



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

DÁLKOVĚ OVLÁDÁNÁ TERÉNNÍ ČTYŘKOLKA

REMOTE-CONTROLLED CROSS-COUNTRY FOUR-WHEELER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Hladký

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

BRNO 2018



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**
Ústav mikroelektroniky

Student: Pavel Hladký

ID: 186428

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Dálkově ovládaná terénní čtyřkolka

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a zkonstruuje terénní závodní čtyřkolové vozítko. Předpokladem je schopnost dosažení solidní rychlosti i přes překážky. Vozítko bude možné ovládat pomocí smartphone nebo tabletu s dobrou koordinací pohybu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů školitele.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 31.5.2018

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Cílem této práce je navrhnout a zkonstruovat terénní závodní čtyřkolové vozítko. Bude kladen důraz i na konstrukční zpracování čtyřkolky. První požadavek zadání bakalářské práce, rychlost, je nejvíce ovlivněna elektrickými komponenty – motorem a obvodem k jeho řízení. Druhým požadavkem je ovládání pomocí smartphone nebo tabletu, pro tento účel byl vybrán operační systém Android.

KLÍČOVÁ SLOVA

Terénní čtyřkolka, řízení BLDC motoru, Wi-Fi dálkové ovládání, RC čtyřkolka

ABSTRACT

Goal of this thesis is design and construction of terrain race four-wheeled vehicle. Therefore the emphasis is also on framework of quadcycle. Speed, the first requirement of bachelor thesis, is mainly affected by electric components such as engine and driver circuit. The second requirement is control using smartphone or tablet, devices with operating system Android were chosen for this task.

KEYWORDS

Quadcycle, BLDC motor drive circuit, Wi-Fi remote control, RC quadcycle

HLADKÝ, P. Dálkově ovládaná terénní čtyřkolka. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 35 s, 1 s příloh. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou na téma Dálkově ovládaná terénní čtyřkolka jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Házemu, Ph.D. za vymyšlení tématu mé bakalářské práce a za pomoc při jejím zpracování.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Obsah

Úvod	1
1 Elektrický motor	2
1.1 Kartáčkové DC motory	2
1.2 Bezkartáčkové DC motory.....	3
1.2.1 Detekce polohy Hallovými sondami.....	5
1.2.2 Bezsenzorová detekce polohy.....	7
1.2.3 Inicializace bezsenzorového BLDC motoru	9
2 Servomotor	10
2.1 Konstrukce	10
2.2 Řízení.....	10
3 Akumulátor	11
3.1 Akumulátor Ni-Cd	11
3.2 Akumulátor NiMH.....	11
3.3 Akumulátor LiPol	11
4 Bezdrátová technologie WiFi	12
4.1 Charakteristika technologie	12
4.2 Realizace na DPS	12
5 KonstRUKČNÍ PRVKY MODELU	14
5.1 Stálý převod	14
5.2 Diferenciál	15
5.3 Mezinápravový diferenciál	16
5.4 Odpružení.....	17
5.5 Nastavení geometrie kol	18
6 Výběr komponent	20
6.1 Mikrokontroler ESP8266-12E	20
6.2 Obvod LM2574M	20
6.3 Obvod LM2675MADJ.....	21
6.4 Tranzistor DMN3010LFG	21
6.5 Obvod IR2110S	22

6.6	Obvod TLC271D	22
6.7	Akumulátor LIPOL 5000mAh 45C 11.1V	22
6.8	BLDC motor Corally 3.0	22
6.9	Servomotor MG958	22
7	Návrh řídicího obvodu a obslužných programů	23
7.1	Řídicí obvod.....	23
7.2	H-most	24
7.3	Návrh layoutu desky	26
7.4	Vývojový diagram obsluhy ESP8266-12E	29
7.5	Aplikace pro zařízení s OS Android	30
8	Model Reely titan 1:10	33
9	Závěr	36
	Literatura	37
	Seznam symbolů a zkratek	39
	Seznam obrázků	40
	Seznam tabulek	42
	Přílohy	43

ÚVOD

Průmysl volného času a automobilový průmysl jsou již několik let nedílnou součástí našeho života a čím dál tím více se v těchto odvětvích využívají elektronické systémy. Dálkově ovládané modely stojí na pomezí těchto dvou průmyslů. Jako ostatní spotřební elektronika, jejich ovládání poskytuje uvolnění a soutěž.

Nejčastější formou komunikace vysílače a modelu bývá rádiové vysílání. Tento způsob má hned několik výhod: daleký dosah a snadná obsluha. Hlavní nevýhodou jsou rozměry a jednoúčelovost dálkového ovladače. Ideálním řešením by bylo zakomponování mobilního telefonu jako radiového vysílače, nicméně většina mobilních telefonů disponuje pouze funkcemi pro příjem rádiových vln, nikoliv vysílání. Přijatelným řešením se jeví bezdrátová síťová komunikace, Wi-Fi, jelikož tímto standardem disponuje téměř každý moderní dotykový telefon či tablet. Mimo jiné je nyní vyráběno pouze malé množství modelů RC aut, které umožňují připojení modulu potřebného k bezdrátové síťové komunikaci.

Bakalářská práce je rozvržena do dvou částí. V první části jsou nejprve popsány typy elektromotorů a principy jejich řízení, poté je věnována pozornost servomotorům a jejich parametrům. Dále je srovnání typů akumulátorů a Wi-Fi standardů. Poslední kapitola teoretické části je věnována konstrukčním prvkům vozidel a RC modelů.

Druhá část bakalářské práce se věnuje popisu navrhovaného řídicího obvodu, vysvětlení principu obsluhy mikrokontroleru a aplikace pro zařízení s operačním systémem Android. K závěru práce je popsán zakoupený model auta.

1 ELEKTRICKÝ MOTOR

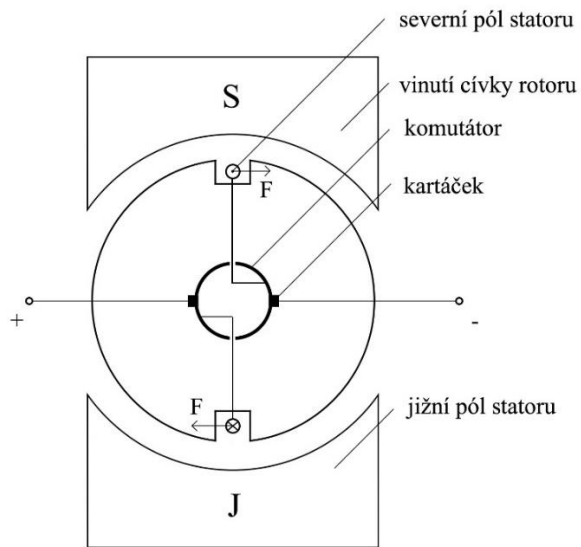
Jedním z hlavních činitelů ovlivňující rychlost vozidla je právě elektrický motor. V RC modelech („Remote control“ – dálkově ovládané) se používají dva typy stejnosměrných elektrických motorů, kartáčkové a bezkartáčkové. V následující kapitole budou popsány principy jejich běhu a posléze bude popsána problematika řízení bezkartáčkových motorů.

1.1 Kartáčkové DC motory

Kartáčkový DC (stejnosměrný) motor se skládá ze dvou hlavních, od sebe oddělených částí – statoru a rotoru. Stator bývá buďto permanentní magnet nebo jádro z magneticky měkké oceli, které s budicí cívkou vytváří magnetický obvod. Mezi magnetickými póly statoru je umístěn rotor, který se skládá z komutátoru, vinutí cívky, kartáčků a hřídele. Komutátor jsou dvojice měděných plíšků které jsou od sebe odizolovány a jsou mechanicky spojeny s hřídelí (nikoli elektricky). Každá protilehlá dvojice plošek komutátoru je spojena vinutím cívky. Skrze uhlíkové kartáčky, které ze stran doléhají na plošky komutátoru je na vývody cívek přiloženo napětí.

Průchodem elektrického proudu cívkou v magnetickém poli začne na částice protékající vodičem působit Lorentzova síla, která zapříčiní otáčení rotoru. V okamžiku, kdy je vinutí cívky kolmo na magnetické pole statoru, je silový účinek Lorentzovy síly nulový, dochází k pootočení rotoru setrvačností a přepólování komutátoru.

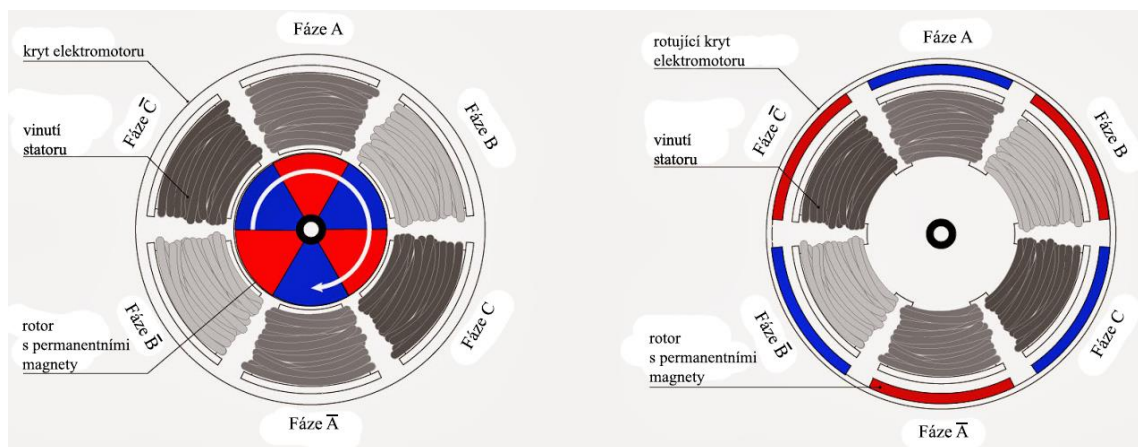
Řízení rychlosti otáček kartáčkového motoru se provádí změnou napětí přivedeného na kartáčky a tudíž změnou proudu procházejícím vinutí cívek. Výhodami tohoto typu motoru jsou snadná regulace otáček a nízká pořizovací cena, nicméně značnou nevýhodou je mechanické opotřebení a limitace způsobená třením kartáčků o povrch komutátoru a tudíž i nutnost časté údržby.



Obr. 1.1: Zjednodušené schéma kartáčkového motoru (převzato a upraveno z [1]).

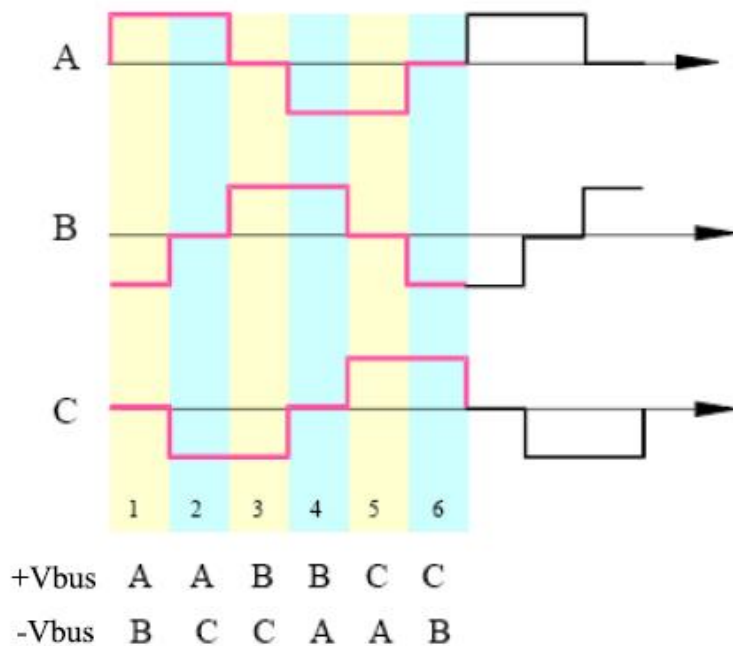
1.2 Bezkartáčkové DC motory

Bezkartáčkové stejnosměrné motory se skládají ze statoru, tvořeného vinutím cívek připojených k ovládacím signálům a rotoru tvořeného permanentními magnety. Podle konstrukce se bezkartáčkové motory rozdělují na „outrunnery“ a „inrunnery“. Na obrázku 1.2. je vidět jejich srovnání. Hlavním rozdílem těchto dvou konstrukcí je poloha rotoru. U elektromotorů typu inrunner se nachází uprostřed v okolí hřídele a je obklopena vinutím statoru, což má za následek nižší točivý moment a vyšší rychlost otáčení hřídele. U typu outrunner permanentní magnety rotoru obklopují vinutí statorových cívek a jsou fyzicky spojeny s ochranným pláštěm elektromotoru. V tomto případě mají permanentní magnety tvar lichoběžníků. Tyto elektromotory mají vyšší točivý moment, ale nižší rychlost otáčení hřídele.



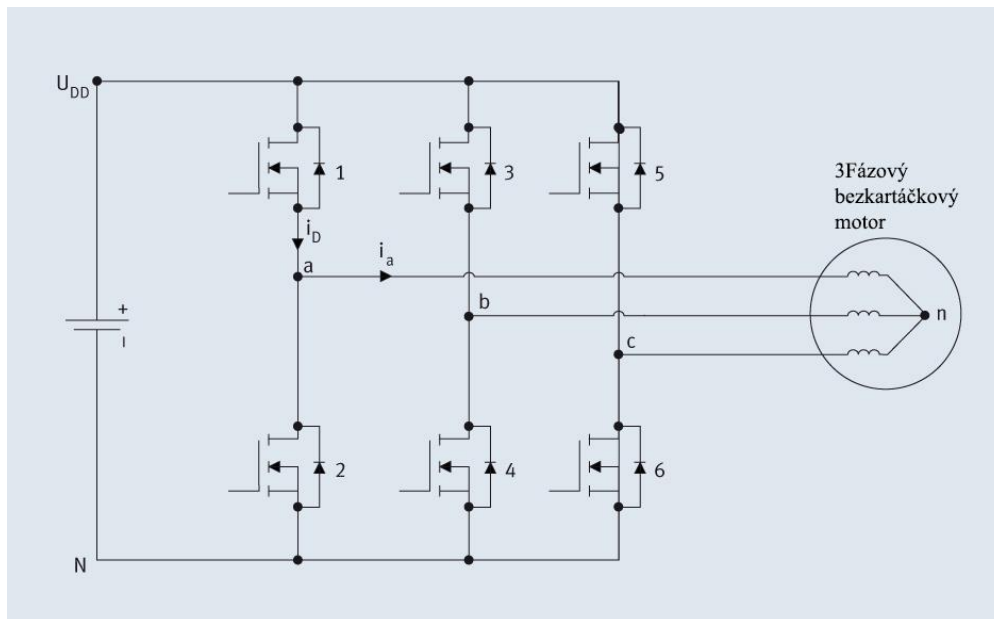
Obr. 1.2: Konstrukce bezkartáčkového motoru typu inrunner (vlevo) a outrunner (vpravo) (převzato a upraveno z [2]).

Nejčastěji používané BLDC motory jsou třífázové – otáčení motoru je řízeno třemi řídicími signály, které přicházejí na vstupy vinutí statorových cívek, které jsou nejčastěji uspořádány do hvězdy. Každá protilehlá dvojice cívek je spojena sériově a cívky vytváří dvojici pólů elektromagnetu. Nejsnáze se vysvětluje funkce BLDC motoru na postupném spínání sousedních vinutí, která vytvářejí magnetické pole a zapříčiní rotaci permanentního magnetu. Za účelem snížení zvlnění točivého momentu se využívá dvou aktivních řídicích signálů, přičemž jedno vinutí na pól permanentního magnetu působí přitažlivě a druhé vinutí odpudivě. Tento způsob spínání se nazývá šesti kroková komutace. Diagram spínání jednotlivých fází je popsán na obrázku 1.3.



Obr. 1.3: Řízení bezkartáčkového motoru šesti krokovou komutací (převzato z [1]).

Pro řízení třífázových BLDC motorů se používá zapojení tranzistorů zvané H-most. Schéma tohoto zapojení je na obrázku 1.4. Motor je řízen sekvenčním otevíráním dvojic tranzistorů. Pro řídicí signály na obrázku 1.3 a pro očíslování tranzistoru z obrázku 1.4 je řídicí sekvence T1T4 – T1T6 – T3T6 – T3T2 – T5T2 – T5T4. Rychlost otáček motoru je dána proudem protékajícím vinutím cívek motoru. Tento proud je možno regulovat spínaným zdrojem, nebo regulací napětí mezi elektrodami *Gate* a *Source* jednotlivých aktivních tranzistorů.



Obr. 1.4: Schéma zapojení H-mostu pro řízení třífázového BLDC (převzato z [3]).

Vývody mikroprocesorů připojené na *Gate* jsou schopny generovat signály pouze logické 1 a 0. Napětíová úroveň logické 1 se odvíjí od provozního napětí použitého mikroprocesoru, nejčastěji bývá reprezentována hodnotou 5 V nebo 3,3 V. Ke změně střední hodnoty stejnosměrného napětí se využívá pulzně šířková modulace (PWM). Změny střední hodnoty stejnosměrného napětí docílíme generováním obdélníkových impulsů na výstupu požadovaného pinu s požadovanou střídou. Střední hodnota napětí signálu se vypočítá následujícím vztahem

$$U_s = \frac{1}{T} \times \int_t^{t+T} |u(t)| dt, \quad (1)$$

kde T je perioda signálu, t je čas začátku měřené periody a $u(t)$ je okamžitá hodnota napětí signálu v čase t . Zanedbáním doby náběžné a sestupné hrany se daný vztah zjednoduší. Střední hodnota napětí na výstupu řídicího pinu je poté přímo úměrná střídě obdélníkového signálu generovaného PWM modulací.

1.2.1 Detekce polohy Hallovými sondami

Pro správný a plynulý běh motoru je nutno znát jeho aktuální polohu, respektive okamžik, kdy přepnout aktivní fáze. Toho lze docílit zabudováním Hallových sond do blízkosti rotoru. Průchodem sond magnetickým polem permanentních magnetů je možné na sondách naměřit Hallovo napětí. Vyhodnocením napětíových úrovní všech tří sond a známou počáteční polohou lze přesně určit polohu motoru. Tento způsob řízení komutace je méně náročný na softwarové řízení, polohu motoru lze určit již u nerotujícího motoru. Nevýhodami jsou zejména vyšší cena a rozměry motorů s Hallovými sondami. V tabulce 1 je přehled sensorových výstupů a jim odpovídajícím aktivním tranzistorům pro rotaci po směru hodinových ručiček. V tabulce 2 je následně přehled sensorových výstupů a jim odpovídajícím aktivním tranzistorům pro rotaci proti směru hodinových ručiček.

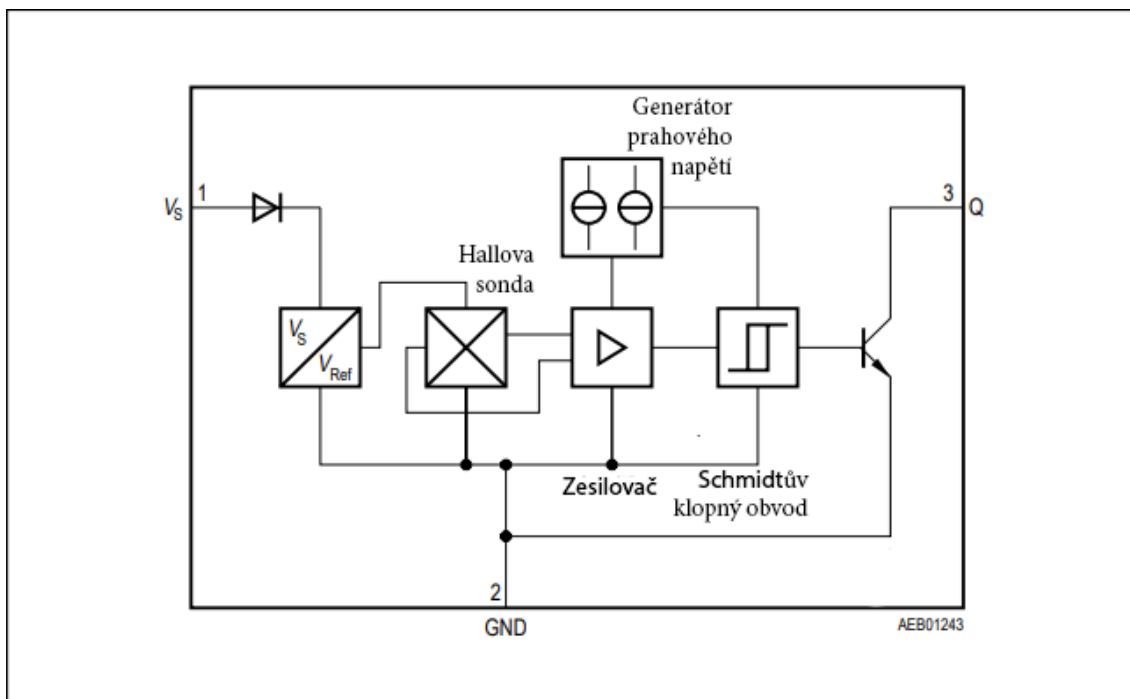
Tab. 1: Přehled sensorových výstupů a aktivních tranzistorů (rotace po směru hodinových ručiček).

Hallový senzory			Aktivní tranzistory	
C	B	A		
1	0	1	T1	T6
1	0	0	T1	T4
1	1	0	T5	T4
0	1	0	T5	T2
0	1	1	T3	T2
0	0	1	T3	T6

Tab. 2: Přehled sensorových výstupů a aktivních tranzistorů (rotace proti směru hodinových ručiček).

Hallový senzory			Aktivní tranzistory	
C	B	A		
1	0	1	T2	T5
1	0	0	T2	T3
1	1	0	T6	T3
0	1	0	T6	T1
0	1	1	T4	T1
0	0	1	T4	T5

Hallové senzory pro sensorové bezkartáčkové elektromotory mívají strukturu obdobnou senzoru TLE 4905, který je zobrazen na obrázku 1.5, ze schématu je zřejmé že pro odečtení logické úrovně na výstupu Hallové sondy je nutné připojit mezi senzor a vstup mikrokontroléru pull-up rezistor.

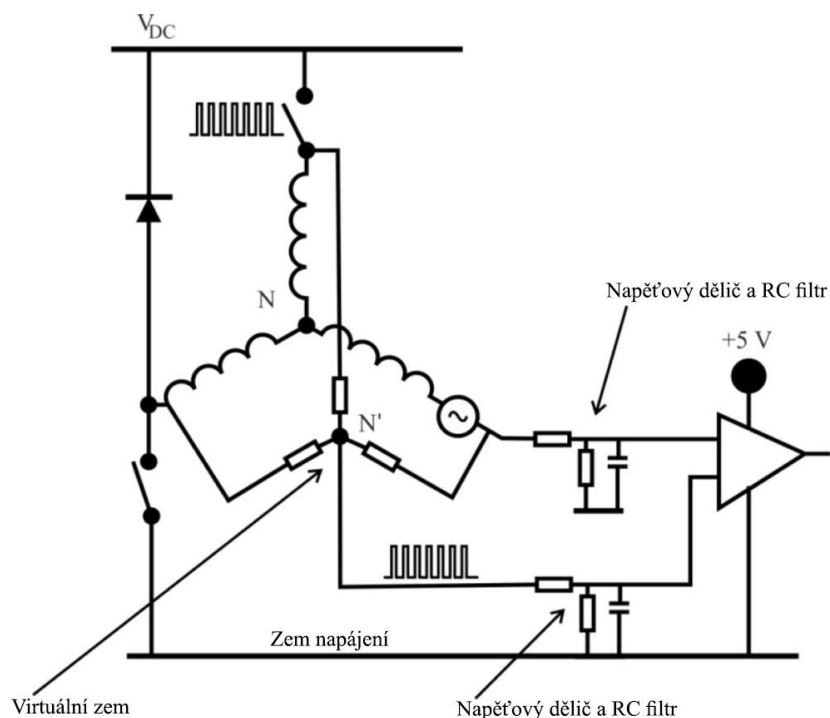


Obr. 1.5: Blokové schéma detektoru magnetického pole TLE 4905 (převzato z [21]).

1.2.2 Bezsenzorová detekce polohy

V těchto metodách se využívá měření zpětného elektromotorického napětí (BEMF), které se indukuje na třetím neaktivním vinutí motoru. Velikost BEMF je závislá na otáčkách motoru, tudíž je v oblasti nízkých otáček detekce polohy velice obtížná a často je zkreslena šumem. V méně náročnějších aplikacích se hojně využívá detekce průchodu nulou. Přístupů k této metodě je hned několik. Prvním přístupem je vyvedení vodiče z neutrálního bodu motoru a jeho následné porovnání s terminálním napětím neaktivní fáze. Implementace této metody je konstrukčně náročná a proto se nepoužívá.

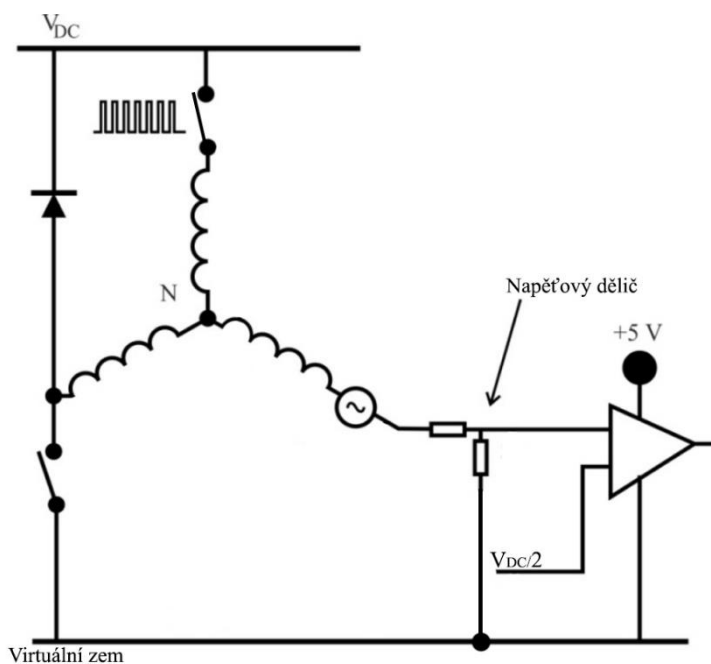
Napětí virtuálního neutrálního bodu lze zkonstruovat pomocí tří rezistorů vyvedených z fází motoru, zapojených do hvězdy. Kvůli vysokému napětí v měřených uzlech a šumu vysokofrekvenčních signálů generovaných PWM modulací se na vstup komparátoru umísťuje napěťový dělič a dolnoproustní filtr. Zapojení je uvedeno na obrázku 1.6. V praxi se zapojení s virtuálním neutrálním středem používá zřídka, neboť tolerancí hodnot rezistorů a zpožděním RC filtru dochází k nepřesnému stanovení času komutace.



Obr. 1.6: Metoda detekce polohy s využitím virtuálního neutrálního bodu (převzato a upraveno z [7]).

Zkreslení vzniklé PWM modulací lze odstranit řízením spodních spínačů nemodulovaným signálem a volbou správného okamžiku akvizice vzorku. Volbou akvizice vzorku v nulové úrovni PWM modulace lze určit bod komutace s vysokou přesností. Mezi hradly *Gate* a *Source* je parazitní kapacita, která zamezuje okamžitému uzavření kanálu. Za těchto okolností nemůže střída modulovaného signálu dosáhnout 100 %, pro správnou detekci průchodu nulou BEMF je nutné buďto zajistit dostatečně vysoký vybíjecí proud nebo snížit střidu PWM modulace.

Tuto situaci lze vyřešit detekcí BEMF při vysoké úrovni modulace. Oba spínače řídicího signálu jsou sepnuté a na obou je přibližně stejné napětí, je-li vinutí aktivních fází symetrické, pak v neutrálním bodě je potenciál roven polovině napájecího napětí. V okamžiku, kdy je BEMF nulové, je terminální napětí rovno napětí v neutrálním bodě. Komparací terminálního napětí s referenčním napětím lze detekovat průchod nulovým bodem i při vysoké střídě modulovaného signálu. Nevýhodami této metody jsou nepřesnost při nízké střídě řídicího signálu, zpoždění způsobené komparátorem a zkreslení způsobené děličem napětí, který je nutno použít pro snížení amplitudy terminálního napětí, aby bylo možno výsledný signál komparátoru přivést na pin mikrokontroleru. Na obrázku 1.7 je zobrazeno zapojení určené k detekci BEMF při vysoké úrovni PWM signálu.



Obr. 1.7: Metoda detekce polohy s využitím řídicího signálu ve vysoké úrovni (převzato a upraveno z [7]).

1.2.3 Inicializace bezsenzorového BLDC motoru

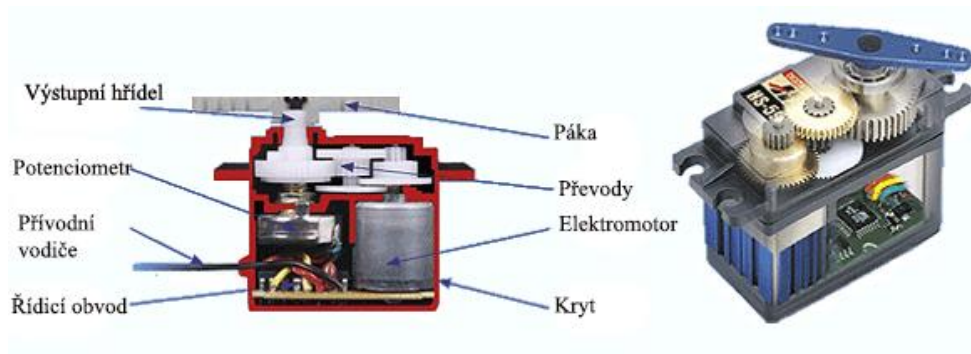
Pro rychlý rozběh bezkartáčkového motoru, pro zvolení správné řídicí sekvence, je nutno znát jeho počáteční polohu. V opačné případě by mohlo dojít k pomalému startu, v horším případě k zablokování motoru, jenž se projeví náhlým nárůstem proudu procházejícím přes vinutí motoru.

Jednou z metod řízeného náběhu motoru je metoda rozběhové proudové rampy, při které jsou přivedeny PWM modulované signály na dvě fáze elektromotoru, zatímco třetí fáze je neustále otevřená. Metoda rozběhové proudové rampy je rozdělena na několik kroků konstantní délky, během které se postupně zvyšuje střída PWM řídicích signálů. Velkou skokovou změnou proudu přivedeného na fáze cívky může dojít k neřízené oscilaci kolem požadované polohy motoru [18].

2 SERVOMOTOR

Servomotor je elektromechanické zařízení, které převádí řídicí signál na rotační pohyb hřídele, servomotory jsou využívány například v CNC strojích a modelářství. Následující kapitola se bude věnovat jejich konstrukci a řízení.

2.1 Konstrukce



Obr. 2.1: Podélný řez servomotorem a popis jednotlivých částí (převzato a upraveno z [6]).

Konstrukce servomotoru je zobrazena na obrázku 2.1. Funkce některých částí je evidentní, nebude jim v této práci věnována pozornost. Elektromotor a převodní kola jsou hlavní aspekty, ovlivňující rychlost rotace servomotoru a točivý moment výstupní hřídele. Podle aplikace je nutno zvolit vhodnou velikost servomotoru a vhodný materiál převodových kol.

Pro detekci polohy páky se využívá zpětnovazební mechanismus zprostředkovaný potenciometrem připojeným k výstupní hřídeli. Změřením úbytku napětí na potenciometru procházejícím proudem lze zjistit aktuální polohu výstupní hřídele.

2.2 Řízení

Řídicí signály jsou do servomotoru přiváděny přes jeden ze tří vodičů vycházejících ze servomotoru, zbylé dva vodiče jsou použity pro napájení a zem. V řídicích obvodech nebývá ochrana proti přepólování, tudíž je důležité dodržet polaritu napájecích vodičů. Vychýlení z počáteční polohy servomotoru je řízeno změnou délky impulzů o konstantní frekvenci. Délka šířky pulzů bývá od 0,9 do 2,1 ms. Impulz, který značí výchozí polohu servomotoru bývá dlouhý 1,51 ms. Aby se zabránilo otáčení servomotoru zákmitý pák ovladače, je rozlišena šířka pásma necitlivosti, jenž představuje minimální změnu délky řídicího pulsu, jež se promítne na změně polohy výstupní hřídele.

Servomotory lze rozdělit podle způsobu zpracování řídicího signálu na analogové a digitální. Výhodou digitálních servomotorů je rychlejší zpracování signálu a plynulejší přechod mezi polohami, což je způsobeno vyšším rozlišením těchto kroků a schopností digitálních servomotorů vyvinout maximální točivý moment již při malých výchylkách polohy. Naopak nevýhodou digitálních servomotorů je vyšší pořizovací cena a vyšší proudový odběr, než je u analogových servomotorů.

3 AKUMULÁTOR

Následující kapitola se zabývá akumulátory typu Ni-Cd, NiMh a LiPol. Podstatou této kapitoly je nástin používaných typů akumulátorů v dálkově ovládaných modelech, jejich výhod a nevýhod.

3.1 Akumulátor Ni-Cd

Nikl-Kadmiový akumulátor je galvanický článek, jehož anoda je tvořena oxid-hydroxidem nikelnatým a katoda je tvořena kadmíem. Elektrolytem bývá nejčastěji hydroxid draselný. Nominální napětí jednoho článku je 1,2 V. V závislosti na stupni nabití se napětí pohybuje v rozmezí 1 - 1,35 V (v některých případech klesá napětí článku až na 0,8 V).

Nevýhodami těchto akumulátorů jsou nutnost vybití akumulátoru před jeho nabitím, vysoká úroveň samovybití při nečinnosti baterie, nízká kapacita a nízký vybíjecí proud. Postupem času dochází k degradaci elektrolytu [10]. Hlavními výhodami jsou vysoká odolnost proti přebití a úplnému vybití.

3.2 Akumulátor NiMH

Nikl-metal hydridový akumulátor je galvanický článek, jehož anoda je podobně jako u Ni-Cd akumulátorů tvořena oxid-hydroxidem niklu, katoda je obvykle tvořena slitinami Niklu, kobaltu, nebo magnesia a neodymu, nebo praseodymu. Elektrolyt je tvořen hydroxidem draselným.

Hlavní nevýhodou těchto baterií je takzvané „zablokování“ baterie [11] při nižších teplotách (ohřátím se baterie vrátí opět do původního stavu). Výhodami NiMH akumulátorů jsou větší vybíjecí proud (srovnatelný s LiPol akumulátory), vyšší kapacita, nižší pořizovací náklady a stálá hodnota napětí (1,2 V).

3.3 Akumulátor LiPol

Lithium-ion polymerový akumulátor je galvanický článek, jehož anoda bývá z oxidu lithia a manganu, nebo kobaltu. Katoda bývá z lithia nebo sloučeniny lithia a uhlíku. Na rozdíl od Ni-Cd a NiMH akumulátorů je elektrolyt tvořen vysoce vodivým gelovým nebo pevným polymerem – polyethylen oxidem [12]. Napětí článku se pohybuje v rozmezí 2,7 – 4,2 V. Při napětí 2,7 až 3 V hrozí permanentní poškození článku.

Nevýhodami akumulátoru jsou možnost vznícení při zkratu, poškození při nadměrném vybití, zničení při dlouhodobém nepoužívání, proměnné napětí baterie a vyšší pořizovací cena. Výhodami jsou nízká váha, vysoký vybíjecí proud, nízká úroveň samovybití, vysoká kapacita, velká tvarová variabilita článků a možnost nabíjení velkým proudem.

4 BEZDRÁTOVÁ TECHNOLOGIE WIFI

Komunikace mikroprocesoru s ovladačem bude realizována pomocí technologie Wi-Fi, proto bude následující kapitola zaměřena právě na tuto bezdrátovou technologii a možnou implementaci na desce plošného spoje.

4.1 Charakteristika technologie

Wi-Fi je označení bezdrátové technologie, která pro komunikaci mezi dvěma síťovými uzly využívá protokoly a metody zpracování signálu, deklarované mezinárodním standardem IEEE 802.11. Tyto standardy se vztahují na 1. a 2. vrstvu ISO/OSI modelu (popořadě fyzickou a spojovou vrstvu). Komunikace skrze tyto standardy probíhá na frekvencích 2,4 až 5 GHz. Nejhojněji se používají standardy 802.11a/b/g/n/ac/ad. Porovnání těchto standardů je možné vidět v tabulce 3.

Tab. 3: Přehled parametrů standardů IEEE 802.11 (převzato a upraveno z [8]).

označení	Frekvence [GHz]	Šířka pásma [MHz]	Teoretická přenosová rychlost [Mbit/s]	Dosah na otevřeném prostranství [m]
a	5	20	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	120
b	2,4	22	1, 2, 5.5, 11	140
g	2,4	20	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	140
n	2,4	20	288,8	250
	5	40	600	
ac	5	20	346	Neuvedeno
		40	800	
		80	1733	
		160	3466	

Přenosová rychlost je značně limitována vytížeností používaných frekvencí. Například u standardu IEEE 802.11b je komunikace vedena na frekvenci 2,4 – 2,5 GHz, vysílací pásmo je rozděleno na 14 vysílacích kanálů, šířky 22 MHz, které se navzájem překrývají. Aby nedošlo k rušení dvou nezávislých komunikací, musí být vzdálenost použitých kanálů alespoň pět. Dále na této frekvenci probíhají komunikace zařízení využívajících technologii Bluetooth nebo ZigBee.

4.2 Realizace na DPS

Obecně se lze setkat s několika topologiemi. Nejpoužívanější bývá spojení řídicího mikroprocesoru a Wi-Fi mikroprocesoru (nebo modulu) pomocí sériové linky. Wi-Fi mikroprocesor má ve své čipové sadě zahrnuté funkce a protokoly pro zpracování signálu a řízení komunikace [9]. Zavedení, řízení a ukončení komunikace čili autentizace, asociace a jejich komplementární funkce, nebývají vždy poskytnuty čipovou sadou, tudíž

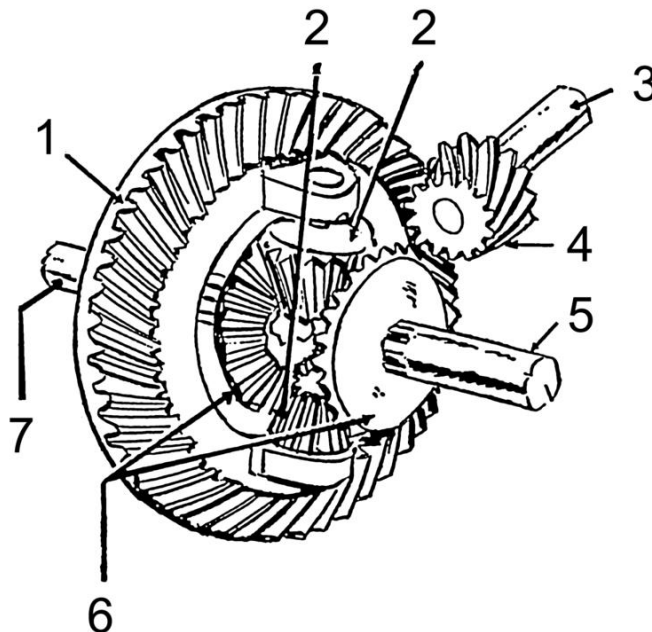
je nutné je řídit softwarově pomocí hlavního mikroprocesoru.

Druhá topologie se sestává ze samotného mikroprocesoru, který je schopen, jak komunikovat pomocí technologie Wi-Fi, tak obsluhovat ostatní periferie. Tuto topologii lze souhrnně označit jako System on a Chip (SoC). Hlavní výhodou těchto mikroprocesorů je snadné softwarové řízení komunikace, naopak nevýhodou je menší integrovaná paměť.

5.2 Diferenciál

Při jízdě v zatáčkách nevykonávají všechna kola stejnou dráhu, jelikož vzdálenější kola musejí urazit delší vzdálenost, tudíž by jejich rychlost otáčení měla být různá, aby nedocházelo k podkluzování a většímu opotřebení jednoho z kol. Avšak projíždění zatáčkou není jediný případ, kdy mají kola různou rychlost otáčení, dalším příkladem je podkluzování jednoho z kol, jízda po nerovném terénu nebo při různém tlaku vzduchu v pneumatikách.

Kuželový diferenciál se skládá z páru kuželových ozubených kol, pastorku (4) a talířového kola (1), k talířovému kolu je připevněna klec diferenciálu. Ke kleci diferenciálu je poté připevněn čep, na jehož koncích jsou volně uložena kuželová ozubená kola (2) (satelity). Při vyšším zatížení vozidla lze použít křížový čep se čtyřmi diferenciály, tento typ diferenciálu je použit například u modelu JLB Racing Cheetah 4x4 1:10. Planetová kola (6), pevně spojená s výstupními hřídeli (5) přiléhají na satelity.



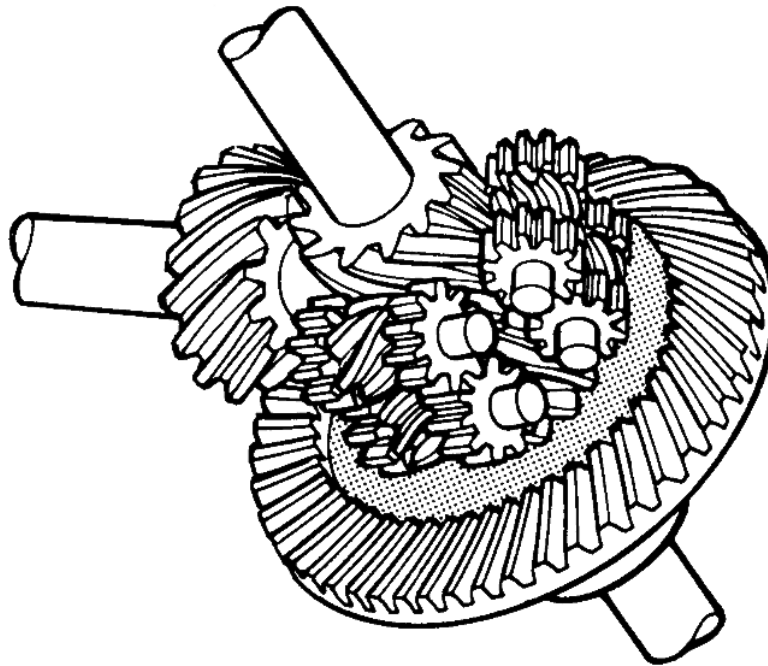
Obr. 5.2: Náčrt kuželového diferenciálu, bez klece diferenciálu (převzato z [22]).

Pohybuje-li se vozidlo v přímém směru je točivý moment přenášen z pastorku skrze talířové kolo na satelity a planetová kola. Satelity se otáčejí kolem osy výstupních hřídelí, nikoliv kolem čepu (fungují jako spojka planetových kol). Točivý moment se rozděluje mezi obě výstupní hřídele rovnoměrně a jejich úhlová rychlost je totožná.

Při jízdě v zatáčce dochází ke zpomalení rychlosti otáčení vnitřního kola a satelity se odvalují po pomalejším planetovém kole, tím vzroste rychlost vnějšího kola. Obdobná situace nastává i v případě ztráty kontaktu jednoho kola s vozovkou nebo výraznému snížení tření mezi pneumatikou a vozovkou, kdy se satelity odvalují po stojícím planetárním kole a všechny točivý moment je upotřeben na volném planetárním kole, jehož otáčky jsou nyní dvojnásobkem otáček klece diferenciálu. Tento jev je však

nechtěný a lze mu zamezit například závěrem diferenciálu. Závěr diferenciálu mechanicky spojí planetární kola s klecí diferenciálu a zabrání tak jeho funkci. Funkci diferenciálu je poté nutno obnovit.

Diferenciál typu TORSEN (abreviace torque sensitive) využívá vlastnosti šnekového soukolí čili šnek může převádět točivý moment na šnekové kolo, ale šnekové kolo nemůže převádět točivý moment na šnek. Šnek nahrazuje planetární kolo výstupní hřídele a satelity jsou nahrazeny šnekovými koly, která jsou také volně spojena s klecí diferenciálu. Na koncích šnekových kol jsou připevněna přímá ozubená kola, která propojují šneková kola obou výstupních hnacích hřídelí, viz obrázek 5. 3.



Obr. 5.3: Nákres diferenciálu TORSEN (převzato z [23]).

Při jízdě v přímém směru se šneky otáčejí společně s klecí diferenciálu a točivé momenty jsou rovnoměrně rozděleny mezi obě kola. V situaci, kdy dochází k výraznému snížení tření mezi pneumatikou a vozovkou nemůže dojít k zastavení jednoho z kol, jelikož šnekové kolo nemůže převádět točivý moment na šnek.

5.3 Mezinápravový diferenciál

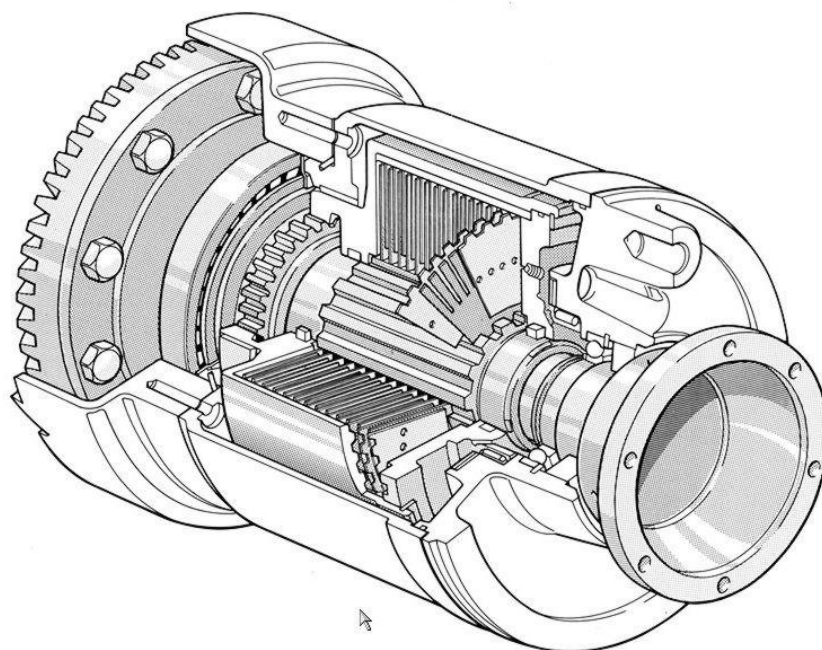
U modelů s pohonem na všechna čtyři kola je nutno vzít v úvahu, že jak přední, tak zadní náprava se vždy netočí stejně rychle, tudíž mimo použití diferenciálů na obou nápravách je dobré použít i mezinápravový diferenciál, aby nedocházelo k prokluzování jedné z náprav. Jako mezinápravové diferenciály se nejčastěji používají již výše zmíněný diferenciál TORSEN nebo diferenciál s viskózní spojkou.

Diferenciál s viskózní spojkou reaguje na změny adhezních podmínek různým rozdělením hnacích momentů na kola přední a zadní nápravy. Dvě sady lamel jsou

prokládány a uloženy v komoře zalité silikonovou kapalinou vysoké viskozity, každá sada lamel je připevněna na jednu z hnacích hřídelí a mezi každou sousední lamelou je udržován rozstup. Zvýšením rozdílu otáček přední a zadní nápravy dochází ke zvyšování odporu proti tomuto nárůstu [24]. Na obrázku 5.4 jsou zobrazeny lamely diferenciálu s viskózní spojkou a na obrázku 5.5 je nákres diferenciálu.



Obr. 5.4 Lamely diferenciálu s viskózní spojkou (převzato z [24]).

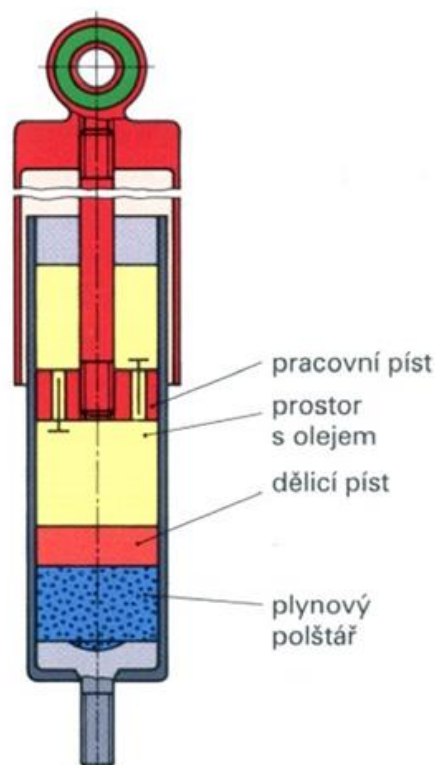


Obr. 5.5: Nákres diferenciálu s viskózní spojkou (převzato z [24]).

5.4 Odpružení

Aby byl zajištěn kontakt pneumatik při jízdě po nerovném terénu, je mezi držák tlumičů (parohy) a závěs kol připevněn tlumič s pružinou. Systém odpružení se skládá jak z pružící části (pružiny), která se stará o smrštění a expanzi tlumiče při najetí na nerovnost povrchu, tak z tlumící části (tlumiče), která limituje zákmit pružiny.

Nejpoužívanější tlumiče u RC modelů jsou jednoplášťové plynokapalinové tlumiče s vinutou pružinou. Při smrštění pružiny dochází k posunu pracovního pístu a olejová kapalina proudí skrz ventily v pístu. Kvůli vysoké hustotě kapaliny dochází k útlumu třením proudící kapaliny. Četností a průměrem ventilů lze regulovat tlumení tlumiče. Složení je zobrazeno na obrázku 5.6.



Obr. 5.6: Řez jednovlášňovým tlumičem (převzato z [26]).

Předpružení pružiny umístěné na tlumiči lze realizovat šroubovatelnou maticí na těle tlumiče nebo umístěním již stlačeného tlumiče mezi parohy a závěs kola.

Možnou realizací nastavitelného tlumiče ve světě RC modelů by byla implementace magnetoreologického tlumiče. Konstrukce tlumiče je obdobná jako v případě jednovlášňového tlumiče, hlavním rozdílem je umístění elektromagnetu v oblasti kanálků v pístu a přítomnost magneticky měkkých částic v kapalině. Zvyšováním, potažmo snižováním magnetického pole elektromagnetu lze regulovat množství částic nahromaděných v kanálku a tím i regulovat tlumení systému. Nicméně tento systém se v RC modelech nevyužívá [27].

5.5 Nastavení geometrie kol

Vhodným nastavením kol lze zlepšit jízdní vlastnosti modelu, potažmo auta. Nejvýraznějšími parametry jsou sbíhavost, potažmo rozbíhavost kol (toe) a odklon kol od svislice auta (camber), kladný odklon kola se nepoužívá, jelikož snižuje trakci při průjezdu zatáčkou, a tudíž mu nebude věnována pozornost. Nákres těchto parametrů je zobrazen na obrázku 5.7.



Obr. 5.7: Nastavení geometrie kol ovlivňující jízdní vlastnosti (převzato a upraveno z [28]).

Rozbíhavost předních kol zvyšuje nedotáčivost a snižuje říditelnost vozidla v zatáčce i mimo ni, jelikož odezva na změnu řízení je rychlejší. Sbíhavost předních kol naopak zmenšuje nedotáčivost a zlepšuje říditelnost při vjezdu do zatáčky a stabilitu na rovném úseku. Sbíhavost ani rozbíhavost by neměla převyšovat úhel 4° .

Rozbíhavost zadních kol zhoršuje záběr zadní nápravy a zhoršuje stabilitu vozidla při vjezdu do zatáčky brzděním a výjezdu ze zatáčky akcelerací. Sbíhavost zadní nápravy naopak zlepšuje stabilitu při vjezdu vozidla, potažmo modelu do zatáčky brzděním a výjezdu ze zatáčky akcelerací, dále zlepšuje záběr zadní nápravy a zlepšuje stabilitu na rovném terénu.

Negativní odklon na obou nápravách do jisté míry zlepšuje chování vozidla v zatáčkách [25].

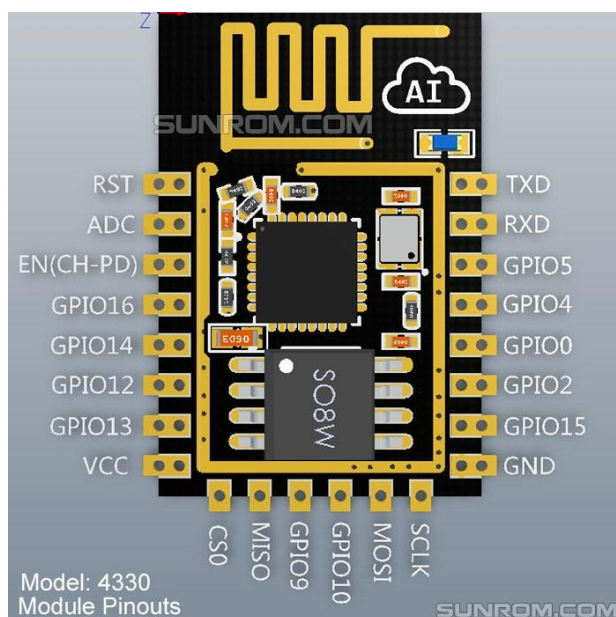
6 VÝBĚR KOMPONENT

V následující kapitole budou popsány vybrané komponenty a některé jejich parametry, které mají důležitou roli při realizaci řídicího obvodu.

6.1 Mikrokontroler ESP8266-12E

Mikrokontroler ESP8266-12E je SoC navrhnutý firmou Espressif, který je možno použít buď jako Wi-Fi modul s vestavěnou anténou nebo jako samostatný Wi-Fi mikrokontroler. Podporovány jsou standardy IEEE 802.11 b/g/n na frekvenci 2,4 – 2,5 GHz. Mikrokontroler ESP8266-12E je postaven na 32bitové architektuře, operační napětí je uvedeno v rozmezí 3 – 3,6 V. Velkým omezením tohoto mikroprocesoru je nízká proudová zatížitelnost pinů (nejvýše 12 mA).

Mikrokontroler ESP 826612E disponuje 16 vstupně výstupními piny, přičemž piny 6 až 11 slouží pro SPI komunikaci s vnitřní flash pamětí. V konfiguraci SPI DIO lze používat i pin GPIO10 jako vstupně výstupní. Všechny dostupné piny, kromě pinu GPIO16, lze používat v režimech vstup (potažmo pull-up vstup) jako zdroje přerušení. Pin GPIO16 lze naopak používat v režimu pull-down vstup. ESP8266-12E je vhodný pro tuto aplikaci, jelikož softwarově poskytuje PWM modulaci, disponuje velkým počtem universálních pinů a obsahuje 10bitový převodník AD.

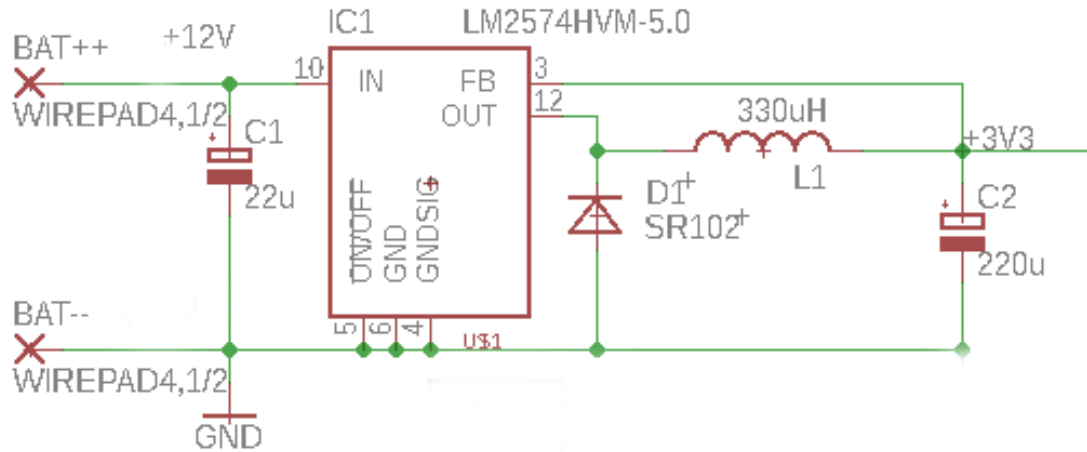


Obr. 6.1 Pinout a struktura ESP8266-12E (převzato z [20]).

6.2 Obvod LM2574M

Obvod LM2574M slouží jako spínaný regulátor napájecího napětí mikrokontroleru. Regulátor stabilizuje výstupní napětí na hodnotě 3,2 až 3,4 V. Výstupní proud

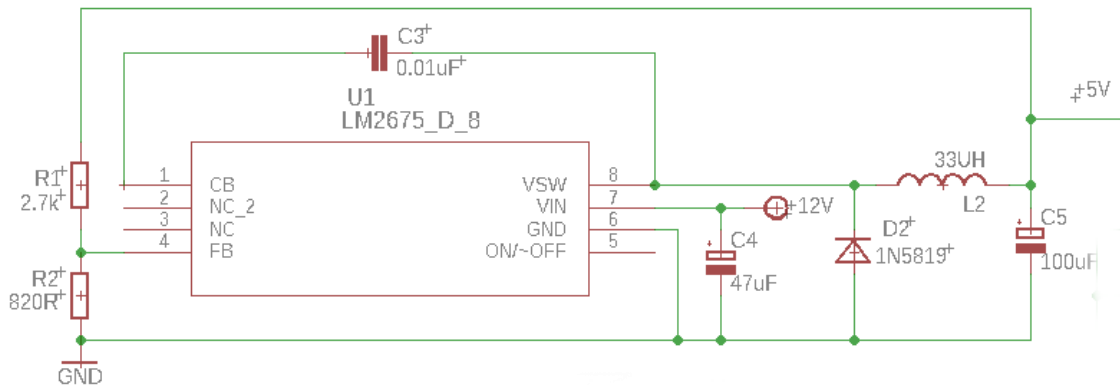
stabilizátoru výrazně nepřekračuje proudové omezení na napájecím pinu mikroprocesoru. Na obrázku 6.2 lze vidět zapojení regulátoru.



Obr. 6.2: Schéma zapojení spínaného regulátoru napětí +3,3 V.

6.3 Obvod LM2675MADJ

Obvod LM2675 slouží jako regulátor napájecího napětí pro servomotor a Hallovy sondy. Regulátor stabilizuje výstupní napětí přibližně na hodnotě 5,2 V. Maximální výstupní proud regulátoru je 1 A.



Obr. 6.3: Schéma zapojení regulovatelného spínaného regulátoru napětí +5,2 V.

6.4 Tranzistor DMN3010LFG

Tranzistor DMN3010LFG je unipolární MOS tranzistor s indukovaným N kanálem. Tento tranzistor bude použit pro spínače fází BLDC motoru. Byl zvolen pro své relativně nízké prahové napětí ($U_P = 1 - 2,5$ V pro $U_{DS} = U_{GS}$ a $I_{DSS} = 250 \mu A$) a nízký odpor na kanálu *Drain-Source* v aktivním režimu 8,5 m Ω .

Kvůli parazitní kapacitě mezi hradly *Gate* a *Source* a velkému proudu nutnému k rychlému uzavření kanálu, bude mezi hradlo *Gate* a řídicí pin zapojen obvod pro řízení výkonových součástek IR2110S.

6.5 Obvod IR2110S

Obvod IR2110S je integrovaný obvod pro řízení výkonových součástek. Tento obvod také poskytuje dostatečně velké napětí pro otevření vrchních tranzistorových spínačů. Není nutné, aby tímto obvodem byly řízeny i spodní spínače, ale docílíme tak stejného zpoždění řídicích signálů.

6.6 Obvod TLC271D

Obvod TLC271D je operační zesilovač, který bude použit jako neinvertující zesilovač se zápornou zpětnou vazbou pro měření proudu přes vinutí motoru.

6.7 Akumulátor LIPOL 5000mAh 45C 11.1V

Pro napájení čtyřkolky byl zvolen akumulátor typu LiPol, jelikož akumulátory tohoto typu jsou lehké, disponují vysokou kapacitou a vysokou hodnotou vybíjecího proudu. Jak vypovídá z názvu, kapacita tohoto akumulátoru je 5000 mAh, stálý vybíjecí proud tohoto tříčlánkového akumulátoru může dosáhnout hodnoty až 225 A. Tento akumulátor je tříčlánkový.

6.8 BLDC motor Corally 3.0

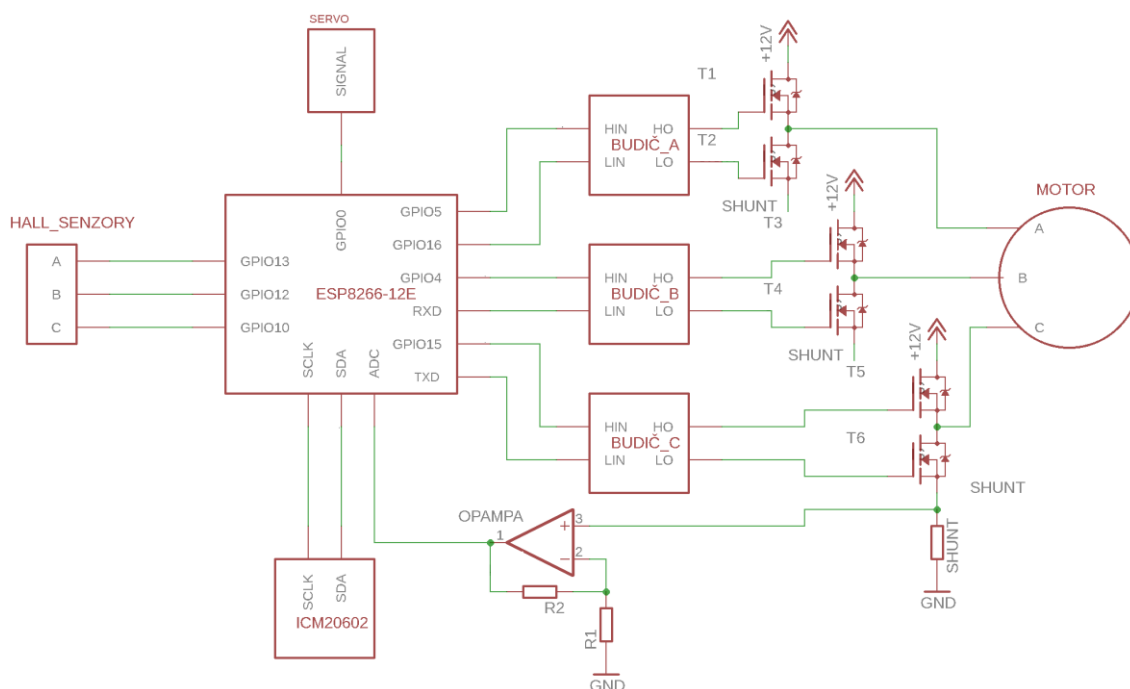
Motor BLX3656 je dvoupólový bezkartáčkový senzorový elektromotor, který dokáže bez zátěže rotovat rychlostí 2200 otáček za minutu na každý volt napájecího napětí. K napájení je doporučováno použít dvou až tříčlánkového akumulátoru LiPol, což odpovídá přibližně 8,1 – 12,6 V v krajních případech nabití a vybití akumulátoru.

6.9 Servomotor MG958

MG958 je digitální servomotor, jehož operační napětí je v rozmezí 4,8 – 6,6 V. Točivý moment tohoto servomotoru je 18-20 kg.cm v závislosti na napájecím napětí, což je dostačující hodnota pro modely v měřítkách 1:10. Převodová kola jsou vyrobena ze slitiny železa a hliníku. Servomotor má bez zátěže proudový odběr 170 mA.

7 NÁVRH ŘÍDICÍHO OBVODU A OBSLUŽNÝCH PROGRAMŮ

V následující kapitole bude popsáno schéma navrženého obvodu. Schéma na obrázku 7.1 je pouze orientační, popisuje propojení jednotlivých funkčních bloků, kompletní schéma zapojení lze nalézt v příloze I. Ze schématu byly pro přehlednost vyjmuty regulátory napětí +3,3 a +5,2 V.



Obr. 7.1: Konceptuální schéma zapojení řídicího obvodu a tranzistorových budičů.

7.1 Řídicí obvod

Pro přísun stabilního napětí do obvodu jsou použity dva spínané regulátory napětí. První reguluje napětí z akumulátoru (9,3 – 12,6 V) na napětí 3,3 V pro mikrokontrolér. Jelikož spínaný zdroj pro regulaci napětí využívá PWM modulaci je nutno potlačit zvlnění výstupního signálu. Pro tento účel je využita výstupní smyčka induktoru, zátěže a diody. Kondenzátory na vstupu a výstupu slouží pro odfiltrování střídavé složky napětí a pro dočasný přísun proudu do obvodu při poklesu napětí. Zpětná vazba spínaného regulátoru pro napájení elektromotoru je obohacena o napěťový dělič. Tento dělič reguluje výstupní napětí na 5,2 V. Hodnoty součástek byly voleny podle katalogových listů s ohledem na maximální hodnoty vstupního a výstupního napětí (respektive proudu).

Mikrokontroler ESP8266-12E je zapojen v konfiguraci pro spuštění programu z integrované paměti FLASH. Stiskem tlačítka SW1 při bootování je mikrokontrolér nastaven do programovacího módu. Konfigurace řídicích signálů je zobrazena v tabulce 4. Konfigurace je řešena obvodově, pin GPIO15 je přes rezistor uzemněn, pin

GPIO0 je připojený přes 12 kΩ rezistor ke stabilizovanému napájecímu napětí, stiskem tlačítka SW1 dochází k uzemnění signálu, což se projeví hodnotou logické 0. Pin GPIO2 je možno dle dokumentace k mikrokontroleru nechat plovoucí (ve stavu vysoké impedance), ale pro jednoznačné určení stavu pinu je ve schématu připojen přes rezistor k napájecímu napětí.

Tab. 4: Konfigurace signálů při bootování určujících mód mikrokontroleru.

mód	pin 19	pin 20	pin 21
Flash	1	X nebo 1	0
UART	0	X nebo 1	0

Programování mikrokontroleru probíhá přes sériovou linku, konvertor pro USB je připojen přes konektor SIP. Na pinu GPIO0 je připojeno ovládání servomotoru pomocí PWM modulace. Na pinech GPIO1 (TXD), GPIO3 (RXD), GPIO5, GPIO4, GPIO15 a GPIO16 jsou pomocí PWM modulace ovládány řídicí obvody tranzistorů. Na piny GPIO10, GPIO12 a GPIO13 jsou přivedeny signály Hallových senzorů, detekující přepínání aktivních fází. Tyto piny jsou ve stavu pull-up vstup, což znamená že vnitřně je na vstup připojen 50 kΩ pull-up rezistor.

Na pinu ADC je 10bitový AD převodník, tento převodník je schopen převádět napětí v rozmezí 0–1 V. Jelikož změna napětí na rezistoru SHUNT je příliš malá, je toto napětí zesíleno operačním zesilovačem. Pro maximální procházející proud $I_{MAX} = 35$ A platí

$$U_{SHUNT} = R_{SHUNT} \times I_{MAX} = 0,001 \times 35 = 35 \text{ mV}, \quad (2)$$

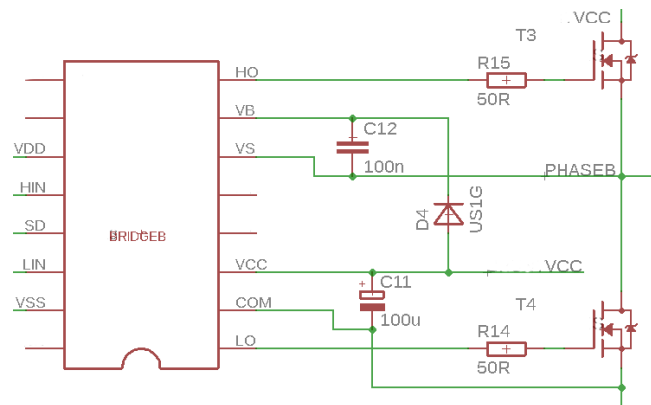
$$G_{OP} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = \left(1 + \frac{47000}{2700}\right) = 18,4 \text{ (-)}, \quad (3)$$

$$U_{MAX} = 0,035 \times 18,4 = 0,64 \text{ V}, \quad (4)$$

kde U_{SHUNT} je napětí na rezistoru pro snímání proudu, R_{SHUNT} je jeho odpor, G_{OP} je napěťové zesílení neinvertujícího operačního zesilovače se zápornou zpětnou vazbou, R_2 a R_1 jsou hodnoty rezistorů v rezistorovém děliči v záporné zpětné vazbě zesilovače.

7.2 H-most

Struktura tranzistorových spínačů je řízena takzvanými *Gate drivery* (IR2110S), které tvoří meziklánek mezi řídicími piny mikrokontrolerů a hradly Gate tranzistorů. Při uzavírání hradla Gate dodávají dostatečný proud, který by mikrokontroler nebyl schopen poskytnout. O udržení otevřeného stavu *Drain-Source* kanálu vrchního tranzistoru se stará takzvaný *bootstrap* obvod, tvořený zdrojem napětí, diodou a kondenzátorem. Konstrukce tohoto obvodu je na obrázku 7.2.



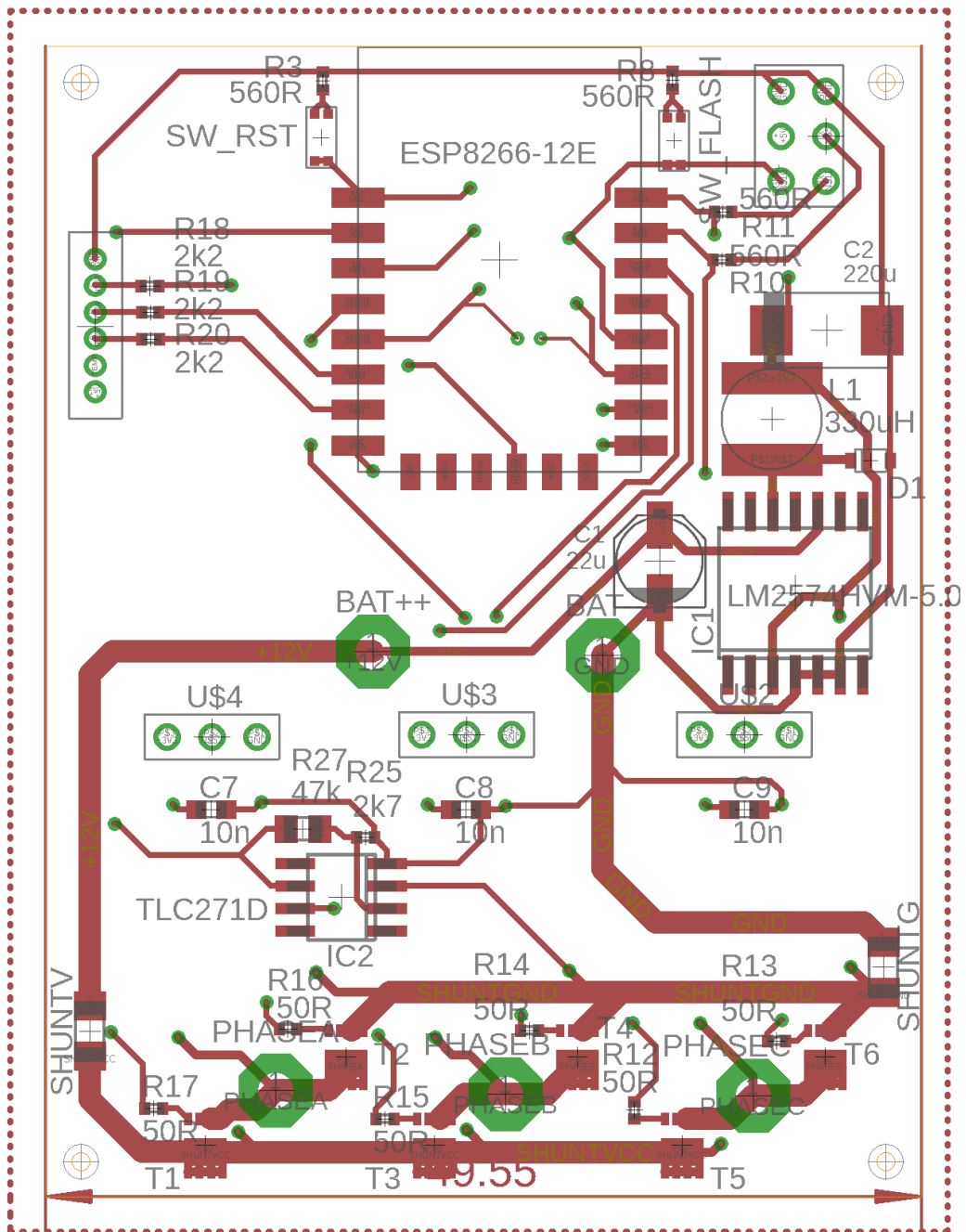
Obr. 7.2: Schéma bootstrap obvodu tvořeného prvky U_{CC} , D_4 , C_{12} a T_4 (vyňato ze schématu).

V okamžiku, kdy je spodní tranzistor otevřen a vrchní je uzavřen, je nabit *bootstrapový* kondenzátor a při otevření vrchního tranzistoru poté poskytuje potřebné napětí k udržení otevřeného stavu. Velikost tohoto kondenzátoru je dána jednotlivými parametry *Gate* driveru, tranzistorového spínače, zdroje napětí, *bootstrapové* diody a maximální střídou PWM signálu [19]. Kondenzátor mezi piny V_{CC} a COM slouží pro odvod střídavé složky napájecího signálu.

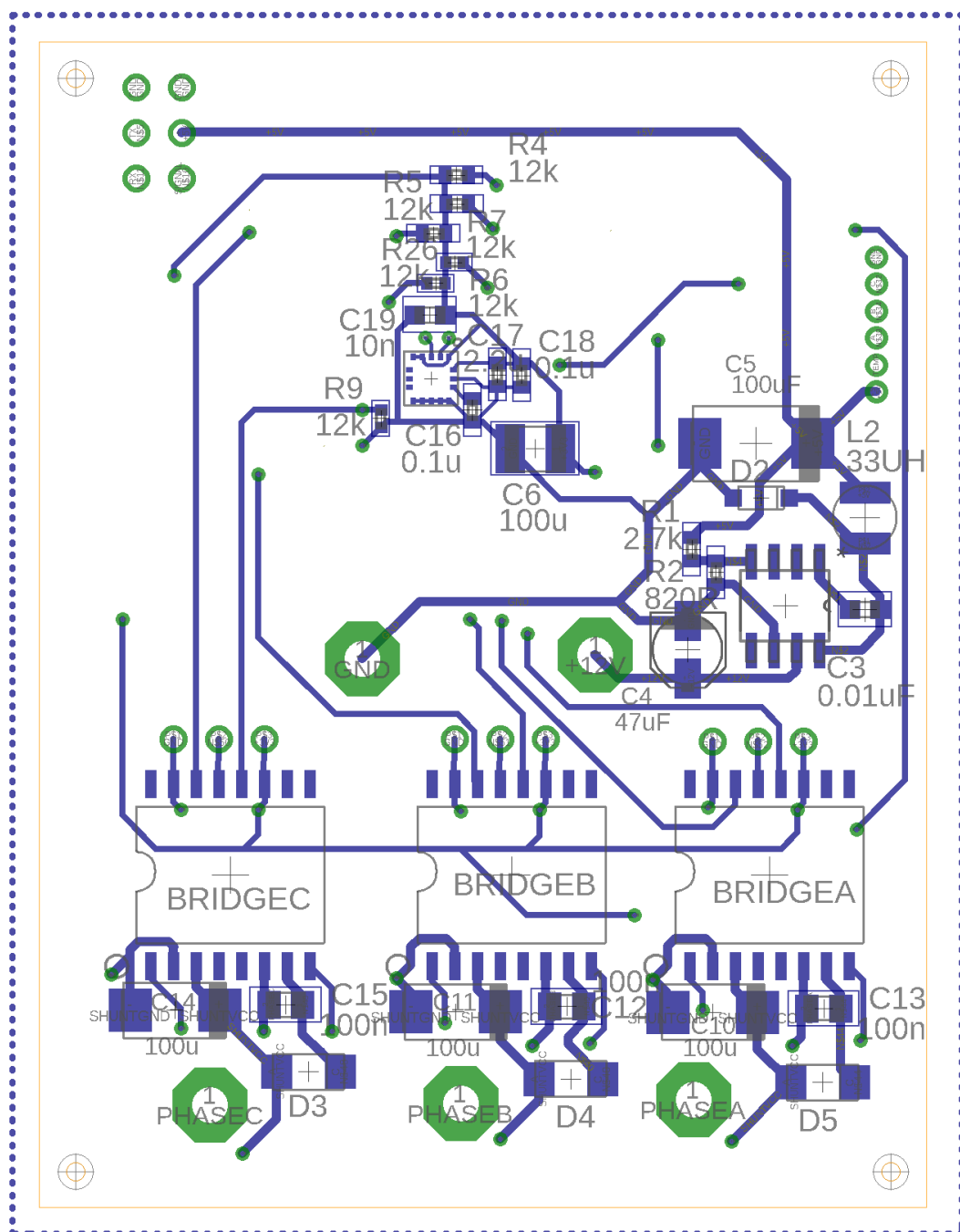
Pro možnost testování softwaru na desce bez rizika nechtěného zkratování přes H-most jsou na piny VSS , SD (shutdown) a VDD umístěny oboustranné kolíky. Přemostěním pinu VDD a SD dojde k vypnutí hradlového budiče.

7.3 Návrh layoutu desky

Ze schématu zapojení byl navržen layout desky s přihlédnutím na některé základní požadavky: krátké napájecí výkonové větve, dostatečný odstup součástek pro možnou výměnu a osazení ručním pájením. Konečné parametry desky jsou 5 x 6,5 x 1,6 cm. Tloušťka mědi byla zvolena 0,203 mm. Na obrázku 7.3 je zobrazen layout vrchní vrstvy. Na obrázku 7.4 je zobrazen *layout* spodní vrstvy desky.



Obr. 7.3: Layout navrženého řídicího obvodu (vrchní strana).



Obr. 7.4: Layout navrženého řídicího obvodu (spodní strana).

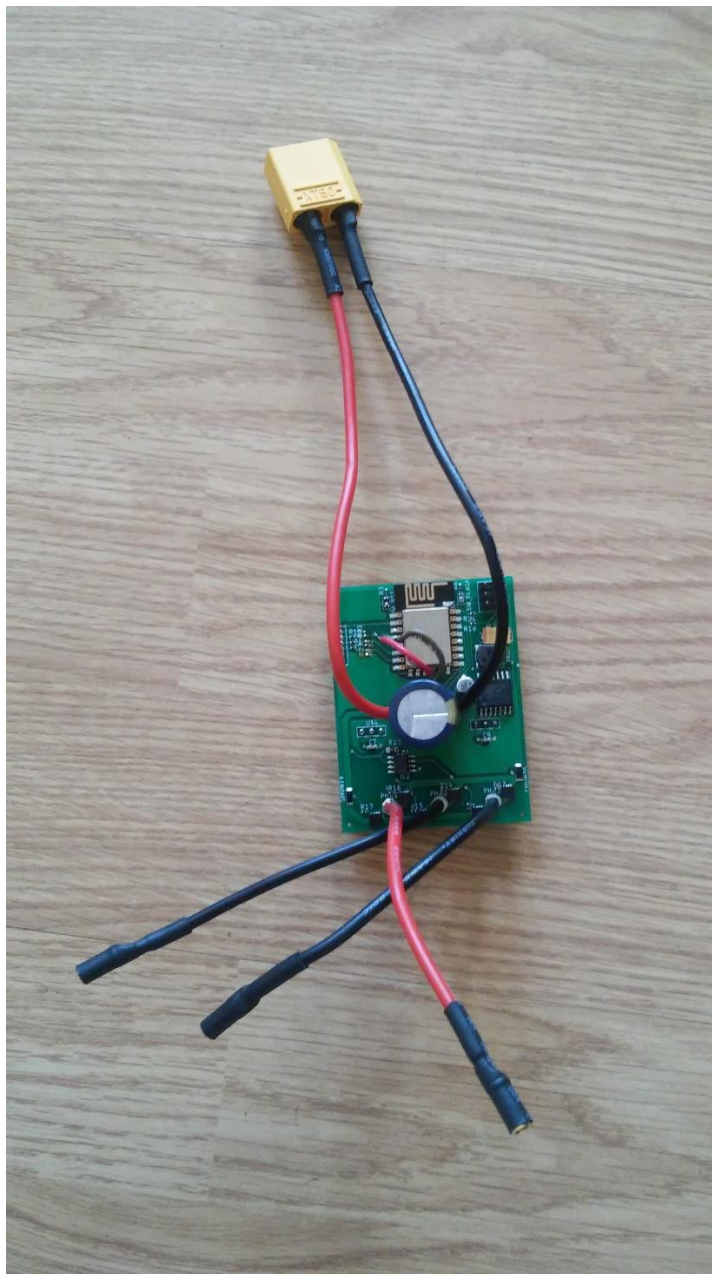
Kvůli velkému kolísání napájecího napětí při velkých změnách zatížení motoru byl mezi napájecí kabely připájen 2mF elektrolytický kondenzátor s malým ekvivalentním sériovým odporem (tento kondenzátor není uveden v layoutu). Kolísání napájecího napětí způsobovalo aktivaci hardwarového watchdogu, který vypnul mikrokontrolér.

Aktuální verze řídicího obvodu se mírně liší položením cest od výše uvedeného layoutu. Chyby návrhu starší verze byly na desce opraveny ručně. Nejzřetelnější úpravou bylo vedení vzdušné cesty od výstupu 2,2kΩ rezistoru Hallova senzoru C k pinu GPIO10 a vedení vzdušné cesty od pinu GPIO16 k digitálnímu vstupu budiče horního tranzistoru

(HIN pin budiče Bridge B). Původně byl senzor C připojen k pinu GPIO16, ale jelikož tento pin jako jediný nepodporoval externí přerušení, musely být piny přemostěny.

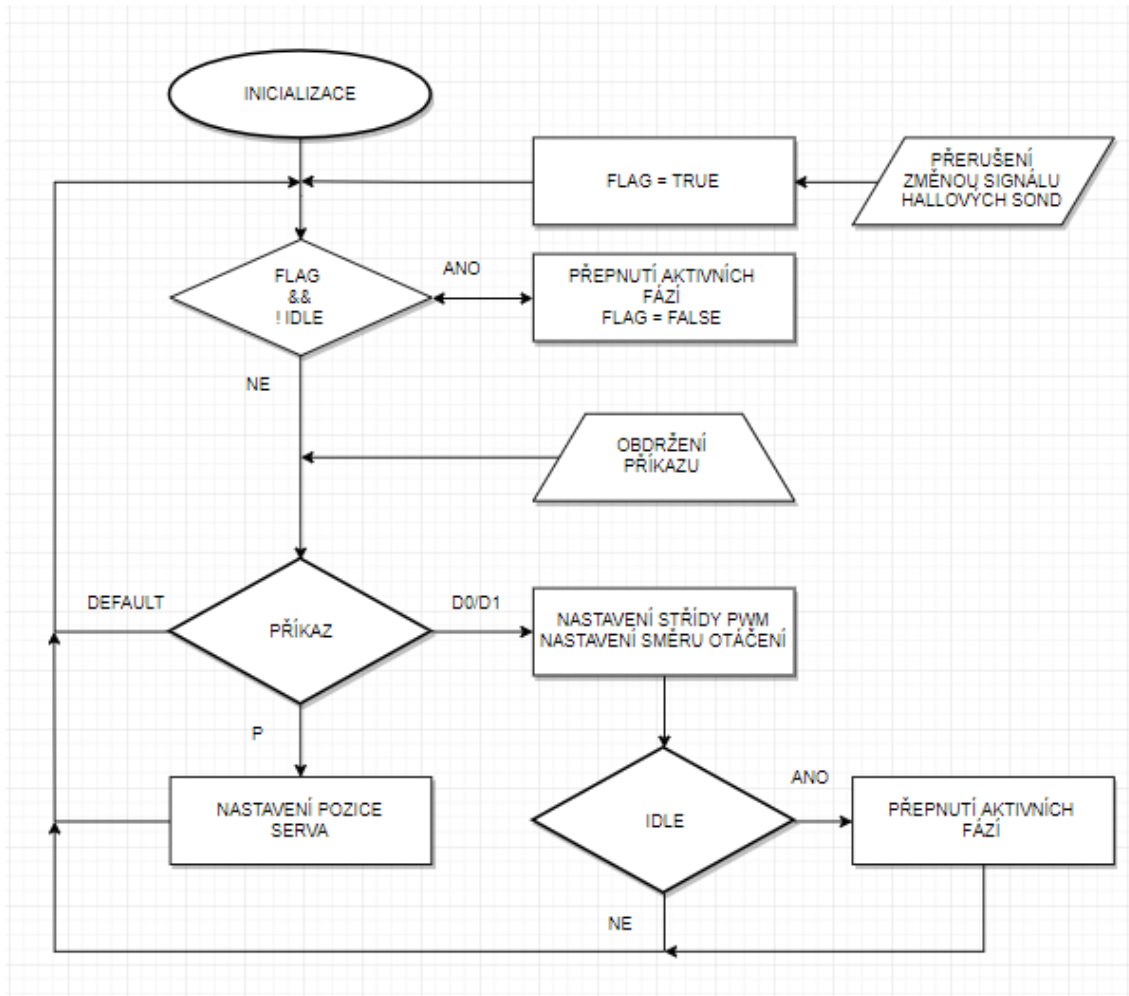
Fáze A, B a C řídicího obvodu jsou spojeny s fázemi BLDC motoru pomocí vodiče s velikostí vodiče 16 podle standardu AWG a 3,5mm vidlice (vodič připojený k fázi A je červený). Napájecí kabely lze spojit s akumulátorem pomocí konektoru XT-90.

Na obrázku 7.5 je fotografie vrchní strany osazené DPS včetně 2mF elektrolytického kondenzátoru.



Obr. 7.5: Fotografie vrchní strany DPS.

7.4 Vývojový diagram obsluhy ESP8266-12E



Obr. 7.6: Zjednodušený vývojový diagram obsluhy ESP8266-12E.

Program pro obsluhu ESP8266-12E byl napsán programovacím jazykem Arduino ve vývojovém prostředí Arduino IDE. Jazyk Arduino vychází z jazyka C++, ale je uzpůsoben pro programování mikrokontroleru. Struktura programu je poté rozdělena do tří částí: část definic, Setup a Loop. V části definic se definují globální proměnné, konstanty, jména hlavičkových souborů a funkce. Samotný program poté začíná v části setup, která předchází nekonečné smyčce Loop a iteruje se pouze jednou.

V části setup obsluhy ESP8266-12E dochází k inicializaci čili nastavení vstupně výstupních portů, nastavení parametrů PWM modulace (frekvence a bitovému rozsahu), nastavení přerušování vstupů Halloových sond, nastavení sítě Wi-Fi (IP, maska sítě) a uvedení mikrokontroleru do módu přístupového bodu a serveru.

Komutace BLDC motoru je řízena dvěma příznaky: FLAG a IDLE. Příznak FLAG je nastaven při vyvolání přerušování na vstupních pinech Halloových sond, příznak IDLE signalizuje, zdali motor běží. Přepnutí aktivních fází je implementováno ve funkci *hallChange()*.

Mimo komutace je v nekonečné smyčce řízena komunikace s klienty. ESP266-12E

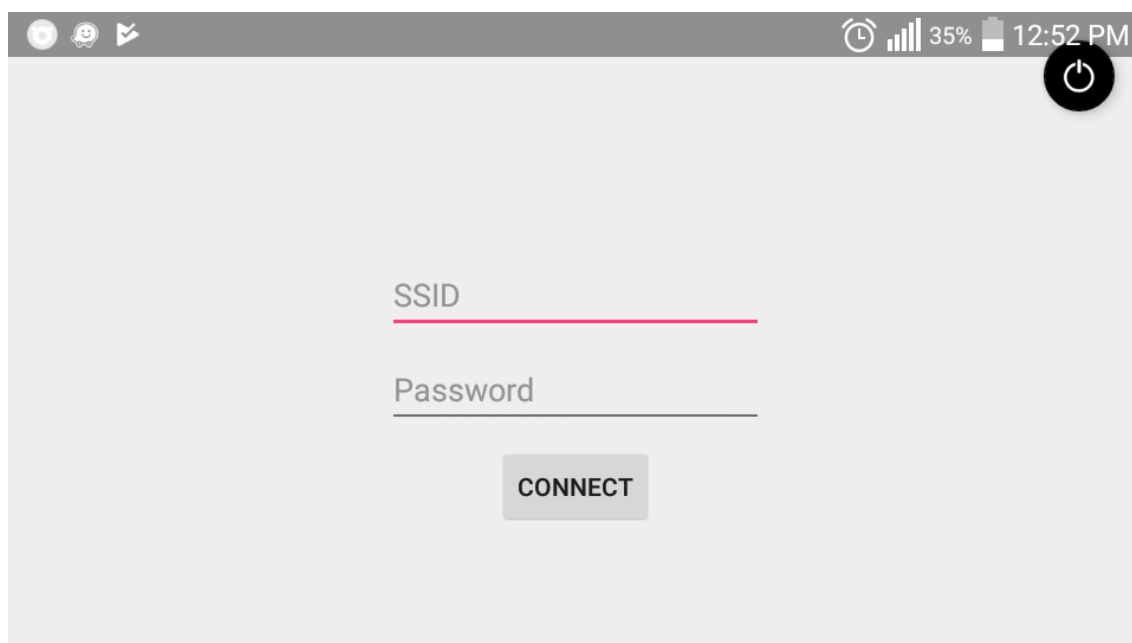
odposlouchává na portu 5045. Jako komunikační protokol byl použit protokol TCP. V rámci výběru byl otestován i protokol HTTP – metody GET a POST, ale kvůli pomalému přenosu informací pomocí protokolu HTTP nebyl použit. První 2 bajty paketu jsou formátovací znaky pro zahájení přenosu, 3. bajt signalizuje, zdali se jedná o příkaz pro nastavení servomotoru či motoru. V případě nastavení motoru se nachází na 4. bajtu příznak směru otáčení a poté následuje hodnota střídání, vztažená na interval hodnot $< 0; 1023 >$, zakončená znakem X. Pro nastavení pozice servomotoru na 4. bajtu již začíná hodnota pozice servomotoru, která je opět zakončena znakem X.

Aby byl mikrokontrolér méně zatěžován, většina výpočtů probíhá již na straně aplikace a pomocí komunikace se odesílají již argumenty pro funkce `servo.write(int angle)` pro nastavení pozice servomotoru a `analogWrite(int pin, int range)` pro nastavení střídání PWM modulace.

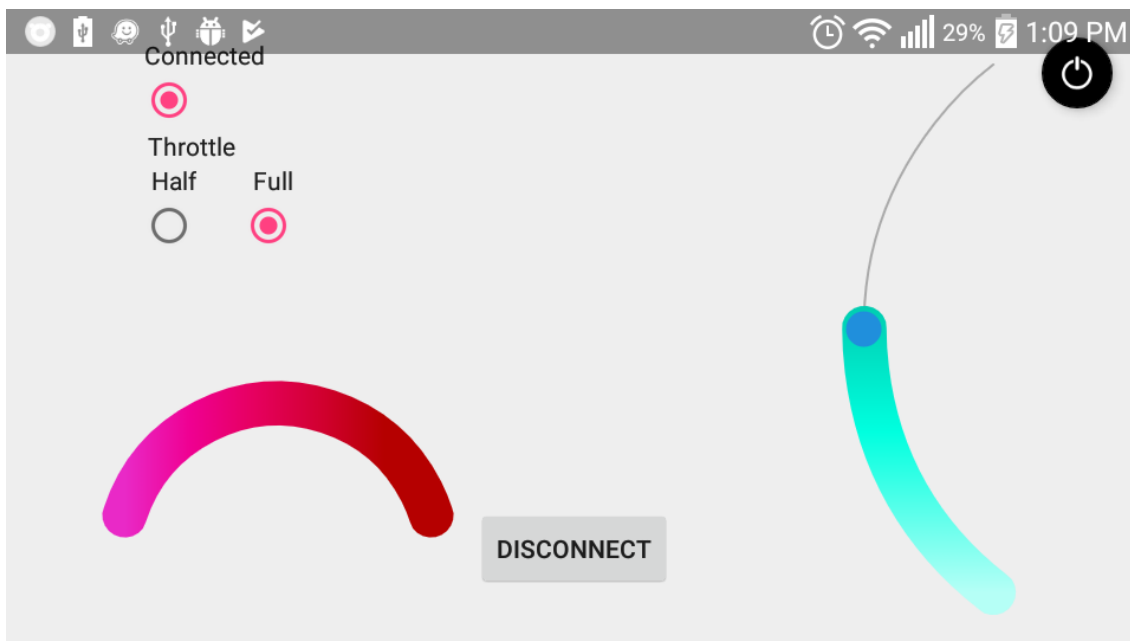
V případě překročení proudového limitu na fázích motoru, je motor vypnut.

7.5 Aplikace pro zařízení s OS Android

Aplikace pro zařízení s operačním systémem Android byla napsána v prostředí Android studio, které slouží pro vývoj aplikací (SDK). Pro tento účel byl zvolen jazyk Java. Samotná aplikace se skládá ze dvou aktivit: `Authorize`, která slouží pro připojení zařízení k vytvořené Wi-Fi síti a `MainActivity`, která slouží k ovládání RC auta.



Obr. 7.7: Úvodní obrazovka aplikace (aktivita `Authorize`).



Obr. 7.8: Ovládání RC auta po připojení k Wi-Fi (aktivita MainActivity).

V levém horním rohu je indikátor aktivní komunikace s ESP8266-12E, dále se zde nachází tlačítka pro omezení maximální rychlosti na tyrkysovém posuvníku (seekBar), těmito tlačítky se nastavuje maximální střída řídicích PWM signálů (Half = 50%, Full = 85%). Tyrkysový posuvník slouží pro nastavení střídy PWM a směru otáčení motoru. Střed posuvníku $\pm 15\%$ maximální hodnoty symbolizuje vypnutý motor, do této hodnoty se posuvník vrací při jeho uvolnění. Výpočet střídy PWM signálu se vypočítává podle rovnice 5 a 6

$$var = \frac{\left(\frac{(maxDuty - minDuty) \times newProgress}{100} + minDuty\right) * 1024}{100}, \quad (5)$$

$$newProgress = math.round(var), \quad (6)$$

kde var je pomocná proměnná, $maxDuty$ je maximální hodnota střídy na posuvníku v %, $minDuty$ je minimální hodnota střídy na posuvníku v % (tato hodnota se nedá uživatelsky nastavit), $newProgress$ v první rovnici je aktuální hodnota na posuvníku v intervalu $< 0, 200 >$ a $newProgress$ ve druhé rovnici je hodnota střídy PWM signálu vztažena na interval $< 0, 1023 >$.

Určování pozice servomotoru (otáčení kol) se přednostně řídí pozičním senzorem, měnit pozici servomotoru lze natáčením zařízení v rozsahu -30 až $+30$ °. Pro práci se senzorem (získání a transponování souřadnic natočení, zapnutí a vypnutí senzoru) slouží třída `SensorOrientation`. Není-li v zařízení dostupný poziční senzor, je zpřístupněn levý posuvník. Kvůli konstrukci modelu auta jsou krajní polohy servomotoru 40 a 140 °. Aby byly výstupy senzoru orientace a posuvníku, představující nastavení pozice servomotoru, stejné, je maximální rozsah posuvníku 180 jednotek a interval natočení $< -30, +30 >$ ° je transponován na interval $< 0, 180 >$ °. Při minimalizování aplikace je zastaveno

odposlouchávání změny pozice zařízení. Prvky třídy ArcSeekBar pochází z knihovny *com.marcinmoskala.arcseekbar*.

Pro odhlášení od sítě Wi-Fi a navrácení do přihlašovací obrazovky (aktivita Authorize) slouží tlačítko *DISCONNECT*.

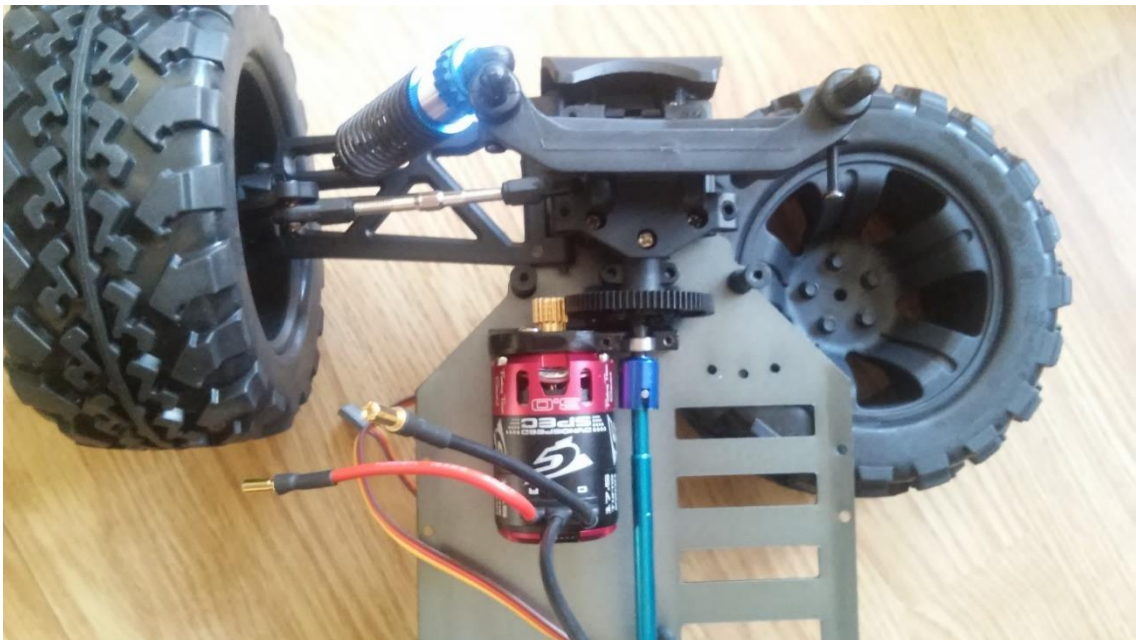
Komunikace s ESP8266-12E probíhá na pozadí aplikace (třída BgTask) a je vedena pomocí síťových socketů na portu 5045. Po odeslání dat komunikační kanál a daný asynchronní úkol zaniká.

Stisknutím černého tlačítka vypnout v pravém horním rohu dojde k uvolnění všech prostředků, které používá aplikace.

8 MODEL REELY TITAN 1:10

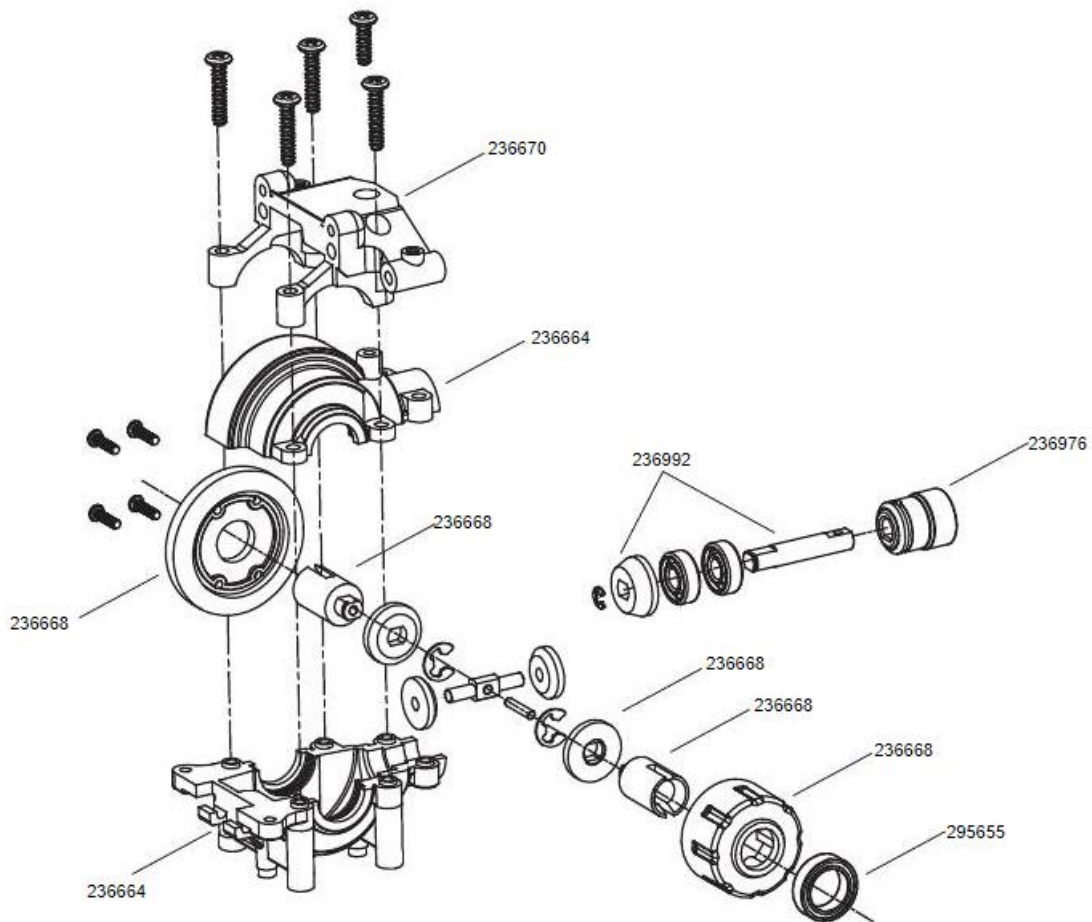
V následující kapitole bude popsán model zakoupeného modelu, který byl zakoupen jako skládačka a posléze složen. Bohužel v průběhu kompletace modelu byla odhalena závada – poškozená hnací hřídel jednoho z kol. Reklamace za novou součástku nebyla do data odevzdání práce vyřízena, a tudíž je model nekompletní.

Převod točivého momentu z BLDC motoru na centrální hřídel je převeden pomocí stálého přímého převodu. Větší přímé ozubené kolo je spojeno hřídelí s diferenciálem zadní nápravy, stálý převod rozvodovky je v tomto případě jednoduchý jednostranný s kuželovými ozubenými koly. Diferenciál přední nápravy je kuželový, pouze s jedním čepem (čili dvěma satelity). Točivý moment z diferenciálu do kol je převeden pomocí kardanové hřídele.



Obr. 8.1: Fotografie pevného převodu modelu Reely Titan z rotoru motoru na centrální hnací hřídel.

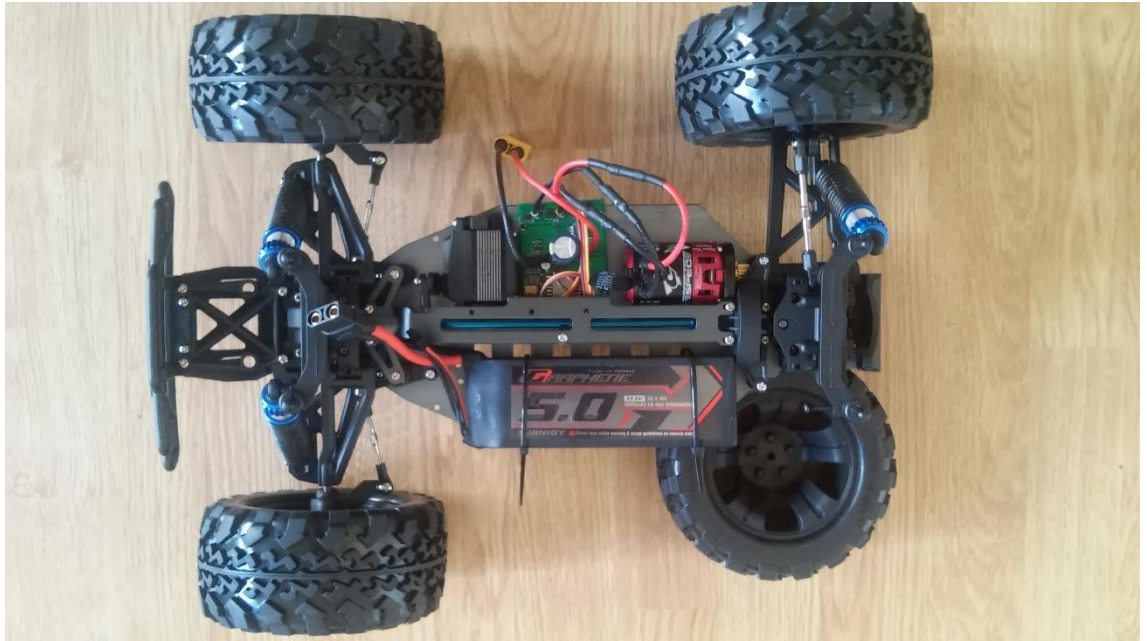
Spoj mezi přední a zadní nápravou modelu Reely Titan je realizován pouze kardanovou hřídelí. Přední diferenciál je spojen s centrální kardanovou hřídelí jednoduchým jednostranným stálým převodem s kuželovými ozubenými koly. Převod točivého momentu z planetárního kola diferenciálu na kola přední nápravy je zařízen pomocí kardanové hřídele. Složení předního diferenciálu je znázorněno na obrázku 8.2.



Obr. 8.2: Nákras zadního diferenciálu a stálého převodu (převzato z manuálu [25]).

Odpružení modelu je realizováno pomocí jednovláškových kapalinových tlumičů s vinutými pružinami (každý závěs má vlastní tlumič). Sklon kol od svislice auta nastavit pomocí šroubu zakončeného koulí v ramenu přední nápravy. Sbíhavost kol (příklon kola k ose modelu) lze nastavit pomocí nastavitelných spojovaček kol

Na obrázku 8.3 je fotografie modelu se všemi komponenty (kromě závěsu levého zadního kola, jelikož kardanová hřídel posledního závěsu měla na jedné straně poničený čep).



Obr. 8.3: Fotografie téměř dostavěného modelu.

9 ZÁVĚR

V rámci bakalářské práce byl navržen a zhotoven řídicí obvod pro řízení sensorového bezkartáčkového stejnosměrného motoru a servomotoru. Sensorový elektromotor byl vybrán kvůli možnosti detekce komutace již při nízkých otáčkách, respektive detekce polohy. Součástí bakalářské práce bylo také vytvoření programu pro obsluhu mikrokontroleru a komunikaci se zařízením s operačním systémem Android. K řízení vozidla byla vytvořena aplikace pro dané zařízení. Tato aplikace byla testována na zařízení LG L90 D405, které disponuje senzorem polohy a jehož nativní rozlišení displeje je 540 x 960 pixelů. Model RC auta (Reely Monstertruck „Titan“ 4WD) v měřítku 1:10 byl zakoupen jako skládačka a poté byl smontován. Při kompletizaci byla zjištěna závada na hnací kardanové hřídeli u kola a tudíž model není v termínu odevzdání bakalářské práce kompletní.

Jako motor byl vybrán sensorový dvoupólový BLDC Team Corally Dynospeed 3.0 verze 2200 KV. Pro jemnější řízení otáček mohl být vybrán 4pólový elektromotor, ale tímto se dostáváme ke slabině toho návrhu ESP8266-12E. Při vyšších otáčkách již mikrokontrolér nestíhá s nízkou odezvou vyřizovat příkazy ze strany ovladače a provádět komutaci elektromotoru. Tudíž elektromotor je při vyšší stříde pulzní šířkové modulace brzděn mikrokontrolerem. Možným řešením tohoto problému by do budoucna bylo použití ESP8266-12E pouze pro komunikaci s aplikací a řízení servomotoru, zatímco pro řízení komutace elektromotoru by byl využit druhý mikrokontrolér komunikující s ESP pomocí sériové linky.

Pro možnost budoucího vývoje řídicího obvodu byl na desku připojen i tříosý akcelerometr a gyroskopický senzor, které by mohly být využity pro korekci směru řízení auta nebo pro vývoj aktivního odpružení. Tyto senzory jsou připojeny k mikrokontroleru pomocí sériové linky a komunikují po sběrnici I²C.

Ačkoliv je elektromotor mírně brzděn při vyšších otáčkách, zadání bakalářské práce by bylo z tohoto pohledu splněno.

LITERATURA

- [1] VYČÍTAL, J. Řízení rychlosti otáček motoru. Brno, 2012. Bakalářská práce (Bc.). Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [2] RCLAB.INFO. The basics of electrical power: brushless motors [online]. Rclab.info. 01/2014 [cit. 8.12.2017]. Dostupné z: <http://www.rclab.info/2014/01/the-basics-of-electric-power-brushless.html>.
- [3] HACKADAY.IO. BLDC motor and controller theory [online]. HACKADAY.IO. 13.11.2014 [cit. 8.12.2017] Dostupné z : <https://hackaday.io/project/3176-gator-quad/log/11053-bldc-motor-and-controller-theory>.
- [4] DH servis. Pulsně šířková modulace [online]. DH servis. [cit. 8.12.2017]. Dostupné z: <http://www.dhservis.cz/psm.htm>.
- [5] SHAO, J; NOLAN, D; TEISSIER, M; SWANSON, D, 2003. A Novel Microcontroller-Based Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drive for Automotive Fuel Pumps [online]. IEEE [cit. 8.12.2017]. Dostupné z : <<http://www.ieeexplore.ieee.org/document/1248258>>.
- [6] RC-AUTA.EU. Serva [online] rc-auta.eu [cit. 8.12.2017] Dostupné z: <<http://www.rc-auta.eu/uzitecne-odkazy/93-serva>>.
- [7] STMICROELECTRONICS. Sensorless BLDC motor control and BEMF sampling methods with ST7MC [online]. Stmicroelectronics. Rev. 12.7.2005 [cit. 8.12.2017]. Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/aa/b4/69/3f/75/58/4a/a1/CD00020086.pdf/files/CD00020086.pdf/jcr:content/translations/en.CD00020086.pdf>.
- [8] WIKIPEDIA. IEEE 802.11 [online]. Wikipedia.org. 4.12.2017 [cit. 9.12.2017]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11>.
- [9] KAVULI, S. Protocol Stack in Wi-Fi Chipsets. In: 80211notes.blogspot.cz [online]. 24.8.2014 [cit. 9.12.2017]. Dostupné z: <<http://80211notes.blogspot.cz/2014/08/protocol-stack-in-wi-fi-chipsets.html>>.
- [10] WIKIPEDIA. Nikl-kadmiový akumulátor [online]. Wikipedia.org. 23.10.2017 [cit. 10.12.2017]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Nikl-kadmiový_akumulátor>.
- [11] WIKIPEDIA. Nickel–metal hydride battery [online]. Wikipedia.org. 12.11.2017 [cit. 10.12.2017]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel-metal_hydride_battery>.
- [12] WIKIPEDIA. Lithium polymer battery [online]. Wikipedia.org. 14.11.2017 [cit. 10.12.2017]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_polymer_battery>.
- [13] AI-THINKER. ESP-12E WiFi Module [online]. Rev. 19.11.2015 [cit. 10.12.2017]. Dostupné z: <<http://www.kloppenborg.net/images/blog/esp8266/esp8266-esp12e-specs.pdf>>.
- [14] TEXAS INSTRUMENTS. LM2574/LM2574HV SIMPLE SWITCHER™ 0.5A Step-Down Voltage Regulator [online]. Rev. 5/2013 [cit. 10.12.2017]. Dostupné z: <<https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.330-223.1.pdf>>.
- [15] INTERNATIONAL RECTIFIER. IRL2203NPbF HEXFET® Power MOSFET [online]. Rev. 29.1.2004 [cit. 10.12.2017]. Dostupné z: <<https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.213-254.1.pdf>>.
- [16] INTERNATIONAL RECTIFIER. IR2113 HIGH AND LOW SIDE DRIVER [online].

- Rev. 23.4.2006 [cit. 10.12.2017].
Dostupné z: <<https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.399-184.1.pdf>>.
- [17] TEXAS INSTRUMENTS. TLC374, TLC374Q, TLC374Y LinCMOS™ QUADRUPLE DIFFERENTIAL COMPARATORS [online]. Rev. 3/1999 [cit. 10.12.2017].
Dostupné z: <<https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.314-010.1.pdf>>.
- [18] STMICROELECTRONICS. SENSORLESS BLDC MOTOR CONTROL AND BEMF SAMPLING METHODS WITH ST7MC [online]. Rev. 7.9.2007 [cit. 11.12.2017].
Dostupné z: <<http://forums.parallax.com/discussion/download/83730&d=1312466087>>.
- [19] TEXAS INSTRUMENT. Fundamentals of MOSFET and IGBT Gate Driver Circuits [online]. Rev. 4/2002 [cit. 12.12.2017].
Dostupné z: <<http://www.ti.com/lit/ml/slua618/slua618.pdf>>.
- [20] SUNROM. WiFi Module - ESP8266 - PCB Antenna - ESP-12E [online]. Sunrom.com. [cit. 23.5.2018]. Dostupné z: <<https://www.sunrom.com/p/wifi-module-esp8266-pcb-antenna>>.
- [21] ŽDÁNSKÝ, Bronislav, Zdeněk JAN a Jiří ČUPERA. Automobily (2): převody. 2011. AVID, 2011. ISBN 978-80-87143-32-2.
- [22] WIKIPEDIA. Diferencial gear (PSF) [online]. Wikipedia.org. 23.12.2008 [cit. 28.5.2018].
Dostupné z: <[https://cs.wikipedia.org/wiki/Diferenci%C3%A1l_\(mechanika\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Diferenci%C3%A1l_(mechanika))>.
- [23] QUORA. Is there a limited slip/locker differential hybrid, like a Detroit Locker/Truetrac combo? In: quora.com [online]. 1.10.2016 [cit. 28.5.2018]. Dostupné z: <<https://www.quora.com/Is-there-a-limited-slip-locker-differential-hybrid-like-a-Detroit-Locker-Truetrac-combo>>.
- [24] DIOPAN. Co je Diferenciál a jak to vlastně všechno funguje. In diopan.cz [online]. 1995 [cit. 28.5.2018]. Dostupné z: <<http://www.diopan.cz/citroenbx/diferencial.htm>>.
- [25] REELY. 1:10 EP Monstertruck „Titan“ 4WD (Construction Kit). Rev. 07/09 [cit. 30.5.2018].
- [26] ELUC. Tlumiče pérování [online]. Rev. 26.8.2014 [cit. 30.5.2018].
Dostupné z: <<https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1486>>.
- [27] MAGNERIDE. Engineered by BWI GROUP In: www.magneride.com [online]. [cit. 29.5.2018]
- [28] PRACTICALTIPS. Understanding steering geometry In practicalautotips.com [online]. [cit. 30.5.2018] Dostupné z: <<https://practicalautotips.com/understanding-steering-geometry>>.

SEZNAM SYMBOLŮ VELIČIN A ZKRATEK

RC	Dálkově ovládané (remote controlled)
DC	Stejnoseměrný (direct current)
BLDC	Bezkartáčkový stejnosměrný motor (brushless direct current)
PWM	Pulsně šířková modulace (pulse width modulation)
BEMF	Zpětná elektromotorická síla (back electromotoric force)
RC filtr	Dolnopropustní filtr tvořený rezistorem a kondenzátorem
CNC	Číslicové řízení pomocí počítače (computer numerical control)
Ni-Cd	Typ galvanického článku viz. kapitola 3.1
NiMH	Typ galvanického článku viz. kapitola 3.2
LiPol	Typ galvanického článku viz. kapitola 3.3
WiFi	Technologie bezdrátové komunikace
DPS	Deska plošného spoje
TCP	Přenosový protokol (transmission control protocol)
HTTP	Hypertextový přenosový protokol (hypertext transfer protocol)
SDK	Prostředí pro vývoj softwaru (software development kit)
IDE	Prostředí pro vývoj softwaru (integrated development environment)
T	Perioda signálu
t	Časový okamžik t
U_s	Střední hodnota napětí modulovaného signálu
$u(t)$	Okamžitá hodnota napětí
U	Hodnota napětí
I	Hodnota proudu
R	Hodnota odporu
G	Napěťové zesílení, relativní

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1:	Zjednodušené schéma kartáčkového motoru (převzato a upraveno z [1]).....	3
Obr. 1.2:	Konstrukce bezkartáčkového motoru typu inrunner (vlevo) a outrunner (vpravo) (převzato a upraveno z [2]).	3
Obr. 1.3:	Řízení bezkartáčkového šesti krokovou komutací (převzato z [1]).....	4
Obr. 1.4:	Schéma zapojení H-mostu pro řízení třífázového BLDC (převzato z [3]). ...	5
Obr. 1.5:	Blokové schéma detektoru magnetického pole TLE 4905 (převzato z [21]).	7
Obr. 1.6:	Metoda detekce polohy s využitím virtuálního neutrálního bodu (převzato a upraveno z [7]).	8
Obr. 1.7:	Metoda detekce polohy s využitím řídicího signálu ve vysoké úrovni (převzato a upraveno z [7]).	9
Obr. 2.1:	Podélný řez servomotorem a popis jednotlivých částí (převzato a upraveno z [6]).	10
Obr. 5.1:	Přehled popisovaných typů převodů (převzato a upraveno z [21]).	14
Obr. 5.2:	Nákres kuželového diferenciálu, bez klece diferenciálu (převzato z [22]).	15
Obr. 5.3:	Nákres diferenciálu TORSEN (převzato z [23]).	16
Obr. 5.4:	Lamely diferenciálu s viskózní spojkou (převzato z [24]).	17
Obr. 5.5:	Nákres diferenciálu s viskózní spojkou (převzato z [24]).	17
Obr. 5.6:	Řez jednoplášťovým tlumičem (převzato z [26]).	18
Obr. 5.7:	Nastavení geometrie kol ovlivňující jízdní vlastnosti (převzato a upraveno z [28]).	19
Obr. 6.1:	Pinout a struktura ESP8266-12E (převzato z [20]).	20
Obr. 6.2:	Schéma zapojení spínaného regulátoru napětí +3,3 V.	21
Obr. 6.3:	Schéma zapojení regulovatelného spínaného regulátoru napětí +5,2 V.	21
Obr. 7.1:	Konceptuální schéma zapojení řídicího obvodu a tranzistorových budičů..	23
Obr. 7.2:	Schéma bootstrap obvodu tvořeného prvky U_{CC} , D_4 , C_{12} a T_4 (vyňato ze schématu).	25
Obr. 7.3:	Layout navrženého řídicího obvodu (vrchní strana).	26
Obr. 7.4:	Layout navrženého řídicího obvodu (spodní strana).	27
Obr. 7.5:	Fotografie vrchní strany DPS.	28
Obr. 7.6:	Zjednodušený vývojový diagram obsluhy ESP8266-12E.	29
Obr. 7.7:	Úvodní obrazovka aplikace (aktivita Authorize).	30
Obr. 7.8:	Ovládání RC auta po připojení k Wi-Fi (aktivita MainActivity).	31
Obr. 8.1:	Fotografie pevného převodu modelu Reely Titan z rotoru motoru na centrální hnací hřídel.	33

Obr. 8.2: Nákres zadního diferenciálu a stálého převodu (převzato z manuálu [25]).	34
Obr. 8.3: Fotografie téměř dostavěného modelu.....	35

SEZNAM TABULEK

Tab. 1:	Přehled sensorových výstupů a aktivních tranzistorů (rotace po směru hodinových ručiček).....	6
Tab. 2:	Přehled sensorových výstupů a aktivních tranzistorů (rotace proti směru hodinových ručiček).....	6
Tab. 3:	Přehled parametrů standardů IEEE 802.11 (převzato a upraveno z [8]).	12
Tab. 4:	Konfigurace signálů při bootování určujících mód mikrokontroleru.	24

PŘÍLOHY

Příloha I: Schéma zapojení obvodu

