveďte návrh obvodového řešení a programového vybavení.
- 4) Navrhněte testovací přípravek.
- 5) Ověřte navržené řešení.
- 6) Testování proveďte na elektromobilu Citroën Berlingo Electricque.

Seznam odborné literatury:

- [1] Pavelka, J.: Elektrické pohony, nakladatelství ČVUT, Praha 2007
- [2] L'Institut Citroën: Berlingo Electricque
- [3] Voženílek, P., Novotný, V., Mindl, P.: Elektromechanické měniče, České vysoké učení technické v Praze, Praha 2007
- [4] ST Microelectronics Inc., < <http://www.st.com/>>

Vedoucí: Košík Michal

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

Ing. Jan Bauer, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 4. 2016

Prohlášení

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

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

podpis

Anotace

Diplomová práce se zabývá návrhem a konstrukcí modulu řízení motoru elektromobilu. Popsané řešení umožňuje pohon elektromobilu se stejnosměrným cize buzeným motorem, reverzací, rekuperací a odbuzováním. Řízení jednotlivých DC/DC měničů pro kotvu a buzení je řešeno pomocí procesoru ARM Cortex M3. Cílem bylo navrhnout plně funkční náhradu za původní poškozenou měničovou výbavu elektromobilu Citroen Berlingo Electrique. Zkonstruovaný modul řízení motoru byl úspěšně testován a práce obsahuje výsledky měření jak dílčích celků, tak i zpracovaná data naměřená během testovacích jízd.

Abstract

The converter equipment described in this diploma thesis allows to drive an electric vehicle with a separately excited DC motor. The converter allows reversing, regenerative braking and excitation control. Designed equipment consists of two DC/DC converters, one for the armature and the second one for field windings, both are fully controlled by the ARM Cortex M3 micro controller unit. The goal was to create a fully functional replacement for the damaged original converter of the electric vehicle Citroen Berlingo Electrique. Designed module was successfully tested and processed data measured during driving tests are included.

Klíčová slova

Elektromobil, stejnosměrný cize buzený motor, DC/DC měnič, pulzně-šířková modulace, rekuperace, odbuzování, procesor, MCU, ARM Cortex M3, PS regulátor.

Key words

Electric vehicle, DC motor, DC/DC converter, PWM, regenerative braking, excitation control, field weakening, MCU, ARM Cortex M3, PS controller.

Obsah

1. Úvod.....	10
2. Úvod do problematiky.....	11
2.1 Typy motorů.....	11
2.2 Reverzace.....	11
2.2.1 Přepólování buzení.....	11
2.3 Rekuperace.....	12
2.4 Dimenzování prvků.....	13
2.5 Momentová charakteristika.....	14
2.6 Chlazení.....	16
2.7 Parametry navrženého modulu řízení motoru.....	17
3. Popis jednotlivých bloků HW.....	18
3.1 MCU řízení motoru.....	19
3.1.1 DPS LEM.....	21
3.2 IGBT driver.....	22
3.3 Měnič kotvy.....	25
3.4 Měnič buzení.....	26
3.5 Izolační zdroj.....	27
3.5.1 Návrh impulzního transformátoru.....	28
3.6 Konstrukce šasi.....	30
4. Popis SW bloku řízení motoru.....	32
4.1 Blokové schéma pohonu.....	33
4.2 Inicializace periférií.....	34
4.3 Řízení běhu programu.....	34
4.3.1 Přerušování.....	35
4.3.2 PS Regulátory.....	35
4.3.3 Obsluha PWM modulátorů.....	36
4.4 Hlavní stavový automat.....	36
4.4.1 Stav 0 – Výchozí.....	37
4.4.2 Stav 1 – Běh.....	37
4.4.3 Stav 2 – Čekání.....	37
4.4.4 Stav 3 – Testování.....	37
4.4.5 Stav 4 – Chyba.....	38
4.4.6 Stav 5 – UART manual.....	38
4.4.7 Stav 6 – ADC manual.....	38
4.5 Podřízený automat buzení.....	38
4.5.1 Stav 0 – Odbuzeno.....	39
4.5.2 Stav 1 – Buzení vzad.....	39
4.5.3 Stav 2 – Buzení vpřed.....	40
4.5.4 Stav 3 – Jízda vzad.....	40
4.5.5 Stav 4 – Jízda vpřed.....	40
4.5.6 Stav 5 – Neutrál vzad.....	40
4.5.7 Stav 6 – Neutrál vpřed.....	41
4.6 Rozhraní CAN.....	41
4.6.1 Programová realizace.....	41
4.7 Rozhraní UART.....	42
4.7.1 Programová realizace.....	42
4.8 Diagnostické funkce.....	43

5. Měření a vyhodnocení výsledků.....	44
5.1 Měření IGBT driverů.....	44
5.2 Síť momentových charakteristik.....	47
5.3 Měření v elektromobilu.....	49
5.4 Shrnutí výsledků měření.....	53
6. Závěr.....	54
7. Literatura.....	55

Seznam obrázků

Obr. 1: Měnič buzení obecně.....	12
Obr. 2: Měnič kotvy obecně.....	12
Obr. 3: Průběhy napětí a proudu na výstupu měniče kotvy (10 V/div, 2 A/div, 10 μ s/div). 13	
Obr. 4: Maximální momentová charakteristika.....	14
Obr. 5: Maximální momentová charakteristika motoru elektromobilu (zdroj: [6]).....	15
Obr. 6: Blokové schéma řízení motoru.....	18
Obr. 7: Schéma desky s MCU pro řízení motoru.....	20
Obr. 8: Foto desky MCU.....	21
Obr. 9: Schéma desky s proudovými sondami.....	21
Obr. 10: Schéma IGBT driveru.....	22
Obr. 11: Koncový stupeň IGBT driveru.....	23
Obr. 12: Obvod měření saturačního napětí.....	24
Obr. 13: Foto IGBT driverů.....	25
Obr. 14: Schéma měniče kotvy.....	25
Obr. 15: Pohled na měnič kotvy – vlevo.....	26
Obr. 16: Celkové schéma měniče buzení.....	26
Obr. 17: Foto měniče buzení.....	27
Obr. 18: Izolační zdroj.....	27
Obr. 19: Rozložení vinutí na transformátoru.....	29
Obr. 20: Foto izolačního zdroje – zadní strana.....	29
Obr. 21: Foto izolačního zdroje – přední strana.....	30
Obr. 22: Základní konstrukce šasi.....	30
Obr. 23: Rozložení desek v šasi.....	31
Obr. 24: Foto šasi.....	31
Obr. 25: Blokové schéma pohonu.....	33
Obr. 26: Řízení přerušením.....	34
Obr. 27: Hlavní stavový automat.....	36
Obr. 28: Podřízený automat buzení.....	39
Obr. 29: Průběh napětí na Gate – sepnutí (5 V/div, 250 ns/div).....	44
Obr. 30: Průběh napětí na Gate – vypnutí (5 V/div, 250 ns/div).....	44
Obr. 31: Průběh napětí na Gate při vybavení nadproudové ochrany (5 V/div, 500 μ s/div). 45	
Obr. 32: Průběh napětí na Gate při vybavení nadproudové ochrany – detail (5 V/div, 25 μ s/div).....	45
Obr. 33: Průběh napětí na tranzistoru při sepnutí (10 V/div, 20 A/div, 100 ns/div).....	46
Obr. 34: Průběh napětí na tranzistoru při vypnutí (10 V/div, 20 A/div, 100 ns/div).....	46
Obr. 35: Schéma zapojení pro měření sítě momentových charakteristik.....	47
Obr. 36: Síť momentových charakteristik.....	49

Obr. 37: Záznam jízdy – reverzace a rekuperace.....	50
Obr. 38: Záznam jízdy – odbuzování a rekuperace.....	51
Obr. 39: Umístění měničové výbavy v elektromobilu.....	52
Obr. 40: Pohled do šasi.....	52

Seznam tabulek

tab 1: Parametry motoru v elektromobilu.....	15
tab 2: Barevné označení cest v blokovém schématu.....	18
tab 3: Přehled funkcí a periférií.....	32
tab 4: Rozhraní CAN.....	41
tab 5: Rozhraní UART.....	42
tab 6: Parametry motoru na měřicím soustrojí.....	47
tab 7: Síť momentových charakteristik.....	48

Seznam příloh

Příloha A – Měření

Příloha B – Schémata

Příloha C – Seznam součástek

Příloha D – Propojení DPS

Seznam použitých zkratk a symbolů

PWM	Pulzně šířková modulace
DPS	Deska plošných spojů
MCU	Mikroprocesorová jednotka
CAN	Sériová sběrnice typu Controlled Area Network
UART	Univerzální asynchronní sériová sběrnice
Std. Periph.	Knihovna Standart peripherals library pro ARM Cortex M3
B_{max}	Maximální sycení jádra izolačního zdroje
d	Průměr drátu vinutí izolačního zdroje
f	Frekvence izolačního zdroje
f_c	Mezní frekvence antialiasingového filtru
f_s	Spínací frekvence měničů kotvy a buzení
I_b	Proud buzení
I_{ef}	Efektivní proud primárním vinutím izolačního zdroje
I_f	Proud buzení trakčního motoru

I_p	Špičkový proud primárním vinutím izolačního zdroje
I_q	Proud kotvou trakčního motoru
I_q^*	Žádaný proud kotvou trakčního motoru
J	Proudová hustota vinutí izolačního zdroje
L_d	Indukčnost zátěže obecného DC/DC měniče
L_f	Indukčnost buzení trakčního motoru
L_q	Indukčnost kotvy trakčního motoru
l_v	vzduchová mezera transformátoru izolačního zdroje
M	Moment trakčního motoru
N_p	Počet primárních závitů izolačního zdroje
N_s	Počet sekundárních závitů izolačního zdroje
P	Výkon trakčního motoru
P_p	Výkon izolačního zdroje
P_Z	Ztrátový výkon měniče kotvy celkový
$P_{Z<25km/h}$	Ztrátový výkon měniče kotvy pro rychlost < 25 km/h
$P_{Z>25km/h}$	Ztrátový výkon měniče kotvy pro rychlost > 25 km/h (odbuzování)
P_{Z1}	Vodivostní ztráty IGBT kotvy
P_{Z2}	Spínací ztráty IGBT kotvy
P_{ZD}	Ztráty na zpětné diodě měniče kotvy
P_{ZT}	Ztráty na tranzistoru měniče kotvy v sepnutém stavu
R_f	Odpor buzení trakčního motoru
R_G	Odpor mezi driverem a Gate tranzistoru měniče kotvy
R_q	Odpor kotvy trakčního motoru
s	Střída měniče kotvy
s_{iz}	Střída izolačního zdroje
S_j	Průřez jádra transformátoru izolačního zdroje
t_f	Doba poklesu proudu při vypínání tranzistoru
t_r	Doba nárůstu proudu při zapínání tranzistoru
U_b	Napětí trakční baterie
U_{CEsat}	Saturační napětí tranzistoru
U_D	Napětí na diodě v propustném směru
U_f	Napětí na buzení trakčního motoru
U_{i_max}	Dovolené indukované napětí na trakčním motoru při změně směru

U_n	Výchozí napětí palubní sítě pro návrh izolačního zdroje
U_p	Napětí indukované na primárním vinutí izolačního zdroje
U_q	Napětí kotvy trakčního motoru
U_s	Napětí sekundárního vinutí izolačního zdroje
v	Rychlost jízdy
$\eta_{<25km/h}$	Účinnost měniče kotvy pro rychlost < 25 km/h
$\eta_{>25km/h}$	Účinnost měniče kotvy pro rychlost > 25 km/h (odbuzování)
Φ	Magnetický tok buzení trakčního motoru
Ω	Úhlové otáčky trakčního motoru
ΔI_{max}	Zvlnění proudu kotvou trakčního motoru maximální
ΔU_{C_max}	Zvlnění napětí na vstupním kondenzátoru měniče kotvy

1. Úvod

V této práci se zabývám problematikou řízení pohonu se stejnosměrným cize buzeným motorem.

Cílem bylo postavit kompletní měničovou výbavu elektromobilu Citroën Berlingo Electricque a tento modul řízení motoru je její součástí.

V první části obecně popisují řízení trakčních motorů podle jejich typu. Srovnávám zde princip řízení motoru střídavého, stejnosměrného sériového a stejnosměrného s cizím buzením. Srovnání je provedeno z pohledu řízení momentu, reverzace a rekuperace, tedy čtyřkvadrantového řízení.

Na konci úvodní části jsou stanoveny parametry modulu řízení motoru podle parametrů motoru v elektromobilu.

Následující dvě kapitoly obsahují detailní popis HW a SW sestaveného modulu. V části HW je detailně popsána funkce jednotlivých desek plošných spojů, schémata zapojení a snímky výsledného provedení desek.

Protože modul je řízen procesorem, následuje kapitola popisující v něm nahraný obslužný SW. Jedná se o popis pomocí stavových diagramů a blokových schémat naznačujících funkci pohonu a jeho řízení. V poslední podkapitole je nakonec rozebrán samotný kód v jazyce C a stručně vysvětleny jednotlivé funkce, ze kterých se skládá.

Ověřování funkce modulu řízení motoru bylo prováděno v několika etapách od měření jednotlivých desek po jejich osazení a odladění, přes měření v laboratoři na měřicím soustrojí s momentovou vahou až po měření v samotném elektromobilu.

V kapitole Měření jsou postupně uvedeny výsledky z jednotlivých etap. První je měření průběhů na IGBT driverech vlastní konstrukce, které bylo třeba naladit podle stanovených parametrů a ověřit schopnost bezpečně budit výkonový IGBT modul.

Dále bylo provedeno měření hotových měničů na měřicím soustrojí pro ověření správné funkce regulátorů v MCU, hlavně princip odbuzování stejnosměrného cize buzeného motoru.

Následně bylo provedeno měření ve vozidle. Celá měničová výbava, jejíž součástí modul řízení motoru je, zamontována do elektromobilu Citroën Berlingo Electricque a připojena do stávající elektrické instalace vozidla. Nezbytnou součástí této měničové výbavy je i palubní počítač, který funguje jako rozhraní mezi původní instalací vozidla a mým modulem řízení. Palubní počítač ale nebyl součástí mé práce, proto zde popsán není. Je zde ale popsáno, jakým způsobem modul řízení motoru komunikuje s palubním počítačem pomocí sběrnice CAN.

S elektromobilem byly provedeny testovací jízdy a v kapitole Měření uvádím jejich výsledky v podobě časových průběhů jednotlivých měřených veličin tak, jak byly měřeny v průběhu jízdy. Toto měření bylo provedeno jako záznam dat odesílaných palubním počítačem, který přeposílá naměřené hodnoty z jednotlivých snímačů a podřízených modulů, včetně mého modulu řízení motoru.

S elektromobilem zatím nebylo možno vyjet mimo areál školy, takže testovací jízdy byly zatím provedeny pouze při malých rychlostech.

2. Úvod do problematiky

Cílem je řídit stejnosměrný motor s cizím buzením, zde ale pro srovnání stručně popíši i možnosti řešení měničů při použití střídavého motoru a motoru stejnosměrného sériového. Na konci kapitoly se věnuji už konkrétně motoru v elektromobilu Citroën Berlingo Electrique a stanovení parametrů, které byly výchozí při návrhu modulu řízení motoru.

2.1 Typy motorů

V elektromobilu máme k dispozici stejnosměrný zdroj, trakční baterii, a potom podle typu buď střídavý nebo stejnosměrný motor.

V případě střídavého motoru se jedná typicky o třífázový synchronní, nebo asynchronní a k jeho napájení používáme třífázový střídač s pulzně šířkovou modulací.

U stejnosměrného motoru potřebujeme stejnosměrný DC/DC měnič. Pokud se jedná o sériový motor stačí pro jeho napájení teoreticky jediný DC/DC měnič. V případě motoru s cizím buzením je třeba jeden měnič pro obvod kotvy a druhý pro obvod buzení.

2.2 Reverzace

V případě střídavého motoru je reverzace realizována jednoduše změnou sledu fází, tedy pouze sofistikovaným řízením měniče, nic dalšího není potřeba.

V případě stejnosměrného motoru se sériovým buzením je nutné změnit směr budícího proudu vůči kotevnímu. Protože je buzení v sérii s kotvou, a tedy buzením teče poměrně velký kotevní proud musí toto být realizováno buď silovým relé, nebo můstkem výkonových polovodičových součástek.

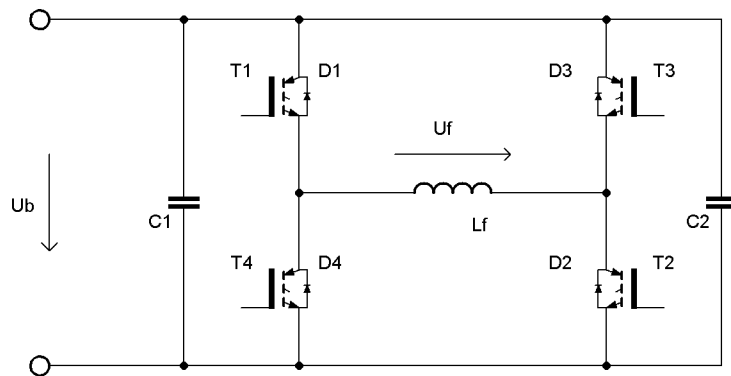
Pro stejnosměrný motor s cizím buzením můžeme pro reverzaci s výhodou využít toho, že buzením teče řádově 10x menší proud než obvodem kotvy a řešit reverzaci v měniči buzení pomocí menšího relé, nebo výhodně pomocí přídatného malého můstkového měniče.

2.2.1 Přepólování buzení

Zde je problémem typicky velká indukčnost obvodu buzení, a tedy velká časová konstanta. Při použití reverzačního relé je nutné ho dimenzovat na vypínání malých induktivních proudů, a nebo lépe zajistit jeho přepínání pouze při nulovém proudu buzení. To lze snadno zajistit řízením, ale kvůli velké časové konstantě pohon ztrácí dynamiku a vede to k tomu, že elektromobil reaguje na změnu zvoleného směru s nepříjemným zpožděním.

Řešením je použití polovodičového měniče, který umožňuje obrátit polaritu napětí na svorkách buzení. Díky zpětným diodám nedojde, jako při použití relé, k vzniku přepětí při přepínání, a není tedy třeba čekat na dlouhou časovou konstantu při změně směru.

Obecné zapojení takového měniče je uvedeno na obrázku 1.



Obr. 1: Měníč buzení obecně

Žádáme-li kladné napětí buzení U_f spínáme současně T1 a T2. Proud buzení řídíme pulzně šířkovou modulací. Při vypnutí T1 a T2 vedou zpětné diody D3 a D4.

Při požadavku reverzace buzení spínáme T3 a T4.

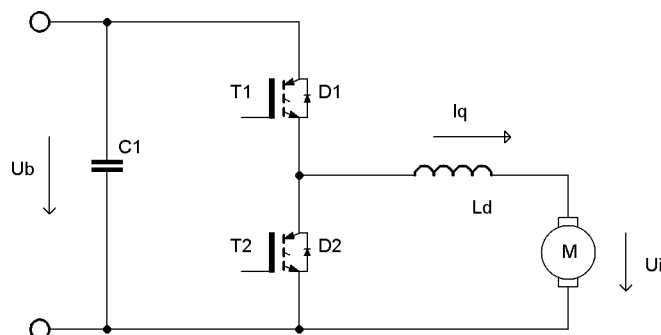
2.3 Rekuperace

V případě střídavého motoru je rekuperace realizována opět pouze změnou řízení stávajícího třífázového polovodičového můstku.

U stejnosměrného sériově buzeného motoru je nutné při rekuperaci zajistit zachování směru budícího proudu, k tomu je možno využít výkonové diody a proud buzením usměrnit, tedy zachovat jeho polaritu při jízdě i brzdění rekuperací.

Cize buzený motor zde opět přináší výhodu odděleného obvodu kotvy od obvodu buzení a k rekuperaci přizpůsobíme pouze DC/DC měnič kotvy.

Obecné schéma DC/DC měniče pro kotvu je na následujícím obrázku 2.



Obr. 2: Měníč kotvy obecně

Při jízdě spínáme pulzně šířkovou modulací T1, při jeho vypnutí vede D2. Při rekuperaci spínáme naopak T2 a při jeho vypnutí se přes D1 vrací energie zpět do trakční baterie.

Z principu zapojení vyplývá, že T1 i T2 můžeme spínat vzájemně inverzně, a měnič pak drží indukované napětí na kotvě motoru dané aktuální střídou a napětím trakční baterie bez ohledu na směr proudu. Toto zjednodušení je důležité pro řízení měniče pomocí jednoduchých analogových obvodů, ale v případě využití MCU nemá význam.

2.4 Dimenzování prvků

Cílem je dosáhnout malého zvlnění proudu kotvou pod 5 % dle [3]. Pro maximální zvlnění proudu, které nastává při střídě 50 % dle [1] pro zapojení z obrázku 2 platí:

$$\Delta I_{max} = \frac{U_b}{4 \cdot f_s \cdot L_d} \quad (1)$$

Zvlnění můžeme ovlivnit spínací frekvencí f_s a indukčností L_d . Indukčnost má ale samotná kotva motoru, proto se snažíme ji využít, nepřidávat externí tlumivku a místo toho dosáhnout přijatelného zvlnění zvýšením spínací frekvence. Po zjištění nutné spínací frekvence vybereme vhodné výkonové součástky.

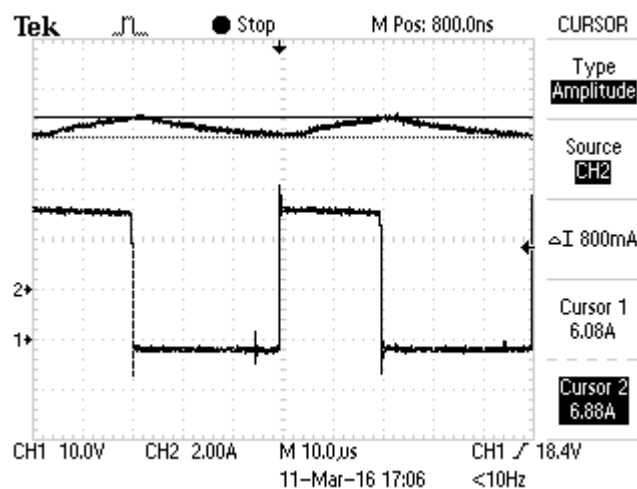
Dalším prvkem je kondenzátor C1, který slouží jako akumulátor energie pro pulzní měnič a zabraňuje tomu, aby pulzní odběr zatěžoval trakční baterii. Trakční baterie má vždy určitý sériový odpor a pulzní odběr by způsoboval zbytečné zvýšení ztrát na tomto parazitním odporu.

Při výpočtu vhodné kapacity se dle [1] vychází ze zvlnění napětí na svorkách kondenzátoru:

$$\Delta U_{cmax} = \frac{I_{max}}{4 \cdot f_s \cdot C_1} \quad (2)$$

Zde je vyšší spínací frekvence f_s výhodou, ale zvyšuje nároky na provedení kondenzátoru.

Na obrázku 3 je pro příklad zobrazen naměřený průběh napětí a proudu na měniči kotvy při měření v laboratoři.



Obr. 3: Průběhy napětí a proudu na výstupu měniče kotvy (10 V/div, 2 A/div, 10 µs/div)

V tomto konkrétním příkladu můžeme odečíst zvlnění proudu 13 %, a tedy by bylo třeba uvažovat o zvýšení spínací frekvence. K měniči byl ale připojen malý motor na nízké napětí, motor v elektromobilu má indukčnost kotvy výrazně větší.

2.5 Momentová charakteristika

Stejnoseměrným cizí buzeným motorem můžeme v rámci dovolených parametrů modelovat libovolnou momentovou charakteristiku, protože řídíme odděleně proud kotvy i proud buzení. Platí následující rovnice:

$$M = k \cdot \Phi \cdot I_q \quad (3)$$

Tok Φ můžeme dle [1] aproximovat jako $k_\phi \cdot I_f$ a tedy:

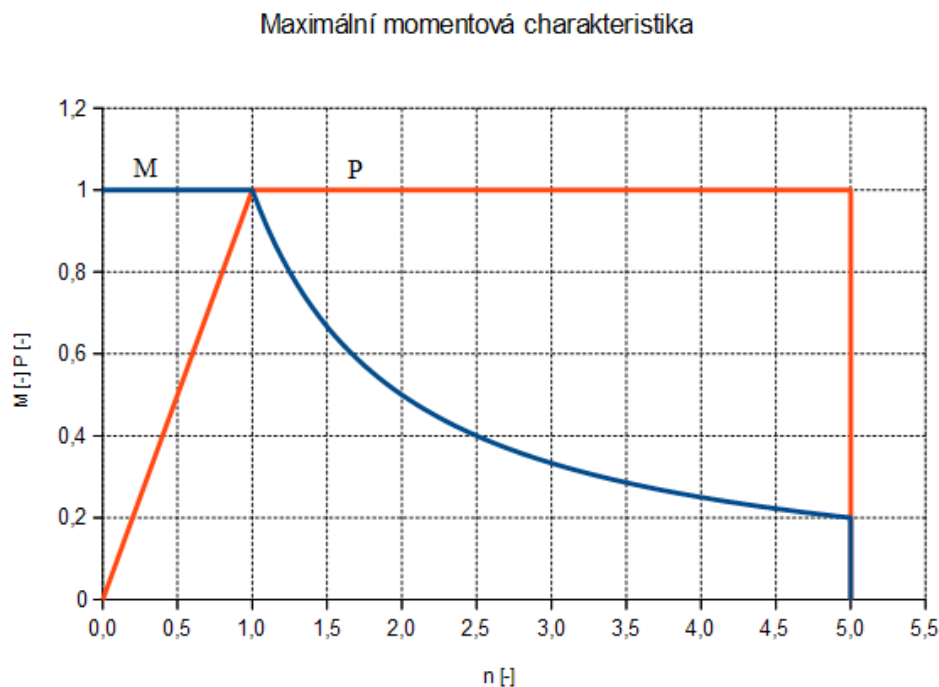
$$M = k' \cdot I_q \cdot I_f \quad (4)$$

Pro otáčky pak platí:

$$\Omega = k'' \cdot \frac{U_q - R_q \cdot I_q}{I_f} \quad (5)$$

Protože se jedná o pohon elektromobilu, chceme maximálně využít pracovní oblast motoru. Ta je omezena z elektrického hlediska maximálním proudem kotvy, maximálním proudem buzení, z hlediska izolace dovoleným napětím na kotvě a z hlediska mechanického maximálními otáčkami rotoru.

Můžeme tedy sestavit příklad maximální momentové charakteristiky na obrázku 4 v poměrných jednotkách.



Obr. 4: Maximální momentová charakteristika

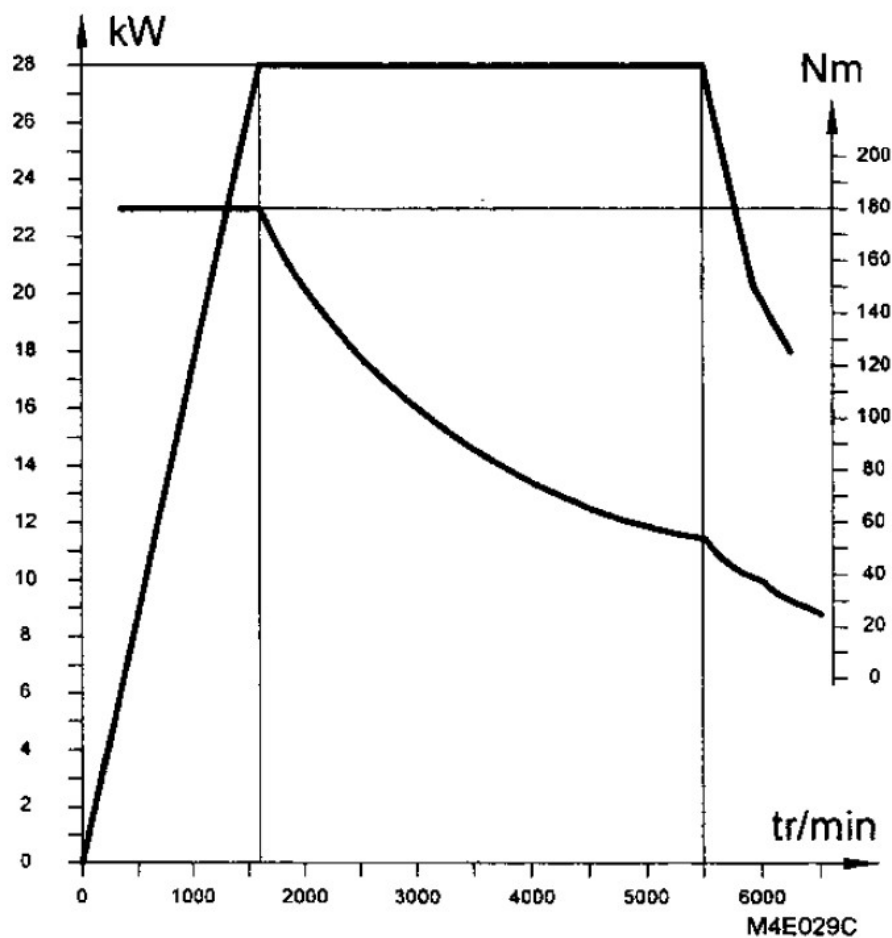
Křivky vychází z rovnosti $P = M \cdot \Omega$.

Štítkové hodnoty se udávají pro jmenovité nabuzení, proto je zlom charakteristiky v otáčkách 1,0 poměrných jednotek, jako maximální otáčky jsem zvolil pro tento ilustrační model charakteristiky 5,0 pj. tedy odbuzení na 20 %.

Nyní se můžeme podívat na reálné parametry a charakteristiku uvedenou uvedenou v manuálu [6] k elektromobilu Citroën Berlingo Electricque.

Štítkové parametry		Naměřené parametry	
Výrobce	LEROY-SOMER	R_q	$(0,1 \pm 0,02) \Omega$
Typ	SA18	R_f	$(8,9 \pm 0,2) \Omega$
Výkon	15 kW	L_q	$(285 \pm 20) \mu\text{H}$
Otáčky	1650 ot./min	L_f	$(15 \pm 2) \text{H}$
Kotva	162 V / 110 A		
Buzení	120 V / 9,5 A		

tab 1: Parametry motoru v elektromobilu



Obr. 5: Maximální momentová charakteristika motoru elektromobilu (zdroj: [6])

Z těchto údajů jsem vycházel při návrhu nového řízení tohoto motoru. Jmenovitým otáčkám dle [6] odpovídá 25 km/h, je tedy patrné, že měnič kotvy řídí prakticky pouze rozjezd.

Při vyšší rychlosti je motor v režimu odbuzování, tedy je řízen pouze měničem buzení, zatímco měnič kotvy může být trvale plně otevřený.

To vede k úvaze, že pro účinnost jsou nejpodstatnější ztráty na spínacím prvku měniče kotvy v sepnutém stavu. Ztráty při spínání a vypínání se uplatní pouze při rozjezdu.

Je tedy třeba navrhnout algoritmus řízení obou měničů tak, aby se využilo právě této možnosti výrazného snížení ztrát.

2.6 Chlazení

Největším zdrojem tepla v tomto návrhu řízení stejnosměrného cize buzeného motoru bude spínací prvek měniče kotvy. Porovnáním dostupných součástek jsem zvolil IGBT modul.

Pro ztráty v sepnutém stavu tranzistoru se saturačním úbytkem U_{CEsat} spínaným se střídou s platí:

$$P_{ZT} = U_{CEsat} \cdot I_q \cdot s \quad (6)$$

Po komutaci teče proud zpětnou diodou, ztráty na ní budou:

$$P_{ZD} = U_D \cdot I_q \cdot (1 - s) \quad (7)$$

Protože u IGBT zpravidla platí $U_D = U_{CEsat}$, můžeme pro ztráty v sepnutém stavu psát jednoduše:

$$P_{Z1} = U_{CEsat} \cdot I_q \quad (8)$$

Pro spínací ztráty vycházíme dle [5] z napětí trakční baterie U_b a katalogových hodnot tranzistoru, kde t_r je doba nárůstu a t_f doba poklesu proudu při sepnutí resp. vypnutí.

$$P_{Z2} = U_b \cdot I_q \cdot (t_r + t_f) \cdot f_s \quad (9)$$

Celkové ztráty potom:

$$P_Z = P_{Z1} + P_{Z2}$$

Zvolil jsem tranzistor SKM195GB066D, ztráty po prostém dosazení hodnot z katalogu [8], když uvažuji $U_b = 200\text{V}$, $I_q = 100\text{A}$ a $f_s = 20\text{kHz}$ vycházejí:

$$P_{Z1} = U_{CEsat} \cdot I_q = 1,25\text{V} \cdot 100\text{A} = 125\text{W} \quad (10)$$

$$P_{Z2} = U_b \cdot I_q \cdot (t_r + t_f) \cdot f_s = 200\text{V} \cdot 100\text{A} \cdot (42 + 70)\text{ns} \cdot 20\text{kHz} = 45\text{W} \quad (11)$$

Ztráty v režimu odbuzování budou v reálném zapojení odpovídat vypočtené hodnotě, ovšem spínací ztráty budou zřejmě větší. Problémem jsou krátké spínací časy. V katalogu jsou napsané nejkratší dosažené, ale v reálném zapojení je důležité zamezit vzniku nebezpečného přepětí při vypínání, a proto jsou příliš krátké časy, a tedy vysoké du/dt je naopak na škodu.

Vysoké du/dt dále namáhá izolaci vinutí motoru a zrychluje její stárnutí.

Zpravidla tedy nechceme využívat maximálního du/dt , který daný IGBT teoreticky umožňuje, ale navrhujeme kompromis s ohledem na ztráty.

Volím $R_G = 4\Omega$, podle grafů v katalogu [8] potom $t_r' = 52$ ns a $t_f' = 80$ ns.

Spínací ztráty potom:

$$P_{Z2} = U_b \cdot I_q (t_r' + t_f') \cdot f_s = 200 \text{ V} \cdot 100 \text{ A} \cdot (52 + 80) \text{ ns} \cdot 20 \text{ kHz} = 55 \text{ W} \quad (12)$$

Ztráty při rozjezdu:

$$P_{Z \leq 25 \text{ km/h}} = P_{Z1} + P_{Z2}' = 180 \text{ W} \quad (13)$$

Při jízdě nad 25 km/h IGBT sepneme na $s = 1$, a tedy $f_s = 0$:

$$P_{Z > 25 \text{ km/h}} = U_{CEsat} \cdot I_q = 1,25 \text{ V} \cdot 100 \text{ A} = 125 \text{ W} \quad (14)$$

Součástí měničové výbavy bude dále palubní měnič mezi trakční baterií a palubní sítí, který má ztráty maximálně 100W. Tento měnič bude chlazen stejným chladičem jako IGBT modul měniče kotvy.

Uvažuji tedy, že bude potřeba chladit výkon celkem 280 W.

Pro tento výkon stačí vhodný žebrovaný chladič s ventilátory. Díky tomu nebude v daném elektromobilu již potřeba stávající okruh vodního chlazení a celý se bude moci vymontovat, což ušetří hmotnost i údržbu.

2.7 Parametry navrženého modulu řízení motoru

Z předchozích podkapitol vycházejí základní parametry, ze kterých jsem vycházel při výběru součástek.

Zvolil jsem následující parametry pro další návrh modulu řízení motoru:

Maximální napětí trakčních baterií $U_b = 200$ V

Jmenovitý proud kotvy $I_q = 100$ A

Jmenovitý proud buzení $I_f = 10$ A

Spínací frekvence měničů $f_s = 20$ kHz

$$\text{Účinnost pro rychlost pod 25 km/h} \quad \eta_{<25 \text{ km/h}} = 1 - \frac{P_{Z < 25 \text{ km/h}}}{P_N} = 1 - \frac{180 \text{ W}}{15 \text{ kW}} = 98,8 \%$$

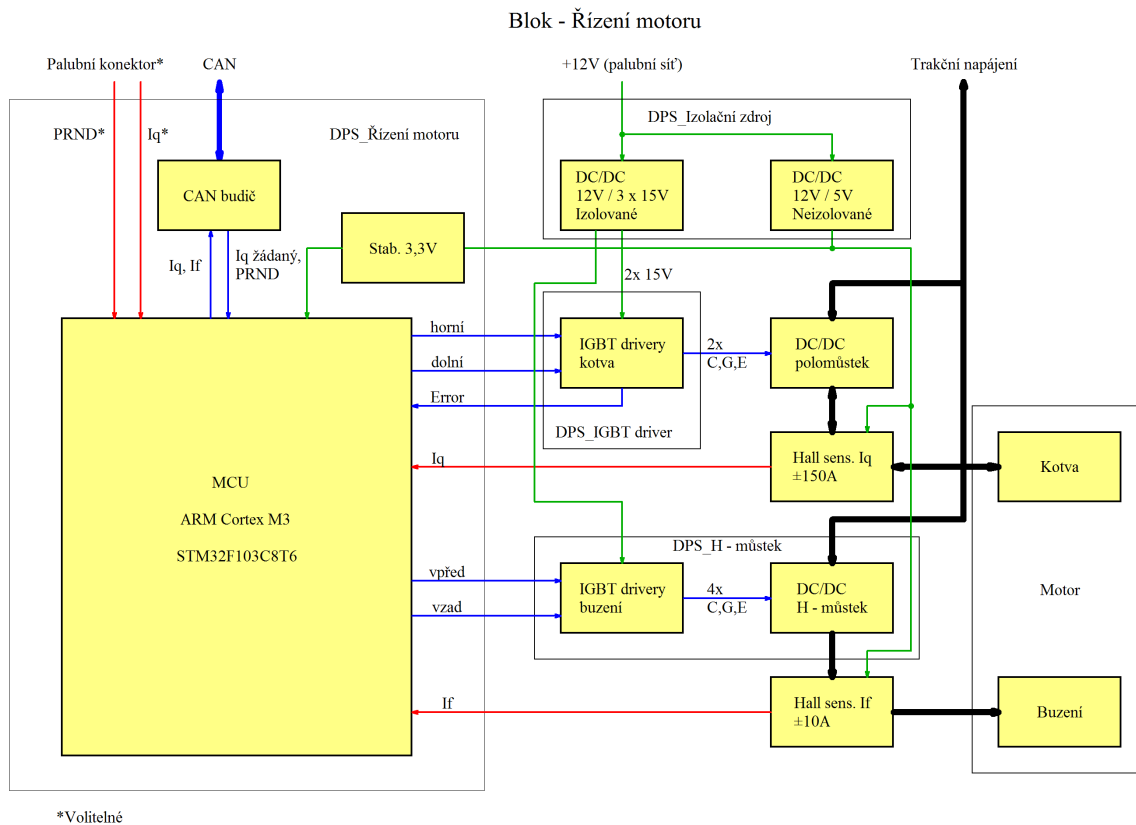
$$\text{Účinnost nad 25 km/h} \quad \eta_{>25 \text{ km/h}} = 99,2 \%$$

3. Popis jednotlivých bloků HW

Nejprve popíši celkové blokové schéma modulu řízení motoru, a poté jednotlivé části. Celý modul se skládá z pěti desek plošných spojů (DPS), a dále samonosně montovaného silového obvodu měniče kotvy. V každé podkapitole bude popsána jedna část, DPS, včetně celkového schématu, jeho rozboru a popisu funkce.

Pospojování konektorů všech desek je uvedeno v příloze.

Na obrázku 6 je blokové schéma celého modulu řízení motoru.



Obr. 6: Blokové schéma řízení motoru

Jedná se o samostatně fungující celek připojený mezi trakční baterii a trakční motor, zajišťující jeho kompletní obsluhu. Jako vlastní napájení používá palubní síť 12 V.

Modul obsahuje dva DC/DC měniče kotvy a buzení, drivery výkonových součástek těchto měničů, řídicí MCU, měření a napájecí zdroje.

Signály jsou ve schématu jsou odlišeny barevně takto:

Barevné označení cest	
modrá	digitální
červená	analogové
zelená	napájení
černá	trakční obvod

tab 2: Barevné označení cest v blokovém schématu

Vstupními veličinami jsou žádaný proud kotvy I_q^* , který je zadáván plynovým pedálem a režim jízdy vozidla, který určuje poloha řadící páky. Ty mohou být volitelně připojeny tím způsobem, že se na rozšiřující konektor připojí přímo potenciometry plynového pedálu a řadící páky, nebo prioritně sběrnici CAN.

MCU ovládá měnič kotvy pomocí dvou PWM signálů, zvláště pro horní a dolní tranzistor. Horní pro jízdu, dolní pro rekuperaci. Z IGBT driveru je vyveden zpět signál poruchy měniče kotvy.

Měnič buzení je ovládán také přímo pomocí PWM jedním ze dvou signálů podle toho, jestli se má budít pro jízdu vpřed nebo vzad.

Zpětná vazba je tvořena proudovými Hallovými sondami, které převádí proud kotvy a proud buzení na napětí, která jsou zpracována AD převodníkem v MCU.

IGBT drivery jsou napájeny třemi vzájemně izolovanými větvemi 15 V z izolačního zdroje, který dále napájí 5V DPS MCU. Napětí 3,3V je získáno lineárním stabilizátorem.

Měniče kotvy i buzení jsou připojeny k trakčnímu motoru přímo, k trakční baterii přes dvojici izolačních relé. Tato relé odpojují oba póly trakční baterie. nejsou zde zakresleny, protože jejich obsluhu provádí palubní počítač.

Celý trakční obvod je galvanicky oddělen od palubní sítě elektromobilu.

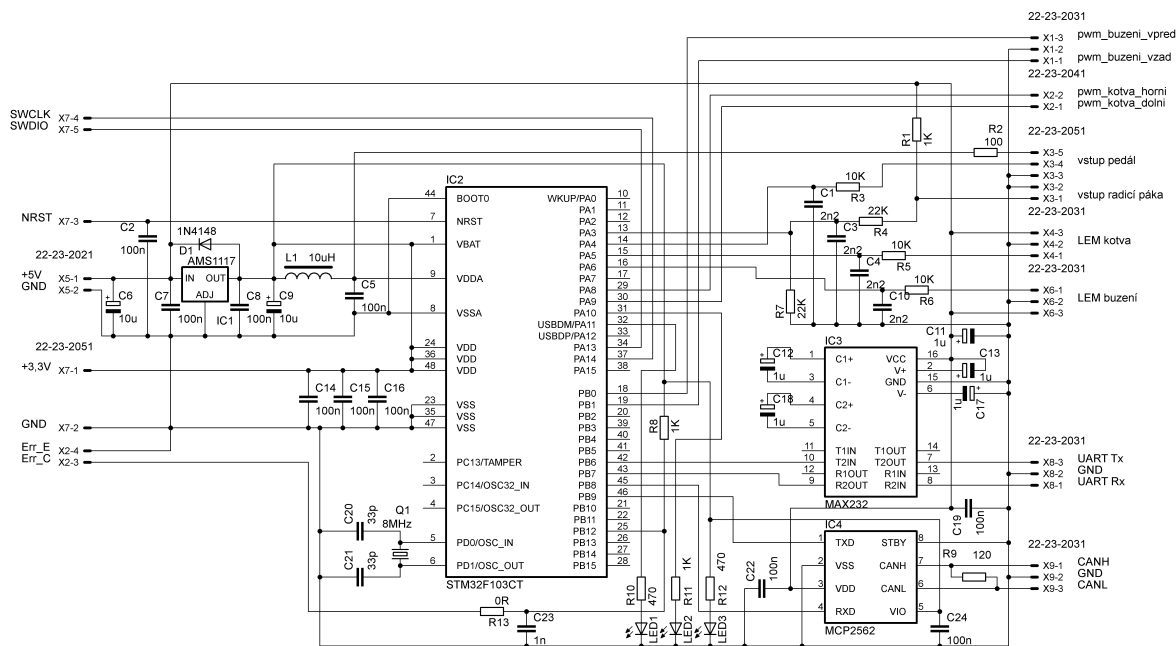
Dále následuje popis šesti základních bloků:

- 1) MCU řízení motoru
- 2) IGBT driver
- 3) Měnič kotvy
- 4) Měnič buzení
- 5) Izolační zdroj
- 6) Šasi

3.1 MCU řízení motoru

Jedná se o řídicí počítač, který komunikuje s nadřazeným palubním počítačem pomocí sběrnice CAN. Obsahuje PS regulátory proudu kotvy, proudu buzení a žádaného proudu buzení. Zajišťuje reverzaci a odbuzování. Obsahuje stavové automaty pro bezpečné přechody mezi jednotlivými stavy.

Na obrázku 7 je kompletní schéma desky s MCU.



Obr. 7: Schéma desky s MCU pro řízení motoru

Deska kromě MCU STM32F103C8T6 obsahuje obvody pro periferie CAN a UART, pasivní antialiasingové filtry na vstupech AD převodníku a lineární stabilizátor pro získání napětí 3,3 V ze vstupních 5 V.

Napájení AD převodníku v MCU je filtrováno pomocí LC článku L1, C5.

Analogový signál na všech kanálech je vzorkován na frekvenci $f_s = 20$ kHz, dolní propusti jsou nastaveny pro splnění vzorkovacího teorému podle vzorce:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 10\text{k}\Omega \cdot 2,2\text{nF}} = 7,2\text{kHz} < \frac{1}{2} f_s \quad (15)$$

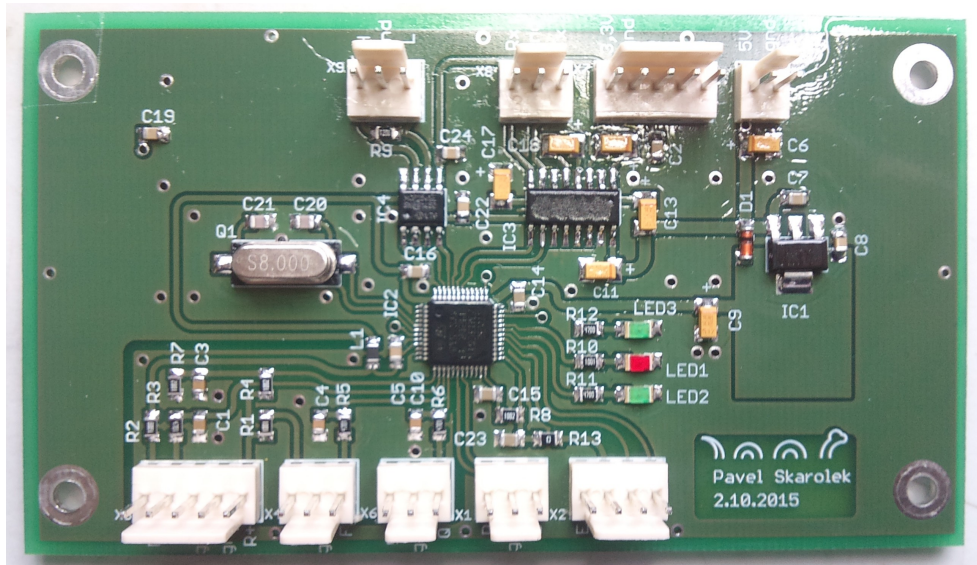
Odlíšný je pouze kanál připojený na pin PA3, kde byl potřeba převod napěťových hladin z řadicí páky dle [6]. Aby dělič složený z R4 a R7 vyhovoval vzorkovacímu teorému, je volen tak, aby měl přibližně stejnou nebo větší impedanci v místě C3, zde 11 kΩ.

IC3 obvod pro sběrnici RS232 slouží pouze pro ladění SW, pro komunikaci s nadřízeným počítačem je zde CAN driver IC4. Zakončovací odpor R9 je nutný, protože deska bude umístěna na konci sběrnice.

Deska je připojena k ostatním pomocí konektorů a drátových propojů.

Nahrávání do programové flash paměti MCU je řešeno pomocí SWD sběrnice vyvedené zvlášť na konektor X7.

Proudy kotvy a buzení jsou měřeny pomocí Hallových sond umístěných na zvláštní DPS připojené k desce MCU.

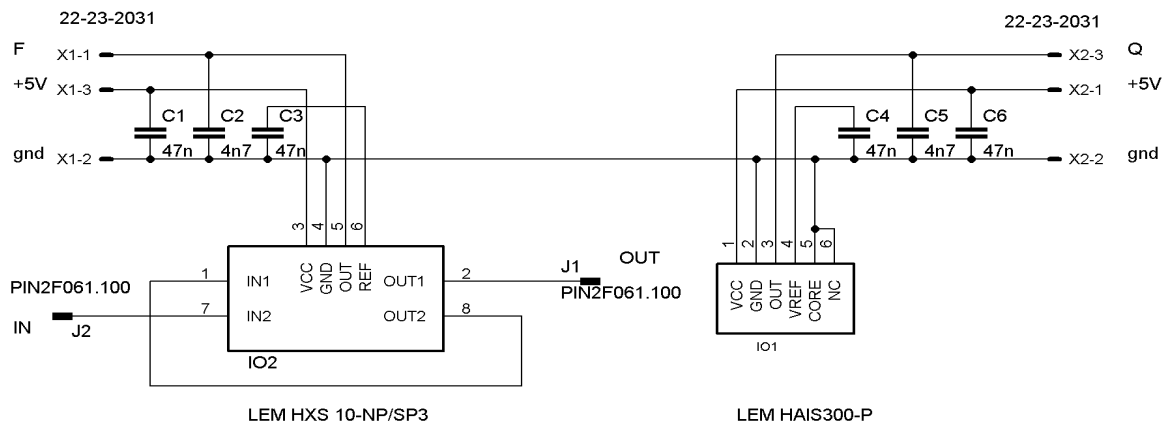


Obr. 8: Foto desky MCU

3.1.1 DPS LEM

Hallové sondy pro měření proudů kotvy a buzení jsou umístěny na samostatné desce kvůli tomu, aby mohly být umístěny v blízkosti silového trakčního obvodu na rozdíl od MCU. Tato DPS obsahuje kromě proudových sond jen blokovací kondenzátory doporučené výrobcem.

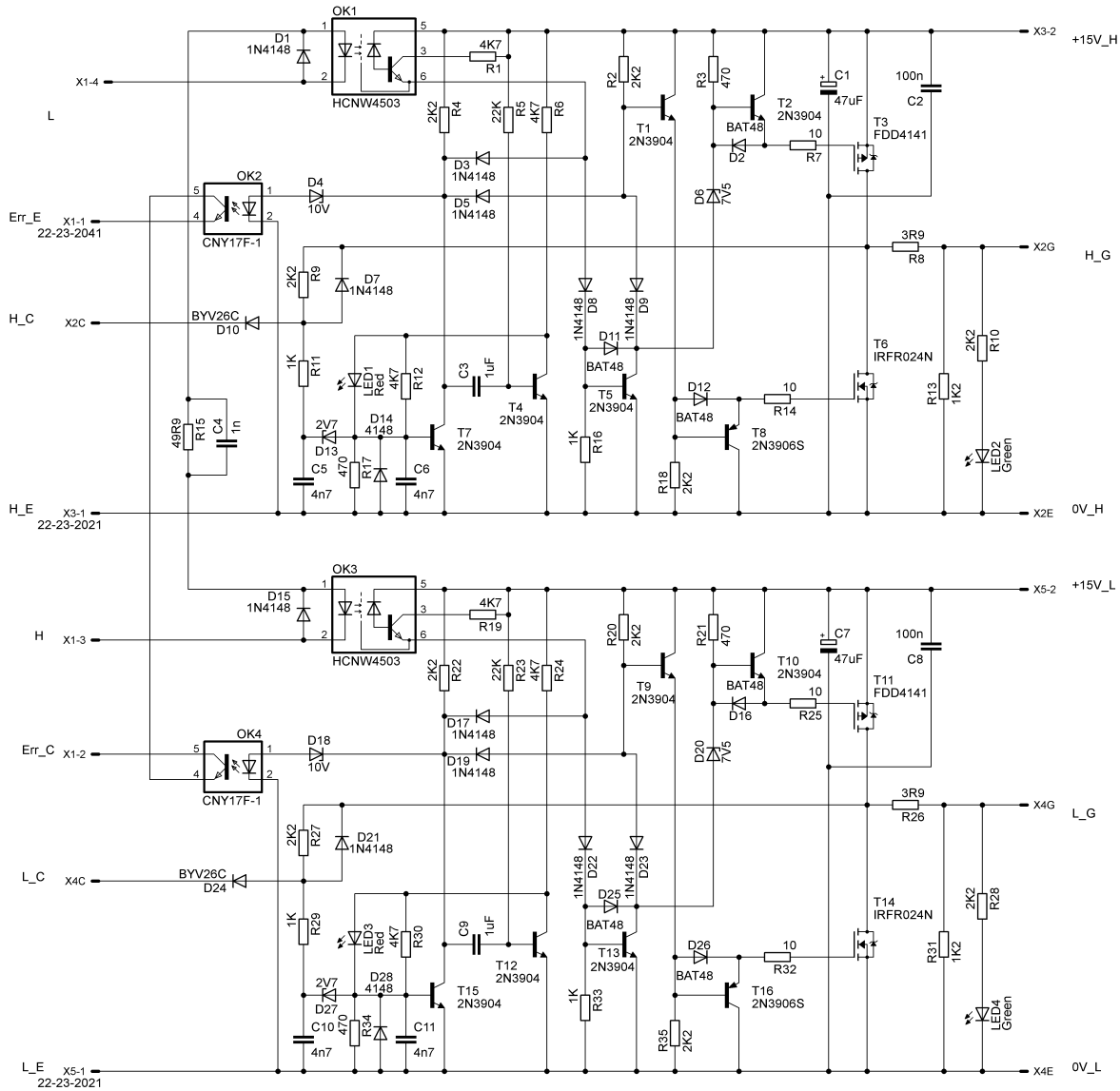
K desce MCU řízení motoru je připojena šesti vodiči.



Obr. 9: Schéma desky s proudovými sondami

3.2 IGBT driver

Jedná se o dvojici diskretních driverů s galvanickým oddělením pomocí optočlenů umístěné na jedné společné desce. Celkové schéma na následujícím obrázku 10.

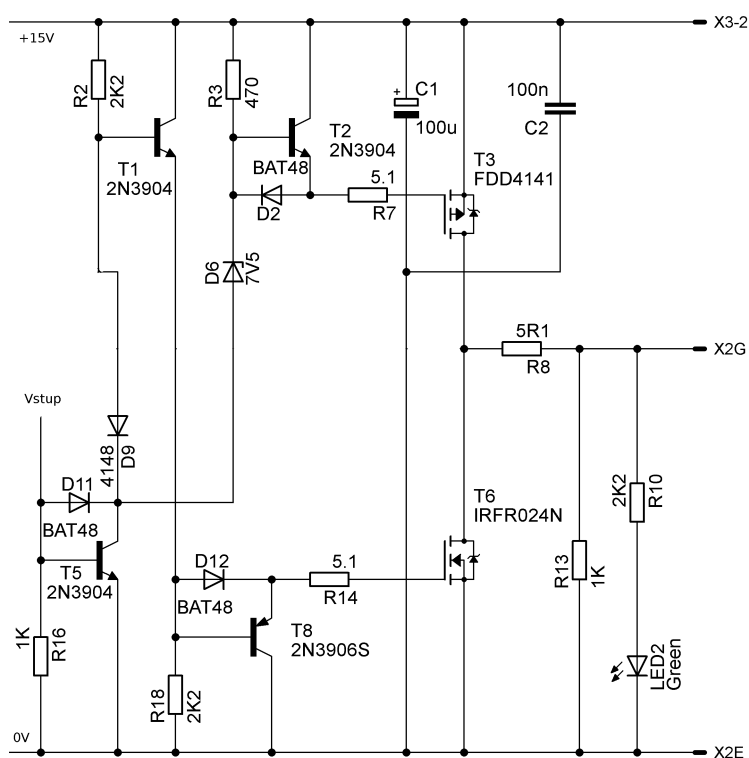


Obr. 10: Schéma IGBT driveru

Zvolil jsem konstrukci z diskretních prvků především kvůli rychlostem a velkým možnostem v individuálním nastavení důležitých parametrů driverů podle konkrétního použitého IGBT. Dalším důvodem je poměrně nízká cena konstrukce v porovnání s dostupnými drivery požadovaných parametrů.

Vstupní optočleny jsou zapojeny antisériově, aby nemohlo dojít k současnému požadavku na otevření obou řízených IGBT. C2 kompenzuje vnitřní vstupní kapacity optočlenů.

Na následujícím obrázku 11 je detail koncového stupně jednoho IGBT driveru.



Obr. 11: Koncový stupeň IGBT driveru

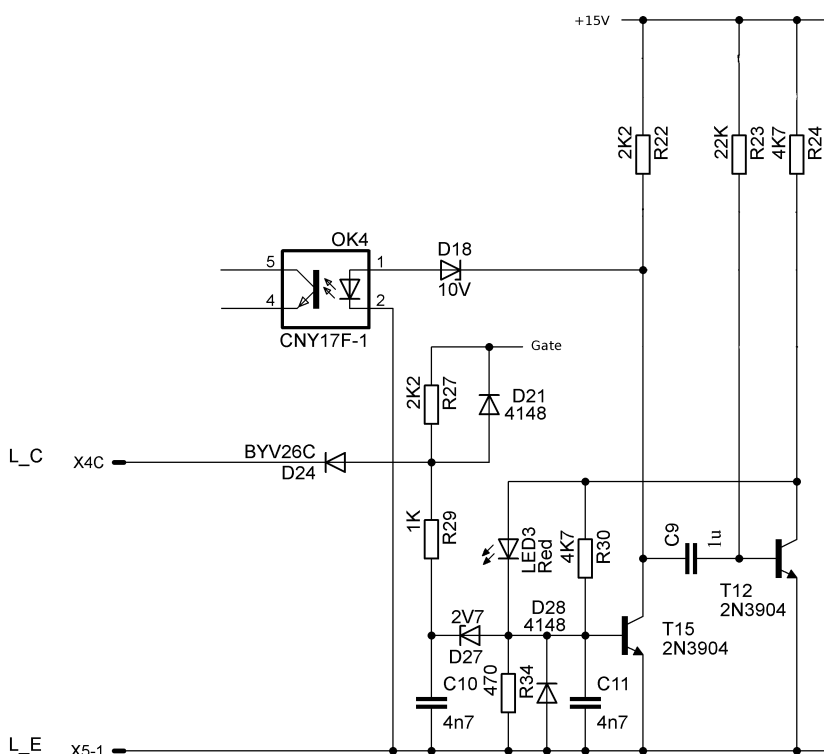
Vstupní PWM signál z optočlenu přichází na T5 s desaturační diodou D11, která zabezpečuje rychlejší vypínání tranzistoru díky tomu, že drží tranzistor otevřený mimo saturaci.

Dále se signál dělí na dvě cesty. První přes Zenerovu diodu D6 7,5 V, ovládá horní koncový tranzistor T3 buzený emitorovým sledovačem T2. Druhá přes T1, který ovládá dolní koncový tranzistor T6 buzený T8.

Tranzistory T5 a T1 dodávají proud k otevření jednotlivých koncových MOSFET tranzistorů, T2 a T8 naopak k jejich vypnutí.

Zenerova dioda D6 má jednak funkci podpěťové ochrany, zamezí sepnutí T3 při napětí menším než přibližně 13V, což je dané součtem napětí 7,5V na ní a prahového napětí Gate T3. V normálním provozu D6 také zajišťuje minimální nutný deadtime, a snižuje tak oteplení koncových tranzistorů T3 a T6.

Deadtime vzniká díky tomu, že napětí na kolektoru T5 roste resp. klesá konečnou rychlostí a za diodou D6 nastane pokles pod práh otevření T3 později než nastane zavření T6. Při nárůstu napětí na kolektoru T5 je naopak T3 zavřen dříve než je otevřen T6 díky posunu napětí na jednotlivých Gate diodou D6.



Obr. 12: Obvod měření saturačního napětí

Nadproudová ochrana je realizována měřením saturačního napětí IGBT tranzistoru po sepnutí. Napětí na kolektoru je snímáno rychlou diodou D24 a to pouze tehdy, když je připojený IGBT tranzistor sepnutý, tedy když na jeho Gate je kladné napětí přivedené z výstupu driveru na D24 přes R27. Zpoždění reakce ochrany je nastaveno RC článkem R29, C10. Napětí při kterém ochrana spouští je definováno pomocí Zenerovy diody D27, která spouští klopný obvod T15 a T12.

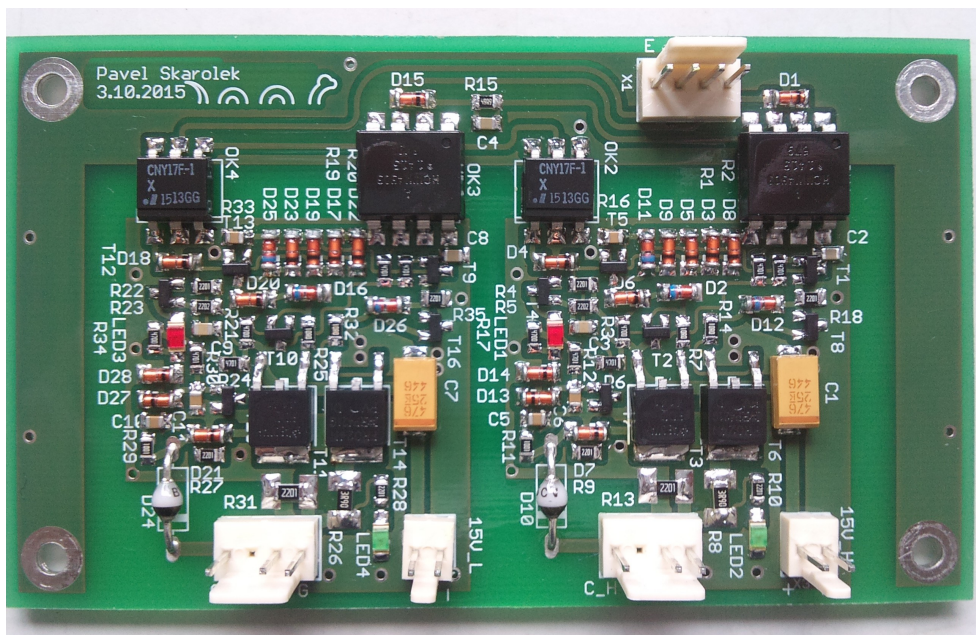
Klopný obvod generuje blokovací pulz délky definované RC článkem R23, C9.

Po dobu trvání blokování jsou prostřednictvím D3 a D5 z obrázku 10 drženy oba koncové tranzistory zavřené. Výstup driveru je takto držen ve stavu vyšší impedance definované odporem R13. Třetí stav vyšší impedance je nutný kvůli tomu, že se předpokládá vypínání nadproudu. Ten by způsobil při původní rychlosti odsávání náboje z Gate IGBT příliš velké di/dt a hrozil by průraz IGBT napětím, které by vzniklo na parazitních indukčnostech.

Jedná se tedy o omezení přepětí za cenu vysokých vypínacích ztrát. Proto je nastavena dostatečně dlouhá doba, po kterou zůstane výstup blokován než dojde k opětovnému pokusu o sepnutí.

Hodnoty součástek ve schématu odpovídají zpoždění reakce $1,5 \mu s$ a době blokování 2 ms. Pokud by po prvním zareagování ochrany nedošlo k vypnutí řízení, driver by tedy automaticky spínal IGBT s periodou 2 ms a střídou 0,1 %.

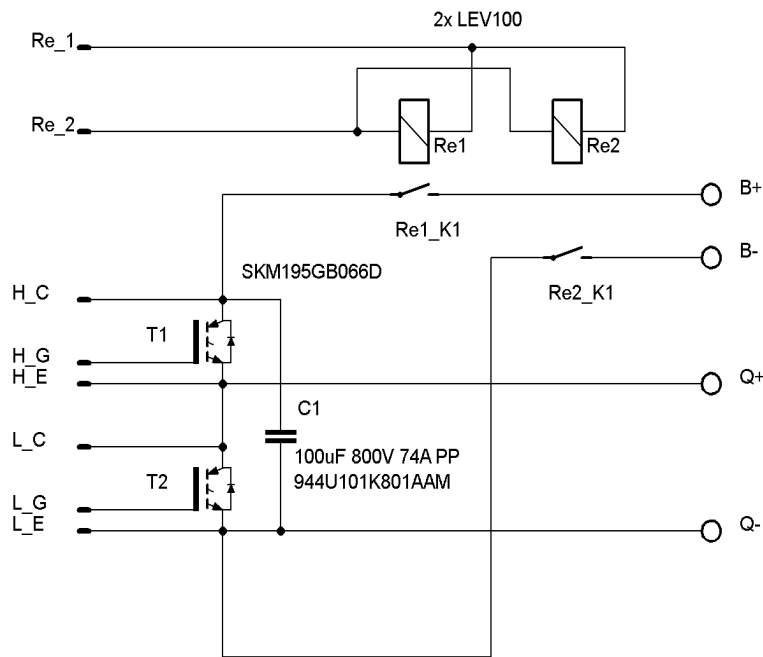
Výstupní optočleny jsou v sérii, nerozlišují tedy poruchu horního nebo spodního driveru. Porucha je signalizována zavřením optočlenu, tedy přerušením okruhu mezi Err_C a Err_E. Signalizování podpětí je nastaveno pomocí Zenerovy diody D4 tak, aby optočlen reagoval dřív než vnitřní ochrana driveru pomocí D6.



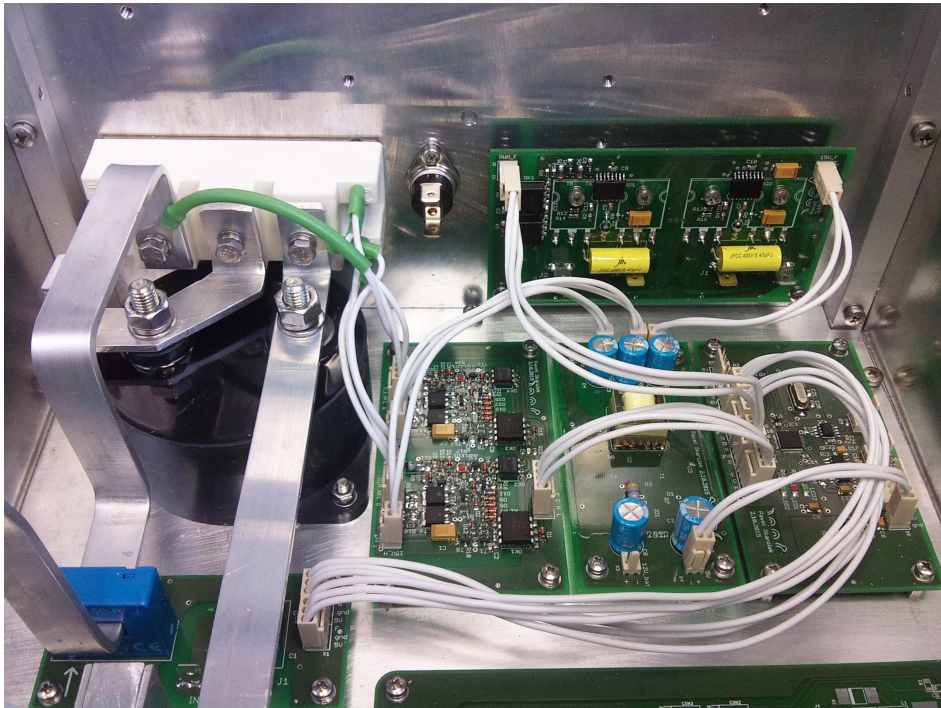
Obr. 13: Foto IGBT driverů

3.3 Měnič kotvy

Jedná se o obvod sestavený z výkonových součástek pospojovaných šínami. Základními prvky jsou IGBT modul, DC-link kondenzátor a izolační relé. Izolační relé zajišťuje odpojení obou pólů trakční baterie od ostatního zařízení, a to při vypnutí spínací skříňky do polohy 0, při poruše, vybavení ochran, nebo použití stop tlačítka.



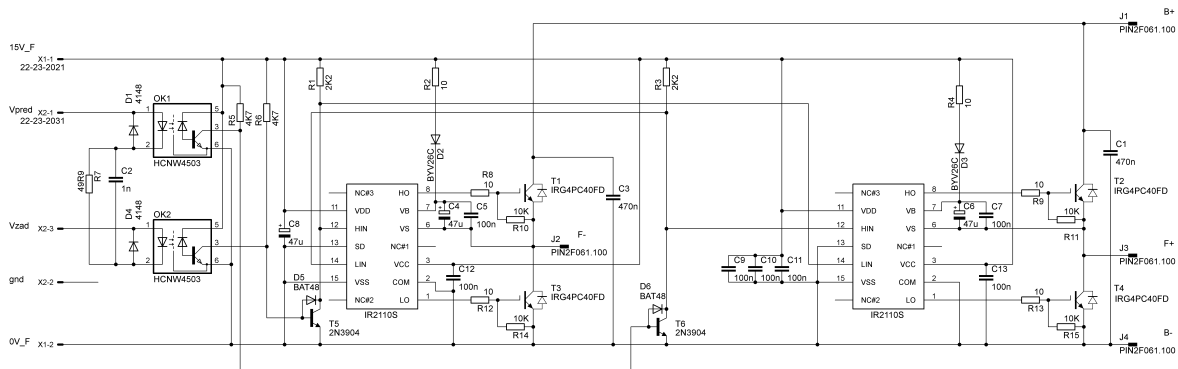
Obr. 14: Schéma měniče kotvy



Obr. 15: Pohled na měnič kotvy – vlevo

3.4 Měnič buzení

Jedná se o H můstek umožňující kromě PWM také reverzaci, tedy obrácení polarity napětí na buzení. celkové schéma na následujícím obrázku.



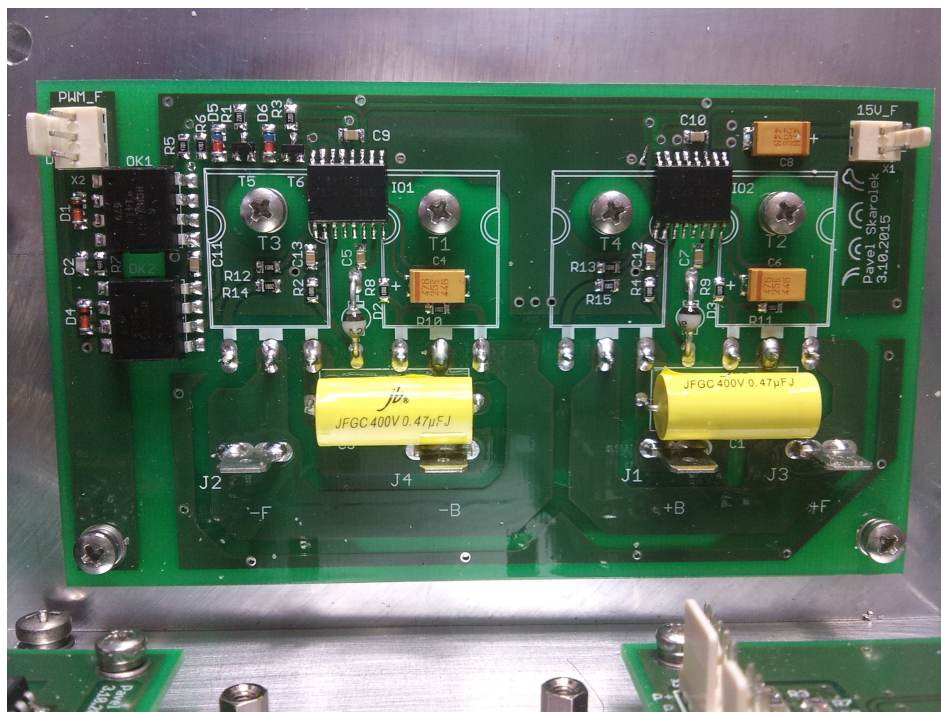
Obr. 16: Celkové schéma měniče buzení

Čtveřice IGBT je rozdělena do dvou polomůstek řízených integrovanými driversy IR2110. Drivers jsou na vstupech ovládány signály z optočlenů, které jsou opět zapojeny antisériově, aby nemohlo dojít k sepnutí všech IGBT tranzistorů najednou.

Dále je třeba signál z optočlenů invertovat, protože mají při nulovém napětí na vstupech log. 1 na výstupu. Inverze je realizována tranzistory T5, T6 s desaturačními diodami D5, D6.

Princip funkce je takový, že spínáním optočlenu OK1 je PWM signál přiveden souhlasně na T2 a T3, které umožní proud buzení kladné polarity. Při spínání OK2 záporné.

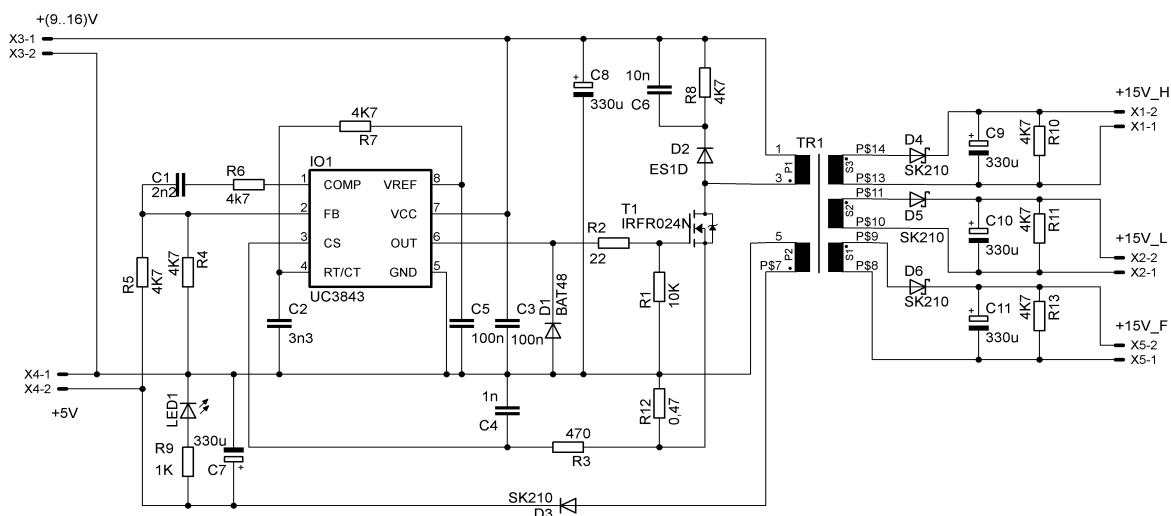
Horní drivery v IR2110 jsou napájeny nábojovými pumpami s kondenzátory C4 a C8, které jsou nabíjeny přes diody D2, D3 v době, kdy jsou IGBT vypnuty. Zapojení tedy nemůže správně pracovat při střídě 0 až 100 %, ale maximální střída musí být omezena např. na 98 %.



Obr. 17: Foto měniče buzení

3.5 Izolační zdroj

Zajišťuje napájení desky MCU, měniče buzení a IGBT driverů z palubního napětí elektromobilu. U posledních dvou jmenovaných zajišťuje také galvanické oddělení.



Obr. 18: Izolační zdroj

Jedná se o jednočinný blokující zdroj podle [12] řízený proudovým regulátorem UC3843. Měníč pracuje na frekvenci 100 kHz, proudová zpětná vazba je zavedena z bočnicku R12, přes filtr R3, C4. Napěťová zpětná vazba je přivedena děličem R4, R5 z výstupu 5 V.

3.5.1 Návrh impulzního transformátoru

Minimální napětí primární strany zdroje volím: $U_p = 9 \text{ V}$

Sekundární napětí: $U_{s1} = 5 \text{ V}$, $U_{s2} = U_{s3} = U_{s4} = 15 \text{ V}$

Přenášený výkon: $P_p = 5 \text{ W}$

Spínací frekvence: $f = 100 \text{ kHz}$

Průřez sloupku jádra, na které chci vinout: $S_j = 21 \text{ mm}^2$

Indukované napětí na primárním vinutí kvůli dobré vzájemné vazbě: $U_p = U_{s2} = 15 \text{ V}$

Sycení jádra: $B_{max} = 0,2 \text{ T}$

Střída na primární straně potom:

$$s_{iz} = \frac{U_p}{U_p + U_n} = \frac{15 \text{ V}}{15 \text{ V} + 9 \text{ V}} = 0,625 \quad (16)$$

Počet závitů primárního vinutí:

$$N_p' = \frac{s_{iz} \cdot U_n}{f \cdot B_{max} \cdot S_j} = \frac{0,625 \cdot 9}{100000 \cdot 0,2 \cdot 21 \cdot 10^{-6}} = 13 \quad (17)$$

Špičkový proud primárním vinutím:

$$I_p = \frac{2 P_p}{s_{iz} \cdot U_n} = \frac{2 \cdot 5 \text{ W}}{0,625 \cdot 9 \text{ V}} = 1,78 \text{ A} \quad (18)$$

Velikost vzduchové mezery:

$$l_v' = \frac{\mu_0 \cdot N_p \cdot I_p}{B_{max}} = \frac{4 \pi \cdot 10^{-7} \cdot 13 \cdot 1,78}{0,2} \text{ m} = 0,145 \text{ mm} \quad (19)$$

Na vytvoření vzduchové mezery je k dispozici izolační páska tloušťky 0,063 mm, jádro EE má mezeru rozdělenou na dvě poloviny, mám tedy možnost vytvořit mezeru 0,13 mm.

Přepočet počtu závitů pro mezeru $l_v = 0,13 \text{ mm}$

$$N_p = \sqrt{\frac{s_{iz}^2 \cdot U_n^2 \cdot l_v}{2 \cdot f \cdot P_p \cdot \mu_0 \cdot S_j}} = \sqrt{\frac{0,625^2 \cdot 9^2 \cdot 0,00013}{2 \cdot 100000 \cdot 5 \cdot 4 \pi \cdot 10^{-7} \cdot 21 \cdot 10^{-6}}} = 12,5 \quad (20)$$

Volím 12 závitů.

Sekundární vinutí:

$$N_s = N_p \cdot \frac{U_{sl}}{U_p} = 12 \cdot \frac{5 \text{ V}}{15 \text{ V}} = 4 \quad (21)$$

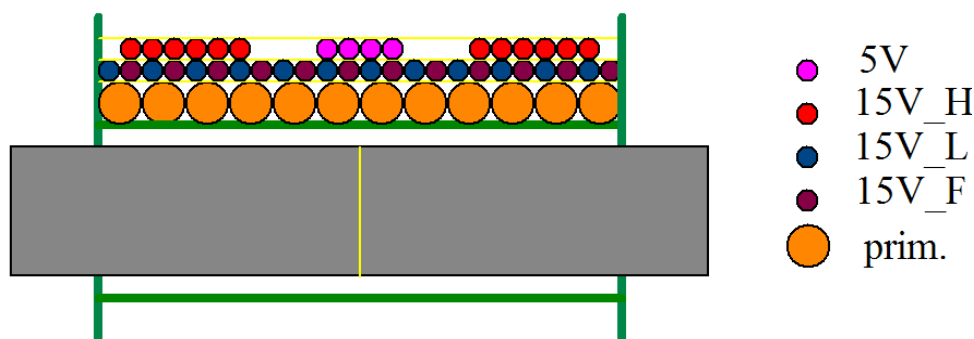
Dimenzování vodiče primárního vinutí:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{s_{iz} \cdot T} I^2(t) dt} = \sqrt{\left(\frac{I_p^2}{s_{iz}^2 \cdot T^3} \right) \int_0^{s_{iz} \cdot T} t^2 dt} = I_p \cdot \sqrt{\frac{s_{iz}}{3}} = 1,78 \text{ A} \cdot \sqrt{\frac{0,625}{3}} = 0,81 \text{ A} \quad (22)$$

Pro nízké oteplení volím ze zkušenosti proudovou hustotu $J = 2,5 \text{ A/mm}^2$, vhodný průměr vodiče potom:

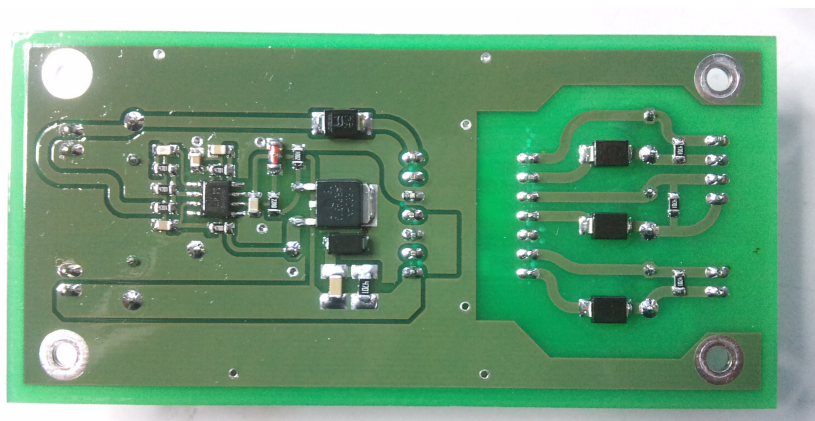
$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{I_{ef}}{J \cdot \pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,81}{2,5 \cdot \pi}} \text{ mm} = 0,64 \text{ mm} \quad (23)$$

Kvůli tomu, že tři galvanicky oddělená vinutí nemají zpětnou vazbu bylo potřeba navrhnout jejich rozložení na kostřičce transformátoru tak, aby vinutí měla dobrou vzájemnou vazbu. Zvolil jsem rozložení z následujícího obrázku.

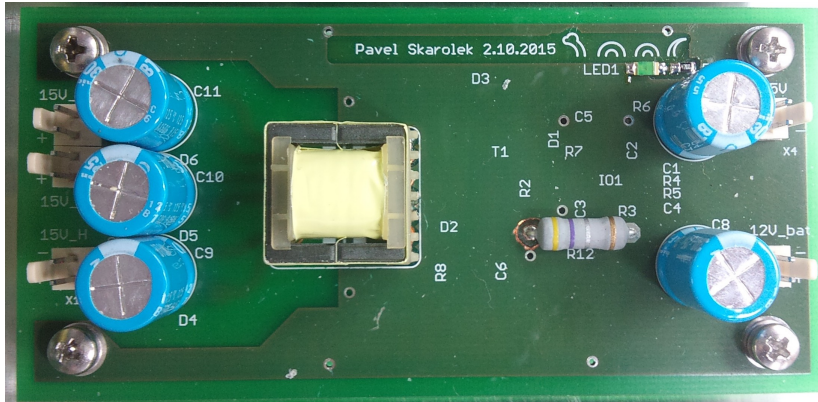


Obr. 19: Rozložení vinutí na transformátoru

Primární vinutí dole je drátem 0,6 mm, který při 12 závitů přesně vyplní kostřičku. Pro sekundární vinutí je zvolen poloviční průměr vodiče, který proudově vyhoví, ale hlavně také při bifilárním návíně zaplní celou délku kostřičky. Třetí galvanicky oddělené vinutí je rozloženo okolo zpětnovazebního 5 V vinutí. Tím je zajištěna dostatečně nízká rozptylová indukčnost mezi vinutími a galvanicky oddělené větve tak drží napětí i při rozdílném proudovém zatížení v požadovaném rozsahu nutném pro funkci IGBT driverů.



Obr. 20: Foto izolačního zdroje – zadní strana

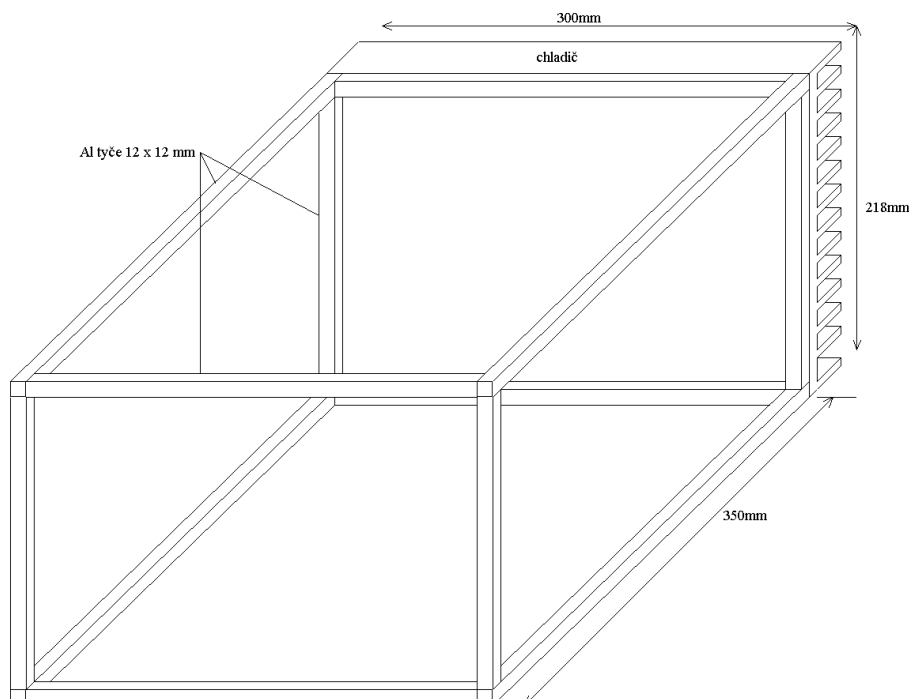


Obr. 21: Foto izolačního zdroje – přední strana

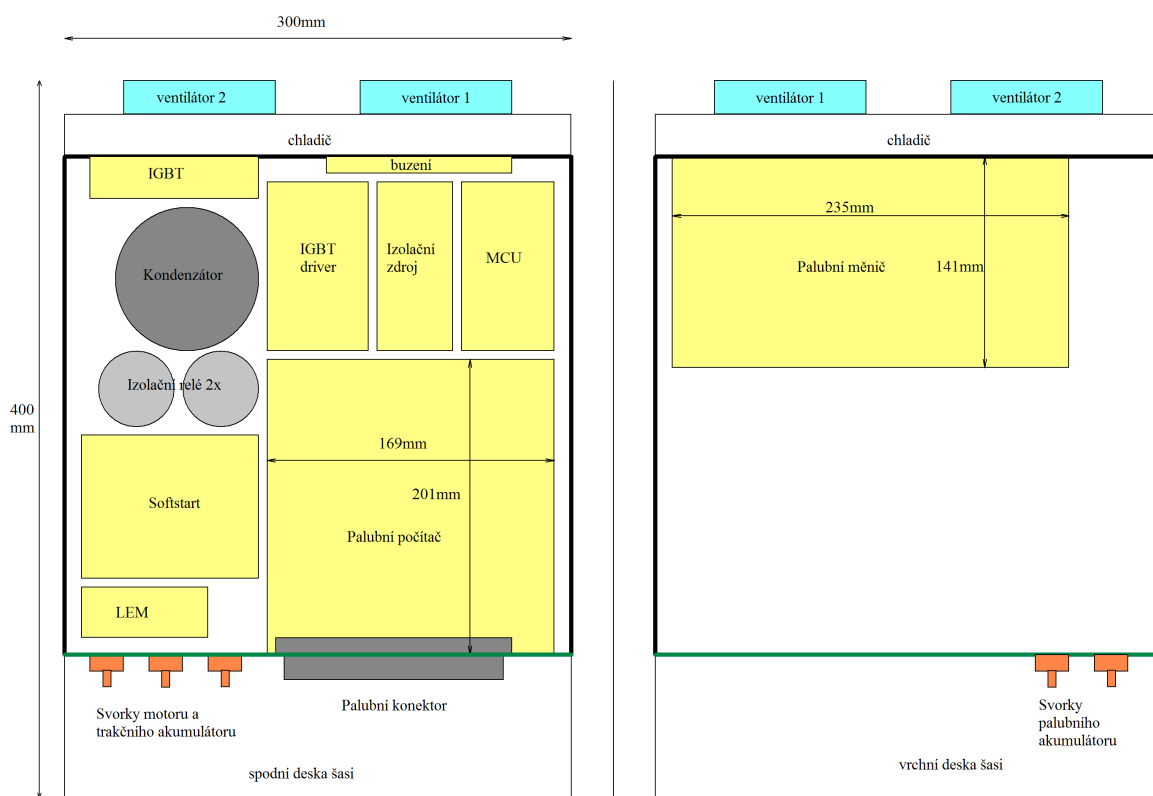
3.6 Konstrukce šasi

Cílem je zamontovat měničovou výbavu do elektromobilu na místo původní. Bylo tedy nutné navrhnout šasi, do kterého se vejde vše zde popsáno a navíc palubní počítač a palubní měnič.

Protože ztrátový výkon 280 W, který je třeba chladit není příliš velký, zvolil jsem vzduchem chlazené šasi. Celá jedna stěna je žebrovaný chladič s ventilátory, zbytek je konstrukce z hliníkových plechů přišroubovaných na hliníkové hranoly. Ochrana proti vnikání vlhkosti bude řešena vložení těsnění nebo tmelu mezi styčné plochy hranolů a plechů.



Obr. 22: Základní konstrukce šasi



Obr. 23: Rozložení desek v šasi

Cílem rozmístění prvků je umístit největší zdroje tepla přímo na chladič. Největšími zdroji tepla jsou IGBT modul měniče kotvy, IGBT tranzistory měniče buzení a modul palubního měniče.



Obr. 24: Foto šasi

4. Popis SW bloku řízení motoru

Řídicí SW v MCU bloku řízení motoru obsluhuje měniče kotvy a buzení, měří veličiny důležité pro funkci regulátorů a komunikuje s nadřazeným palubním počítačem.

Řídicí SW je napsaný v jazyce C, zde stručně popíši, z čeho se skládá.

Pro inicializaci a částečně i obsluhu periférií byla využita knihovna Standard Peripheral Library verze pro procesor ARM Cortex M3 [13].

Struktura souborů je zde typická pro procesory ARM. Výchozím je Startup, který obsahuje základní inicializaci jádra a tabulku vektorů přerušení. Z něho se volá soubor main.c.

V souboru main.c se nejprve spustí SystemInit(), ve kterém je nastaven zdroj hodin, zde z externího krystalu a dále PLL násobička pro časovací frekvenci jádra a děličky pro sběrnice k perifériím a zvláště pro ADC.

Následně je zavolána funkce main.

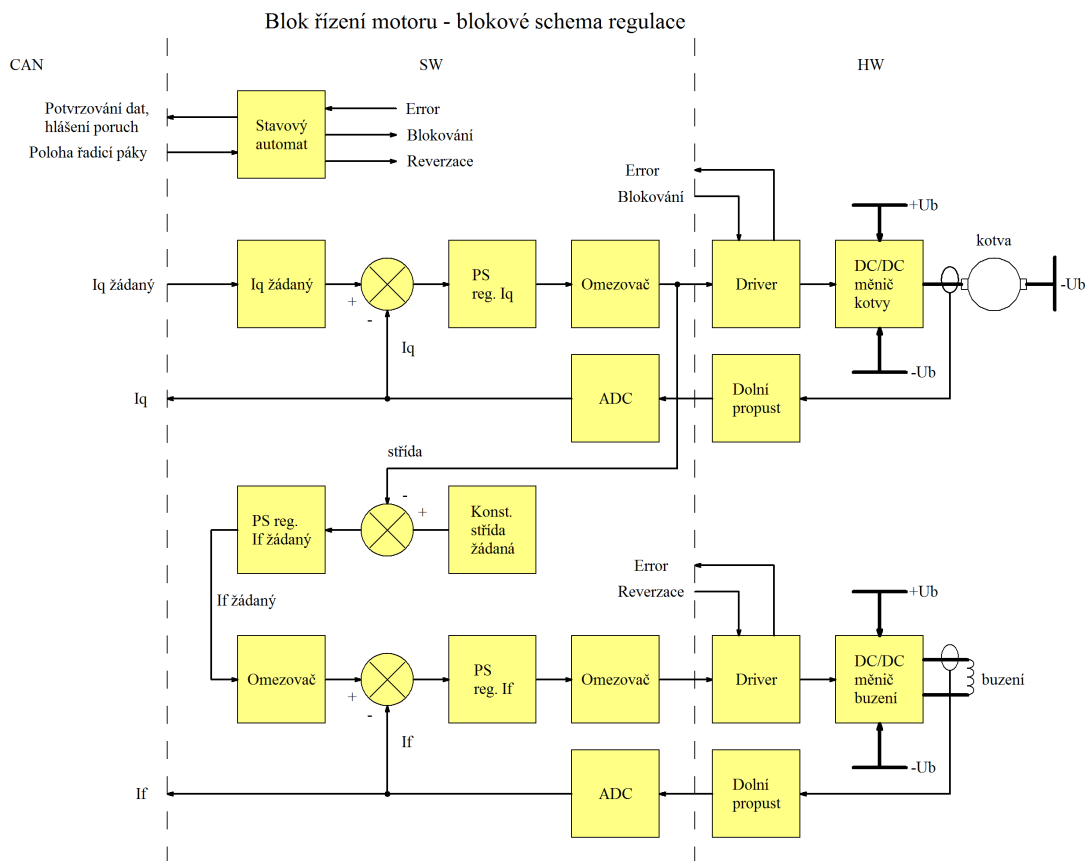
V následující tabulce 3 jsou vypsány základní funkce, periférie, které ovlivňují a konkrétní piny procesoru, ke kterým jsou připojeny.

Přehled funkcí a periférií			
funkce	periférie	piny	zdroj
Init_GPIO	GPIO	-	vlastní
Init_USART1	USART1	PB6, PB7	vlastní
Init_ADC1	ADC1	PA5, PA6	vlastní
Init_ADC2	ADC2	PA3, PA4	vlastní
Init_TIM1	TIM1	PA8, PA9	vlastní
Init_TIM3	TIM3	PB0, PB1	vlastní
Init_CAN	CAN1	PB8, PB9	vlastní
Reg_buzeni	TIM3	PB0, PB1	vlastní
Reg_kotva	TIM1	PA8, PA9	vlastní
Zaznam_buzeni	TIM3	PB0, PB1	vlastní
Zaznam_kotvy	TIM1	PA8, PA9	vlastní
Zaznam_odbuzovani	TIM3	PB0, PB1	vlastní
FSM1	-	-	vlastní
ADC_Measure	ADC1	-	Std. Periph.
Delay_ms	-	-	Std. Periph.
CAN_Transmit	CAN1	-	Std. Periph.: CAN.h
CAN_Receive	CAN1	-	Std. Periph.: CAN.h
ADC_RegularChannelConfig	ADC1, ADC2	-	Std. Periph.: ADC.h
ADC_SoftwareStartConvCmd	ADC1, ADC2	-	Std. Periph.: ADC.h
NVIC_EnableIRQ	-	-	Std. Periph.: NVIC.h
NVIC_DisableIRQ	-	-	Std. Periph.: NVIC.h

tab 3: Přehled funkcí a periférií

4.1 Blokové schéma pohonu

SW v MCU realizuje výpočet PS regulátorů a generování PWM podle následujícího blokového schématu na obrázku 25.



Obr. 25: Blokové schéma pohonu

Základem jsou dvě uzavřené proudové smyčky obvodu kotvy a buzení. Tyto dvě smyčky jsou řízeny PS regulátory kotvy a buzení na jejichž výstupech je přímo střída PWM pro drivery výkonových součástí.

Žádaný proud kotvy přichází přímo po sběrnici CAN.

Žádaný proud buzení se počítá pomocí dalšího PS regulátoru žádané hodnoty buzení. Princip výpočtu proudu buzení vychází z toho, že cílem pohonu v elektromobilu je držet maximální možný moment motoru. Maximální možný moment pro daný budicí proud je vždy ten, při kterém je na kotvě maximální napětí, tedy maximální střída měniče kotvy.

Střída na kotvě je tedy vstupem záporné zpětné vazby a PS regulátor nastavuje žádaný proud buzením takový, aby držel na kotvě maximální zadanou střidu, tedy maximální možné napětí.

4.2 Inicializace periférií

Jedná se o řadu postupně volaných funkcí, které nastavují vlastnosti jednotlivých pinů procesoru, jejich přiřazení perifériím, a dále nastavení samotných periférií.

Jsou zde nastaveny dva timery, TIM1 pro generování PWM měniče kotvy a TIM3 pro měnič buzení. Oba jsou nastaveny tak, že čítají střídavě nahoru dolů mezi čísly 0 a 1600 s frekvencí 20kHz. Kanál č. 1 TIM1 je konfigurovaný podle [7] kapitoly 14, jako kladná PWM modulace, tedy při vyšším čísle z rozsahu 0 až 1600 je na výstupu vyšší střída, kanál č. 2 je negativní PWM, tedy přesně opačně. Kanál č. 1 ovládá horní IGBT měniče kotvy, kanál č. 2 dolní.

TIM3 má podle [7] kapitoly 15 nakonfigurovány kanály č. 3 a 4 shodně jako kladnou PWM. Kanál č. 4 pro jízdu vpřed a kanál č. 3 pro jízdu vzad (reverzaci).

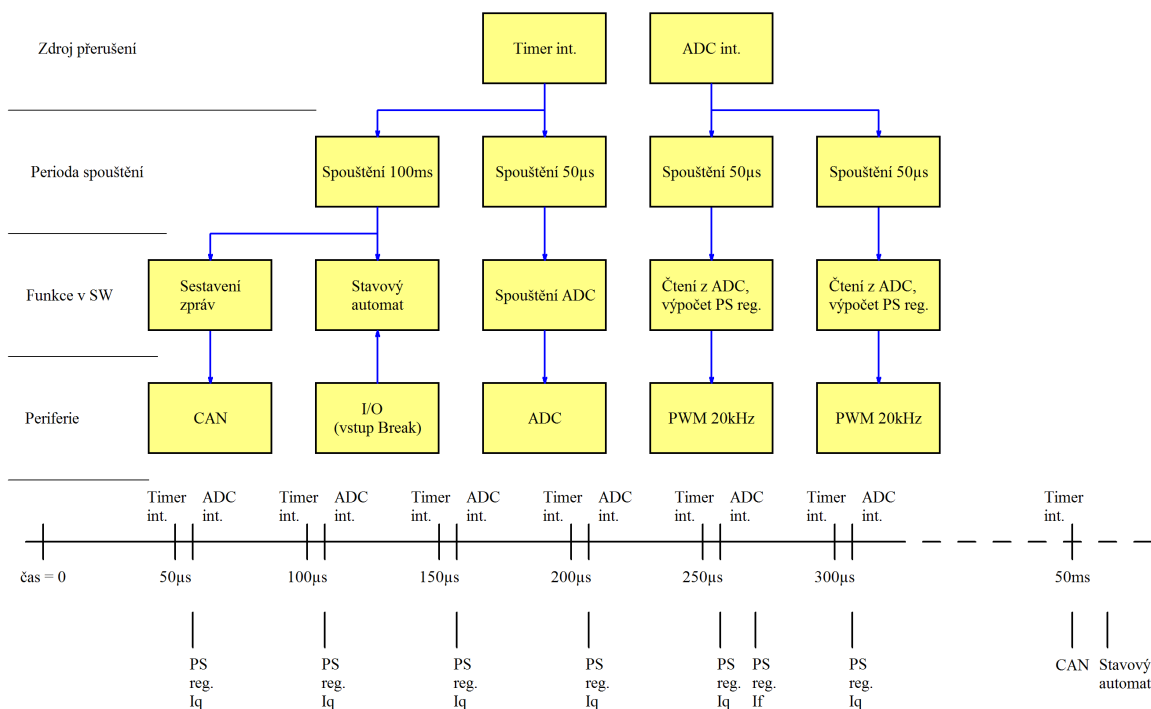
Následuje inicializace sběrnice CAN podle [7] kapitoly 24 na rychlost 500kbps. Protože připojených zařízení je zatím málo jsou nastavené filtry prázdné. Periferie tedy přijímá všechny zprávy, které se na sběrnici objeví.

Periferie USART1 je konfigurována podle [7] kapitoly 27 na 115200bps, 8 bit, bez parity.

ADC1 a ADC2 jsou nastaveny shodně jako nezávislé se SW spuštěním podle [7] kapitoly 11.

4.3 Řízení běhu programu

Na následujícím obrázku 26 jsou znázorněny základní prvky SW a jejich časování.



Obr. 26: Řízení přerušením

Běh programu je řízen přerušením z Timeru, který generuje PWM. Ten periodicky každých 50 μ s spustí AD převodník, který vezme vzorek měřených hodnot a spustí jejich převod na digitální hodnotu. Když je dokončen převod, je vyvoláno přerušení. Protože použitý procesor obsahuje dva nezávislé AD převodníky, je možno v každé periodě měřit současně proud kotvy i buzení ve stejný čas, což snižuje nároky na filtraci, protože oba měniče běží na synchronně generované PWM, tedy vzorek je v obou případech odebrán v polovině doby sepnutí spínacích prvků.

V přerušení AD převodníku jsou provedeny výpočty PS regulátorů kotvy a buzení. Nové hodnoty střídy jsou tedy dosazeny do PWM modulátorů každou periodu.

Komunikace s nadřazeným palubním počítačem po sběrnici CAN je řízena pomocí časových značek odvozených ze stejného timeru jako AD převodník. Každých 50 ms je vložena do sběrnice nová zpráva.

Výpočet stavových automatů je prováděn v nekonečné smyčce.

Pro přehlednost není zanesen příjem po sběrnici CAN, který také vyvolává přerušení, ve kterém je přijatá zpráva pouze uložena do příslušné proměnné.

4.3.1 Přerušení

Jsou povoleny 4 přerušení. TIM1-Break vstup, na který je připojen chybový signál z IGBT driveru podle [7] kapitoly 14.3.12, TIM1-Update event, tedy přetečení a podtečení, přerušení od obou ADC a přerušení při příjmu zprávy po CAN sběrnici.

V přerušení TIM1-Break vstupu jsou vypnuty všechny PWM výstupy a předána zpráva o chybě hlavnímu stavovému automatu.

TIM1 Update event spouští převod AD převodníků.

V přerušení od ADC jsou volány funkce regulátorů kotvy a buzení.

Při zachycení zprávy CAN sběrnici je v přerušení zpráva zapsána do určené proměnné.

4.3.2 PS Regulátory

Funkce Reg_kotva obsahuje klasický PS regulátor s omezovačem. Je spouštěn každou periodu PWM tak, jak je schematicky znázorněno na obrázku 26, a po ukončení výpočtu je ihned dosazena nová hodnota střídy do komparačních jednotek TIM1.

Reg_buzeni obsahuje dva PS regulátory dle blokového schéma na obrázku z kapitoly 4.1 .

Výstup z regulátoru žádaného proudu buzení je dosazen do regulátoru proudu buzení a výstupní střída opět ihned dosazena do komparačních jednotek TIM3. Tato funkce je také volána každou periodu PWM.

4.3.3 Obsluha PWM modulátorů

Ke generování PWM signálu měniče kotvy je použitý modulátor integrovaný v MCU jako součást periferie TIM1. Je zde využito funkce vkládání deadtime, popsané v [7] kapitole 14.3.11, která zabezpečuje jednak bezpečný přechod z režimu jízdy do rekuperace a zpět, ale také omezuje délku PWM pulzů. Jsou vynechány pulzy kratší než minimální doba sepnutí resp. vypnutí a při žádané kratší době než minimální je IGBT vypnut resp. sepnut celou periodu.

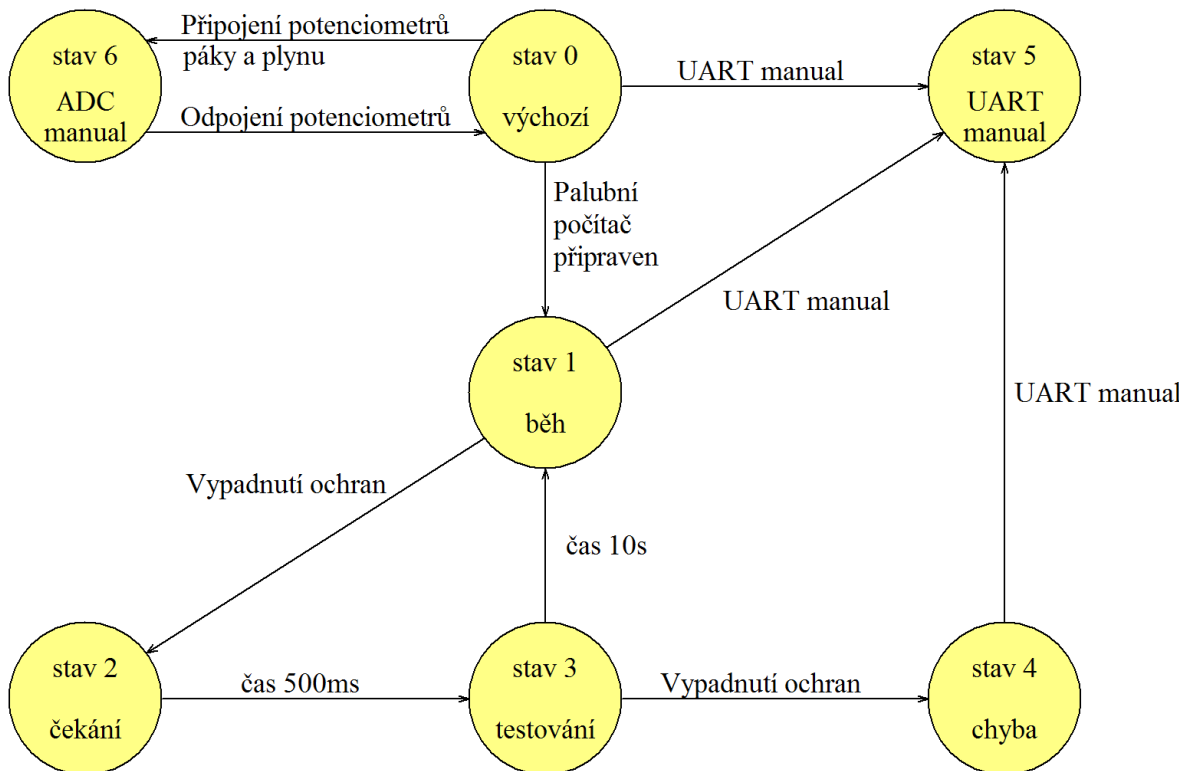
Výsledkem je omezení spínacích ztrát v oblasti regulace motoru odbuzováním díky tomu, že IGBT je sepnut několik po sobě následujících period dokud žádaná hodnota střídá z regulátoru proudu kotvou nepřesáhne minimální dobu vypnutí.

Měnič buzení je ovládán z TIM3, který HW vkládání deadtime neumožňuje, takže ochranné doby jsou vloženy do SW v podobě omezujících podmínek střídá za regulátorem. Kvůli správné funkci driverů s IR2110 je zde nutné omezit maximální střídá tak, aby se stíhaly nabíjet kondenzátory nábojových pump horních driverů. Měřením bylo ověřeno, že stačí střídá omezit na 98 %.

4.4 Hlavní stavový automat

Běh programu je řízen pomocí dvou automatů, hlavního a podřízeného automatu buzení. Hlavní automat řeší především komunikaci s periferiemi a nouzové stavy.

Programově je realizován jako switch v hlavní smyčce ve funkci main.



Obr. 27: Hlavní stavový automat

4.4.1 Stav 0 – Výchozí

Ve výchozím stavu jsou vypnuty PWM výstupy měniče kotvy a buzení, automat nemá žádané vstupní hodnoty, čeká na splnění jedné z podmínek rozhodujících o tom, odkud se bude přijímat žádaný proud kotvy a poloha řadící páky.

Pokud se podaří navázat spojení po sběrnici CAN s palubním počítačem, a ten dá pokyn ke spuštění modulu řízení měniče, vstoupí automat do stavu 1.

Pokud se spojení nepodařilo navázat, ale měřením je nalezena připojená řadící páka a plynový pedál zapojené přímo do rozšiřujícího konektoru X3 na desce MCU řízení měniče, automat jde do stavu 6.

Tento přechod je podmíněn naměřením méně než 1 V na pinu X3-1, který je při nezapojeném konektoru držen na +3,3 V pull-up rezistorem, a naměřením napětí $(1,6 \pm 0,2)$ V na pinu X3-4, tedy přibližně polovinu běhu plynového pedálu.

Do stavu 5 se dostane příkazem pro vstup do manuálního režimu po sběrnici UART podle popisu v kapitole 4.7 .

4.4.2 Stav 1 – Běh

V tomto stavu jsou spuštěny všechny tři regulátory, PWM výstupy povoleny a žádané hodnoty přijímány po sběrnici CAN.

Při vybavení ochran IGBT driveru dojde ke vstupu do přerušení TIM1 – Break vstupu, zde je kromě vypnutí PWM výstupů také nastaven příznak, který posune automat do stavu 2.

Do stavu 5 se opět dostane příkazem pro vstup do manuálního režimu po sběrnici UART.

4.4.3 Stav 2 – Čekání

Jsou vypnuty PWM výstupy a všechny PS regulátory jsou drženy ve výchozích stavech pro plynulé najetí po opětovném spuštění.

V tomto stavu setrvává vždy 500 ms, pak přechází do stavu 3.

4.4.4 Stav 3 – Testování

Stav je z pohledu řízení měničů shodný se stavem 1.

Pokud do 10 s dojde opět k vybavení ochran IGBT driverů automat vstoupí do stavu 4.

Pokud nedojde k opětovnému vybavení ochran po dobu 10 s, považují problém za vyřešený a nechám automat přejít zpět do stavu 1.

Stav 3 a stav 1 se z pohledu řízení měničů neliší, takže řidič rozdíl mezi těmito stavy nepocítí. Čekání 10 s slouží pouze k vyhodnocení závažnosti problému na základě periody jeho opakování.

4.4.5 Stav 4 – Chyba

Je shodný se stavem 0, tedy PWM výstupy jsou vypnuty a žádané hodnoty ignorovány.

Palubní počítač v reakci na chybu řízení motoru vypne izolační relé trakční baterie a rozsvítí kontrolku poruchy elektrické soustavy na palubní desce.

Z tohoto stavu se může automat přesunout pouze do stavu 5 – režimu UART manual zadáním příkazu po sběrnici UART

4.4.6 Stav 5 – UART manual

Jedná se o stav, kdy jsou žádané hodnoty očekávány po sběrnici UART. Pouze v tomto stavu je umožněno přepisování konstant regulátorů a spouštění diagnostických funkcí podle kapitoly 4.7. Tento stav je určen pouze pro ladění.

Výstup z tohoto stavu z bezpečnostních důvodů není možný. Do výchozího stavu se automat dostane pouze restartem MCU, vypnutím spínací skříňky elektromobilu do polohy 0 a opětovnému spuštění v poloze 1. Tím je zabezpečeno, že jsou opět inicializovány původní konstanty regulátorů.

4.4.7 Stav 6 – ADC manual

Řízení měničů je v tomto stavu shodné se stavem 1, ale žádané hodnoty jsou měřeny přímo AD převodníkem v MCU řízení motoru na konektoru X3, do kterého je přímo připojen potenciometr plynového pedálu a řadicí páka. Žádaný proud kotvy je regulován v rozsahu -100 A až +100 A, kdy nulovému proudu odpovídá poloha potenciometru plynového pedálu 50 %.

4.5 Podřízený automat buzení

Podřízený automat buzení zajišťuje ovládání pohonu řadicí pákou elektromobilu. Cílem je šetřit energií, takže při zastavení elektromobilu s pákou v poloze neutrál automaticky odbudí motor. Odbuzení v poloze neutrál ale není dovoleno za jízdy kvůli tomu, aby byla zachována informace o směru jízdy. Indukované napětí na motoru je odvozeno jednoduše z výstupní střídavy PWM kotvy pro zadaný nulový proud kotvou. Regulátor kotvy ve snaze udržet nulový proud při nízké rychlosti střídou kopíruje indukované napětí, které odpovídá aktuálním otáčkám pro daný proud buzení. Díky tomu může stavový automat získat informaci o směru jízdy a přibližné rychlosti elektromobilu.

Polohy řadicí páky jsou označeny:

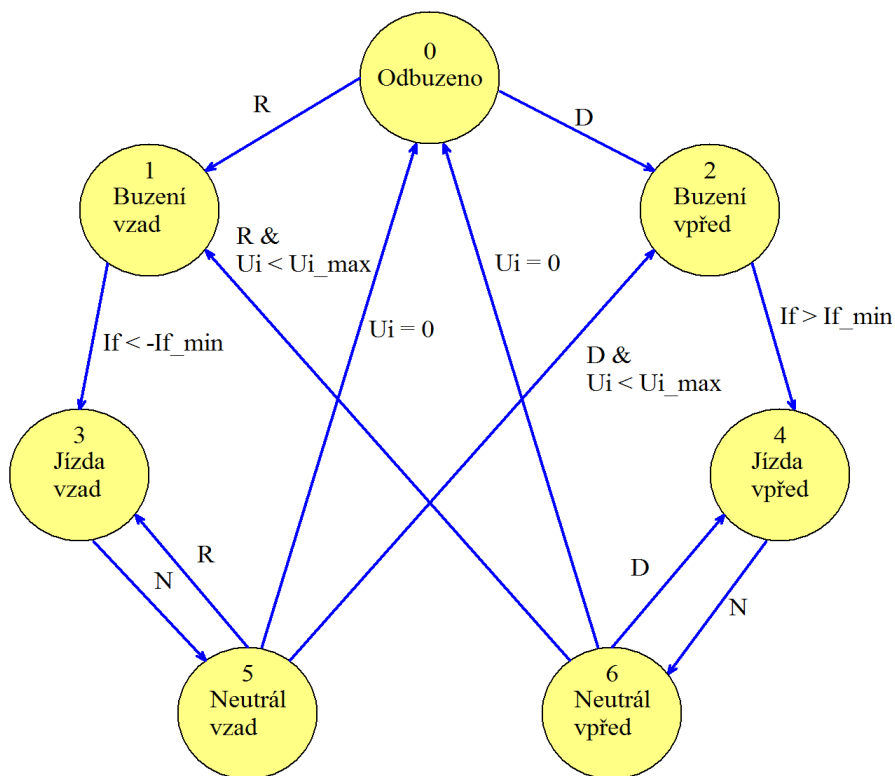
P – parkování

R – reverzace

N – neutrál

D – jízda vpřed

Podřízený automat buzení je napsán jako samostatná funkce FSM1(), která je volána nadřízeným hlavním automatem. Funkce obsahuje opět switch o sedmi stavech podle následujícího obrázku 28.



P, R, N, D .. polohy řadící páky
 If .. proud buzení
 If_min .. nejhlubší dovolené odbuzení
 Ui .. indukované napětí kotvy
 Ui_max .. napětí při otáčkách bezpečných pro nabuzení na opačnou polaritu

Obr. 28: Podřízený automat buzení

4.5.1 Stav 0 – Odbuzeno

Toto je výchozí stav při prvním spuštění funkce podřízeného automatu. Motor je odbuzen a měnič kotvy i buzení vypnut.

Při nastavení řadící páky do polohy R nebo D přechází automat do stavů 1 nebo 2.

4.5.2 Stav 1 – Buzení vzad

Je spuštěn měnič buzení, který přivede záporné napětí na buzení trakčního motoru. Jako žádaný záporný proud je dosazena jmenovitá hodnota budícího proudu. Proud buzením ale vlivem velké indukčnosti narůstá nezanedbatelně pomalu.

Když proud buzení dosáhne alespoň minimálního dovoleného, tedy nejhlubšího dovoleného odbuzení, vstoupí automat do stavu 3.

4.5.3 Stav 2 – Buzení vpřed

Shodný jako stav 1, ale je dosazena kladná hodnota budícího proudu.

Po dosažení minimálního proudu přechází do stavu 4.

4.5.4 Stav 3 – Jízda vzad

Měnič kotvy je spuštěn a automat předává žádaný proud regulátoru kotvy. Elektromobil se může rozjet dozadu. Budící proud se řídí regulátorem žádaného proudu buzení.

Pokud je zařazen neutrál dalším stavem je stav 5.

4.5.5 Stav 4 – Jízda vpřed

Podobně jako stav 3 je spuštěn měnič kotvy a jeho regulátor a elektromobil může jet dopředu.

Při zařazení neutrálu je dalším stavem stav 6.

4.5.6 Stav 5 – Neutrál vzad

V tomto stavu je regulátoru kotvy vnucen nulový žádaný proud kotvy, plynový pedál je ignorován. Kvůli úspoře energie je motor odbuzen do nejhlubšího dovoleného odbuzení. Směr budícího proudu je zachován, střída měniče kotvy tedy sleduje indukované napětí kotvy závislé na rychlosti.

Pokud je střída měniče kotvy rovná nule, a tedy motor nedodává při tomto nabuzení žádné indukované napětí, přechází automat do výchozího stavu 0. Ztrácí tak informaci o směru jízdy, ale předpokládáme, že elektromobil už prakticky stojí na místě.

Pokud je řadicí pákou zvolen směr vzad, automat ihned přejde zpět do stavu 3.

Když zvolíme směr opačný, tedy jízdu vpřed, automat nedovolí přepnutí do stavu 4, dokud není splněna podmínka střídy měniče kotvy, tedy indukovaného napětí menšího než stanovená hodnota U_{i_max} , odpovídající pro dané nabuzení rychlosti bezpečné pro změnu směru jízdy.

Podmínkou tedy není úplné zastavení, což zlepšuje dynamiku jízdy. Naopak zabránit změně směru při vyšší rychlosti je nutné vzhledem k charakteru elektrického pohonu. Při nabuzení na opačnou polaritu, než odpovídá směru jízdy, by motor reagoval obráceně na plynový pedál a působil jako nebezpečně silná brzda. Zároveň by došlo k obrácení polarity zpětné vazby proudu a hrozilo přetížení měniče a kotvy motoru.

4.5.7 Stav 6 – Neutrál vpřed

Shodný se stavem 6 až na polaritu budícího proudu, který je minimální dovolený kladný.

Při zastavení přejde do stavu 0.

Při opětovném zvolení směru vpřed ihned přejde do stavu 4.

Při volbě jízdy vzad čeká na zpomalení jízdy vpřed na maximální dovolenou rychlost opět měřenou prostřednictvím střídavy měniče kotvy, a po splnění této podmínky přechází do stavu 3.

4.6 Rozhraní CAN

Po sběrnici CAN řízení motoru přijímá žádaný proud kotvy, polohu řadicí páky, stav stavového automatu palubního počítače a uživatelská data manuálního ovládání.

Odesílá naměřené proudy kotvy a buzení, žádaný proud na vstupu regulátoru kotvy pro kontrolu a polohu svých stavových automatů.

Sběrnice CAN funguje na principu asynchronního vkládání zpráv jednotlivými připojenými zařízeními. Každá zpráva má vlastní Id, identifikační číslo a definovanou délku. Pokud dojde současně pokusu o vysílání více zpráv, zpráva s nižším číslem má přednost. Sběrnice CAN je zde výhodná hlavně svojí robustností.

V následující tabulce 4 jsou vypsány zprávy, které přijímá a odesílá blok řízení motoru.

CAN1 Vstupy řízení motoru							
Id zprávy	Název	jednotka	délka	0	1	2	3
0	Proud kotvy žádaný	[mA]	4	LSB			MSB
1	Poloha řadicí páky	{0,1,2,3} = {P,R,N,D}	1	PRND	-	-	-
2	Automat palubního počítače	[-]	1	FSM0_pal	-	-	-
3	Data manuálního ovládání	[-]	1	data	-	-	-
CAN1 Výstupy řízení motoru							
Id zprávy	Název	jednotka	délka	0	1	2	3
4	Proud kotvy naměřený	[mA]	4	LSB			MSB
5	Proud buzení naměřený	[mA]	2	LSB	MSB	-	-
6	Proud kotvy žádaný	[mA]	4	LSB			MSB
7	Automaty řízení motoru	[-]	2	FSM0_rm	FSM1_rm	-	-

tab 4: Rozhraní CAN

4.6.1 Programová realizace

Časovou značkou 50 ms, která je počítána v přerušení TIM1 – Update, je spuštěn switch, ve kterém je vždy sestavena jedna zpráva a zavolána funkce z knihovny Standard Peripherals, která zajistí její odeslání. Za dalších 50 ms je sestavena a odeslána další zpráva. Po odeslání poslední následuje opět ta první. Zprávy se odesílají celkem čtyři, tedy stejná proměnná je předávána do palubního počítače s periodou 200 ms.

4.7 Rozhraní UART

Dále je v hlavní smyčce realizována obousměrná komunikace po sběrnici UART, která slouží pouze pro ladění samotného bloku řízení motoru. Umožňuje číst naměřené hodnoty AD převodníků, zobrazovat polohy stavových automatů a ostatní veličiny důležité pro běh programu. Ty se odesílají automaticky s periodou 1 vteřina.

Zapisováním do sběrnice UART lze měnit parametry regulátorů případně přímo řídit žádaný proud kotvy a buzení. Kvůli zvýšení bezpečnosti je tento režim, nazvaný UART manual, přístupný pouze po opakovaném zadání znaku 0x7D, tedy dekadicky 125. Přepnutí je realizováno hlavním stavovým automatem.

Komunikace je řešena stylem data – příkaz. Tedy první znak obsahuje data 0 až 255 a druhý znak je příkaz, kam se mají tato data uložit podle tabulky 5.

Bez zadání vstupního kódu lze měnit pouze periodu vysílání např. pro logování.

UART manuální ovládání		
příkaz	Název	Rozsah při zadání 0 až 255
0	Žádaný proud kotvy	-100 A až +100 A
1	Max proud buzení	0 až 10 A
2	Min proud buzení	0 až 10 A
3	Kp reg. žádaného proudu buzení	10 % až 2550 %
4	Ki reg. žádaného proudu buzení	0,1 % až 25,5 %
5	Kp reg. buzení	1 % až 255 %
6	Ki reg. buzení	0,1 % až 25,5 %
7	Kp reg. kotvy	1 % až 255 %
8	Ki reg. kotvy	0,1 % až 25,5 %
9	Perioda vysílání UART	0 = vypnuto, jinak 100 ms až 25,5 s
10	Poloha řadicí páky	{0,1,2,3} = {P,R,N,D}
11	Záznam proudu buzení při změně střídání	střídání 0 až 100 %
12	Záznam proudu kotvy při změně střídání	střídání 0 až 100 %
13	Záznam proudu kotvy při přibuzení	přibuzení o 0 až 100 %
jiný	Vysvětlivky	---

tab 5: Rozhraní UART

4.7.1 Programová realizace

Zprávy jsou odesílány s výchozí periodou 1 s odvozenou z časové značky 100 ms počítané v přerušení TIM1 – Update. Periodu vysílání je možno nastavit viz tab. 5.

K sestavení a odeslání zprávy je využito přesměrování funkce printf prostřednictvím knihovny Standard Peripherals na rozhraní USART1.

Data ze sběrnice jsou vyzvedávána asynchronně v hlavní smyčce pokud je zjištěno, že byl nastaven flag USART1_RX, tedy že v přijímacím registru čekají data na vyzvednutí. Prvních 8 bit je uloženo do proměnné jako data a následujících 8 bit jako příkaz.

Pomocí switche se data zapíše do příslušné proměnné dle tabulky 5. Při zadání příkazu, který v tabulce 5 není, jsou odeslány vysvětlivky, které obsahují stručně právě tuto tabulku. Dalších 8 bit je opět uloženo jako data atd.

4.8 Diagnostické funkce

Na závěr jsou napsány 3 diagnostické funkce užitečné pro nastavení příslušných PS regulátorů Ziegler-Nicholsovou metodou z přechodové charakteristiky [1]. Jedná se o následující funkce:

Zaznam_kotvy();

Zaznam_buzeni();

Zaznam_odbuzovani();

Funkce jsou volány příkazem přes rozhraní UART podle kapitoly 4.7. Zadávaným parametrem je zde střída kotvy, buzení resp. procentuální hodnota přibuzení pro funkci Zaznam_odbuzovani.

Spuštěním funkce je dosazena zadaná střída přímo do komparační jednotky daného timeru a ihned je změřena série dat příslušné veličiny, tedy proudu kotvy pro funkce Zaznam_kotvy() a Zaznam_odbuzovani(), respektive proudu buzení pro funkci Zaznam_buzeni(). Po doměření jsou měniče okamžitě automaticky vypnuty.

Vždy je zaznamenána série 1000 hodnot.

Funkce Zaznam_buzeni() a Zaznam_odbuzovani() zaznamenává s periodou 1 ms. Funkce Zaznam_kotvy s periodou 1 μ s, protože se jedná o podstatně rychlejší děj.

Naměřená sada hodnot je uložena v poli a ihned po dokončení měření automaticky odeslána po UARTu ve formě tabulky o dvou sloupcích, čas a naměřená hodnota.

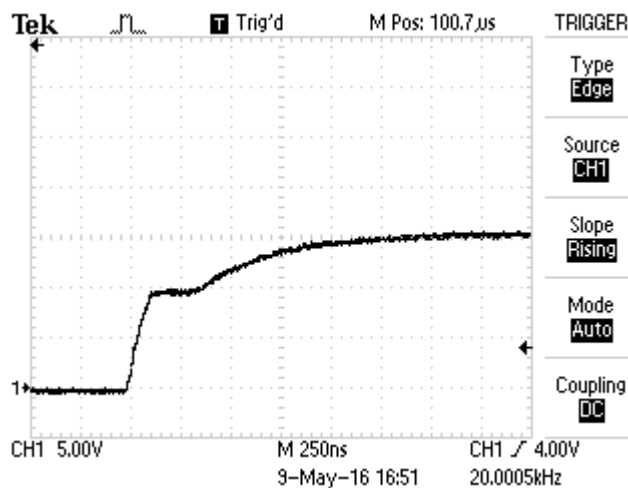
5. Měření a vyhodnocení výsledků

V této části jsou uvedeny výsledky měření dílčích celků měničové výbavy, a dále měření celé sestavené měničové výbavy. Ta byla nejprve měřena na laboratorním soustrojí s momentovou váhou, kde byly změřeny momentové charakteristiky pohonu. Potom byla zamontována do elektromobilu Citroën Berlingo Electricque a byly provedeny testovací jízdy.

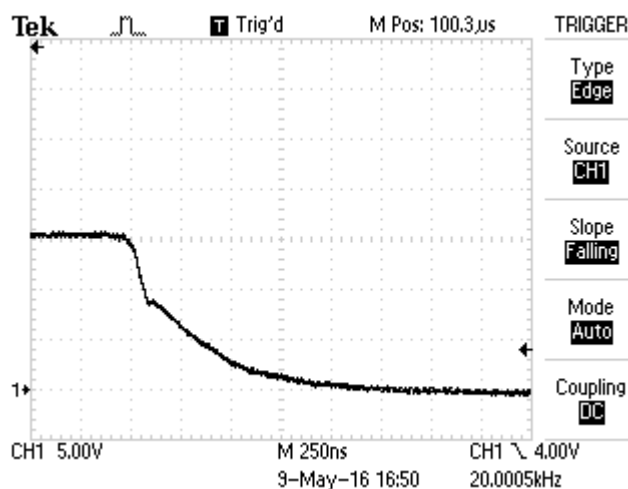
5.1 Měření IGBT driverů

Cílem navržených driverů je kromě minimalizace spínacích ztrát ovládaného IGBT modulu a jeho bezpečné vypnutí při poruše.

Nejprve jsem měřil průběh napětí na připojeném Gate. Průběhy na snímcích z osciloskopu 29 a 30 jsou měřeny přímo mezi G-E připojeného IGBT tranzistoru měniče kotvy.



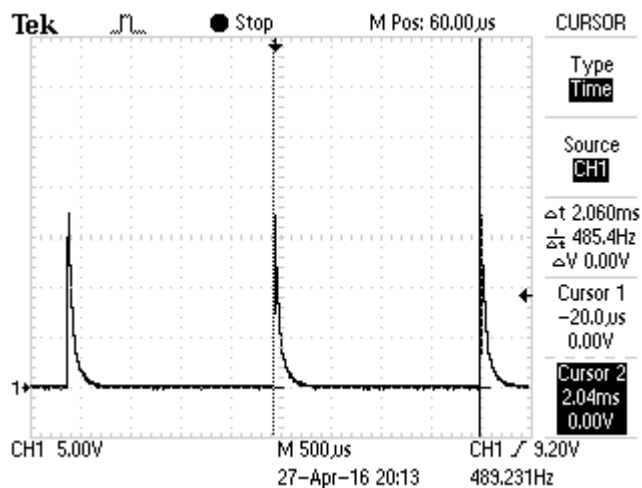
Obr. 29: Průběh napětí na Gate – sepnutí (5 V/div, 250 ns/div)



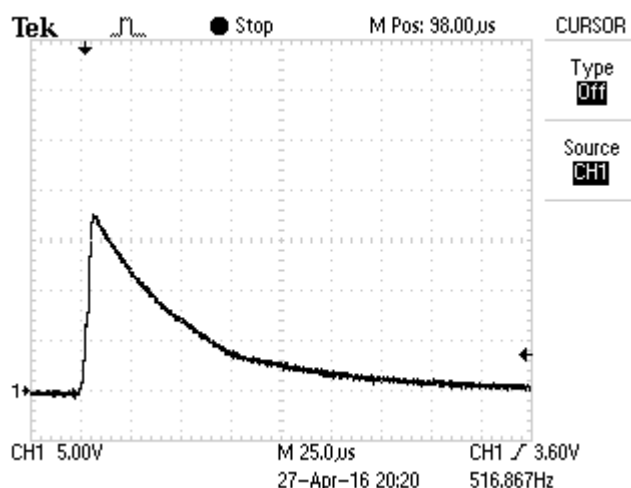
Obr. 30: Průběh napětí na Gate – vypnutí (5 V/div, 250 ns/div)

Průběhy jsou dle [4] v pořádku a nedochází k nebezpečnému parazitnímu spínání, které hrozí při napájení Gate driverem bez záporné napájecí větve.

Na následujících snímcích 31 a 32 jsou potom průběhy napětí na Gate při simulovaném vybavení nadproudové ochrany ihned po sepnutí.



Obr. 31: Průběh napětí na Gate při vybavení nadproudové ochrany (5 V/div, 500 µs/div)



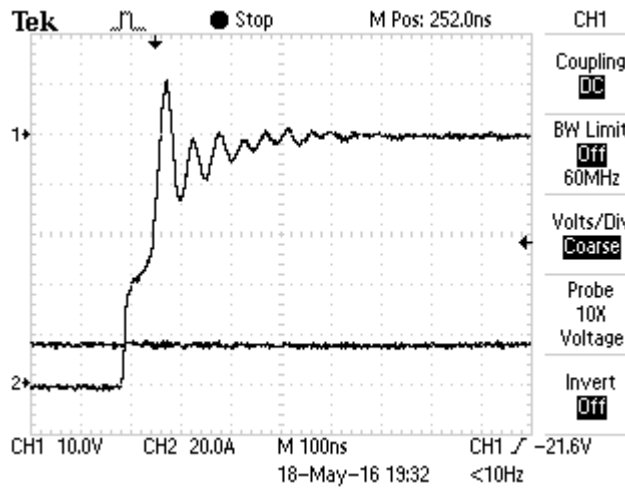
Obr. 32: Průběh napětí na Gate při vybavení nadproudové ochrany – detail (5 V/div, 25 µs/div)

Ze snímků 31 a 32 je vidět, že IGBT je nejprve sepnut, a po vybavení ochrany je vypnut odlišným způsobem než při běžném stavu.

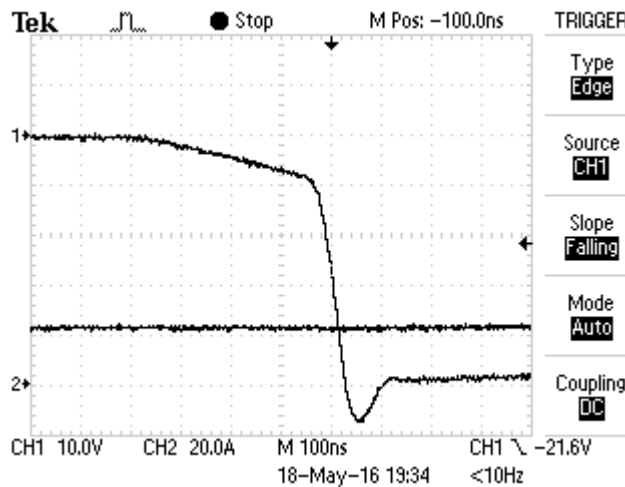
Náboj Gate se vybíjí pomalu přes řádově větší odpor, než při běžném vypínání, tím je zajištěno výrazné zpomalení vypínání nutné pro bezpečné vypnutí zkratového proudu kvůli zamezení přepětí z parazitních indukčností obvodu.

Driver zůstává vypnutý podle očekávání cca 2 ms, a poté, pokud řídicí signál nebyl odpojen, se pokusí znovu sepnout.

Na snímcích 33, 34 jsou zobrazeny průběhy napětí (CH1) a proudu (CH2) mezi C-E horního IGBT tranzistoru měniče kotvy zde při napájení 50 V. Zem měřící sondy osciloskopu byla připojena na kladný pól trakční baterie, proto je zobrazeno při vypnutí záporné napětí.



Obr. 33: Průběh napětí na tranzistoru při sepnutí (10 V/div, 20 A/div, 100 ns/div)



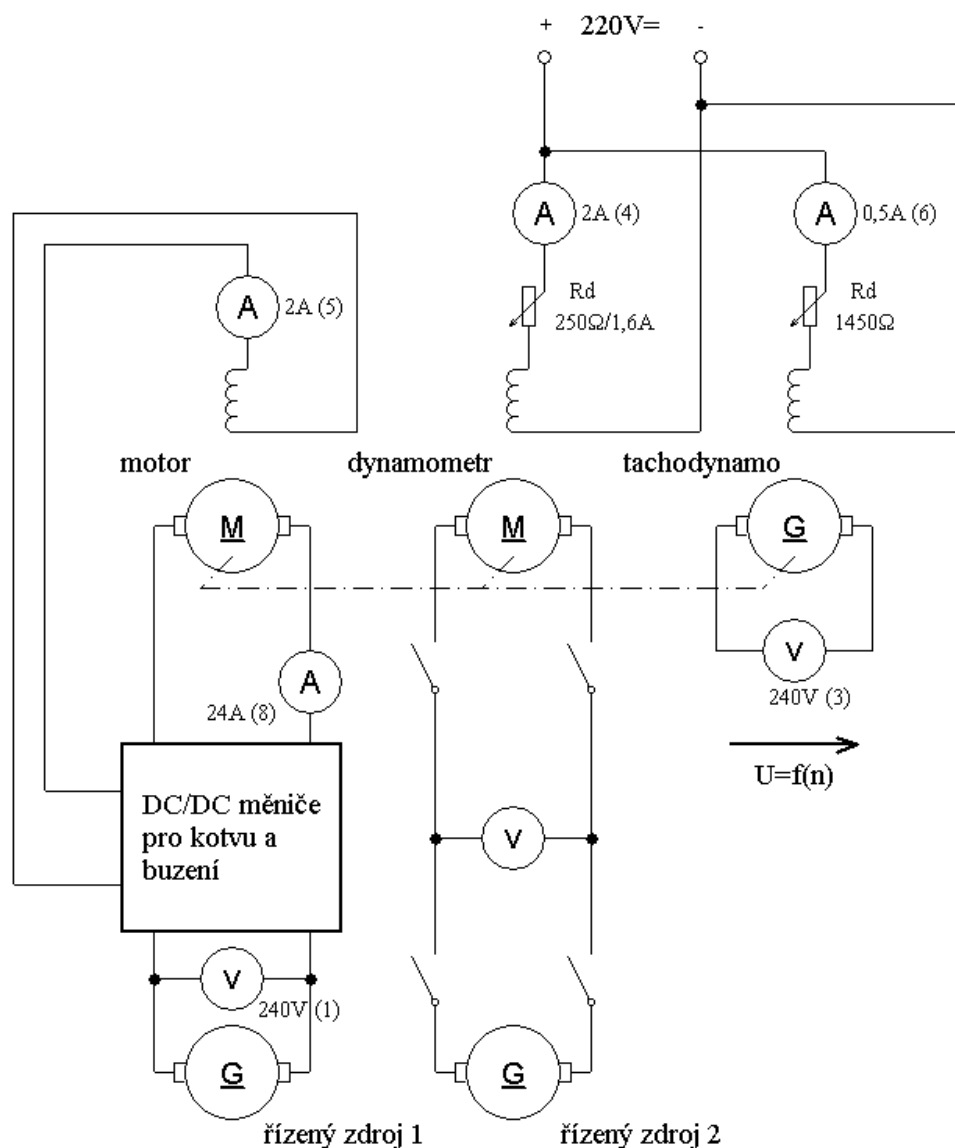
Obr. 34: Průběh napětí na tranzistoru při vypnutí (10 V/div, 20 A/div, 100 ns/div)

Při sepnutí i vypnutí dochází k překmitu o 20 % napájecího napětí, což ale vzhledem k parametrům použitého tranzistoru není problém.

Můžeme odečíst strmost při vypínání jako $du/dt = 700 \text{ V}/\mu\text{s}$.

5.2 Síť momentových charakteristik

Měničová výbava byla zapojena k měřicímu soustrojí podle následujícího schématu.



Obr. 35: Schéma zapojení pro měření síť momentových charakteristik

Parametry motoru na měřicím soustrojí	
Typ	TMN16AB
Výkon	4,0 kW
Otáčky	1400 ot./min
Kotva	220 V / 20 A
Buzení	220 V / 0,55 A

tab 6: Parametry motoru na měřicím soustrojí

Podle těchto parametrů byl upraven SW v MCU řízení motoru tak, aby jmenovitý proud buzení a maximální proud kotvy odpovídal štítkovým hodnotám tohoto motoru. Poloha plynového pedálu byla zadávána přímo potenciometrem připojeným k příslušnému konektoru na DPS řízení motoru.

Trakční baterie byla simulována regulovaným zdrojem nastaveným na napětí 150 V, aby bylo možno měřit i v oblasti odbuzování bez překročení maximálních otáček soustrojí.

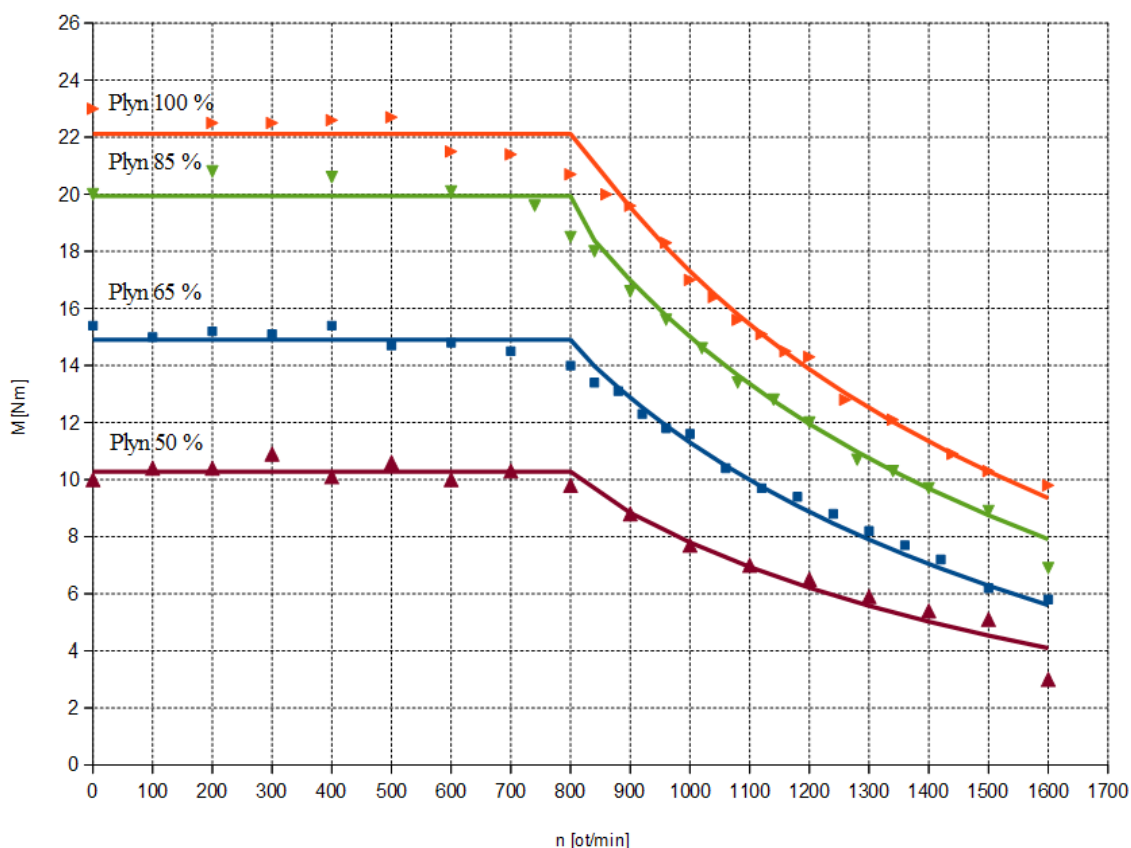
Měření bylo prováděno tak, že se nejprve nastavil žádaný proud kotvou při zabrzděném motoru, a pak se druhým regulovaným zdrojem postupně zvyšovaly otáčky dynamometru za odečítání hodnot.

Pro další měření se nastavila nová hodnota plynu a opakoval se postup odbrzdování.

Sít momentových charakteristik							
plyn 50%		plyn 65 %		plyn 85 %		plyn 100 %	
n [ot/min]	M [Nm]	n [ot/min]	M [Nm]	n [ot/min]	M [Nm]	n [ot/min]	M [Nm]
0	10	0	15,4	0	20	0	23
100	10,4	100	15	200	20,8	200	22,5
200	10,4	200	15,2	400	20,6	300	22,5
300	10,9	300	15,1	600	20,1	400	22,6
400	10,1	400	15,4	740	19,6	500	22,7
500	10,6	500	14,7	800	18,5	600	21,5
600	10	600	14,8	840	18	700	21,4
700	10,3	700	14,5	900	16,6	800	20,7
800	9,8	800	14	960	15,6	860	20
900	8,8	840	13,4	1020	14,6	900	19,6
1000	7,7	880	13,1	1080	13,4	960	18,3
1100	7	920	12,3	1140	12,8	1000	17
1200	6,5	960	11,8	1200	12	1040	16,4
1300	5,9	1000	11,6	1280	10,7	1080	15,6
1400	5,4	1060	10,4	1340	10,3	1120	15,1
1500	5,1	1120	9,7	1400	9,7	1160	14,5
1600	3	1180	9,4	1500	8,9	1200	14,3
		1240	8,8	1600	6,9	1260	12,8
		1300	8,2			1340	12,1
		1360	7,7			1440	10,9
		1420	7,2			1500	10,3
		1500	6,2			1600	9,8
		1600	5,8				

tab 7: Sít momentových charakteristik

Momentové charakteristiky pro různé polohy plynu



Obr. 36: Sít' momentových charakteristik

Průběh je proložen křivkou vycházející z rovnice $P = M \cdot \Omega$.

Ztráty měřícího soustrojí byly v prokladu modelovány odečtením křivky tvaru ventilátorové charakteristiky, což se jeví jako dostatečná aproximace.

5.3 Měření v elektromobilu

Modul řízení motoru byl zamontován do elektromobilu Citroën Berlingo Electricque, připojen k motoru a trakčním akumulátorům s napětím $U_b = 48$ V. Byl připojen prostřednictvím sběrnice CAN k palubnímu počítači, do kterého byla zapojena původní elektrická instalace vozidla.

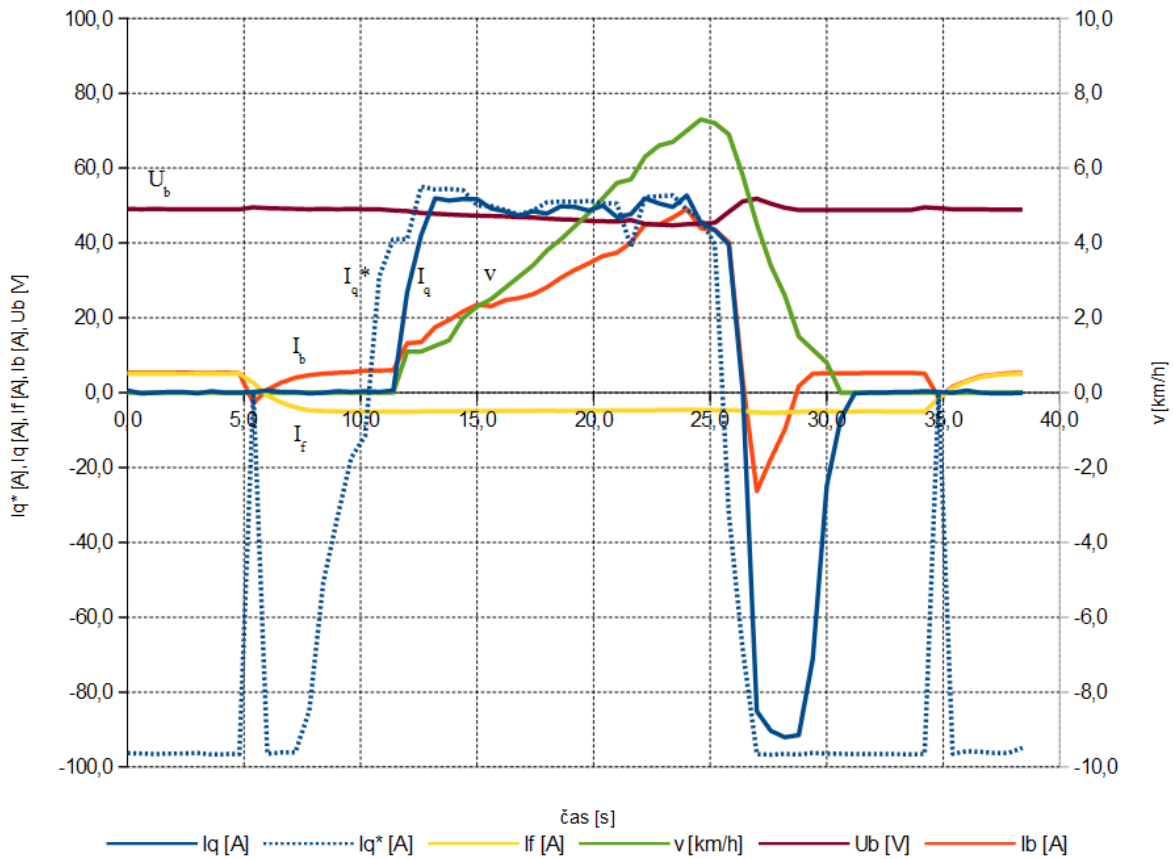
Zde uvedené hodnoty byly přímo měřeny zabudovanými měřícími prvky připojenými k jednotlivým procesorům palubního počítače a modulu řízení motoru. Byly přenášeny pomocí sběrnice CAN do externího převodníku CAN – UART a následně zaznamenávány v PC pomocí terminálu.

Elektromobilem byly provedeny krátké testovací jízdy nízkou rychlostí. Ze zaznamenaných dat jsem vybral úseky, které dobře prezentují funkci algoritmů řízení motoru v režimu jízdy, rekuperace a reverzace, tedy všech čtyřech kvadrantech.

Naměřené průběhy jsou na obrázcích 37 a 38.

Naměřená data, ze kterých jsou sestaveny tyto měřené průběhy jsou v tabulkách 1 a 2 v příloze A.

Jízda, reverzace a rekuperace



Obr. 37: Záznam jízdy – reverzace a rekuperace

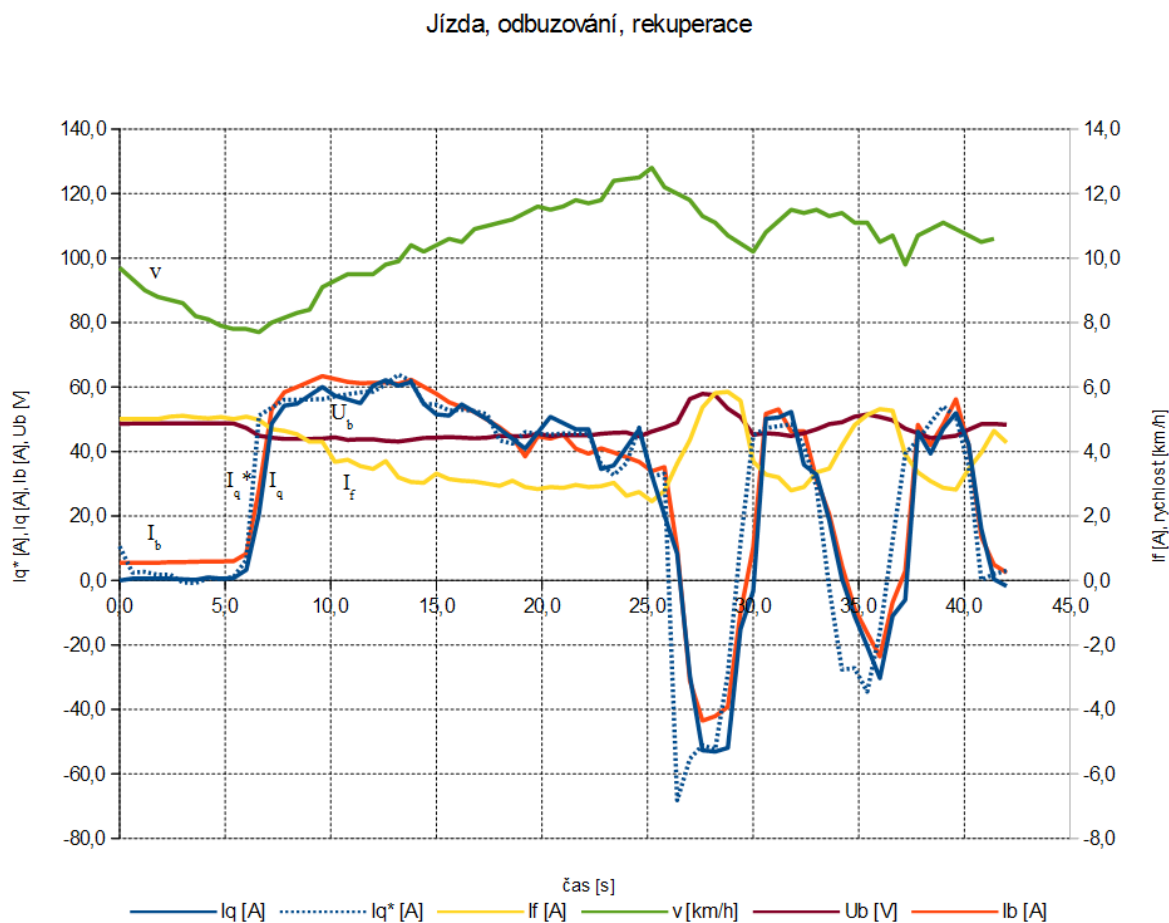
V čase 5 s byla provedena změna směru z jízdy vpřed na jízdu vzad, v čase 35 s naopak. Je vidět, že podřízený stavový automat při odbuzení nastaví polohu plynu na $I_q^* = 0$ a přenos žádané hodnoty plynu povolí opět až při nabuzení na opačnou polaritu.

Při budícím proudu menším než dovolená minimální hodnota je tedy vypnut měnič kotvy a poloha plynového pedálu je ignorována.

Dále je zde vidět rekuperace při malé rychlosti. Proud kotvou kopíruje zápornou žádanou hodnotu dokud není rychlost příliš nízká. Protože měnič kotvy v této oblasti pracuje jako zvyšující měnič napětí kotvy na napětí trakční baterie, je proud baterie menší, a dále klesá s rychlostí tak, jak se zmenšuje motorem dodávaný výkon.

Vzhledem k tomu, že měnič kotvy dokáže udržet záporný proud motorem do rychlosti jednotek km/h, je pocit z jízdy takový, že rekuperaci je možno používat místo klasických brzd prakticky do zastavení.

Na následujícím obrázku 38 je potom jízda a rekuperace při vyšší rychlosti v režimu odbuzování.



Obr. 38: Záznam jízdy – odbuzování a rekuperace

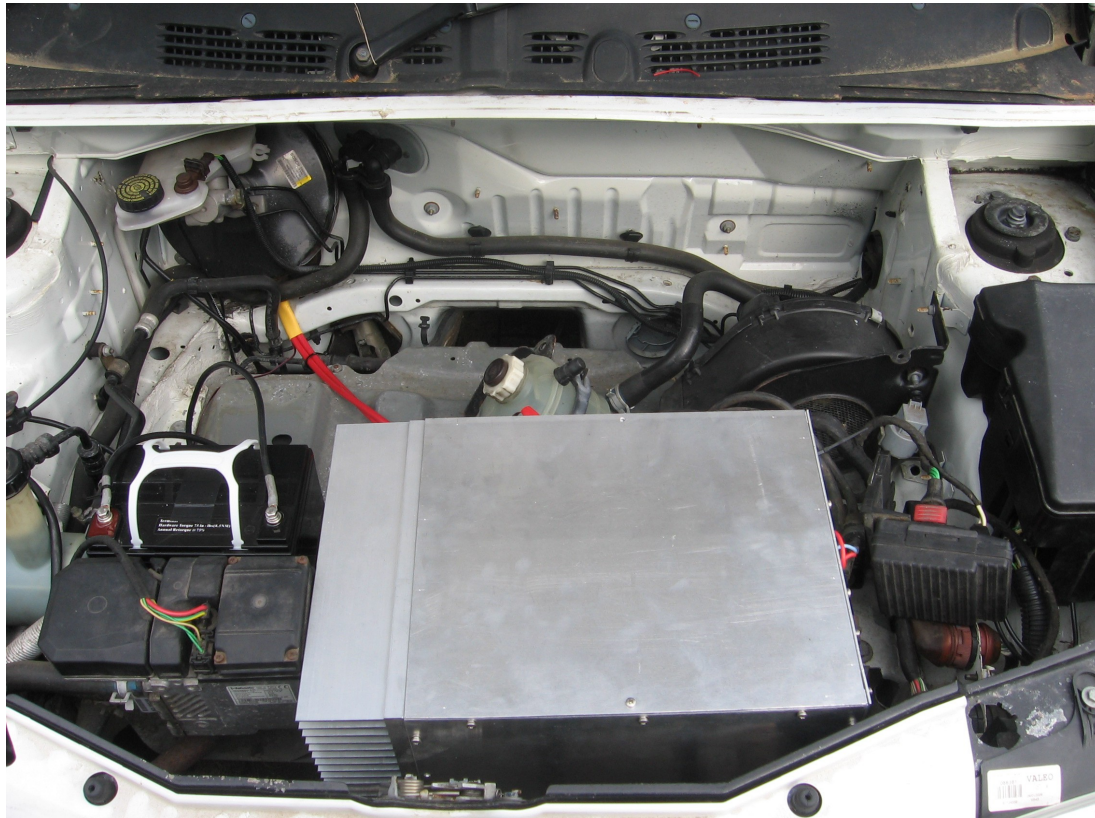
Protože napětí baterie U_b bylo jen 48 V, nastává odbuzování již při rychlosti 8 km/h.

Rekuperace zde probíhá tak, že se přibuzuje motor za plného otevření měniče kotvy, proto křivka proudu baterie I_b na rozdíl od předchozího obrázku kopíruje křivku proudu kotvou I_q .

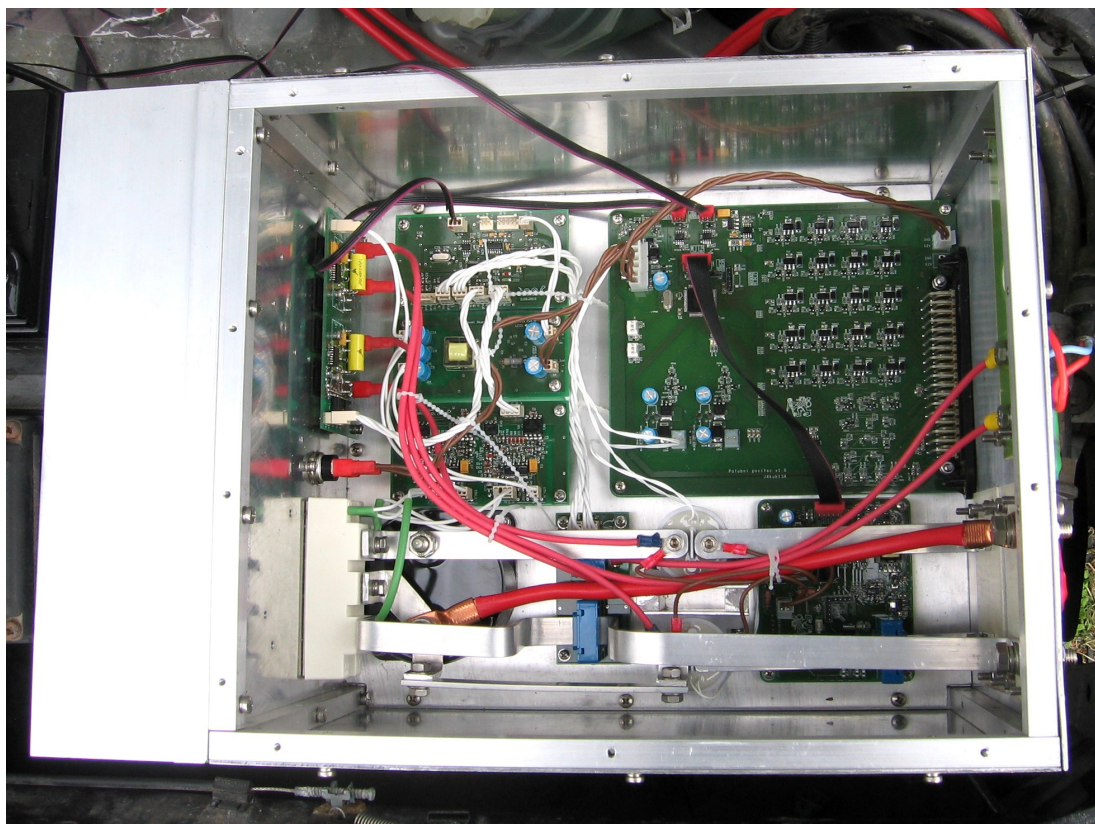
Vlivem testovacích jízd v omezeném prostoru, nejsou naměřené průběhy příliš hladké, ale aspoň je zde vidět reálný průběh změn žádaných hodnot pohonu elektromobilu a nutná dostatečná dynamika jeho řízení.

Trakční baterie byla provizorně sestavena z Pb akumulátorů. Vlivem vyššího vnitřního odporu těchto již starších akumulátorů dochází při zatížení k poklesu a při rekuperaci naopak k výraznému nárůstu napětí U_b .

Poslední obrázky 39 a 40 pak ukazují umístění měničové výbavy v elektromobilu.



Obr. 39: Umístění měničové výbavy v elektromobilu.



Obr. 40: Pohled do šasi

5.4 Shrnutí výsledků měření

Podle literatury [4] jsem naměřenými průběhy ověřil, že navržený a odladěný diskretní IGBT driver je schopen bezpečně řídit zvolený IGBT modul tak, že dosahuje parametrů uvedených výrobcem v katalogu [8]. A to přesto, že se jedná pouze o řízení Gate jednou polaritou napětí, tedy bez vypínání záporným napětím. Naměřené spínací a vypínací časy odpovídají podle grafů v [8] zvolenému R_G .

Průběh napětí na výstupu měniče kotvy sice vykazuje překmity, ale v únosné míře, která nebrání bezpečnému provozu na zvoleném napětí trakční baterie. Zřejmě jsou způsobeny přívody k DC-link kondenzátoru, které díky odlišné rozteči vývodů modulu už nemohly být provedeny kratší.

Měření ztrát spínacích prvků, a tedy i účinnosti měničů zatím mohlo být provedeno pouze teoreticky právě ověřením spínacích časů t_r a t_f . Tyto časy odpovídají těm, pro které byly provedeny výpočty účinnosti. Pro dostatečně přesné přímé měření výkonu a příkonu nestačí instalované měřicí sondy, a tedy bude nutno měření provést dodatečně s lepším vybavením a při jmenovitém napětím trakční baterie.

Měření momentových charakteristik je vždy ovlivněno ztrátami měřicího soustrojí, nicméně sít' charakteristik je ověřením především funkce samotného algoritmu řízení pohonu. Hlavně spolupráce tří provázaných PS regulátorů, které bylo třeba naladit tak, aby pohon fungoval v celém měřeném rozsahu, což se v laboratoři podařilo.

Algoritmus pohonu funguje správně, ale z měření jízd, obrázek 38 čas 10 s až 25 s, je vidět, že je třeba lépe naladit regulátor žádaného proudu buzení, který způsobuje kolísání proudu buzení a s ním spojené výkyvy proudu kotvy.

Dodatečné ladění ale nebude problém, protože výhodou procesorového řízení je možnost změny parametrů regulátorů v širokém rozsahu bez zásahu do zapojení.

6. Závěr

Podstatou této práce bylo projít celým procesem návrhu, konstrukce a ověření funkčnosti modulu řízení motoru elektromobilu Citroën Berlingo Electrique.

Práce začala zvolením obecné koncepce pohonu a stanovením základních parametrů, což bylo provedeno podle dostupných parametrů trakčního motoru, ale také s ohledem na kompatibilitu s původní elektroinstalací v elektromobilu.

Jedním z cílů návrhu bylo snížit ztráty měničů na minimum tak, aby mohlo být použito chlazení vzduchem. Díky tomu mohlo být z elektromobilu vymontováno celé původní vodní chlazení. Tento cíl byl splněn díky modernějším součástkám, se kterými vycházejí ztráty lépe, a tedy chlazení vzduchem vyhovuje.

Další cíl, který jsem si vytyčil, bylo navrhnout a odladit vlastní driver IGBT tranzistorů, protože dostupné drivery jsou stále poměrně drahé a ne vždy plně vyhovují požadavkům pro provoz v elektromobilu. Návrhem IGBT driveru jsem se zabýval i mimo rámec této práce, a tedy zde uvedený, odladěný a plně vyhovující driver je již několikátou verzí postupně vylepšované koncepce.

Celý modul řízení motoru je složen z velkého množství desek plošných spojů, celkem pěti, což je dáno především snahou o modulárnost konstrukce při ladění, ale velkou nevýhodou je nutné množství propojů mezi deskami. Co by se mělo zlepšit je tedy výrazně snížit počet desek plošných spojů a optimalizovat jejich rozmístění v šasi.

Dále nejsem spokojen se složitým vedením silových cest v měničích kotvy. Je třeba vybírat součástky i s ohledem na jejich rozměry a rozteče vývodů tak, aby se silová část dala poskládat do malých rozměrů a vhodně pospojovat, což sníží vyzařování rušení do okolí a také omezí vznik překmitů zde způsobených indukčnostmi nezanedbatelně dlouhých propojů.

Zklamáním bylo použití proudových sond LEM, které sice přináší výhodu jednoduchého řešení galvanického oddělení, ale k přesnému měření proudu se příliš neosvědčily. Všechny použité vykazují poměrně velký offset, navíc závislý na teplotě, a nezanedbatelný šum, což je vidět i na naměřených datech v příloze A. Fungují dobře pouze v oblasti maximálního měřitelného proudu. Po této zkušenosti uvažuji opět o použití bočníků a izolačních zesilovačů, které se dnes dají sehnat s velmi nízkým offsetem a šumem za zlomek ceny proudové sondy.

Zde popsaná měničová výbava je v současné době zamontována v elektromobilu Citroën Berlingo Electrique a probíhají testovací jízdy a ladění především palubního počítače tak, aby spolupracoval s původní elektroinstalací.

7. Literatura

- [1] PAVELKA, Jiří a Jiří ZDĚNEK. *Elektrické pohony a jejich řízení*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2010, 241 s. ISBN 978-80-01-04642-5.
- [2] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů*. 1. vyd. V Praze: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2005, ISBN 80-01-03351-1.
- [3] Maxon Precision Motors, Inc. *PWM-Scheme and Current Ripple of Switching Power Amplifiers*, company white paper publication, Aug. 29, 2000. [online] Dostupné z: <http://www.electromate.com>
- [4] Semikron. *Application Note 1401- Limits and hints how to turn off IGBTs with unipolar supply* [online] Semikron, 2015. Dostupné z: <http://www.semikron.com>
- [5] Semikron. *Application Note 1403- Determining switching losses of SEMIKRON IGBT modules* [online] Semikron, 2014. Dostupné z: <http://www.semikron.com>
- [6] Technická dokumentace vozidla Citroen Berlingo electricque, L'Institut Citroen.
- [7] CD00171190 reference manual STM32F10x [online] STMicroelectronics 2014. Dostupné z: <http://www.st.com>
- [8] SKM195GB066D datasheet [online] Semikron 2014. Dostupné z: <http://www.alldatasheet.com>
- [9] IRG4PC40FD datasheet [online] International Rectifier 2012. Dostupné z: <http://www.irf.com>
- [10] LEM_HAIS300P datasheet [online] LEM 2012. Dostupné z: <http://www.lem.com>
- [11] LEM_HXS10NPSP3 datasheet [online] LEM 2012. Dostupné z: <http://www.lem.com>
- [12] UC2843 datasheet [online] Texas Instruments 2015. Dostupné z: <http://www.ti.com>
- [13] Knihovna Standard Peripheral Library pro STM32F10x dostupná z <http://www.st.com>

Příloha A – Měření

Jízda, reverzace a rekuperace						
čas [s]	I_q^* [A]	I_q [A]	I_r [A]	v [km/h]	U_b [V]	I_b [A]
0,0	-96,3	0,6	5,14	0,0	49,1	5,4
0,6	-96,4	-0,2	5,11	0,0	49,0	5,4
1,2	-96,6	0,0	5,08	0,0	49,1	5,4
1,8	-96,4	0,2	5,08	0,0	49,0	5,4
2,4	-96,4	0,2	5,06	0,0	49,0	5,4
3,0	-96,3	-0,2	5,11	0,0	49,0	5,3
3,6	-96,6	0,4	5,08	0,0	49,0	5,3
4,2	-96,6	0,0	5,08	0,0	49,0	5,4
4,8	-96,6	0,0	5,10	0,0	49,0	5,2
5,4	0,0	0,2	2,64	0,0	49,5	-2,8
6,0	-96,5	0,6	-0,77	0,0	49,3	0,8
6,6	-96,1	0,2	-2,64	0,0	49,2	2,7
7,2	-96,1	0,2	-3,94	0,0	49,1	4,0
7,8	-84,9	-0,2	-4,69	0,0	49,0	4,7
8,4	-50,7	0,0	-4,93	0,0	49,1	5,1
9,0	-33,5	0,4	-5,02	0,0	49,0	5,3
9,6	-17,4	0,2	-5,10	0,0	49,1	5,5
10,2	-11,5	0,4	-5,08	0,0	49,0	5,9
10,8	31,0	0,2	-5,08	0,0	49,0	5,9
11,4	40,9	0,6	-5,08	0,0	48,7	6,0
12,0	41,0	26,8	-5,14	1,1	48,5	13,2
12,6	55,1	42,1	-5,03	1,1	48,0	13,5
13,2	54,3	51,9	-4,98	-	47,8	17,5
13,8	54,4	51,3	-4,99	1,4	47,6	19,4
14,4	54,1	51,7	-4,93	2,0	47,4	21,7
15,0	50,0	51,7	-4,88	2,3	47,3	23,5
15,6	49,8	49,2	-4,93	2,5	47,2	23,1
16,2	48,8	48,4	-4,88	2,8	47,1	24,7
16,8	47,6	47,3	-4,91	3,1	46,9	25,3
17,4	48,7	48,4	-4,88	3,4	46,8	26,3
18,0	50,9	47,9	-4,82	3,8	46,5	28,2
18,6	51,1	49,8	-4,90	4,1	46,3	30,7
19,2	51,0	49,6	-4,85	-	46,2	32,8
19,8	51,2	48,6	-4,80	4,8	45,9	34,6
20,4	50,6	50,0	-4,82	5,2	45,8	36,5
21,0	50,5	46,9	-4,72	5,6	45,7	37,4
21,6	39,0	47,7	-4,77	5,7	46,1	40,1
22,2	52,3	51,9	-4,77	6,3	45,1	44,9
22,8	52,5	50,6	-4,67	6,6	44,9	44,9
23,4	52,7	49,6	-4,64	6,7	44,7	46,8
24,0	48,8	52,7	-4,56	7,0	45,0	49,1
24,6	46,3	45,4	-4,62	7,3	45,1	43,9
25,2	39,5	43,4	-4,71	7,2	45,4	43,5
25,8	-32,5	39,6	-4,62	6,9	48,3	40,2
26,4	-68,7	0,4	-4,88	5,8	51,1	3,4
27,0	-96,6	-85,1	-5,28	4,5	51,8	-26,3
27,6	-96,7	-90,3	-5,37	3,4	50,5	-17,7
28,2	-96,5	-92,1	-5,24	2,6	49,4	-9,9
28,8	-96,6	-91,5	-5,14	1,5	48,8	1,7
29,4	-96,3	-71,2	-5,01	-	48,8	5,1
30,0	-96,4	-24,9	-5,03	0,8	48,8	5,2
30,6	-96,5	-6,9	-5,06	0,0	48,8	5,2
31,2	-96,6	-0,2	-5,03	0,0	48,8	5,2
31,8	-96,6	0,0	-5,03	0,0	48,8	5,3
32,4	-96,6	0,0	-5,03	0,0	48,8	5,3
33,0	-96,6	0,2	-5,08	0,0	48,8	5,3
33,6	-96,6	0,2	-5,03	0,0	48,8	5,3
34,2	-96,5	0,4	-5,08	0,0	49,5	5,1
34,8	0,0	0,2	-1,52	0,0	49,3	-1,3
35,4	-96,5	0,0	1,29	0,0	49,0	1,6
36,0	-95,8	0,6	2,99	0,0	49,0	3,1
36,6	-95,9	0,0	4,13	0,0	49,0	4,4
37,2	-96,3	-0,2	4,69	0,0	48,9	4,8
37,8	-96,3	-0,2	4,95	0,0	48,9	5,2
38,4	-94,9	0,0	5,01	0,0	48,9	5,3

Tab. 1: Jízda, reverzace a rekuperace

Pozn. Některá pole jsou prázdná, protože přijatá data byla nutně špatně, buď kvůli rušení, nebo chybě předání dat v palubním počítači. SW palubního počítače potřebuje ještě doladit.

Jízda, odbuzování a rekuperace						
čas [s]	I_a^* [A]	I_a [A]	I_r [A]	v [km/h]	U_b [V]	I_b [A]
0,0	10,6	0,0	5,01	9,7	48,6	5,5
0,6	2,5	0,6	5,01	-	48,7	5,5
1,2	2,6	0,6	5,01	9	48,7	5,5
1,8	1,8	0,6	5,01	8,8	48,7	5,5
2,4	1,8	0,6	5,08	-	48,7	5,7
3,0	-0,6	0,4	5,11	8,6	48,7	5,7
3,6	-0,8	0,2	5,06	8,2	48,7	5,8
4,2	0,6	1,0	5,03	8,1	48,7	5,9
4,8	0,5	0,6	5,07	7,9	48,7	5,9
5,4	1,1	0,8	5,01	7,8	48,7	6,0
6,0	6,4	3,3	5,08	7,8	47,3	8,3
6,6	51,2	20,7	4,98	7,7	44,9	28,2
7,2	53,6	48,6	4,69	8	44,3	53,0
7,8	56,1	54,2	4,64	-	43,9	58,4
8,4	56,0	54,8	4,54	8,3	43,9	60,0
9,0	56,2	-	4,30	8,4	43,9	-
9,6	56,2	60,0	4,30	9,1	44,0	63,4
10,2	57,1	57,3	3,68	9,3	44,4	-
10,8	57,8	-	3,74	9,5	43,6	61,6
11,4	58,3	55,0	3,55	-	43,8	61,2
12,0	58,6	60,4	3,46	9,5	43,8	-
12,6	60,8	62,1	3,71	9,8	43,3	61,4
13,2	63,9	60,4	3,20	9,9	43,1	61,0
13,8	61,9	61,6	3,06	10,4	43,6	62,3
14,4	54,7	54,8	3,03	10,2	44,2	-
15,0	54,6	51,5	3,32	-	44,3	57,9
15,6	52,7	51,1	3,15	10,6	44,5	55,3
16,2	53,0	54,6	3,09	10,5	44,3	-
16,8	52,6	-	3,07	10,9	44,1	52,3
17,4	51,6	50,0	3,00	11	44,3	-
18,0	43,4	-	2,94	11,1	44,9	47,5
18,6	42,4	-	3,09	11,2	44,7	44,5
19,2	46,0	40,9	2,90	11,4	44,7	38,5
19,8	45,5	-	2,83	11,6	45,5	44,7
20,4	45,2	50,8	2,90	11,5	44,8	44,0
21,0	45,6	-	2,87	11,6	45,1	45,3
21,6	45,6	46,9	2,96	11,8	45,0	40,9
22,2	45,6	46,9	2,90	11,7	45,0	39,3
22,8	36,0	34,5	2,93	11,8	45,5	41,0
23,4	32,7	35,7	3,03	12,4	45,8	39,7
24,0	36,4	-	2,63	-	45,9	-
24,6	47,4	46,9	2,74	12,5	44,7	36,8
25,2	32,3	32,6	2,46	12,8	46,2	33,9
25,8	33,1	20,3	2,78	12,2	47,4	35,2
26,4	-68,2	8,3	3,63	12	49,0	10,0
27,0	-55,3	-29,5	4,36	11,8	56,3	-31,1
27,6	-51,1	-52,7	5,37	11,3	57,9	-43,5
28,2	-52,4	-53,1	5,81	11,1	57,5	-42,1
28,8	-28,9	-51,9	5,85	10,7	53,3	-39,2
29,4	11,8	-15,1	5,58	-	50,7	-10,0
30,0	45,0	-3,3	3,69	10,2	45,2	10,3
30,6	47,3	50,2	3,29	10,8	45,7	51,7
31,2	47,9	50,6	3,20	-	45,4	53,1
31,8	48,4	52,3	2,80	11,5	44,8	46,2
32,4	41,6	35,9	2,90	11,4	45,7	46,3
33,0	29,0	32,8	3,35	11,5	46,9	31,3
33,6	-2,3	18,7	3,47	11,3	48,5	20,6
34,2	-27,6	0,6	4,19	11,4	49,1	4,6
34,8	-27,2	-11,0	4,82	11,1	50,8	-8,7
35,4	-34,5	-20,5	5,14	11,1	51,5	-16,3
36,0	-16,0	-30,3	5,32	10,5	50,7	-23,6
36,6	12,3	-11,0	5,27	10,7	49,7	-6,8
37,2	39,3	-6,0	3,91	9,8	47,1	2,9
37,8	43,7	46,1	3,35	10,7	45,7	48,3
38,4	49,0	39,4	3,08	10,9	44,2	42,0
39,0	54,0	47,1	2,87	11,1	44,4	48,5
39,6	50,8	51,9	2,82	10,9	44,9	56,2
40,2	35,5	42,3	3,46	10,7	46,8	42,0
40,8	0,2	16,0	3,97	10,5	48,5	13,5
41,4	2,0	0,4	4,64	10,6	48,6	4,9
42,0	3,0	-1,7	4,28	-	48,3	2,4

Tab. 2: Jízda, odbuzování, rekuperace

Pozn. Viz poznámka k Tab. 1.

Příloha B – Schémata

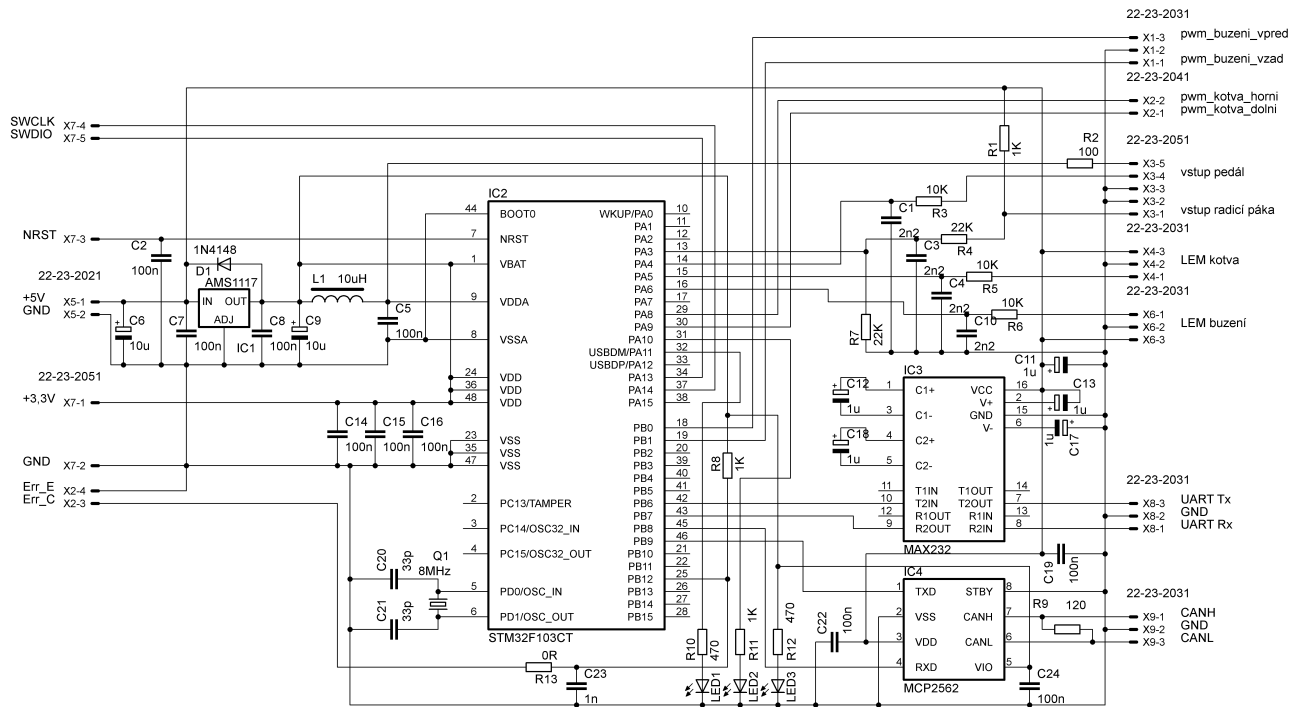


Schéma 1: MCU řízení motoru

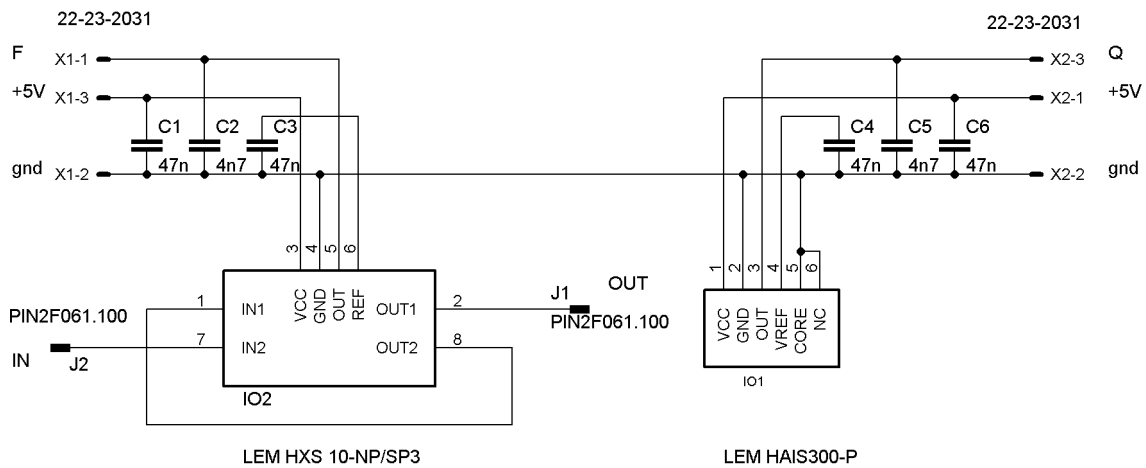


Schéma 2: DPS LEM

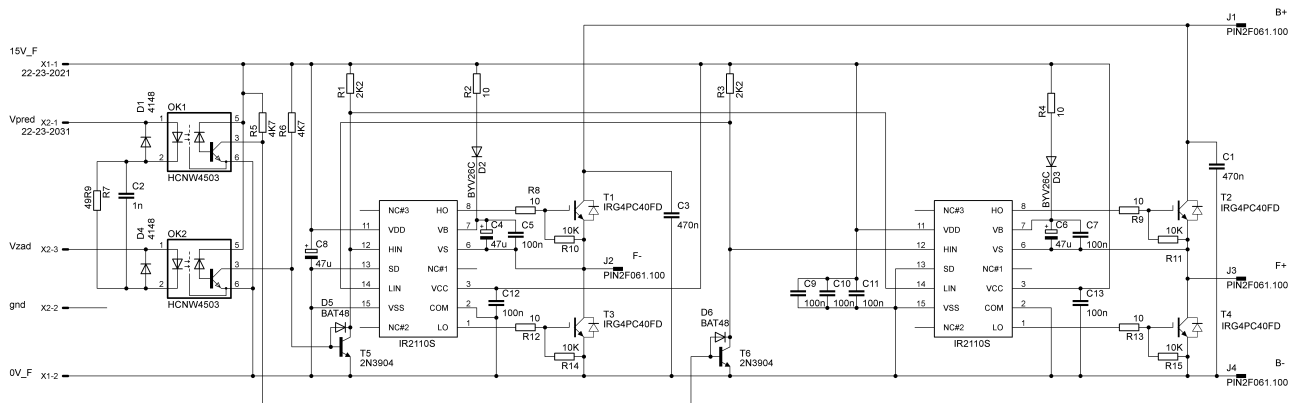


Schéma 3: DPS buzení

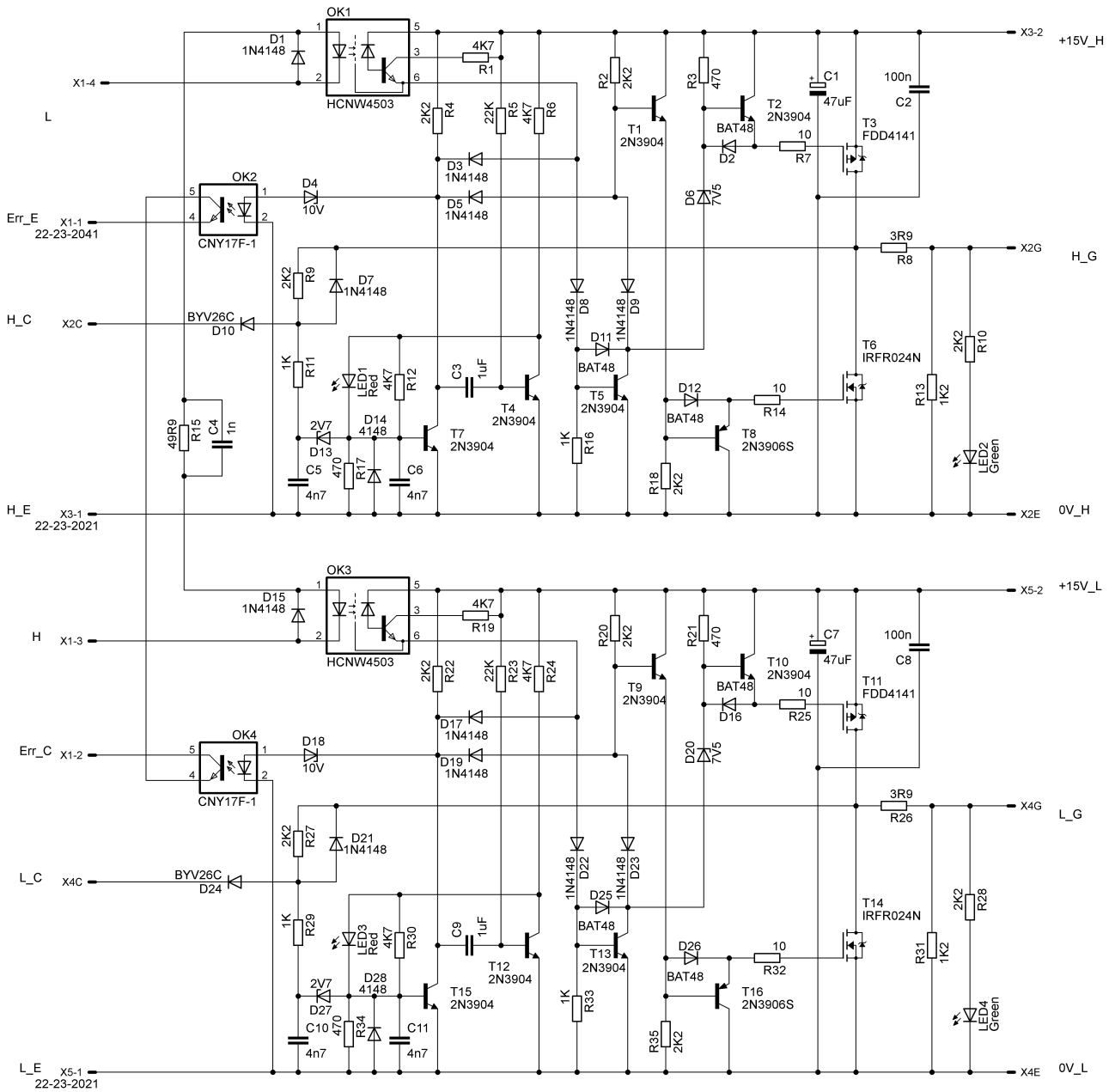


Schéma 4: DPS IGBT driver

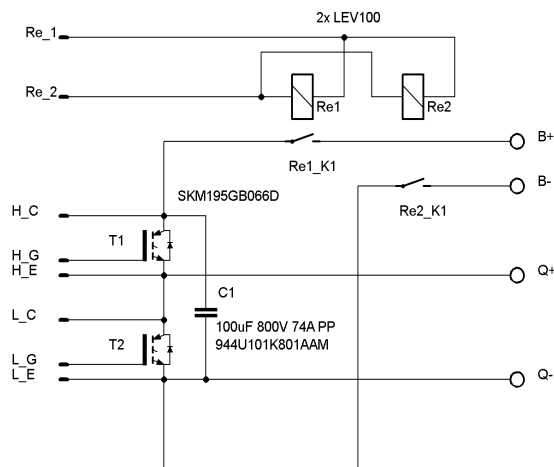


Schéma 5: Měnič kotvy

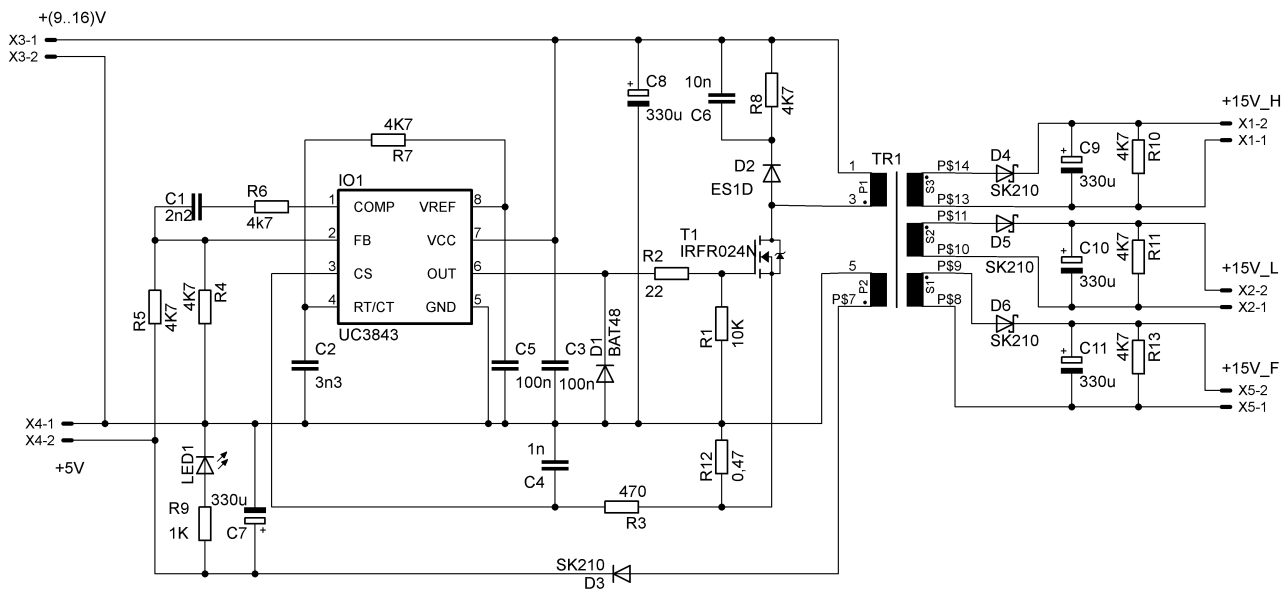


Schéma 6: Izolační zdroj

Příloha C – Seznam součástek

DPS MCU řízení motoru			DPS buzení		
symbol	hodnota	pouzdro	symbol	hodnota	pouzdro
C1	2n2	C0805	C1	470n	JFGC
C2	100n	C0805	C2	1n	C0805
C3	2n2	C0805	C3	470n	JFGC
C4	2n2	C0805	C4	47u	SMC_D
C5	100n	C0805	C5	100n	C0805
C6	10u	SMC_B	C6	47u	SMC_D
C7	100n	C0805	C7	100n	C0805
C8	100n	C0805	C8	47u	SMC_D
C9	10u	SMC_B	C9	100n	C0805
C10	2n2	C0805	C10	100n	C0805
C11	1u	SMC_B	C11	100n	C0805
C12	1u	SMC_B	C12	100n	C0805
C13	1u	SMC_B	C13	100n	C0805
C14	100n	C0805	D1	4148	MINIMELF
C15	100n	C0805	D2	BYV26C	SOD57-10
C16	100n	C0805	D3	BYV26C	SOD57-10
C17	1u	SMC_B	D4	4148	MINIMELF
C18	1u	SMC_B	D5	BAT48	MINIMELF
C19	100n	C0805	D6	BAT48	MINIMELF
C20	33p	C0805	IO1	IR2110S	SO16W
C21	33p	C0805	IO2	IR2110	SO16W
C22	100n	C0805	J1	faston 6,3mm	F061.100
C23	1n	C0805	J2	faston 6,3mm	F061.100
C24	100n	C0805	J3	faston 6,3mm	F061.100
D1	1N4148	MINIMELF	J4	faston 6,3mm	F061.100
IC1	AMS1117	SOT223	OK1	HCNW4503	SMD4-7
IC2	STM32F103CT	LQFP48-05	OK2	HCNW4503	SMD4-7
IC3	MAX232AESE	SO16	R1	2K2	R0805
IC4	MCP2562	SO8	R2	10	R0805
L1	10uH	L0805	R3	2K2	R0805
LED1	červená	1206	R4	10	R0805
LED2	zelená	1206	R5	4K7	R0805
LED3	zelená	1206	R6	4K7	R0805
Q1	8MHz	HC49UP	R7	49R9	R0805
R1	1K	R0805	R8	10	R0805
R2	100	R0805	R9	10	R0805
R3	10K	R0805	R10	10K	R0805
R4	22K	R0805	R11	10K	R0805
R5	10K	R0805	R12	10	R0805
R6	10K	R0805	R13	10	R0805
R7	22K	R0805	R14	10K	R0805
R8	1K	R0805	R15	10K	R0805
R9	120	R0805	T1	IRG4PC40FD	TO247BH
R10	470	R0805	T2	IRG4PC40FD	TO247BH
R11	1K	R0805	T3	IRG4PC40FD	TO247BH
R12	470	R0805	T4	IRG4PC40FD	TO247BH
R13	0R	R0805	T5	2N3904	SOT23
X1	Molex 3x 2,54mm	22-23-2031	T6	2N3904	SOT23
X2	Molex 4x 2,54mm	22-23-2041	X1	Molex 2x 2,54mm	22-23-2021
X3	Molex 5x 2,54mm	22-23-2051	X2	Molex 3x 2,54mm	22-23-2031
X4	Molex 3x 2,54mm	22-23-2031			
X5	Molex 2x 2,54mm	22-23-2021			
X6	Molex 3x 2,54mm	22-23-2031			
X7	Molex 5x 2,54mm	22-23-2051			
X8	Molex 3x 2,54mm	22-23-2031			
X9	Molex 3x 2,54mm	22-23-2031			

Seznam součástek 1

symbol	hodnota	pouzdro	symbol	hodnota	pouzdro
C1	47uF	SMC_D	R6	4K7	R0805
C2	100n	C0805	R7	10	R0805
C3	1uF	C0805	R8	3R9	R1812
C4	1n	C0805	R9	2K2	R0805
C5	4n7	C0805	R10	2K2	R0805
C6	4n7	C0805	R11	1K	R0805
C7	47uF	SMC_D	R12	4K7	R0805
C8	100n	C0805	R13	1K2	R1812
C9	1uF	C0805	R14	10	R0805
C10	4n7	C0805	R15	49R9	R0805
C11	4n7	C0805	R16	1K	R0805
D1	1N4148	MINIMELF	R17	470	R0805
D2	BAT48	MINIMELF	R18	2K2	R0805
D3	1N4148	MINIMELF	R19	4K7	R0805
D4	10V	MINIMELF	R20	2K2	R0805
D5	1N4148	MINIMELF	R21	470	R0805
D6	7V5	MINIMELF	R22	2K2	R0805
D7	1N4148	MINIMELF	R23	22K	R0805
D8	1N4148	MINIMELF	R24	4K7	R0805
D9	1N4148	MINIMELF	R25	10	R0805
D10	BYV26C	SOD57-10	R26	3R9	R1812
D11	BAT48	MINIMELF	R27	2K2	R0805
D12	BAT48	MINIMELF	R28	2K2	R0805
D13	2V7	MINIMELF	R29	1K	R0805
D14	4148	MINIMELF	R30	4K7	R0805
D15	1N4148	MINIMELF	R31	1K2	R1812
D16	BAT48	MINIMELF	R32	10	R0805
D17	1N4148	MINIMELF	R33	1K	R0805
D18	10V	MINIMELF	R34	470	R0805
D19	1N4148	MINIMELF	R35	2K2	R0805
D20	7V5	MINIMELF	T1	2N3904	SOT23
D21	1N4148	MINIMELF	T2	2N3904	SOT23
D22	1N4148	MINIMELF	T3	FDD4141	DPAK
D23	1N4148	MINIMELF	T4	2N3904	SOT23
D24	BYV26C	SOD57-10	T5	2N3904	SOT23
D25	BAT48	MINIMELF	T6	IRFR024N	DPAK
D26	BAT48	MINIMELF	T7	2N3904	SOT23
D27	2V7	MINIMELF	T8	2N3906S	SOT23
D28	4148	MINIMELF	T9	2N3904	SOT23
LED1	červená	1206	T10	2N3904	SOT23
LED2	zelená	1206	T11	FDD4141	DPAK
LED3	červená	1206	T12	2N3904	SOT23
LED4	zelená	1206	T13	2N3904	SOT23
OK1	HCNW4503	SMD4-7	T14	IRFR024N	DPAK
OK2	CNY17F-1	CNY17	T15	2N3904	SOT23
OK3	HCNW4503	SMD4-7	T16	2N3906S	SOT23
OK4	CNY17F-1	CNY17	X1	Molex 4x 2,54mm	22-23-2041
R1	4K7	R0805	X2	Molex 4x 2,54mm	22-23-2041
R2	2K2	R0805	X3	Molex 2x 2,54mm	22-23-2021
R3	470	R0805	X4	Molex 4x 2,54mm	22-23-2041
R4	2K2	R0805	X5	Molex 2x 2,54mm	22-23-2021
R5	22K	R0805			

Seznam součástek 2

Izolační zdroj			DPS LEM		
symbol	hodnota	pouzdro	C1	47n	C0805
C1	2n2	C0805	C2	4n7	C0805
C2	3n3	C0805	C3	47n	C0805
C3	100n	C0805	C4	47n	C0805
C4	1n	C0805	C5	4n7	C0805
C5	100n	C0805	C6	47n	C0805
C6	10n	C1812	J1	faston 6,3mm	F061.100
C7	330u	E5-10,5	J2	faston 6,3mm	F061.100
C8	330u	E5-10,5	IO1	LEM_HAIS150P	LEM_HAIS
C9	330u	E5-10,5	IO2	LEM_HXS10NPSP3	LEM_HXS
C10	330u	E5-10,5	X1	Molex 3x 2,54mm	22-23-2031
C11	330u	E5-10,5	X2	Molex 3x 2,54mm	22-23-2031
D1	BAT48	MINIMELF			
D2	ES1D	DO214AC	Měnič kotvy		
D3	SK210	SMB	symbol	typ	parametry
D4	SK210	SMB	C1	944U101K801AAM	100uF/800V/74A PP
D5	SK210	SMB	Re1	LEV 100	100A/900V
D6	SK210	SMB	Re2	LEV 100	100A/900V
IO1	UC3843	UC3843	T1	SKM195GB066D	600V/300A
LED1	zelená	1206			
R1	10K	R0805			
R2	22	R0805			
R3	470	R0805			
R4	4K7	R0805			
R5	4K7	R0805			
R6	4k7	R0805			
R7	4K7	R0805			
R8	4K7	R1812			
R9	1K	R0805			
R10	4K7	R0805			
R11	4K7	R0805			
R12	0,47	0309/12			
R13	4K7	R0805			
T1	IRFR024N	DPAK			
TR1	Weisser WE-3449H	EE16			
X1	Molex 2x 2,54mm	22-23-2021			
X2	Molex 2x 2,54mm	22-23-2021			
X3	Molex 2x 2,54mm	22-23-2021			
X4	Molex 2x 2,54mm	22-23-2021			
X5	Molex 2x 2,54mm	22-23-2021			

Seznam součástek 3

Příloha D – Propojení DPS

DPS MCU řízení motoru			
pin	jméno	připojit na	popis
X1-1	R	DPS buzení X2-3	PWM buzení vzad
X1-2	gnd	DPS buzení X2-2	zem
X1-3	D	DPS buzení X2-1	PWM buzení vpřed
X2-1	L	IGBT driver X1-4	PWM kotva dolní IGBT
X2-2	H	IGBT driver X1-3	PWM kotva horní IGBT
X2-3	Err_C	IGBT driver X1-2	porucha měniče kotvy
X2-4	Err_E	IGBT driver X1-1	zem
X3-1	r+	volitelně palubní konektor pin 55	řadičí páka plus
X3-2	r-	volitelně palubní konektor pin 53	zem
X3-3	p-	volitelně palubní konektor pin 36	zem
X3-4	p+	volitelně palubní konektor pin 18	plynový pedál +5V
X3-5	p	volitelně palubní konektor pin 54	plynový pedál vstup
X4-1	Q	DPS LEM X2-3	výstup LEM kotvy
X4-2	gnd	DPS LEM X2-2	zem
X4-3	+5V	DPS LEM X2-1	napájení LEM
X5-1	+5V	Izolační zdroj X4-2	napájení DPS MCU řízení motoru
X5-2	gnd	Izolační zdroj X4-1	zem
X6-1	F	DPS LEM X1-1	výstup LEM buzení
X6-2	gnd	DPS LEM X1-2	zem
X6-3	+5V	DPS LEM X1-3	napájení LEM
X7-1	+3,3V	programátor	+3,3V
X7-2	gnd	programátor	zem
X7-3	NRST	programátor	NRST
X7-4	SWCLK	programátor	SWCLK
X7-5	SWDIO	programátor	SWDIO
X8-1	UART_Rx	volitelně	RS232 +10V/-10V
X8-2	gnd	volitelně	zem
X8-3	UART_Tx	volitelně	RS232 +10V/-10V
X9-1	CAN_H	Palubní počítač J1B	CAN High
X9-2	gnd	Palubní počítač J1A	zem
X9-3	CAN_L	Palubní počítač J1C	CAN Low

Tab. 3: Propojení – DPS MCU řízení motoru

DPS LEM			
pin	jméno	připojit na	popis
J1	OUT	Trakční motor	buzení plus výstup
J2	IN	DPS buzení J2	buzení plus vstup
X1-1	F	MCU řízení motoru X6-1	výstup LEM buzení
X1-2	gnd	MCU řízení motoru X6-2	zem
X1-3	+5V	MCU řízení motoru X6-3	napájení LEM
X2-1	+5V	MCU řízení motoru X4-3	napájení LEM
X2-2	gnd	MCU řízení motoru X4-2	zem
X2-3	Q	MCU řízení motoru X4-1	výstup LEM kotvy

Tab. 4: Propojení – DPS LEM

DPS IGBT driver			
pin	jméno	připojit na	popis
X1-1	Err_E	MCU řízení motoru X2-4	zem
X1-2	Err_C	MCU řízení motoru X2-3	porucha měniče kopvy
X1-3	H	MCU řízení motoru X2-2	PWM kotva horní IGBT
X1-4	L	MCU řízení motoru X2-1	PWM kotva dolní IGBT
X2C	H_C	IGBT modul pin 3	Kolektor horního IGBT měniče kotvy
X2E	H_E	IGBT modul pin 5	Emitor horního IGBT měniče kotvy
X2G	H_G	IGBT modul pin 4	Báze horního IGBT měniče kotvy
X3-1	0V_H	Izolační zdroj X1-1	15V izolovaných mínus
X3-2	+15V_H	Izolační zdroj X1-2	15V izolovaných plus
X4C	L_C	IGBT modul pin 1	Kolektor dolního IGBT měniče kotvy
X4E	L_E	IGBT modul pin 7	Emitor dolního IGBT měniče kotvy
X4G	L_G	IGBT modul pin 6	Báze dolního IGBT měniče kotvy
X5-1	0V_L	Izolační zdroj X2-1	15V izolovaných mínus
X5-2	+15V_L	Izolační zdroj X2-2	15V izolovaných plus

Tab. 5: Propojení – DPS IGBT driver

DPS buzení			
pin	jméno	připojit na	popis
J1	B+	Trakční baterie	Trakční baterie plus
J2	F-	Trakční motor	Buzení motoru mínus
J3	F+	DPS LEM J2	Buzení motoru plus
J4	B-	Trakční baterie	Trakční baterie mínus
X1-1	15V_F	Izolační zdroj X5-2	+15V Izolovaných
X1-2	0V_F	Izolační zdroj X5-1	0V Izolovaných
X2-1	D	MCU řízení motoru X1-3	PWM buzení vpřed
X2-2	gnd	MCU řízení motoru X1-2	zem
X2-3	R	MCU řízení motoru X1-1	PWM buzení vzad

Tab. 6: Propojení – DPS buzení

Izolační zdroj			
pin	jméno	připojit na	popis
X1-1	-	IGBT driver X3-1	15V izolovaných mínus
X1-2	+15V_H	IGBT driver X3-2	15V izolovaných plus
X2-1	-	IGBT driver X5-1	15V izolovaných mínus
X2-2	+15V_L	IGBT driver X5-2	15V izolovaných plus
X3-1	+12V	Palubní počítač J8A	vstup 12V z palubní sítě
X3-2	-	Palubní počítač J8B	zem palubní sítě
X4-1	+5V	MCU řízení motoru X5-1	+5V neizolovaných
X4-2	-	MCU řízení motoru X5-2	zem
X5-1	-	DPS buzení X1-2	15V izolovaných mínus
X5-2	+15V_F	DPS buzení X1-1	15V izolovaných plus

Tab. 7: Propojení – Izolační zdroj