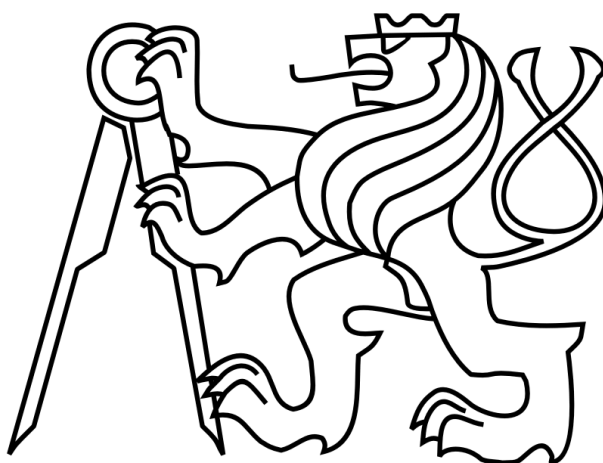


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta Strojní - Ústav mechaniky, biomechaniky a
mechatroniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh a realizace systému elektronicky nastavitelných zkrutných
stabilizátorů pro vůz projektu Formule Student

Design and realization of electronic system for semiactive
actuation of anti roll bars for vehicle of Formula Student SAE
category

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího diplomové práce, Ing. Martina Nečase, MSc., Ph.D. jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků diplomové práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat všem, kteří mi při vytváření této práce pomáhali. Především děkuji vedoucímu své diplomové Ing. Martinu Nečasovi, MSc., Ph.D. za cenné rady a připomínky. Dále děkuji kolegům z týmu CTU CarTech za konstruktivní připomínky a taktéž možnost praktické realizace navrženého systému. Děkuji také rodině a přátelům za psychickou podporu.

Anotační list

Jméno autora:	Bc. Pavel Balcar
Název DP:	Návrh a realizace systému elektronicky nastavitelných zkrutných stabilizátorů pro vůz projektu Formule Student
Rok:	2017
Obor studia:	Mechatronika
Ústav:	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky
Vedoucí:	Dr. Ing. Martin Nečas MSc.
Bibliografické údaje:	počet stran 106 počet obrázků 61 počet tabulek 11 počet příloh 1 CD
Klíčová slova:	Formula student, semiaktivní odpružení, zkrutné stabilizátory, CAN,
Key words:	Formula student, semiactive suspension, anti-roll bars, CAN

Anotace: Práce se zabývá návrhem systému pro elektronické nastavování tuhosti zkrutných stabilizátorů pro vůz kategorie Formula Student SAE. V práci je rozebrán mechanický návrh polohování stabilizátorů, návrh hardwaru a softwaru elektronických jednotek pro samotné ovládání stabilizátorů a taktéž jednotky multifunkčního volantu formule, která komunikuje s jednotkou stabilizátorů po sběrnici CAN. Dále je zde popsáno testování systému, jeho přínos pro formulový vůz a navrženo několik rad pro možný budoucí vývoj systému.

Annotation: This diploma thesis deals with design of electronic system for semiactive actuation of anti roll bars for vehicle of Formula Student SAE category. Description of mechanical designation, hardware and software designation of electrical units for own electronic actuation of anti roll blades and also electronic unit in multifunctional steering wheel, communicating with the other unit via CAN bus, could be found here. Testing of system, benefits of usage of such a system for Formula Student SAE vehicles and advices for possible future development are described in the end of this thesis.

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Formula Student SAE.....	1
1.2	CTU CarTech.....	2
2	Elektronika vozů FS.08 a FS.09	4
2.1	Jednotka elektropneumatického řazení.....	5
2.2	Jednotka sekundárních systémů.....	6
2.3	Jednotka DRS.....	6
2.4	Jednotka pro ovládání aktivního chlazení brzd.....	6
2.5	Snímané veličiny na voze FS.09.....	7
3	Problematika zkrutných stabilizátorů.....	9
3.1	Funkce stabilizátorů	9
3.2	Zajímavé systémy zkrutných stabilizátorů	14
3.3	Řízené odpružení a jeho dělení.....	15
3.4	Řízené stabilizátory, příklady použití	15
3.5	Ukázky realizace ve Formula SAE®	18
4	Cíle práce	20
4.1	Motivace návrhu systému.....	20
4.2	Specifika návrhu v týmu CTU CarTech	21
5	Mechanický návrh polohování stabilizátorů	22
5.1	Systémy na předchozích vozech CTU CarTech.....	23
5.2	Mechanismus polohování pro FS.09.....	25
5.2.1	Odpružení FS.09	25
5.2.2	Systém stabilizátorů vozu FS.09.....	26
5.2.3	Aktuace.....	28
5.2.4	Převodovka.....	29
5.2.5	Určení potřebného momentu	29
6	Elektrotechnický návrh.....	31
6.1	Aktuátory ve vztahu k jejich řízení	31
6.1.1	Serva.....	31
6.1.2	Elektromotory	31
6.2	Vybraná varianta	32
6.2.1	Vybraná kombinace motoru a převodovky.....	32
6.3	Snímání polohy „šavle“	34
6.3.1	Optimální varianta snímače	36
6.4	CAN.....	36

7	Realizace elektronických jednotek	38
7.1	Použitý software	38
7.1.1	Software pro návrh DPS	38
7.1.2	Vývojové prostředí pro návrh firmware jednotek	38
7.2	Modulární koncepce návrhu	38
7.2.1	Motivace k uplatnění a princip.....	39
7.2.2	Knihovna hardwarových modulů	39
7.2.3	Softwarová knihovna	40
7.3	Koncept systému pro vůz FS.09	41
7.4	Řídící jednotka ARB	43
7.4.1	Realizace hardwaru pro jednotku ARB vozu FS.09.....	43
7.4.2	Realizace firmwaru jednotky ARB	56
7.5	Řídící jednotka STEERING.....	61
7.5.1	Realizace hardwaru pro jednotku STEERING	61
7.5.2	Realizace firmwaru jednotky STEERING.....	66
7.6	Komunikace CAN.....	70
7.7	Realizace mechanismů polohování a snímání polohy.....	73
7.8	Multifunkční volant	74
7.9	Vývojové problémy	76
8	Testování systému.....	78
8.1	Validace komunikace po sběrnici CAN	78
8.2	Testování rychlosti polohování	81
8.3	Testování přesnosti polohování.....	83
8.3.1	Vliv přesnosti na výslednou zkrutnou tuhost.....	84
8.4	Dynamické testování.....	85
9	Zhodnocení výsledků.....	87
10	Výhled do budoucna.....	90
11	Závěr.....	92

1 Úvod

Zkrutné stabilizátory jsou nedílnou součástí téměř všech osobních i závodních vozů. Výjimku tvoří pouze extrémní terénní speciály, vozidla, která nemají odpružení, případně vozy, u kterých je celá kinematika a dynamika vozu navržena tak, že stabilizátory nepotřebují (velmi nízké těžiště a tuhé odpružení). Obecnou problematiku zkrutných stabilizátorů detailněji rozeberu dále v této práci. Práce se zabývá návrhem systému stabilizátorů na konkrétní vůz, a to vozidlo FS.09, což je závodní monopost navržený týmem CTU CarTech pro účast v sérii Formula Student SAE. U závodních vozů slouží stabilizátory primárně ke zlepšení jízdních vlastností, které velmi významně ovlivňují. Jejich vliv se projevuje výhradně v příčné dynamice, tedy zatáčení, které je naprosto stěžejní pro vozy studentských formulí. Různým nastavením tuhosti stabilizátorů na přední a zadní nápravě je možné změnit přetáčivé auto na nedotáčivé a naopak. Pro závodní vozy se tedy jeví velice výhodně možnost nastavování stabilizátorů, a ještě lépe potom možnost je nastavovat přímo za jízdy z kokpitu vozu nebo ještě lépe jejich automatickým nastavováním v závislosti na jízdních stavech. Problematikou nastavování stabilizátorů z kokpitu vozu FS.09 se tato práce primárně zabývá. Výsledkem práce je kompletní mechanický a elektromechanický návrh, včetně řídicích jednotek, softwaru atp. pro konkrétní vůz zmíněný výše. Dále zde také navržený systém zvaliduji. Rozeberu zde částečně také přístup k aktivnímu řízení stabilizátorů a popíši, proč tento systém prozatím nebyl použit. Na konci této práce také navrhuji případným pokračovatelům způsoby a kroky k vylepšení funkcionality celého systému.

1.1 Formula Student SAE

Soutěž nebo spíše program Formula SAE® je projekt, který vznikl v roce 1981 (rok, kdy se odehrála první soutěž) v USA. Jedná se o mezinárodní projekt, který je určen výhradně studentům vysokých škol po celém světě. Soutěž umožňuje získat studentům praktické dovednosti a možnost uplatnění studií nabytých znalostí už během samotného působení na vysoké škole. Projekt vznikl na popud průmyslových firem z důvodu nedostatku dostatečně kvalifikovaných absolventů. Cílem projektu je navrhnout a vyrobit

jednosedadlový vůz formulového typu pro tzv. víkendového závodníka, což je zjednodušeně řečeno neprofesionální jezdec, který si užívá řízení. Nejde však jen a pouze o technický návrh takového vozu. V zadání soutěže je taktéž specifikováno, že tým je vlastně fiktivní firma, která by měla rozumět i ekonomické stránce celého projektu, tzn. celý vůz by měl být nejen navrhnout a vyroben, ale také naceněn a také by konkrétní tým neboli firma měl mít tzv. bussines plán, který popisuje proces, jak by se konkrétní formule dostávala na trh mezi fiktivní zákazníky. Proces návrhu a konstrukce vozu je v rámci soutěže hodnocen odbornou komisí, která se skládá většinou z odborníků z praxe či akademické sféry. Správnost návrhu se dále prokazuje v tzv. dynamických disciplínách, kde už se formule pohybuje po poměrně specifické, velmi technické trati. Omezení těchto tratí je pevně zaneseno v pravidlech soutěže a dá se říci, že právě tato specifika tratí jsou počátečními podmínkami pro koncepční návrh samotného monopostu. Typický vůz pro sérii FormulaSAE® je vůz s rozvorem minimálně 1525 mm, hmotností 130 – 350 kg (která však není omezena), s nebo bez aerodynamických prvků, s elektrickým nebo spalovacím motorem (palivo RON95, RON98 nebo E85). Maximální rychlost není omezena, avšak charakter tratí neumožňuje rychlost větší než cca 120 km/h. Zrychlení s pevným startem z 0 na 100 km/h zvládnou nejlepší spalovací formule za cca 3,5 sekund. Dynamické vlastnosti studentských formulí dokazuje také maximální dosahované boční přetížení, které například u formule FS.08 týmu CTU CarTech dosahovalo hodnot kolem 3 g.

Celá soutěž je samozřejmě svázána obsáhlými pravidly, nicméně tato pravidla jsou relativně benevolentní a dávají studentům poměrně volné ruce na rozdíl od profesionálních sérií v motorsportu. Těmito pravidly se samozřejmě musel řídit i tento návrh, a proto jej uvádím jako zdroj v seznamu literatury (1).

1.2 CTU CarTech

Tým založený pod Fakultou strojní ČVUT v Praze vznikl v roce 2008 a v roce 2009 se účastnil prvního závodu v německém Hockenheimu. Do tohoto roku má na kontě již 8 sezón a návrh a výrobu 8 monopostů. Momentálně se tým CTU CarTech nachází na 20. místě v celosvětovém žebříčku spalovacích formulí, který čítá přesně 553 týmů z celého světa. Tým je složen zhruba ze 30

studentů, převážně z Fakulty strojní, nicméně například na tvorbě bussines plánu spolupracují také studenti se Škoda Auto Vysoká Škola.

V době tvorby této práce probíhal návrh a výroba již 9. formule s označením FS.09, na které byl také navržen a zrealizován systém natáčecích zkrutných stabilizátorů, o kterém pojednává tato diplomová práce. Tento systém byl poprvé nasazen již na voze FS.08 a jelikož jsem na tomto prvním návrhu taktéž pracoval, zmíním se dále v této práci částečně i o systému na voze FS.08 a budu se snažit přiblížit vývoj, který proběhl mezi jednotlivými generacemi.



Obr. 1 - Render 3D modelu monopostu CTU CarTech FS.09 - (2)

2 Elektronika vozů FS.08 a FS.09

Přestože se jedná o monoposty spalovací a mohlo by se zdát, že nemusí být nutně vybaveny velkým množstvím elektroniky, není tomu tak. Trend několika posledních dekád ukazuje nejen v oboru automotive ale i v jiných oborech, že mnoho mechanických neduhů je možné dohnat sofistikovanými elektronickými systémy a elektronickým řízením. U závodních vozů, potažmo studentských formulí tomu není jinak, což například dokazuje i letošní (2017) první ročník seriálu tzv. Formula Student Driverless, ve kterém soutěží autonomně řízené monoposty na stejných tratích jako klasické studentské formule.

Elektronická výbava obou zmíněných formulí obsahuje poměrně velkou senzorickou výbavu a množství elektronických jednotek. Pro řízení motoru (dále jen ECU) je u obou monopostů použita jednotka od výrobce EFI s označením Euro4. Jedná se o jednotku používanou v motorsportu, tudíž umožňuje plně konfigurovatelné řízení palivových map, map předstihu, řízení přeplňování, ale také použití asistenčních systémů jako je tzv. traction control¹ nebo launch control². Zároveň využívá sběrnici CAN, která umožňuje předávat relativně velké množství dat z příslušných senzorů například do tzv. dataloggeru³, kterým jsou oba monoposty taktéž vybavené. FS.08 využívá datalogger od firmy AiM s označením MXL Pista, FS.09 potom novější model od stejného výrobce s označením MXS. Ten je oproti svému předchůdci vybaven například dvěma sběrnici CAN ve standardu 2.0b, vyšší vzorkovací frekvencí pro 8 analogových kanálů (až 1000Hz), plně konfigurovatelným displejem, bezdrátovou komunikací, či možností zaznamenávat a dekodovat uživatelsky vytvořený CAN protokol. Tyto dvě jednotky (ECU a datalogger) jsou jediné dvě jednotky, které si tým kupuje. To má samozřejmě své důvody, nicméně ty nejsou pro tuto práci relevantní, proto je zde nebudu zmiňovat.

¹ Systém pro zamezení prokluzu hnacích kol vozu. Systém omezí kroucí moment motoru, a tak i moment přenášený na kola na základě rozdílu rychlosti hnacích kol a rychlosti vozu vůči vozovce (případně rozdílu otáček hnacích a vlečených kol).

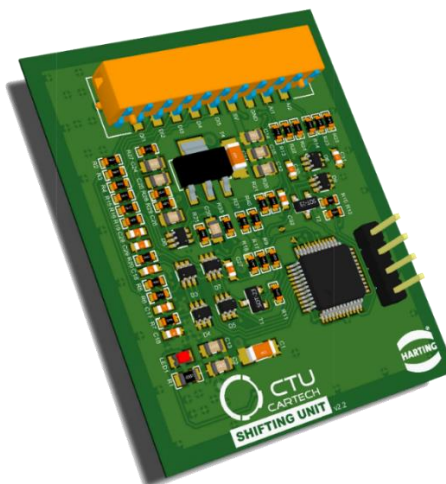
² Systém řízeného rozjezdu. Systém používá rampové řízení kroucího momentu motoru a s vhodným nastavením dokáže umožnit snadné rozjetí s co možná největším zrychlením. Zároveň spolupracuje se systémem Traction control

³ Elektronická jednotka sloužící k záznamu dat z vozu. Umožňuje post-analýzu jízdních stavů.

Další jednotky použité na voze jsou již navržené, vyrobené a naprogramované členy týmu. Jedná se o jednotku elektropneumatického řazení, jednotku sekundárních systémů, jednotku DRS⁴ (pouze na FS.08), jednotku pro aktivní chlazení brzd a dále jednotku multifunkčního volantu a jednotku pro nastavování zkrutných stabilizátorů, které přímo souvisí s touto diplomovou prací. Poslední dvě jednotky dále v práci popíšu detailněji a o zbývajících se zmíním okrajově v následujících odstavcích.

2.1 Jednotka elektropneumatického řazení

Má za úkol ovládat pneumatické ventily, které ovládají pneumatické písty, které dále ovládají řadící mechanismus sekvenční převodovky a spojky. Dále vysílá signál řídící jednotce motoru, která odpojuje elektronické zapalování. Jednotka je stejně jako všechny ostatní jednotky vozu vybavená sběrnici CAN, tudíž veškerá vstupní data této jednotky k ní proudí právě po této sběrnici. Vstupními daty jsou především údaje posílané z jednotky multifunkčního volantu, která vyhodnocuje stav (sepnuto/vypnuto) tzv. pádel řazení pod volantem. Software jednotky dále umožňuje automatické řazení v předem nastavených otáčkách, automatické řazení neutrálu, v závislosti na délce stisku řadícího pádla podřadit o předem nastavený počet rychlostních stupňů atd.



Obr. 2 - Render 3D modelu z prostředí Altium Designer 15 jednotky elektropneumatického řazení - (3)

⁴ Systém pro snížení aerodynamického odporu v momentech, kdy není potřeba vysoký přítlak – jízda na rovině.

2.2 Jednotka sekundárních systémů

Slouží zjednodušeně jako interface mezi jednotkami s CAN sběrnici a jednotkami bez CAN sběrnice. Na voze FS.08 sloužila k přepínání palivových map, ovládání funkce launch control, nastavení funkce traction control a ovládání rádiové komunikace mezi pilotem a týmem. Tyto všechny funkce jsou ovládány z volantu vozu, vyhodnoceny volantovou jednotkou a poslány po sběrnici CAN do jednotky sekundárních systémů. Na voze FS.09 by funkce této jednotky již měla být plně nahrazena sběrnici CAN (jednotka řízení motoru umožňuje příjem CAN zpráv).

2.3 Jednotka DRS

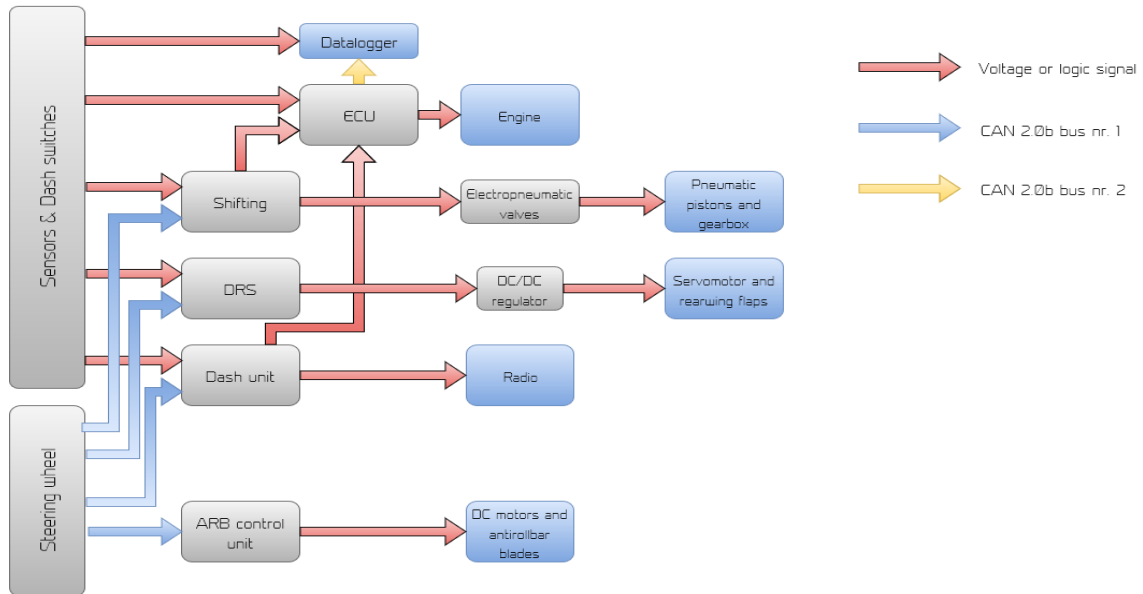
Tato jednotka ovládá servomotor umístěný v zadním přitlačném křídle vozu a polohováním přitlačných klapek umožňuje vozu snížit aerodynamický odpor při jízdě na rovině. Systém je schopný plně automatického fungování na základě údajů o tlaku v brzdové soustavě, polohy škrtecí klapky a úhlu natočení volantu. Tato jednotka již není na voze FS.09 použita, protože bylo rozhodnuto o nepoužití systému DRS na tomto voze, a to především z důvodů ztráty významu, která nastala po změně pravidel aerodynamiky.

2.4 Jednotka pro ovládání aktivního chlazení brzd

Tato jednotka je novinkou pro vůz FS.09. Vzhledem ke značným problémům s přehříváním předních brzdových třmenů a kotoučů i při použití nasávacích kanálů náporového chlazení se tým rozhodl na nový vůz použít chlazení aktivní. Vzhledem k relativní náročnosti návrhu elektroniky pro řízení bezkartáčových stejnosměrných motorů (BLDC) se tým rozhodl použít poměrně jednoduché řešení, a to použití hobby regulátorů BLDC motorů, které se používají v leteckém modelářství. Tyto regulátory zprostředkovávají výkonovou část celého systému a jejich vstupním signálem je velice jednoduchá jednotka s CAN sběrnici, procesorem a jednoduchým tranzistorovým spínacím výstupem, který je spínán PWM⁵ signálem. Výstupní PWM signál z této jednoduché jednotky poté slouží jako vstupní signál pro regulátory a určuje tak požadované otáčky BLDC motorů a tím i jejich výkon.

⁵ Pulse width modulation – pulzně šířková modulace

Regulovaná veličina celého systému je teplota brzdových třmenů, která je zaznamenávána na jednom z analogových kanálů dataloggeru, a tím je také poté dále posílána přes sběrnici CAN do řídicí jednotky aktivního chlazení.



Obr. 3 - Schématické znázornění elektroniky vozu FS.08 - (3)

2.5 Snímané veličiny na voze FS.09

Jak jsem již zmínil výše, vozidlo je vybaveno poměrně velkým množstvím různých snímačů. Některé z nich jsou používány například pouze řídicí jednotkou motoru, která je využívá pouze pro řízení motoru a hrubá data z nich by byla irelevantní. Data z těchto snímačů jsou potom reprezentována zprostředkovanou veličinou, která je posílána přes CAN do dataloggeru. Nicméně většina údajů ze snímačů je přímo zaznamenávána a po samotné jízdě mohou být tato zaznamenaná data vyhodnocena a sloužit jako vodítko pro řešení problémů, zdroj vstupních dat pro simulace dynamiky nebo využita ke zlepšení nastavení vozu. Níže uvádím pro zajímavost výpis veličin, které jsou na voze snímány a zaznamenávány. Neuvádím zde reprezentované veličiny z řídicí jednotky motoru.

- **Teploty:** chladicí kapalina, motorový olej, okolní vzduch, přední brzdové třmeny, přední brzdové kotouče (senzor IR záření)
- **Tlaky:** paliva, oleje, vysokotlakého vzduchu (zásobník stlačeného vzduchu pro systém řazení), předního a zadního brzdového okruhu

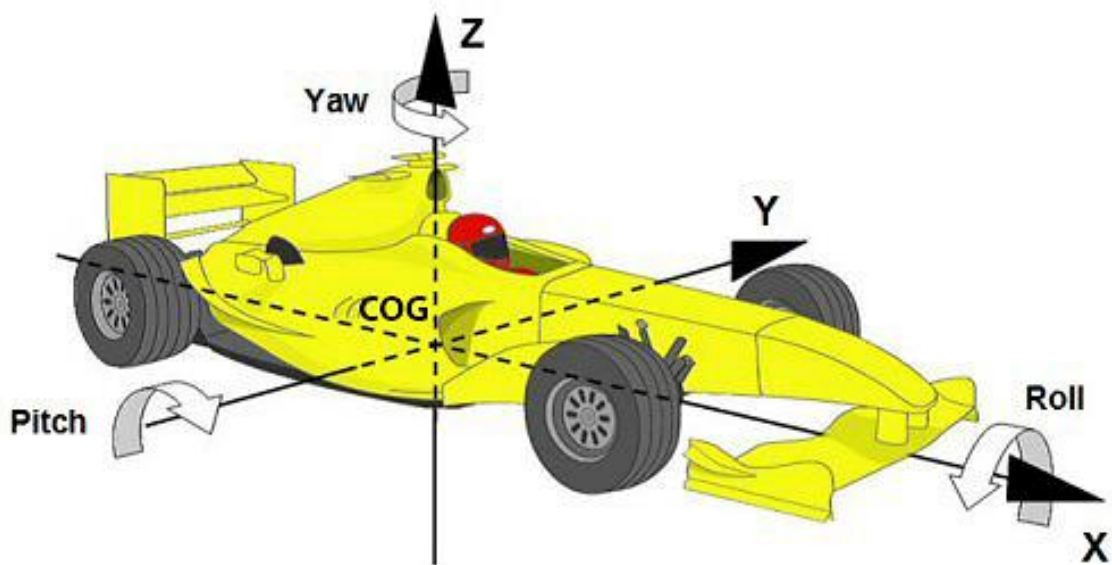
- **Polohy:** poloha (stlačení) všech tlumičů, úhel natočení volantu, úhel natočení předního a zadního stabilizátoru, natočení škrtkové klapky (reprezentováno procenty)
- **Otáčky:** klikového a vačkového hřídele, výstupní hřídele převodovky, všech 4 kol
- **Další:** 3-osý akcelerometr a gyroskop (snímá zrychlení a stáčivou rychlost ve směrech dle standardních ISO souřadnic), tenzometricky snímaná síla v tyčích pull-rod⁶ a spojovacích tyčkách stabilizátorů.

⁶ Převážně tahem namáhaná tyč, která přenáší vertikální síly (síly které způsobují propružení odpružení) ze zavěšení (těhlice) vozu do vahadla, které potom přenáší sílu do tlumiče odpružení.

3 Problematika zkrutných stabilizátorů

3.1 Funkce stabilizátorů

Stabilizátory jsou nedílnou součástí většiny vozidel a to osobních, užitkových, závodních, ale i nákladních. Prakticky se dá říci, že se nevyskytují pouze u extrémních terénních vozů a vozidel, kde nejsou příliš důležité dynamické vlastnosti při zatáčení. Základem rozboru jakéhokoli výzkumu na poli náprav by měla být znalost základních pohybů vozidla, které se odehrávají za jízdy a souřadný systém vozu.



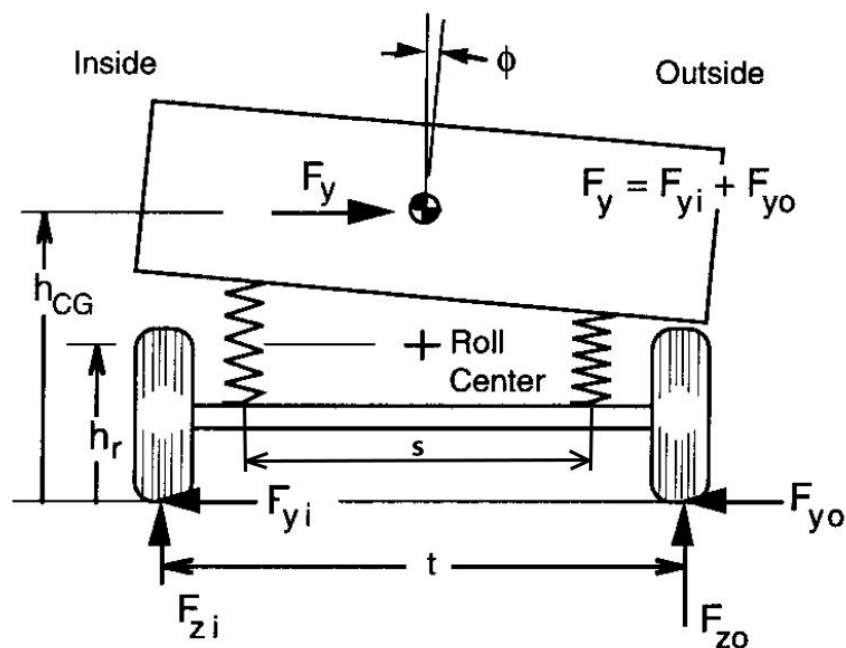
Obr. 4 - Souřadný systém vozidla dle normy ISO8855, včetně vyznačení význačných pohybů šasi (4)

Základní pohyby šasi vozu:

- **Pitch (klonění)** – rotační pohyb kolem příčné osy Y vedené skrz těžiště. Vzniká při brždění a akceleraci.
- **Yaw (stáčení)** – rotační pohyb kolem svislé osy Z vedené skrz těžiště. Vzniká při zatáčení vozu a jeho důsledkem je zatočení vozu do směru.
- **Roll (klopení)** – rotační pohyb kolem podélné osy X vedené skrz těžiště. Vzniká při zatáčení vozu a jeho důsledkem je naklápění karoserie.
- **Heap (nadašení)** – translační pohyb ve směru svislé osy Z. Vzniká při zatížení vozu a při přejezdu nerovností.

Obecně se dá říci, že se výše zmíněné pohyby téměř nikdy nevyskytují zcela samostatně. Například stáčení (yaw) je u reálného vozu zpravidla doprovázeno i pohybem klopení (roll). Nicméně pro simulace a analytické vyšetřování některých jevů dynamiky vozidel je možné tyto pohyby oddělit. Tato práce se zabývá zkrutnými stabilizátory, které mají za úkol ovlivnit rotační pohyb klopení, který se obvykle charakterizuje úhlem klopení ϕ [°] nebo [rad]. Rozbor dynamiky vozu nicméně není přímo tématem této diplomové práce, proto se zde omezím opravdu jen na základ, který úzce souvisí s touto diplomovou prací.

Princip klopení vozu při zatáčení je poměrně snadno pochopitelný a ilustruje ho např. Obr. 5. Odstředivá síla se střediskem v těžišti vozu vyvozuje moment, který se přenáší jako síla do odpružení vozu. Tento moment vyvolá taktéž změnu v zatížení pneumatik, které se říká přenos hmot (angl. load transfer). Tento jev velice významně ovlivňuje celkovou jízdní dynamiku.



Obr. 5 - Princip vzniku klopení vozu (5)

Klopná tuhost odpružení na Obr. 5 se dá definovat dle (5) takto:

$$K_{\phi} = 0,5 \cdot K_s \cdot s^2 \quad (\text{Rov. 1})$$

kde platí:

$K_\varphi \sim$ klopná tuhost odpružení

$K_s \sim$ tuhost pružin

$s \sim$ vzdálenost mezi pružinami

$h_r \sim$ výška roll center nad vozovkou

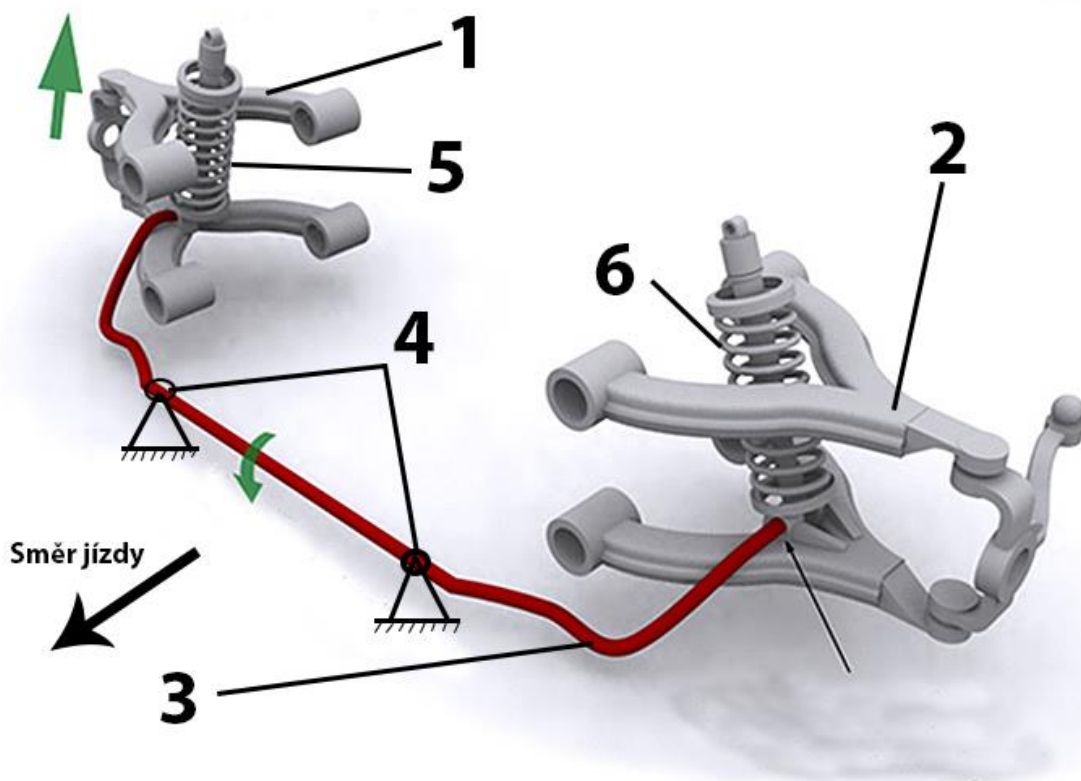
$h_{CG} \sim$ výška těžiště nad vozovkou

$F_{zi}, F_{z0} \sim$ normálové zatížení pneumatik

$F_{yi}, F_{y0} \sim$ reakce pneumatik v laterálním směru

Z rovnice výše uvedené je patrné, že celková klopná tuhost a přeneseně tedy i klopný moment a úhel klopení φ [°] je závislý při konstantních rozměrech a hmotnostech mechanismu (odpružení) pouze na tuhostech pružin. Mohlo by se tedy zdát, že pokud bych od vozidla vyžadoval vysokou klopnou tuhost, a tedy nízké náklony šasi φ [°], bude mi stačit zvýšit tuhosti pružin. Tak jednoduché to samozřejmě není. Pokud bych zvyšoval pouze tuhost odpružení, snížil se sice maximální hodnota klopení vozu, ale odpružení bude mít problém s přejezdem nerovností (heap). Tuhost odpružení bude příliš vysoká, a tím i normálové síly do vozovky budou příliš vysoké. Tím dojde za prvé k výraznému snížení komfortu odpružení, ale taktéž může dojít k odskakování kola při průjezdu zatáčkou. To je způsobené ztrátou tlumení. Disipativní tlumič, je zařízení, které má tuhost ve své zjednodušené formě závislou pouze na rychlosti působícího pohybu. Pokud tedy zvýším tuhost odpružení, dojde ke snížení výchylek tlumiče a tím tedy i ke snížení rychlostí. Díky tomuto jevu může být tlumič v extrémním případě vyřazen z funkce a může dojít k odskakování pneumatiky při průjezdu nerovnou zatáčkou. Zmíněné negativní vlivy jsou pouze střídavým výběrem, který stručně popisuje problematiku klopné tuhosti a zároveň přivádí k myšlence použití přidané tuhosti, která bude závislá pouze na naklopení vozu. Tím by mi především odpadl problém se snížením komfortu odpružení a zvýšením normálových sil na vozovku. Takovým zařízením, které přidává tuhost odpružení v závislosti na naklopení vozu, jsou právě zkrutné stabilizátory.

Princip stabilizátoru vysvětlím zjednodušeně na Obr. 6.

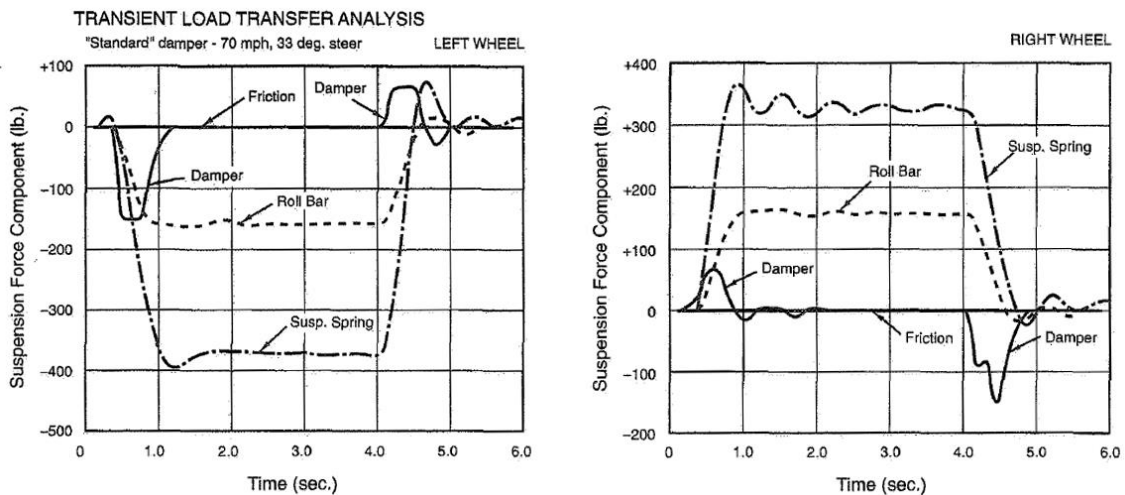


Obr. 6 - Znárodnění principu zkrutného stabilizátoru (1 - nezávislé odpružení pravé strany vozu, 2 - nezávislé odpružení levé strany vozu, 3 - tyč zkrutného stabilizátoru, 4 - uchycení tyče stabilizátoru do rámu (rotační vazba), 5 - pružina s tlumičem pravého zavěšení, 6 - pružina s tlumičem levého zavěšení) (6)

Při propružení obou částí zavěšení 1 a 2, tyč stabilizátoru volně rotuje kolem osy definované body vetknutí do rámu 5. Normálová síla přenášená do pneumatik je tedy závislá pouze na tuhosti pružin 5 a 6 (při zanedbání tlumení) a stabilizátor zde nemá žádný vliv (při zanedbání pasivních odporů). Při náklonu vozu při průjezdu levé zatáčky ve směru vyznačeném na obrázku, se zavěšení pravé strany začne propružovat. To má za následek deformaci pravé pružiny s tlumičem, náklon karoserie a také deformaci tyče zkrutného stabilizátoru. Reakce v uložení stabilizátoru na zavěšení je přímo úměrná tuhosti stabilizátoru a jeho deformaci, která je úměrná náklonu vozu. Tento popis je samozřejmě velice zjednodušený, neuvažuje hlouběji rozměry mechanismu, tuhosti jednotlivých prvků, a především tuhost či poddajnost

pneumatik. Pro potřeby této diplomové práce je však tento popis dle mého názoru dostatečný.

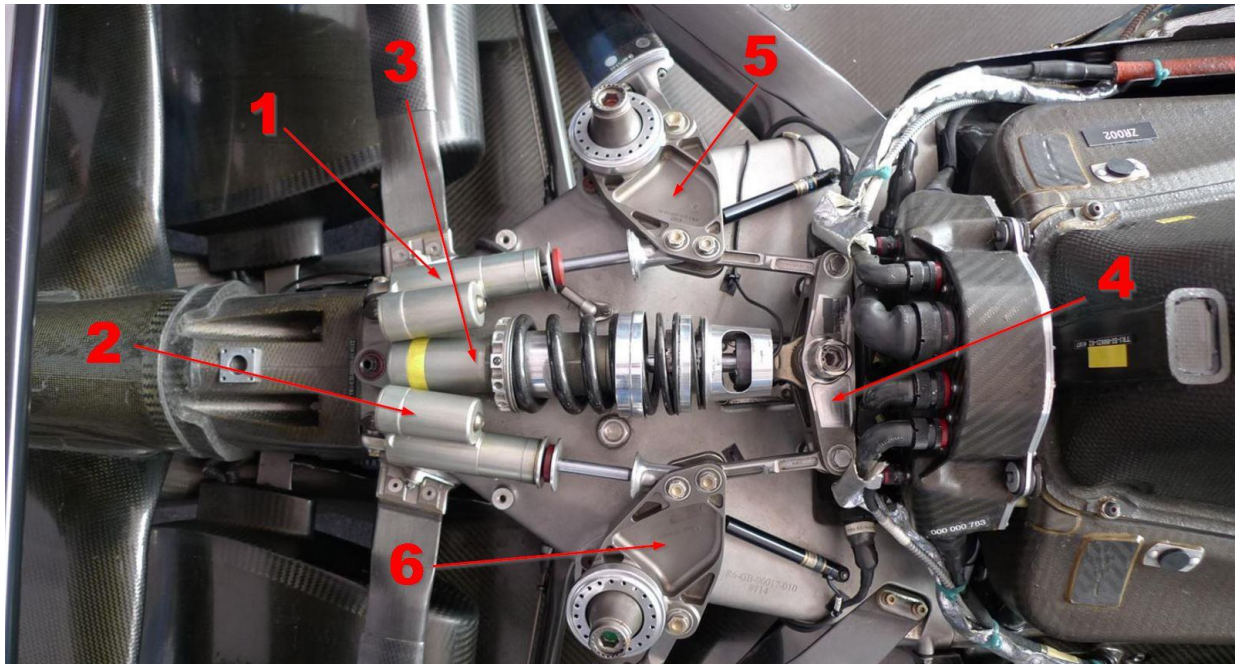
V úvodu této podkapitoly bylo zmíněno, že při průjezdu zatáčkou zachycují klopný moment pružiny a tlumiče náprav a také zkrutný stabilizátor. Na Obr. 7 je možné vidět, jak se jednotlivé prvky odpružení vozu podílí na zachycování klopného momentu při kvazistatickém průjezdu zatáčkou (vozidlo začne zatáčet – přechodový jev, poté konstantně zatáčí a plynule přejde do jízdy v přímém směru). Lze zde vidět, že při idealizované jízdě na dokonale rovné vozovce se tlumič při statickém zatáčení na odpružení nepodílí a že pracuje pouze při přechodovém jevu vjezdu do zatáčky. Zároveň na tomto obrázku je patrné, že pružina a stabilizátor pracují ve fázi a že se liší pouze absolutní hodnoty zachycovaného klopného momentu (v grafu je již přepočten na sílu do odpružení)



Obr. 7 - Rozložení sil v čase na jednotlivé součásti odpružení (tlumič, pružina, stabilizátor) při kvazistatickém jevu zatáčení (7)

3.2 Zajímavé systémy zkrutných stabilizátorů

Zde bude v krátkosti na jednom příkladu ukázán zajímavý systém odpružení vozu Formule 1 s poměrně netradičním způsobem zachytávání klopného momentu.



Obr. 8 - Odpružení vozu F1 s třemi tlumiči a zkrutným stabilizátorem

Na Obr. 8 je vyobrazeno zadní odpružení vozu Formule 1. Jsou zde použity 3 tlumiče, z nichž pouze jeden (v obrázku je označen číslem 3) má na sobě pružinu. Tento tlumič s pružinou je aktivní pouze při propružování celého vozu (nahnášení, heap). Při klopení auta jsou aktivní pouze tlumiče 1 a 2 a stabilizátor, na který je moment přenášen přes vahadlo 4. Síly do všech prvků odpružení jsou vnášeny přes vahadla 5 a 6. Výhodou tohoto řešení je větší možnost oddělení jednotlivých pohybů vozu (samostatné tlumení a pružení pro roll a heap) a tak větší možnosti nastavení.

3.3 Řízené odpružení a jeho dělení

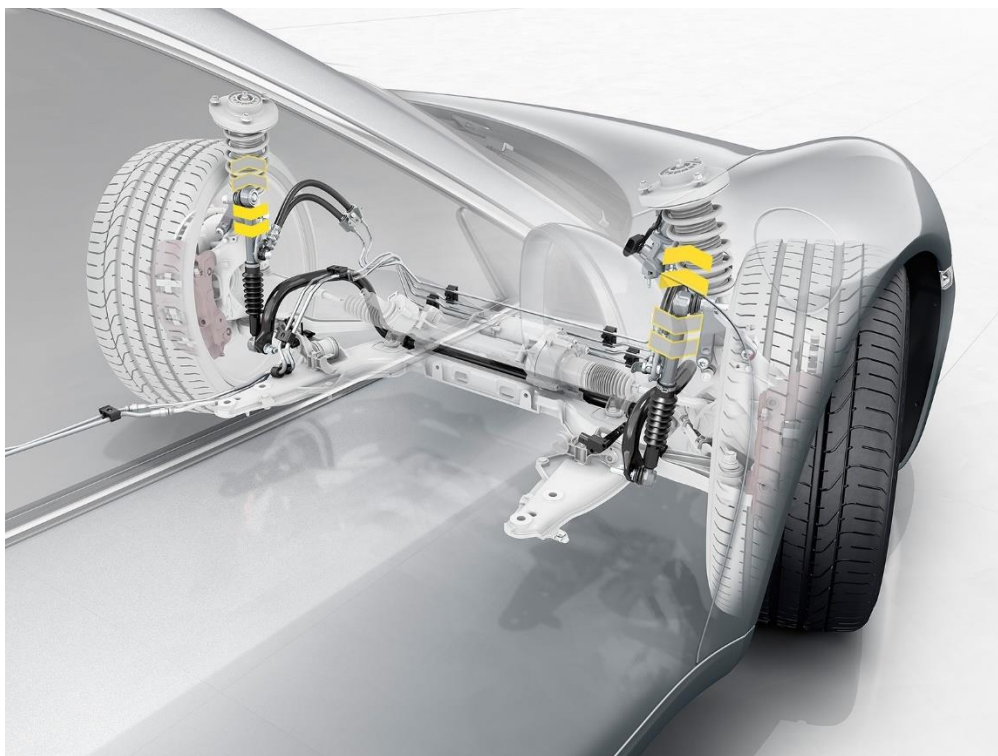
Systémy aktivního odpružení se v poslední době stávají v nových vozech vyšších a středních tříd poměrně běžnou záležitostí. V úvodu této podkapitoly by bylo dobré definovat typy aktivních náprav (5).

- **Samonivelační odpružení** – slouží pouze ke změně světlé výšky, aktuátorem bývá vzduchový měch, který nahrazuje pružinu
- **Semiaktivní odpružení** – mění vlastnosti odpružení v závislosti na jízdních stavech (např. pohyby tlumiče, nebo náprav) či preferencí řidiče. Typickým příkladem může být použití magnetoreologických nebo elektreologických tlumičů.
 - **Slow active** – změny se odehrávají zhruba během desetiny až setiny sekundy. Změny bývají většinou krokové (diskrétní)
 - **Low bandwidth** – spojitě změny aktivních prvků odpružení se odehrávají na základě nízkofrekvenčních pohybů odpružených hmot (1-3 Hz).
 - **High bandwidth** – spojitě změny aktivních prvků odpružení se odehrávají jak na základě nízkofrekvenčních pohybů odpružených hmot, tak na vysokofrekvenčních pohybech hmot neodpružených (10 - 15 Hz).
- **Aktivní odpružení** – aktuátor zde přímo vyvolává požadované síly do odpružení. Aktuátory bývají zpravidla řízené hydraulické válce. Příkladem aplikace může být například monopost F1, Williams FW15c z roku 1993.

3.4 Řízené stabilizátory, příklady použití

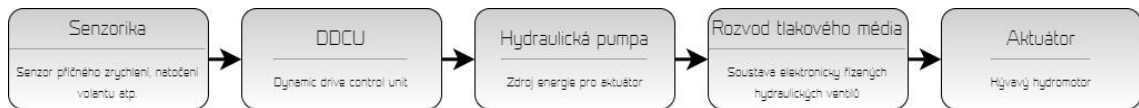
Systémy řízených zkrutných stabilizátorů se tedy řadí do kategorie semiaktivních systémů. První vozidlem vybaveným řízenými stabilizátory byl v roce 1994 vůz Citroen Xantia Activa se systémem SC.CAR (Systeme Citroën de Contrôle Actif du Roulis). Tento systém dokázal díky působení hydraulického aktuátoru na tyč stabilizátoru omezit naklápění karoserie na maximálně 2°. Systém reagoval dle dostupných informací především na změny natočení volantu.

Velice podobný systém používá v současnosti automobilka Porsche a nazývá se PDCC (Porsche Dynamic Chassis Control) a je znázorněn na Obr. 9. Hydraulické aktuátory na pravé i levé straně vozu jsou přichyceny ke zkrutné tyči stabilizátoru na svém jednom konci a na druhém konci k těhlici (zavěšení kola), ke které je také připevněný tlumič (náprava typu Mac-Pherson).



Obr. 9 - Znáznornění systému řízených stabilizátorů Porsche – PDCC (8)

Jako dalšího představitele systému elektronicky řízených stabilizátorů uvádím řešení od firmy BMW, které se jmenuje ARS (Active Roll Stabilization) a je součástí balíku Dynamic Drive. Tento systém je poměrně zajímavý kvůli použitému aktuátoru. Tyč stabilizátoru se skládá ze dvou polovin, které jsou uprostřed připevněné právě k onomu zajímavému aktuátoru, kterým je kývavý hydrodynamický motor. Díky soustavě hydraulických ventilů, které jsou napájené čerpadlem, je možné spojitě ovlivňovat tuhost zkrutného stabilizátoru. Výhodou tohoto systému jsou ve srovnání s Porsche PDCC poměrně malé zástavbové rozměry. Schéma systému je uvedeno na Obr. 10 a tyč stabilizátoru se zmíněným aktuátorem pak na Obr. 11.



Obr. 10 - Schéma systému BMW ARS (Active Roll Stabilization)



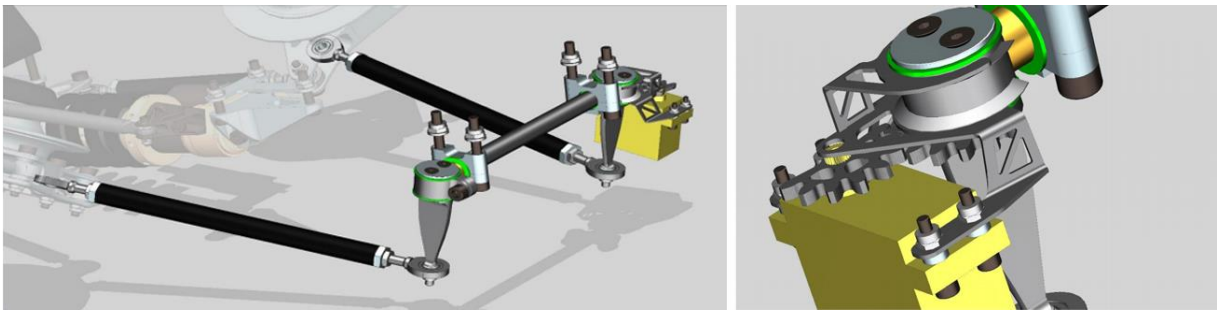
Obr. 11 - Tyč zkrutného stabilizátoru s hydraulickým aktuátorem pro systém BMW ARS

Uvedené systémy jsou pouhým zrnkem písku v kompletním výčtu podobných systémů. Podobné systémy nabízí například:

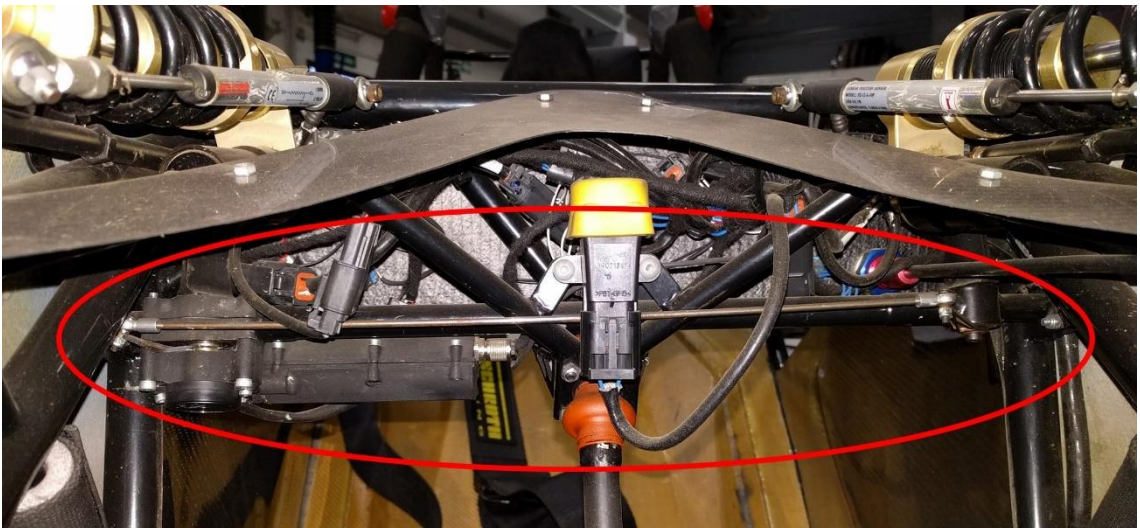
- **Mercedes-Benz – Active Curve System** – Systém velice podobný BMW ARS
- **Range Rover – Dynamic Response** – Systém je taktéž podobný BMW ARS. U terénního vozidla jako je Range Rover se zde projevuje obrovská výhoda v možnosti kompletního odpojení stabilizátoru, a tak umožnění vyššího zkřížení náprav.
- **Toyota – Kinetic Dynamic Suspension System** – Umožňuje opět odpojení stabilizátoru při jízdě v terénu. Zajímavostí je, že funguje pouze s mechanickou vazbou bez jakéhokoli elektronického systému.
- Atd.

3.5 Ukázky realizace ve Formula SAE®

Tým CTU CarTech nebyl první, kdo se o nasazení elektronicky nastavitelných zkrutných stabilizátorů pokusil. Volná pravidla soutěže umožňují nasazení rozličných řešení a některá z nich jsou vidět na Obr. 12, Obr. 13 a Obr. 14. Obecně se dá říci, že týmy používají systémy se servomotory, které se obvykle používají v rádiem řízených modelech a systémy s elektromotory a převodovkami různých typů. V případě použití systému se zkrutnou tyčí a dvěma šavlemi, kterými se otáčí pro změnu tuhosti, se také nedá paušalizovat, zdali se otáčí oběma šavlemi, či jen jednou.



Obr. 12 - Ukázka návrhu elektronicky nastavitelných zkrutných stabilizátorů v FSAE - Rennteam Uni Stuttgart - F0711-11



Obr. 13 - Ukázka realizace elektronicky nastavitelných zkrutných stabilizátorů - FS Team Tallinn



Obr. 14 - Ukázka realizace elektronicky nastavitelných zkrutných stabilizátorů - Rennteam Uni Stuttgart - F0711-9

4 Cíle práce

Cílem práce je vytvoření funkčního systému elektronického nastavování zkrutných stabilizátorů, který bude použit v reálných podmínkách závodů Formula Student SAE na voze FS.09 týmu CTU CarTech. K vytvoření funkčního systému je také nutné určit okrajové podmínky a požadavky. Součástí tohoto projektu a také diplomové práce, je rešerše existujících řešení, rešerše aktuátorů, sensorického vybavení a poté i výběr optimální varianty snímání a polohování. Dále je nutné navrhnout mechanismus polohování zkrutných stabilizátorů, vytvořit elektronické jednotky, které budou pohybovat stabilizátory a také vymyslet způsob, kterým bude možné za jízdy nastavovat požadovanou zkrutnou tuhost nebo jinak řečeno vymyslet rozhraní řidič – stroj. Součástí jednotky (jednotek) by samozřejmě měl být i příslušný řídicí firmware, který zajistí požadovanou a spolehlivou funkci celého systému. Cílem práce je také validace navržených subsystémů a testování celého systému v reálných podmínkách.

4.1 Motivace návrhu systému

Formula Student SAE je inženýrská soutěž s velice benevolentními pravidly. Použití elektronických pomocníků zde není téměř vůbec omezeno a je možné na rozdíl od např. Formule 1 použití prvků pro aktivní řízení systému náprav. Jeden z prvků, který velice významně ovlivňuje jízdní vlastnosti jsou právě zkrutné stabilizátory, a jejich alespoň semiaktivní řízení může v mnoha ohledech dopomoci k lepším jízdním vlastnostem. Zároveň je možné řízením stabilizátorů lépe pracovat s teplotou a tlakem pneumatik, což se jeví jako velice výhodné kvůli charakteru královské disciplíny závodů studentských formulí – disciplíně Endurance, závodu na technických okruzích na celkových 22 kilometrů, s výměnou jezdců v polovině závodu. Protože během tohoto závodu není možné provádět jakékoli úpravy na voze (a to ani měnit tlak v pneumatikách), není možné pneumatiky předehřívát na provozní teplotu, bývá nastavení náprav a tlaku v pneumatikách vždy trochu kompromisem mezi nastavením pro rychlé zahřátí pneumatik a nastavením pro optimální jízdní vlastnosti při ideální provozní teplotě pneumatik. Díky nastavitelným stabilizátorům je možné za jízdy vůz částečně přenastavit, a tak vozidlo mít nastavené od počátku jízdy pro rychlé zahřívání pneumatik a v průběhu jízdy

vozidlo přenastavit pro optimální vyvážení přetáčivosti a nedotáčivosti. Vzhledem k tomu, že se v polovině závodu mění piloti formule a každý pilot může mít trochu jiný jízdní styl, je také možné díky elektronickému nastavování stabilizátorů formuli přizpůsobit tomuto jízdnímu stylu. Nemalým přínosem je také zrychlení procesu nastavování.

4.2 Specifika návrhu v týmu CTU CarTech

Tým CTU CarTech je ve světě Formula Student SAE se svými 9 vozy již poměrně tradiční tým, nicméně pořád se jedná o poměrně malý tým, avšak s velkými ambicemi. Pro udržení se na špičce celosvětové konkurence zhruba 600 týmů je nutné každý rok vynaložit nemalé týmové úsilí. Díky velice malému počtu členů se bohužel často stává, že jeden člen má na starosti mnoho součástí vozu. Zkušenosti z let minulých ukázaly, že je lepší mít na voze alespoň relativně sofistikovanou součást, která opravdu funguje, než součást, která se intenzivně vyvíjí a pak na voze vůbec není, protože k její výrobě nebylo dost času nebo dostatek lidských zdrojů. Analogií k filozofii týmu by mohly být poučky týkající se defenzivního programování – co se může rozbit, rozbije se. Proto se jednotlivé podskupiny už při počátečním konceptuálním návrhu snaží mít reálné, dosažitelné cíle, které se později opravdu realizují a nasadí v závodě. Touto filozofií jsem se rozhodl řídit i při konceptuálním návrhu a realizaci systému, kterým se tato práce zabývá.

Protože vospělý vůz soutěže Formula Student SAE váží obvykle pod 200 kg a jeho minimální hmotnost není pravidly omezena, je důležité zmínit i obecný fakt, který ovlivňuje veškeré návrhy řešení studentských formulí, a to přísný požadavek na co nejnižší hmotnost všech součástí. Tento fakt výrazně ovlivňuje i navržený způsob řešení, kterým se zabývám dále v této práci.

5 Mechanický návrh polohování stabilizátorů

Návrh systému odpružení náprav je každým rokem v týmu CTU CarTech práce pro skupinu „Suspension“. Součástí náprav jsou v případě všech dosavadních vozů týmu i zkrutné stabilizátory. Jak jsem již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, stabilizátor je velice důležitý prvek odpružení, který se významně podílí na jízdních vlastnostech nového vozu. Kinematika a dynamika nápravy jsou poměrně citlivé systémy a vždy by měly být navrhovány jako celek, tudíž myšlenka na separátní návrh stabilizátorů, které by se později pouze připojily do sestavy odpružení, nepřipadala v úvahu. Celý návrh systému tedy probíhal v úzké spolupráci se skupinou „Suspension“ a mým úkolem v něm byla hlavně konstrukce systému polohování. V počátcích návrhu jsem měl samozřejmě možnost zasahovat do konceptu systému a ovlivnit tak výsledné řešení. Celý mechanismus má sloužit spíše k finálnímu doladění za jízdy, tudíž není nutné nastavování z nejměkčí možné varianty po nejtvrděší a je tedy v případě použití dvou nastavitelných šavlí, použití elektrického nastavení pouze pro jednu z nich.

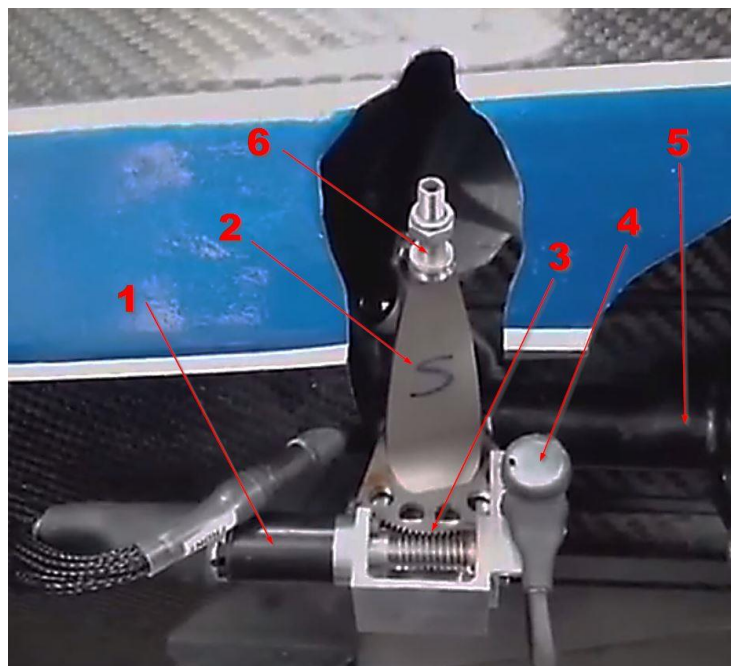
Požadavky na konstrukci:

- **Minimalizace hmotnosti** – celý systém maximálně 100 g na nápravu
- **Plug & Play modul** – modul nastavování by mělo být možné jednoduše odmontovat a umožnit používání stabilizátorů bez elektronického nastavování.
- **Minimální zástavbové rozměry** – především u zadní nápravy vozu FS.09 je opravdu málo místa, s kterým bylo nutné šetřit a vejít se do definovaných obálek.
- **Samosvornost** – toto nebyla podmínka nutná, nicméně zabraňuje vzniku větších problémů při závadě na systému polohování, tudíž podmínka přínosná.
- **Možnost polohování za jakýchkoliv jízdních podmínek** – polohování by mělo být možné za jízdy, s žádnou nebo minimální změnou rychlosti.
- **Vyrobitelná konstrukce** – navržená konstrukce by měla být co možná nejjednodušší a nejlevněji vyrobitelná (ideálně týmem samotným) – samozřejmě při splnění požadavků výše.

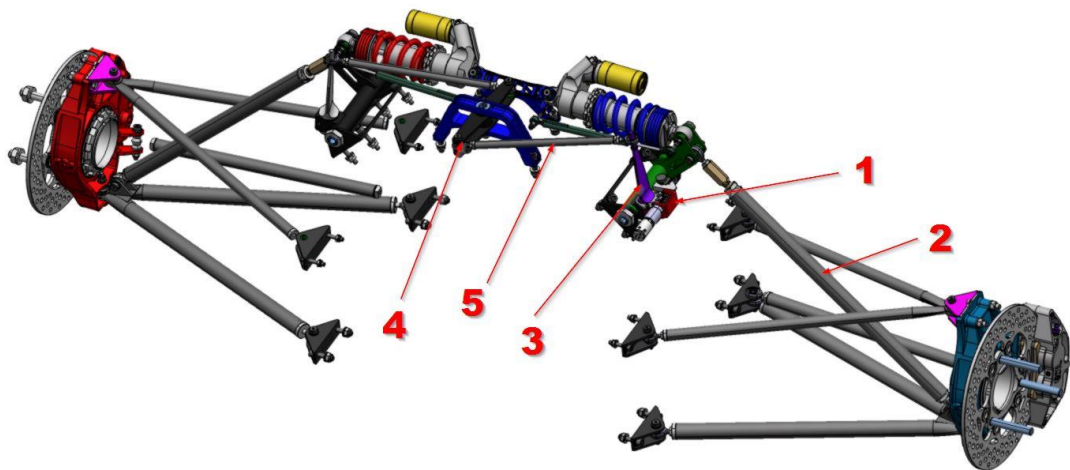
5.1 Systémy na předchozích vozech CTU CarTech

První verze systémů natáčení stabilizátorů byla použita na voze FS.08 v sezóně 2016. Systém je k vidění na Obr. 15. Skládá se z elektromotoru s vícestupňovou planetovou převodovkou - 1, titanové šavle stabilizátoru - 2, šnekové převodovky - 3, rotačního potenciometru - 4. Místo označené v obrázku číslem 5 je potom vahadlo odpružení, které přenáší síly z tyče push-rod do tlumiče a také do systému stabilizátorů. K bodu 6 je potom připevněna tyč, která přenáší síly do odpružení na druhé straně nápravy. Deformačním členem neboli prvkem, který určuje tuhost stabilizátorů, je titanová šavle. Jejím otáčením v rozsahu 0°- 90° (nejvyšší tuhost) lze měnit tuhost celého systému.

Systém se na voze vcelku úspěšně osvědčil. Jeho největším záporem byla zpětná vazba potenciometrem. Problém byl v potenciometru samotném a jeho mechanické odolnosti (začínalo se s obyčejným audio potenciometrem, končilo průmyslovým potenciometrem s krytím), ale hlavně v převodu, který byl mezi velkým kolem na šavli a hřídelí potenciometru. Vůle v tomto ozubení způsobovaly poměrně značné nepřesnosti systému. Tento převod způsoboval také problémy při kalibraci systému a mimo jiné i nutnost kalibrace při každé montáži a demontáži.



Obr. 15 - Systém polohování šavle stabilizátoru na voze FS.08 týmu CTU CarTech



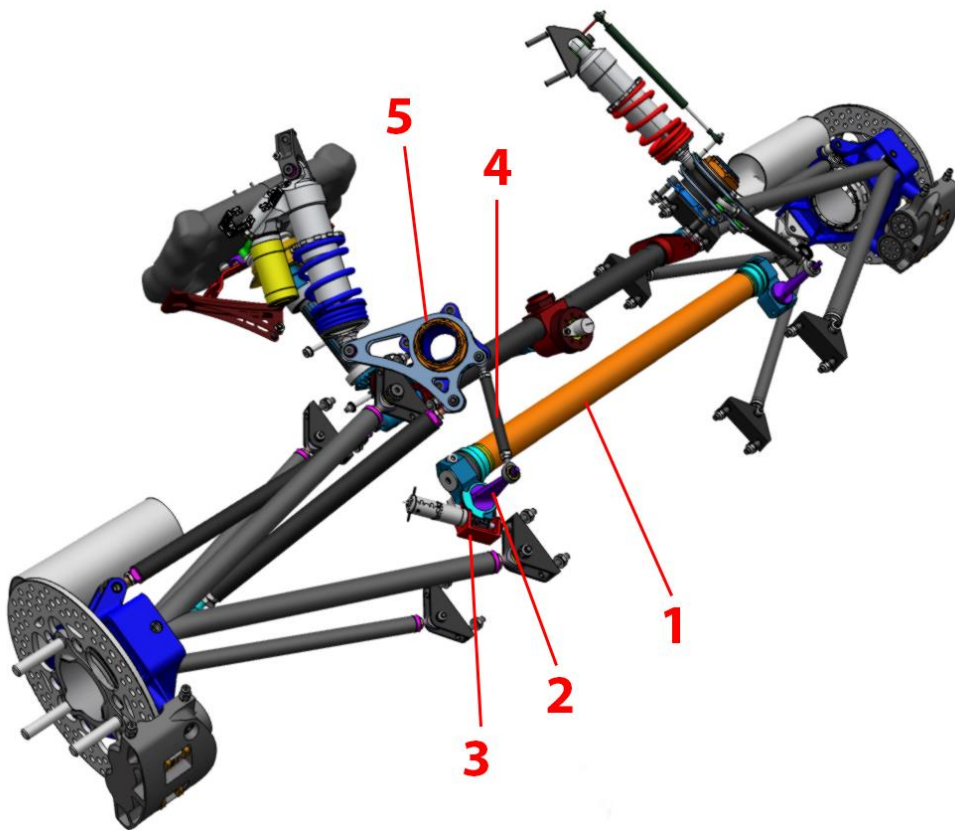
Obr. 16 - 3D model přední nápravy vozu FS.08 – Systém nastavování - 1, tyč push-rod - 2, nastavitelná šavle stabilizátoru - 3, „kolotoč“ (propojení levé a pravé strany) - 4, spojovací tyč - 5 (2)

5.2 Mechanismus polohování pro FS.09

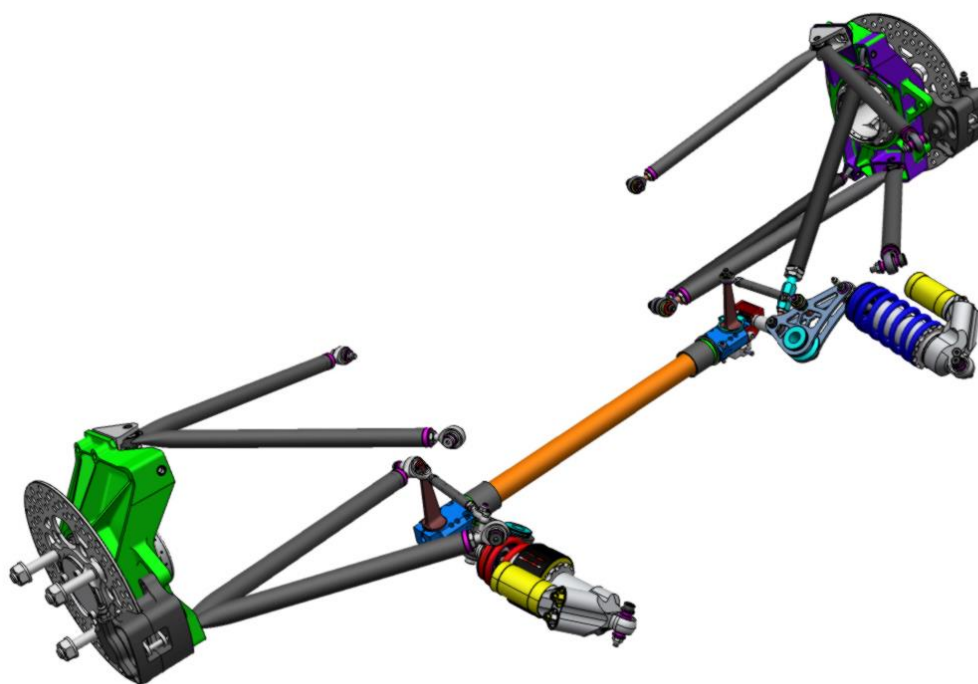
V tomto odstavci bude popsán návrh mechanismu polohování pro vůz FS.09. Systém odpružení vozu se od základů změnil, a i koncepce stabilizátorů prošla velkou evolucí, proto bylo nutné celý mechanismus polohování navrhnout znova. Začátkem tvorby systému byl tedy opět konceptuální návrh, kde však byl uvažován již osvědčený systém z vozu FS.08.

5.2.1 Odpružení FS.09

Na voze FS.09 bylo na rozdíl od předchozího FS.08 použito odpružení náprav typu Pull-rod. Jedná se o systém, kde jsou síly z kolové skupiny přenášeny přes tažnou tyč a vahadlo do odpružení. Vahadlo zároveň přenáší síly do systému stabilizátorů. Odpružení vozu FS.09 je ilustrované na 3D modelu na Obr. 17. a Obr. 18.



Obr. 17 - 3D model přední nápravy vozu FS.09 týmu CTU CarTech s vyznačením jednotlivých prvků stabilizátoru - Zkrutná tyč - 1, šavle - 2, Modul nastavování - 3, spojovací tyč - 4, vahadlo - 5 (2)



Obr. 18 - 3D model zadní nápravy vozu FS.09 týmu CTU CarTech (2)

5.2.2 Systém stabilizátorů vozu FS.09

Systém stabilizátorů se na voze FS.09 skládá ze zkrutné tyče a šavlí stabilizátoru (viz. Obr. 17 a Obr. 18). Oba tyto prvky jsou navrženy jako elastické členy o definované tuhosti (zkrutná tyč má konstantní tuhost, šavle stabilizátorů jsou nastavitelné – jedna elektronicky, jedna manuálně). Zde je tedy rozdíl oproti vozu FS.08, kde jedinými elastickými prvky byly právě šavle stabilizátorů. V Tab. 1 je možné vidět hodnoty tuhosti předního stabilizátoru v závislosti na natočení šavlí při konstantní hodnotě tuhosti zkrutné tyče a v Tab. 2 potom procentuální rozložení vztažené k referenční návrhové hodnotě natočení šavlí 45° a 45° . Tabulky hodnot pro zadní nápravu zde neuvádím, ale ilustrují situaci obdobně.

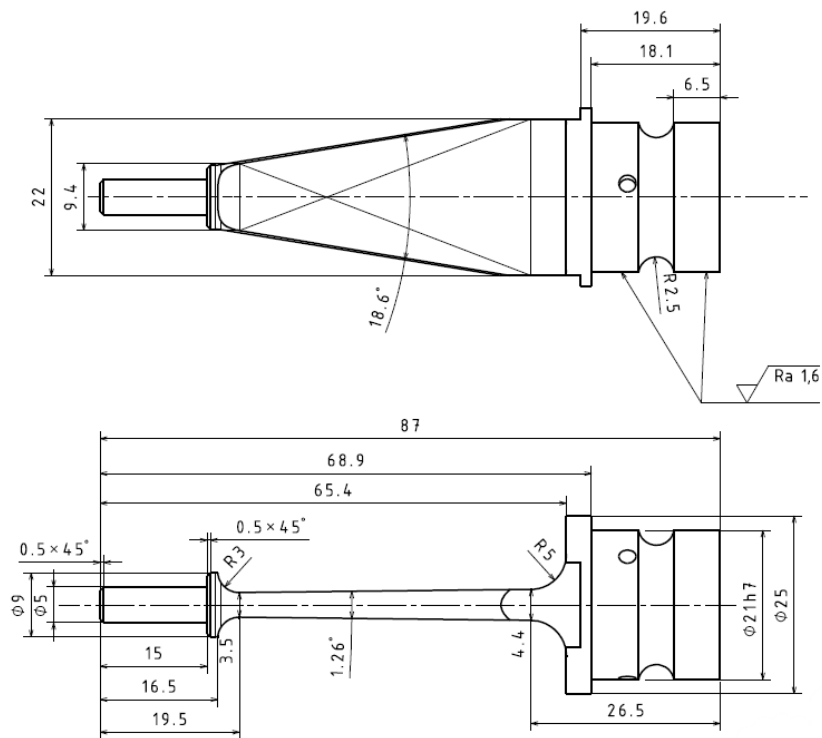
TYČ JE VŽDY STEJNÁ		LEVÁ PŘEDNÍ ŠAVLE							
	°	0	10	20	30	45	60	75	90
PŘAVÁ PŘEDNÍ ŠAVLE	0	4,4	4,5	4,7	4,9	5,3	5,7	6,0	6,1
	10	4,5	4,7	4,9	5,2	5,5	6,0	6,3	6,5
	20	4,7	4,9	5,0	5,3	5,7	6,2	6,6	6,8
	30	4,9	5,2	5,3	5,7	6,1	6,7	7,1	7,3
	45	5,3	5,5	5,7	6,1	6,7	7,3	7,8	8,1
	60	5,7	6,0	6,2	6,7	7,3	8,2	8,7	9,1
	75	6,0	6,3	6,6	7,1	7,8	8,7	9,3	9,8
	90	6,1	6,5	6,8	7,3	8,1	9,1	9,8	10,3

Tab. 1 - Rozložení tuhosti systému stabilizátorů [Nm/°], v závislosti na natočení šavlí, hodnoty jsou vztažené ke klopení vozu ϕ [°]. (2)

TYČ JE VŽDY STEJNÁ		LEVÁ PŘEDNÍ ŠAVLE							
	°	0	10	20	30	45	60	75	90
PŘAVÁ PŘEDNÍ ŠAVLE	0	-34%	-32%	-30%	-26%	-21%	-15%	-11%	-8%
	10	-32%	-29%	-27%	-23%	-17%	-10%	-6%	-3%
	20	-30%	-27%	-24%	-20%	-14%	-6%	-2%	1%
	30	-26%	-23%	-20%	-15%	-8%	0%	6%	9%
	45	-21%	-17%	-14%	-8%	0%	10%	17%	21%
	60	-15%	-10%	-6%	0%	10%	22%	31%	36%
	75	-11%	-6%	-2%	6%	17%	31%	40%	46%
	90	-8%	-3%	1%	9%	21%	36%	46%	54%

Tab. 2 - Procentuální rozložení tuhosti v závislosti na natočení šavlí. Vztaženo k referenční návrhové hodnotě natočení šavlí 45° a 45°. (2)

Z uvedených tabulek se může zdát, že změna, které může být dosaženo pootočením pouze jedné šavle stabilizátoru je poměrně malá, ale jak již bylo uvedeno v úvodu této kapitoly, systém má primárně sloužit k finálnímu doladění jízdních vlastností pomocí stabilizátorů.



Obr. 19 - Výřez výrobního výkresu šavle předního stabilizátoru

5.2.3 Aktuace

V kapitole 3.4 bylo popsáno několik systémů řízených stabilizátorů používaných v osobních automobilech. Jednalo se většinou o systémy, kde akčním médiem byl tlakový olej, tj. hydraulické systémy. Jelikož žádná z formulí týmu CTU CarTech zdroj tlakového oleje neobsahuje a nasazení kompresoru by neúměrně zvýšilo hmotnost, použití hydrauliky nepřipadalo v úvahu. Aktuátory, které byly tedy pro řešení polohování šavlí uvažovány, byly hnány elektrickým proudem. Opět byla revidována aplikovaná řešení z vozu FS.08, a proto bylo vhodné se zamyslet nad vhodnější variantou. Stejně jako v případě FS.08 bylo uvažováno použití servomotorů používaných v rádiem řízených modelech, které jsou poměrně malé, lehké, výkonné a snadno říditelné. Přípustné zvažované varianty jsou uvedeny v Tab. 3.

Aktuátor	Způsob řízení	Hmotnost	Výkon (moment)	Klady	Zápory
DC Elektromotor + šneková převodovka	Řadič + SW	25 - 50* g	Dle použité převodovky, nižší než podobně velký BLDC se stejnou převodovkou, teoreticky neomezený	Dodání na sponzoring, samosvorný, zkušenosti s aplikací	Malý motor + velký převod = nízká rychlost
BLDC Elektromotor + šneková převodovka	Řadič + SW, složitější DPS i SW než DC	25 - 50* g	Dle použité převodovky, teoreticky neomezený	Dodání na sponzoring, samosvorný	Malý motor + velký převod = nízká rychlost, relativně složitě DPS i SW
RC Servomotor	Pouze výstup PWM, velice snadné SW i DPS	65 - 90 g	Dle použitého typu, až 3 Nm	Snadné řízení, není nutná zpětná vazba, rychlost	Nutnost nákupu, není samosvorné, "až moc snadná realizace"

Tab. 3 - Uvažované varianty aktuátoru. *maximální hmotnost uvažovaných variantám která splňovala požadavky na potřebný moment.

Z výše zmíněných variant jsem hned zpočátku vyřadil řešení s BLDC motorem kvůli poměrně složitému řízení a návrhu DPS (byl jsem ovlivněn fakty zmíněnými v kapitole 4.2). Řešení se servem nebo DC motorem se mi jeví srovnatelné. Nicméně řešení použité na FS.08 nedosáhlo svého plného potenciálu (problémy se zpětnou vazbou, problémy SW, problémy elektronické jednotky) a varianta se servem se mi jeví až příliš jednoduchá (detailněji rozebráno v kapitole 6.1). Rozhodl jsem se tedy dále pracovat na konceptu již uplatněném na FS.08 a vyladit ho.

5.2.4 Převodovka

Navržený systém polohování se tedy skládá z komutátorového stejnosměrného motoru v sestavě s planetovou převodovkou. Na výstupní hřídel této převodovky je připojen šnek šnekové převodovky, který již otáčí šnekovým kolem, a tedy šavli stabilizátoru. Šnek byl navržen tak, aby mohl být jednoduše vyroben závitovým očkem M8x1,25. Osová vzdálenost šneku a kola byla určena ze zástavbových rozměrů, a to na 24 mm. Převodový poměr je $i = 105$. Na jednu otáčku šneku se tedy šnekové kolo pootočí o $3,52^\circ$.

5.2.5 Určení potřebného momentu

Celý mechanismus je poměrně značně ovlivněn třením v šnekové převodovce a taktéž uložení šavle stabilizátoru. Další tření vzniká v kulovém kloubu na konci šavle. Toto tření je z důvodu použití kloubků pro motorsport (s těsným

uložením pro omezení vůlí) poměrně značné. Analytické určení potřebného momentu bylo tedy téměř nemožné z důvodů velkého množství neznámých. Bylo tedy rozhodnuto potřebný moment motoru určit z experimentu na prototypu mechanismu. Potřebný moment byl určen měřením síly na páce, která vyvozovala moment na šnek šnekového převodu v různých polohách mechanismu a s různými zatěžovacími silami. Maximální moment, který byl pozorován byl zhruba 0,2 Nm.

6 Elektrotechnický návrh

V této kapitole budou stručně popsány jednotlivé uvažované aktuátory, a to hlavně z pohledu jejich řízení. Dále bude vysvětleno, proč bylo použito sběrnice CAN a tato sběrnice bude stručně popsána. Dále budou rozebrány možnosti snímání polohy šavlí stabilizátorů.

6.1 Aktuátory ve vztahu k jejich řízení

6.1.1 Serva

Výhodou servomotorů pro RC modelářství je jejich velice snadná říditelnost prostřednictvím modulace PWM. Zároveň není nutné použití zpětné vazby, protože žádaná poloha aktuátoru je definovaná přímo délkou pulzu modulace PWM. Dosahují taktéž dostatečně vysokého momentu (až 4 Nm při použití serva tzv. standardní velikosti).

Jejich nevýhodou je poměrně velká spotřeba proudu (až 3A), a to i při pouhém udržování polohy, které by při jejich použití bylo u systému polohování stabilizátorů nutné. Rozsah polohování bývá zpravidla 180° a rychlost polohování, která se většinou udává v jednotkách s/60°, bývá u serv s velkým momentem cca 0,2 – 0,4 s/60°. Tato rychlost je značně závislá na zatížení.

6.1.2 Elektromotory

Bylo zamýšleno použití komutátorových stejnosměrných motorů (DC) nebo bezkartáčových stejnosměrných motorů (BLDC). Rozdíly v jejich řízení jsou poměrně značné. Zatímco DC motor stačí v podstatě pouze připojit k napájení a bude se točit, BLDC motor již vyžaduje poměrně sofistikované pulzní řízení.

Komutátorový DC motor:

- **Potřebný hardware:** teoreticky stačí relé, obvykle se používá řadič s dvojitým H-můstkem a obvykle s minimálně 4 logickými vstupy řadiče
- **Řízení:** směr pomocí kombinace binárních vstupů řadiče, rychlost pomocí PWM modulace na binární vstupy řadiče
- **Klady:** relativně jednoduchá realizace, nižší cena HW i motorů
- **Zápory:** nižší výkon a účinnost (která však při této aplikaci není relevantní)

Bezkartáčový BLDC motor:

- **Potřebný hardware:** řadič je zde nutný. Výrazně složitější zapojení na DPS
- **Řízení:** Řízení prostřednictvím 3 časově synchronizovaných obdélníkových pulzů + další podpůrné signály
- **Nároky na SW:** nutnost použití komplexních synchronizovaných časovačů
- **Klady:** Vyšší účinnost a výkon
- **Zápory:** Výrazně složitější realizace, oproti DC motoru nepřináší při této aplikaci žádnou relevantní výhodu

6.2 Vybraná varianta

Použití serv se tedy jeví poměrně výhodné. Bylo však rozhodnuto o použití motorů a převodovky, a to především z důvodu samosvornosti. Díky samosvornosti je systém bezpečnější a nemůže se stát, že by v případě závady docházelo k samovolnému pootáčení šavle, což se může u systému se servomotory například při závadě na napájení stát. Zároveň, pokud je od serva záměrně odpojeno napájení (tj. systém záměrně vypnut), může taktéž dojít k samovolnému pootáčení. Řešení s motory a zpětnou vazbou bylo zároveň větší výzvou z inženýrského pohledu, a to jak z hlediska nároků na hardware, tak z hlediska programové implementace.

6.2.1 Vybraná kombinace motoru a převodovky

Výběr vhodné kombinace motoru a převodovky byl intenzivně konzultován také s dodavatelem motorů Maxon. Zde bylo nutné udělat kompromis mezi výkonem samotného motoru bez převodovky a jeho velikosti. Bylo by možné vybrat větší motor s převodovkou s nižším převodovým poměrem a získat tak vyšší rychlost při stejném maximálním momentu na výstupní hřídeli sestavy. Zároveň by ale vzrostl proud protékající motorem a hmotnost sestavy. Nakonec byl tedy vybrán komutátorový motor Maxon z programu A-max s průměrem 16 mm (obj. číslo: 110074) a planetovou třístupňovou

převodovkou s keramickými převody s převodovým poměrem $i = 157$ (obj. číslo 401954). Níže na Obr. 20 a Obr. 21 uvádím vybrané parametry pohonu. Na Obr. 22 je potom k vidění ilustrace řezu použité převodovky. Maximální moment na výstupní hřídeli převodovky je 0,4 Nm a nominální otáčky vybraného pohonu jsou potom 51 ot/min.

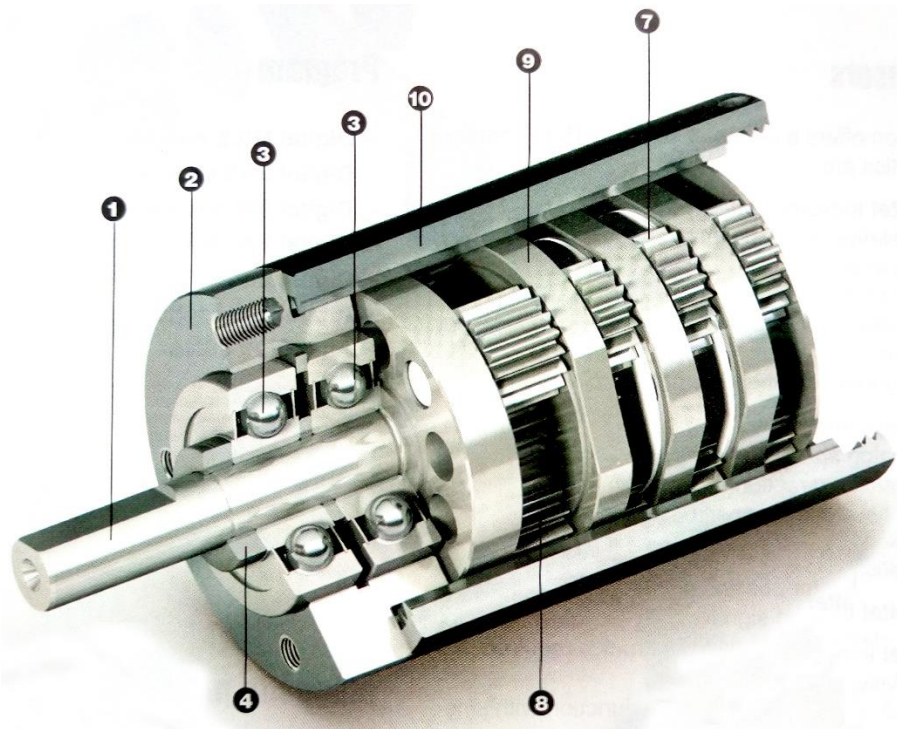
Values at nominal voltage	
Nominal voltage	9 V
No load speed	11500 rpm
No load current	54.6 mA
Nominal speed	5510 rpm
Nominal torque (max. continuous torque)	2.36 mNm
Nominal current (max. continuous current)	0.394 A
Stall torque	4.84 mNm
Stall current	0.704 A
Max. efficiency	52 %

Obr. 20 - Parametry vybraného motoru Maxon A-max 16

Gearhead Data	
Reduction	157 : 1
Absolute reduction	19683/125
Max. motor shaft diameter	1.5 mm
Number of stages	3
Max. continuous torque	0.4 Nm
Max. intermittent torque	0.6 Nm
Direction of rotation, drive to output	=
Max. efficiency	73 %
Average backlash no load	2 °
Mass inertia	0.04 gcm ²
Gearhead length (L1)	26.8 mm
Max. transmittable power (continuous)	3.9 W
Max. transmittable power (intermittent)	4.9 W

Technical Data	
Radial play	max. 0.08 mm, 6 mm from flange
Axial play	0 - 0.05 mm
Max. radial load	60 N, 6 mm from flange
Max. axial load (dynamic)	12 N
Max. force for press fits	100 N
Max. continuous input speed	12000 rpm
Max. intermittent input speed	12000 rpm
Recommended temperature range	-40...+100 °C
Number of autoclave cycles	0

Obr. 21 - Parametry vybrané převodovky Maxon GP 16 C



Obr. 22 - Ilustrace planetové převodovky, připojené k DC motoru. 1 - výstupní hřídel, 2 - montážní příruba, 3 - ložisko výstupní hřídele, 4 - axiální pojištění, 7 - satelit, 8 - planetové kolo, 9 - unašeč, 10 - korunové kolo

6.3 Snímání polohy „šavle“

V případě použití výše zmíněného elektromotoru je nutné k systému připojit i snímač, který bude zajišťovat zpětnou vazbu regulační smyčky. Uvažované možnosti s popsanými klady a zápory konkrétního snímače shrnuje

Uhlíkový audio potenciometr:

- **Princip:** Vodivá odporová cesta
- **Přesnost:** Teoreticky nekonečně velká
- **Opakovatelnost:** Odpor je proměnlivý s opotřebením dráhy
- **Cena [EUR]:** 1
- **Klady:** Cena, analogový výstup
- **Zápory:** Odolnost vnějším vlivům, opakovatelnost měření

Průmyslový potenciometr:

- **Princip:** Vodivá odporová cesta
- **Přesnost:** Teoreticky nekonečně velká
- **Opakovatelnost:** Odpor je proměnlivý s opotřebením dráhy (zde je definován počet cyklů do degradace dráhy)
- **Cena [EUR]:** 10-20
- **Klady:** Krytí IP67, cena stále přijatelná, analogový výstup
- **Zápory:** Opakovatelnost měření

Inkrementální snímač na motoru:

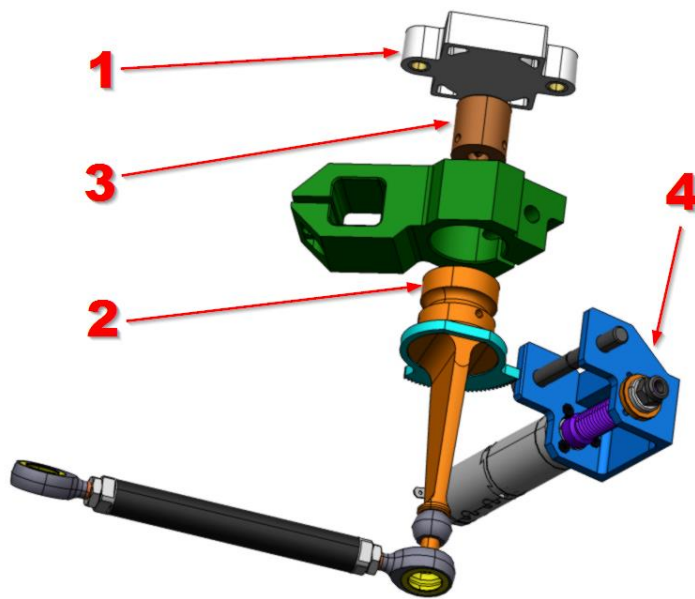
- **Princip:** Indukční nebo Hall
- **Přesnost:** Až 4096 kroků na otáčku pohonu
- **Opakovatelnost:** S vhodným SW algoritmem a kalibrací při sepnutí systému do 0,1°
- **Cena [EUR]:** 60
- **Klady:** Přesnost, opakovatelnost, může být součástí těla pohonu, IP67, minimální zástavbové rozměry
- **Zápory:** Nutnost kalibrace při sepnutí systému nebo ukládání poslední známé polohy, nesnímá přímo polohu šavle

Bezkontaktní snímač polohy s analogovým výstupem:

- **Princip:** 2x snímač Hall + magnet na měřeném členu
- **Přesnost:** 12 bit na 360°
- **Opakovatelnost:** do 0,1°
- **Cena:** 45
- **Klady:** Přímé měření polohy šavlí, přesnost, opakovatelnost, IP68, analogový výstup, ratiometrický analogový výstup (0,5 - 4,5V)
- **Zápory:** Nepatrně větší rozměry

6.3.1 Optimální varianta snímače

Jako optimální snímač byl vybrán bezkontaktní snímač polohy s analogovým výstupem. Jeho značnou výhodou je přesnost a opakovatelnost a zároveň velice snadná implementace. Dále je výhodné, že je možné měřit přímo polohu šavle bez nutnosti převodů. Rozměry a tvary snímače přímo svádí k jeho umístění pod osu šavle, a umístění držáku s magnetem do válcové díry na spodní straně šavle (princip je znázorněn na Obr. 23. Další výhodou je taktéž ratiometrický výstup snímače, který může umožnit snadné diagnostikování závad snímače (pokud je změřeno napětí menší než 0,5V nebo větší než 4,5V může být vyhodnocen chybový stav snímače). Konkrétní vybraný typ snímače je od výrobce Contelec s označením VERT-X 31E6A736-221-402. Datový list je přílohou této diplomové práce.



Obr. 23 - Znázornění uchycení snímače natočení šavle včetně magnetického aktuátoru - 1 - Snímač, 2 - Šavle, 3 - Magnetický aktuátor snímače polohy, 4 - Modul polohování šavle s motorem

6.4 CAN

Důvodem k nasazení některé standardizované sběrnice byl plánovaný nárůst počtu ovládacích prvků na volantů a také potřeba záznamu interakce pilota s vozidlem (stisknutí pádel řazení atp.) palubním dataloggerem. Použitý datalogger umožňuje komunikaci po sběrnici RS-232 nebo sběrnici CAN ve

verzi 2.0b. Bylo rozhodnuto pro použití sběrnice CAN a to zejména kvůli její robustnosti. Zároveň je to sběrnice, která je hojně využívána v automobilovém průmyslu a je časté a obvyklé, že mnoho jednotek, případně i chytrých snímačů (snímačů se sběrnici – zpravidla CAN), používá právě sběrnici CAN ve standardu 2.0b. Z tohoto důvodu se jevílo jako výhodné pokusit se implementovat tuto sběrnici a přinést tak nové znalosti a zkušenosti do týmu CTU CarTech. Bližší informace ke standardu a principu fungování sběrnice jsou přístupné ve velkém množství zdrojů (literatura, internet) a dle mého názoru není nutné je zde detailněji specifikovat. V následujících kapitolách práce bude popsána implementace hardwarového i softwarového vybavení sběrnice a taktéž analýza komunikace na navrženém řešení.

7 Realizace elektronických jednotek

7.1 Použitý software

7.1.1 Software pro návrh DPS

Jako software pro návrh desek plošných spojů (dále jen „DPS“) byl zvolen program Altium Designer ve verzi 14.3.9. Pro jeho použití bylo rozhodnuto především kvůli velice dobré uživatelské přívětivosti a komplexním funkcím v oblasti návrhu DPS. Tento software umožňuje mimo obvyklou tvorbu elektrických schémat a samotného návrhu DPS také velice snadné generování seznamů materiálu, tvorbu 3D modelů (které se dále dají použít v týmu CTU CarTech používaném 3D CAD softwaru). Velkou výhodou programu je taktéž velice rozšířená podpora klávesových zkratk a velké množství automatizovaných funkcí.

7.1.2 Vývojové prostředí pro návrh firmware jednotek

Bylo zvoleno vývojové prostředí Keil μ Vision 5 MDK-ARM. V týmu CTU CarTech existuje mnohaleté know-how s tímto vývojovým prostředím a návrhem firmwaru pro procesory STM32-F1. Vzhledem k tomuto faktu a níže popsané tzv. modulární koncepci návrhu se jeho použití jevílo jako velice výhodné a díky tomu se také povedlo ušetřit čas na vývoj firmwaru pro jednotky, týkající se této diplomové práce.

7.2 Modulární koncepce návrhu

Vozy Formule Student FS.08 a taktéž FS.09 týmu CTU CarTech obsahují 5 elektronických řídicích jednotek dle vlastního návrhu. Funkce a popis hardwaru jednotek, které přímo nesouvisí s touto diplomovou prací, zde nebudou detailně uvedeny, nicméně tzv. modulární koncepci návrhu, která byla uplatněna při návrhu všech vlastních jednotek týmu, a tedy i při návrhu jednotek detailněji rozebraných v této práci, se zde pokusím popsat.

7.2.1 Motivace k uplatnění a princip

Vzhledem k relativně velkému počtu jednotek a nedostatku lidských zdrojů pro vývoj elektronických systémů bylo zvažováno, jak celý proces vývoje především hardwaru a firmwaru zrychlit, a tak získat potřebný čas pro testování subsystémů a taktéž celé formule. Funkční požadavky na výstupy jednotlivých jednotek jsou velice podobné. Jednotky obsahují vždy procesor, napájecí obvody (s ochranou proti přepólování) a pak většinou analogové vstupy, logické nízkoproudové výstupy (s možností PWM), logické vysokoproudové výstupy (taktéž s možností PWM), interface pro sběrnici CAN, řadiče pro řízení komutátorových stejnosměrných motorů atp. Ukázalo se tedy, že by bylo výhodné vybudovat něco jako knihovnu hardwarových a softwarových již použitých modulů, a tak celý proces vývoje unifikovat. Tímto by mělo dojít k významnému zrychlení návrhu, jeho zjednodušení, minimalizaci možných chyb, a nakonec také i usnadnění vývoje pro budoucí členy týmu.

7.2.2 Knihovna hardwarových modulů

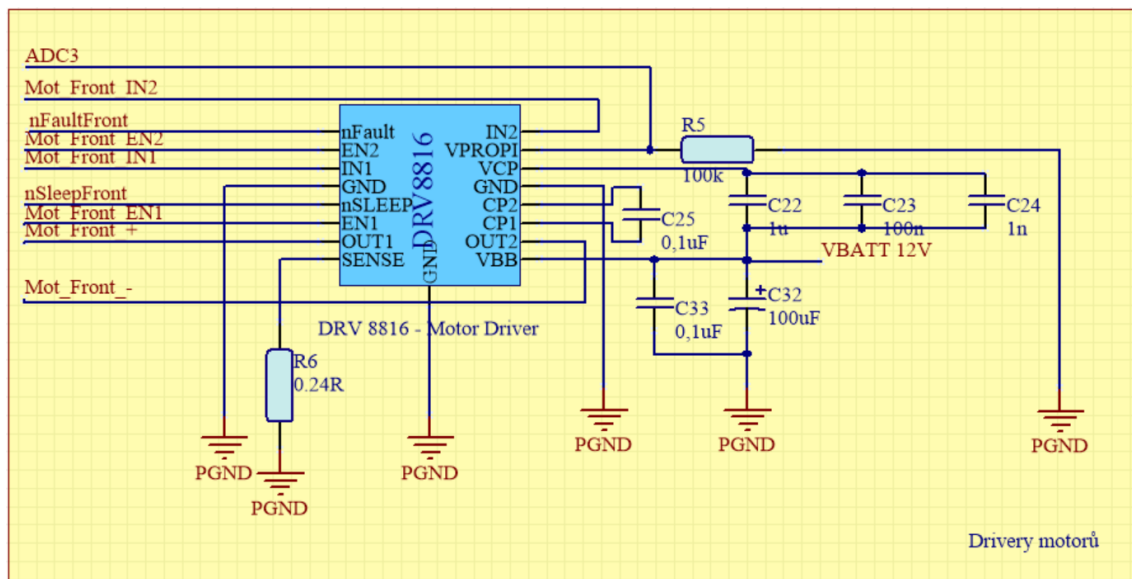
V této podkapitole stručně popíší všechny používané hardwarové moduly z „hardwarové knihovny“, na které se později při detailním popisu jednotek pro ovládání zkrutných stabilizátorů (dále jen jednotka ARB⁷) a jednotky v multifunkčním volantu (dále jen jednotka STEERING⁸) budu odkazovat.

Název modulu	Funkce	Použitý integrovaný obvod
MCU	Výpočetní výkon, ovládání periferií	STM32-F103C6T6
AD 1x VREF 5 V	Analogový vstup pro senzory s napěťovým výstupem 0-5 V, lowpass filtr	Pasivní součástky
AD 1x VREF 3V3	Analogový vstup pro senzory s napěťovým výstupem 0-3,3 V, lowpass filtr	Pasivní součástky
AD 4x VREF 3V3	4x Analogový vstup pro senzory s napěťovým výstupem 0-3,3 V, lowpass filtr,	Pasivní součástky
AD 4x VREF 5 V	4x Analogový vstup pro senzory s napěťovým výstupem 0-5 V, lowpass filtr,	Pasivní součástky
AD 2x VREF 5 V	2x Analogový vstup pro senzory s napěťovým výstupem 0-5 V, lowpass filtr,	Pasivní součástky
AD 2x VREF 3V3	2x Analogový vstup pro senzory s napěťovým výstupem 0-3,3V, lowpass filtr,	Pasivní součástky
Řadič DC motoru	Obousměrné ovládání komutátorového DC motoru (Max. 2,8 A)	DRV8816PWP
Napěťová reference 5	Napájení DPS 5 V	LF50ABDT
Napěťová reference	Napájení DPS 3,3 V + Ochrana proti přepólování	LF33CDT
CAN VIN 5 V	CAN budič s napájecím napětím 5 V	MCP2551
CAN VIN 3V3	CAN budič s napájecím napětím 3,3 V	SN65HVD230D
Logický výstup	Logický výstup max. 540 mA, možnost PWM	BSS670S2L
Logický výstup 2,8A	Logický výstup max. 3,8 A, možnost PWM	IRLL2705PBF
Logický vstup	Logický vstup s pull-down rezistorem	Pasivní součástky
Rotační přepínač 12	Mechanický přepínač s odporovou děličkou, výstup 12 napěťových úrovní	Grayhill Series 56

⁷ ARB – z anglického spojení Anti Roll Bar – přeneseně zkrutný stabilizátor

⁸ STEERING – zatáčení, jednotka byla také takto interně pojmenována

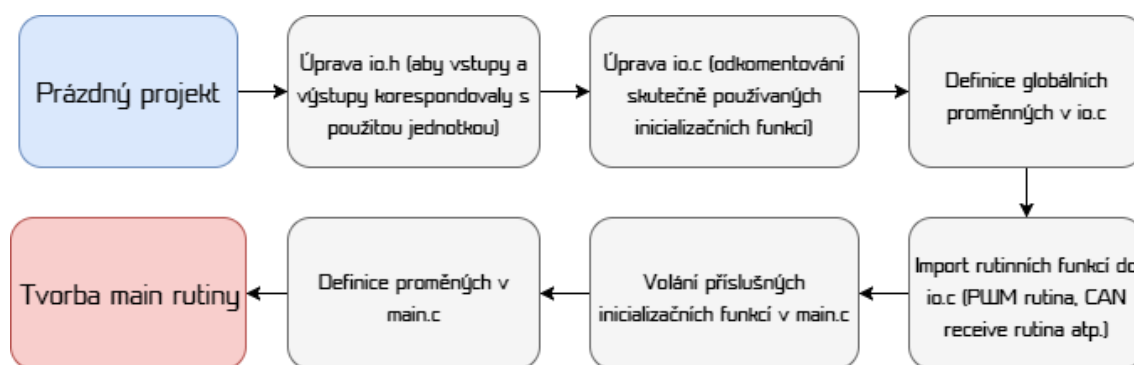
Tab. 4 - Soupis hardwarových používaných hardwarových modulů



Obr. 24 - Příklad HW modulu: zde zobrazen modul - Řadič DC motoru (Driver motoru)

7.2.3 Softwarová knihovna

Spojení softwarová knihovna je trochu zavádějící, protože jsem vyloženě nevytvořil nové knihovny pro ovládání hardwaru, jak by se mohlo na první pohled zdát. Při vývoji firmwaru jsem použil standardní knihovny, které jsou volně dostupné ve vývojovém prostředí Keil μ Vision 5 MDK-ARM. Nicméně jsem za dobu svého působení v týmu CTU CarTech vytvořil relativně velké množství programů a objevil mnoho fungujících částí kódu, které by bylo zbytečné znovu objevovat a testovat při tvorbě firmwaru nových jednotek. Všechny dříve použité projekty (firmwary jednotek) máme také uložené přehledně v cloudovém úložišti, ke kterému mají přístup všichni softwaroví vývojáři. Nejedná se sice o verzovací software (GIT apod.), nicméně i tento relativně malý krok v podobě sdílení firmwarů pomohl rapidně snížit čas potřebný pro vývoj firmwaru. Zároveň jsem vytvořil tzv. prázdný projekt, který obsahuje všechny obvykle používané hardwarové knihovny, je zde dodržena obvykle používaná struktura programu a nainportovány funkční bloky pro inicializaci periférií. Zjednodušený princip tvorby nového firmware z tohoto „prázdného projektu“ je popsán na diagramu níže.

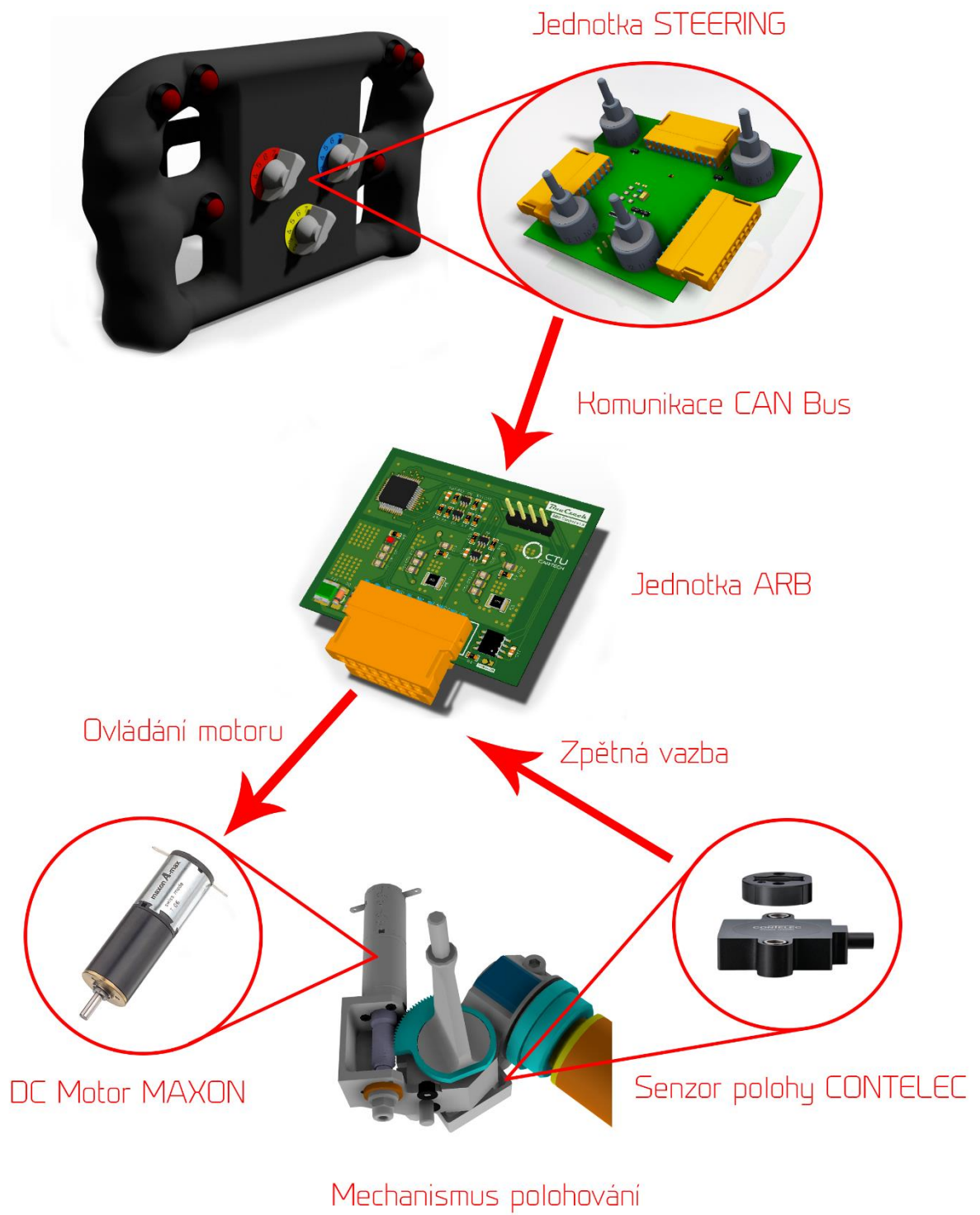


Obr. 25 - Proces tvorby nového firmware z "prázdného projektu"

7.3 Koncept systému pro vůz FS.09

Celý systém je složený primárně z jednotky STEERING, která je umístěna v multifunkčním volantů vozu a jednotky ARB, která je umístěna v boxu pod sedačkou formule spolu s ostatními řídicími jednotkami. Tyto dvě jednotky jsou spolu propojené pouze sběrnici CAN. Jednotka STEERING po této sběrnici posílá informaci o aktuální poloze dvou 12 polohových rotačních přepínačů, kterými se z volantu nastavuje jedna z 12 přednastavených poloh pro přední šavli a jedna z 12 přednastavených poloh pro zadní šavli stabilizátoru. Tato poloha přepínačů je poté firmwarem jednotky ARB převedena již na vnitřní proměnné, které udávají požadovaný úhel natočení šavlí reprezentovaný hodnotou požadovaného analogového napětí výstupu snímače polohy šavlí. Zjednodušeně řečeno, při změně polohy rotačního přepínače jednotka v multifunkčním volantu tedy vyšle informaci o změně polohy, jednotka ARB tuto změnu vyhodnotí a dle požadavků začne otáčet příslušným motorem v odpovídajícím směru a rychlosti, dokud není dosažena cílová poloha. Celý proces je samozřejmě regulovaný (pozdvolné zvyšování rychlosti otáčení šavle v počátku regulace a pozdvolné snižování rychlosti při přibližování se požadované hodnotě natočení).

Systém tedy není vyloženě aktivní a nereaguje na změnu jízdnic stavů formule. K přenastavení stabilizátorů je potřeba zpětná vazba pilota formule, na jejímž základě pilot vyhodnotí jízdnic vlastnosti vozu a stabilizátory si přenastaví dle vlastního uvážení pomocí zmíněných přepínačů na volantu. Proč systém není aktivní, bylo částečně zmíněno v kapitole 4 této práce a dále bude detailněji rozebráno v následujících kapitolách.



Obr. 26 - Koncept systému pro nastavování zkrutných stabilizátorů

7.4 Řídící jednotka ARB

Řídící jednotka ARB má za úkol samotné polohování šavlí stabilizátorů. Jejimi vstupy jsou žádaná poloha, která je reprezentována zprávou CAN z jednotky STEERING a dále dva vstupy analogového napětí (0-5 V) ze snímačů natočení šavlí. Výstupem jsou potom silové výstupy, které ovládají směr a rychlost rotace stejnosměrných komutátorových motorů s převodovkou, které potom dále otáčejí šavlemi stabilizátorů.

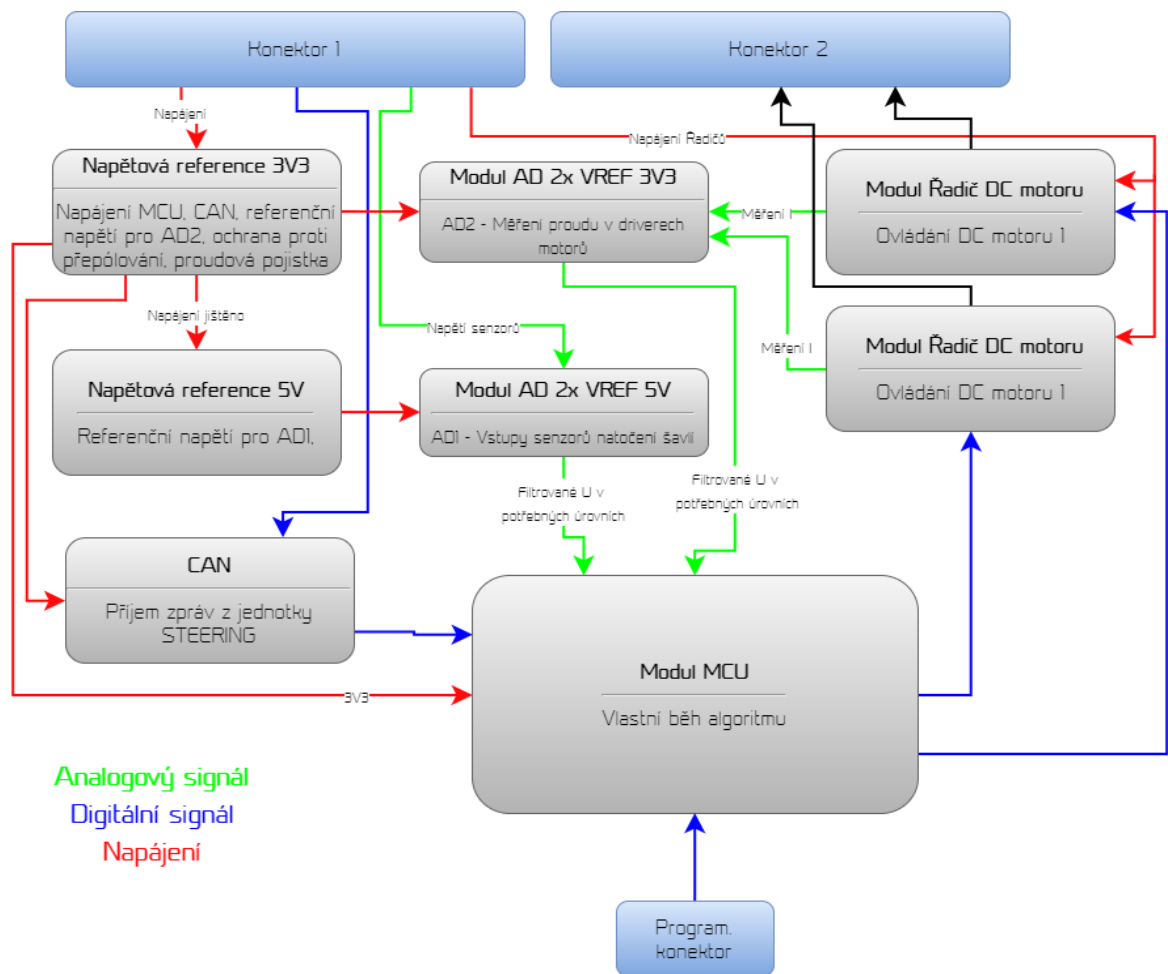
7.4.1 Realizace hardwaru pro jednotku ARB vozu FS.09

7.4.1.1 Požadavky a základní návrh

Z požadovaných vstupů, výstupů a vyžadované funkce byly určeny požadavky na potřebné hardwarové vybavení jednotky. Bylo rozhodnuto použít již mnohokrát zmíněný mikrokontroler STM32-F103 v pouzdře LQFP48⁹. Dále bylo nutné najít vhodný řadič pro řízení stejnosměrných komutátorových motorů s převodovkou (jejich přesná specifikace je uvedena v kapitole 7.7). Vzhledem k tomu, že je potřeba tyto motory řídit dva, bylo nutné jednotku osadit dvěma řadiči. Řadiče motorů zpravidla umožňují také měření proudů na jejich výstupech (tj. měření proudu, který „spotřebovává“ motor). Proto bylo nutné navrhnout obvod pro zpracování tohoto analogového signálu mikrokontrolerem. Pro vybrané snímače polohy (přesná specifikace snímačů je taktéž uvedena v kapitole 7.7) bylo taktéž nutné vybrat vhodný elektrický obvod pro úpravu signálu. Toto je nutné, protože snímače mají ratiometrický výstup 0,5- 4,5 V, ale analogově digitální převodník mikrokontroleru umožňuje měření napětí pouze s úrovněmi mezi 0 a 3,3 V. Dále bylo jednotku nutné osadit budičem CAN. Zde bylo nutné vybrat budič, který umožňuje zpracování standardu CAN 2.0b a zvládá požadovanou rychlost komunikace, která je pro elektronické systémy ve vozech CTU CarTech standardně 1 Mbit/s. Jednotku potom doplňují obvody, z kterých vystupují příslušné napěťové reference pro napájení procesoru, CAN budiče atd. Vybrané prvky a jejich zapojení bude popsáno v následující podkapitole. Základní návrhové schéma je uvedeno na

⁹ LQFP48 - 48-pin low-profile quad flat package - pouzdro se 48 SMD vývody

Obr. 27. V tomto schématu jsou zároveň použity názvy jednotlivých modulů popsaných v kapitole 7.2.2.



Obr. 27 - Schématické znázornění jednotky ARB

7.4.1.2 Specifikace význačných hardwarových komponent

V této podkapitole budou stručně shrnuty vybrané vlastnosti vybraných význačných hardwarových komponent, kterými je osazena jednotka ARB. Některé komponenty jsou společné i pro jednotku STEERING, jejímž návrhem se budu zabývat v kapitole 7.5, proto se později na tento odstavec odkáži. Kompletní specifikační listy níže uvedených hardwarových komponent (datasheety) jsou přílohou této práce, a proto zájemce o opravdu detailní informace odkazují právě na tyto přílohy.

Mikrokontroler *ST™ - STM32-F103C6:*

- Jádro procesoru: ARM 32-bit Cortex™-M3
- Maximální frekvence jádra: 72 MHz
- Flash paměť: 16 MB
- Periferie: DMA¹⁰, 32x GPIO¹¹, 2x 12 bit A/D převodník, 16x Externí interrupt, 6x 16 bit obecný časovač, interní oscilátor, SWD debug interface (debug po sériové lince)
- Komunikace: 1x I2C, 1x SPI, 2x USART, 1x CAN (2.0b aktivní), 1x USB 2.0

Řadič DC motorů Texas Instruments™- DRV8816:

- Řadič s 2x nezávislým H-můstkem
- Podporuje 100% PWM
- Nízký odpor při sepnutých výstupních tranzistorech $R_{DS(on)}=0,4$ Ohm
- Maximální povolený proud skrz můstek: 2,8 A
- Nastavitelná proudová ochrana
- Možnost měření proudu protékajícího můstkem

CAN budič Texas Instruments™ - SN65HVD230D:

- Napájení jedním vstupem 3,3 V
- Kompatibilní se standardem CAN 2.0b
- Kompatibilní se standardem ISO 11898-2
- Díky nízké impedanci vstupu umožňuje až 120 CAN uzlů
- Umožňuje rychlost až 1 Mbit/s

7.4.1.3 Tvorba elektrického schématu jednotky ARB

Jak již bylo zmíněno na začátku kapitoly 7.1, desky plošných spojů byly navrženy v softwaru Altium Designer 14. Návrh začal tvorbou schématu, který obsahuje elektrické zapojení celé desky znázorněné ve schématických znacích. V návrhu byly částečně využity znalosti nabyté při návrhu předchozích DPS a taktéž zmíněné knihovny hardwarových modulů. Zapojení integrovaných obvodů bylo navrženo dle doporučení výrobce uvedeného v příslušných

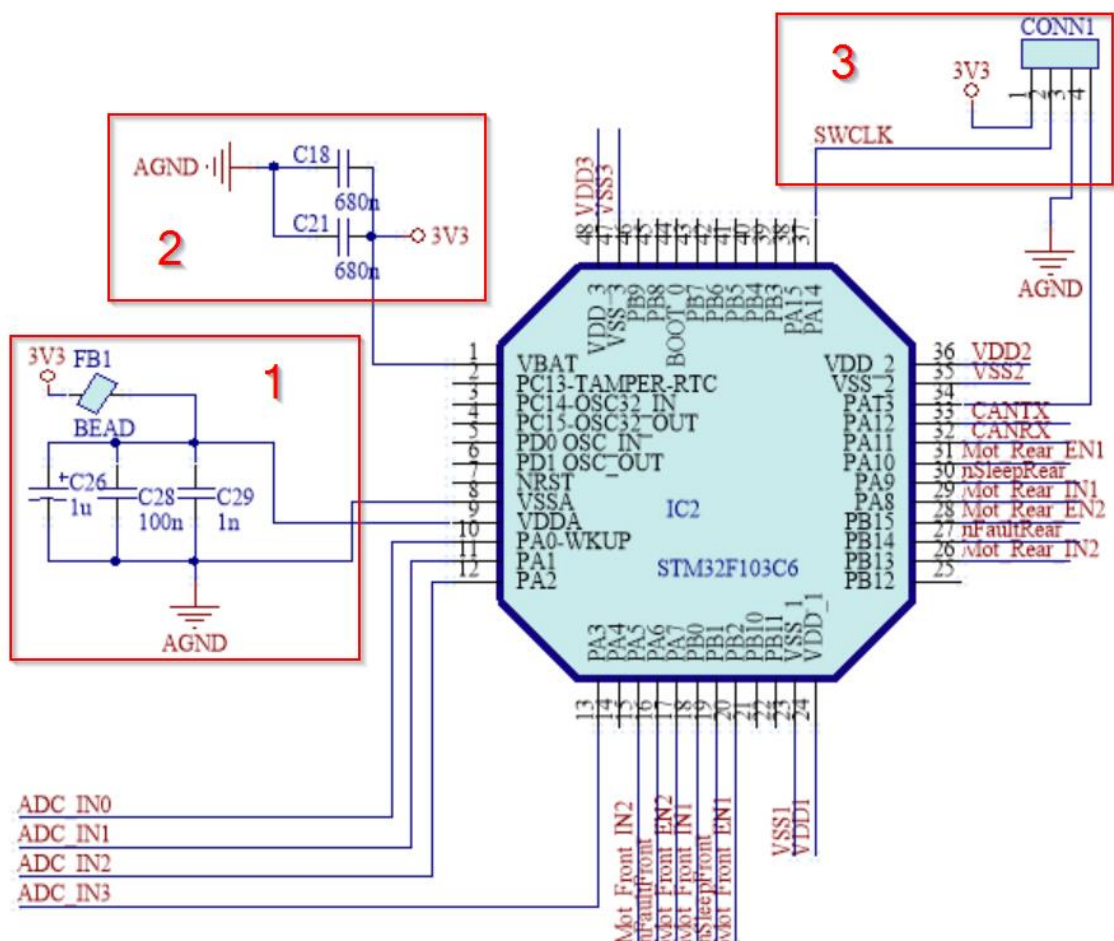
¹⁰ DMA – Direct memory access

¹¹ GPIO – General purpose input output

datových listech. Při realizaci bylo nutné určit parametry některých analogových obvodů a parametry podpůrných součástek integrovaných obvodů. Určení těchto význačných parametrů je uvedené níže v této podkapitole a vychází především z funkčních požadavků. Celé schéma jednotky ARB je přiloženo k této diplomové práci, vychází ze systematického znázornění z Obr. 27 a nebudu jej zde kvůli nedostatku prostoru celé zobrazovat.

7.4.1.3.1 Zapojení mikrokontroleru (MCU)

Zapojení MCU vychází z doporučení výrobce uvedeného v datasheetu (8). Vzhledem k tomu, že nepotřebuji extrémně přesné časování taktu, rozhodl jsem se využít zabudovaný oscilátor mikrokontroleru a desku tak neosazovat externím krystalem.



Obr. 28 - Zapojení MCU pro jednotku ARB

Blok 1 v Obr. 28:

Tento obvod slouží k filtraci napájení analogově digitálních obvodů mikrokontroleru. Je složen z tantalového kondenzátoru C26 s kapacitou 1 μ F, keramických kondenzátorů C28 a C29 (100nF a 1nF) a feritové perly FB1. Zapojení obvodu, použité součástky a jejich hodnoty vychází z doporučení výrobce.

Blok 2 v Obr. 28:

Tento obvod slouží k stabilizaci napětí napájení procesoru. Zapojení opět vychází z doporučení výrobce.

Blok 3 v Obr. 28

Tento konektor slouží k přímému programování mikrokontroleru přes tzv. SWD (Serial Wire Debug), což je programování (flashování) procesoru po sériové lince.

Piny mikrokontroleru VDDx a VSSx slouží k napájení digitálních periférií MCU a jejich zapojení je nutné pro jeho správnou funkci. Další zapojené piny pouzdra LQFP48 již slouží samotné funkci celé jednotky.

Analogově digitální převodník ADC1:

- *Vstupní piny:* 10-13 (PA0-PA3)

Ovládání řadiče DC motoru 1:

- *Výstupní piny:* 15, 17, 18 a 20 slouží k ovládání můstku řadiče motoru č.1, Pin 19 slouží k uvedení řadiče motoru č.1 do režimu nízké spotřeby.
- *Vstupní pin:* 19 – slouží k indikaci chybových stavů řadiče motoru č.1

Ovládání řadiče DC motoru 2:

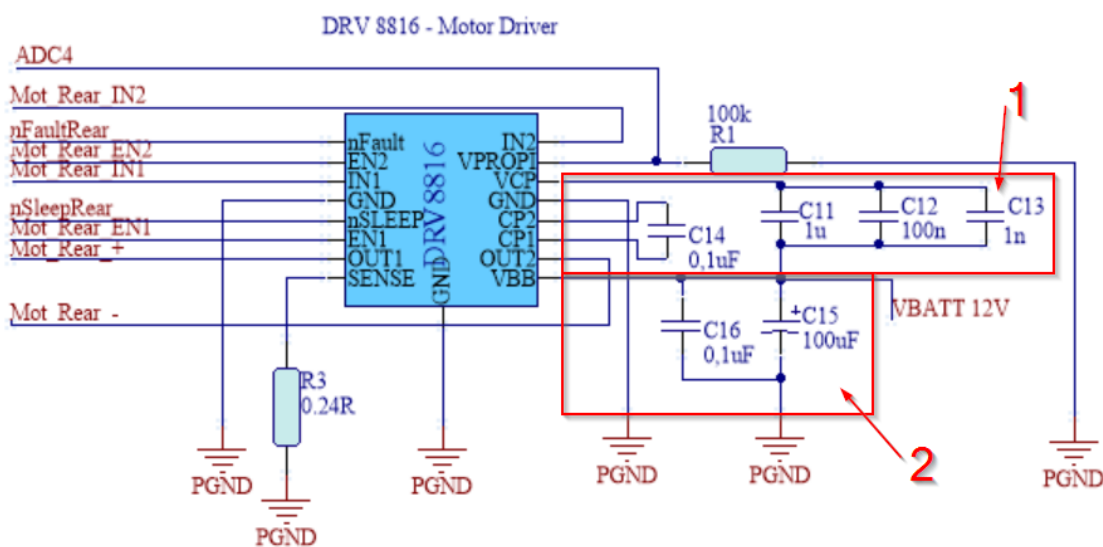
Analogicky k předchozímu

Interface sběrnice CAN (připojený k budiči CAN):

- Výstupní pin 33: Slouží k vysílání zpráv CAN
- Vstupní pin 32: Slouží k přijímání zpráv CAN

7.4.1.3.2 Zapojení řadičů DC motorů

Zde bylo opět vycházeno z doporučení výrobce, které je uvedené v datasheetu (9). Funkce jednotlivých logických vstupů jsou popsány v podkapitole 7.4.2, která se týká návrhu firmwaru. Zde bude opět krátce rozebrána funkce jednotlivých podpůrných elektronických součástí.



Obr. 29 - Zapojení řadiče stejnosměrných komutátorových elektromotorů pro jednotku ARB

Blok 1 v Obr. 29

Keramické kondenzátory C11, C12, C13 a C14 plní funkci takzvané nábojové pumpy. Ta má za úkol zvýšit napětí nad úroveň VBB (v mém případě nad úroveň napájecího napětí VBAT 12V) a slouží k řízení emitoru MOSFET tranzistoru (angl. Source). Kondenzátor C14 plní funkci „pumpování“ a kondenzátory C11-C13 slouží jako zásobník energie právě k řízení emitoru tranzistoru.

Blok 2 v Obr. 29

Elektrolytický kondenzátor C15 a keramický kondenzátor C16 zde společně plní funkci lokálních blokovacích kondenzátorů (angl. Bulk capacitance). Tyto kondenzátory mají za úkol dodávat energii do obvodu v případě impulzních odběrů proudu. Volba vhodné blokovací kapacity je velice složitá a značně závisí na zkušenostech návrháře. Byly zde zvoleny hodnoty kondenzátorů, které jsou obecně doporučovány pro podobné aplikace a to 0,1 μF pro keramický kondenzátor C16 a 100 μF pro elektrolytický kondenzátor C15.

Rezistor SENSE

Rezistor R3 slouží k omezení maximálního možného protékajícího proudu silovými tranzistory, a tedy maximálního proudu protékajícího i motorem. Pokud je tento rezistorem nastavený proud překročen výstupy *OUT2* a *OUT1* jsou odpojeny a výstup *nFault* je přizemněn, tudíž je v logické nule. Při dosažení hodnoty odporem přednastaveného maximálního proudu je na vstupu *SENSE* řadiče motoru napětí V_{TRIP} . Toto napětí je při maximálním možném proudu dle (9) rovno $V_{TRIPmax} = 0,5 \text{ V}$. Hodnota tohoto odporu $R3 = R_{SENSE}$ je tedy určena dle rovnice:

$$R_{SENSE} = \frac{V_{TRIPmax(=0,5V)}}{I_{TRIP}} \quad (\text{Rov. 2})$$

Proud I_{TRIP} byl zvolen dle použitého motoru (volba motoru je popsána v podkapitole 7.7) a zároveň byly vzaty v potaz také proudové špičky, které se objevují při rozběhu motoru. Jako optimální hodnota proudu pro proudovou ochranu se mi tedy jevila hodnota $I_{TRIP} = 2 \text{ A}$. Z rovnice (Rov. 2) byla poté určena příslušná hodnota odporu R3 a to $0,25 \Omega$. Zvolená hodnota proudu I_{TRIP} se zdá být vysoká, protože překračuje maximální povolenou hodnotu proudu protékajícího zvoleným motorem, ale protože je proud zároveň měřen pomocí výstupu *VPROPI* analogově digitálním vstupem mikrokontroleru a maximální povolený protékající proud je tak řízen také softwarově, rezistor R3 slouží tedy pouze jako „pojistka“, která obvod odpojí v případě zkratu. Rezistor R3 zároveň plní funkci kalibračního odporu, který určuje rozsah měřeného proudu při použití výstupu *VPROPI*.

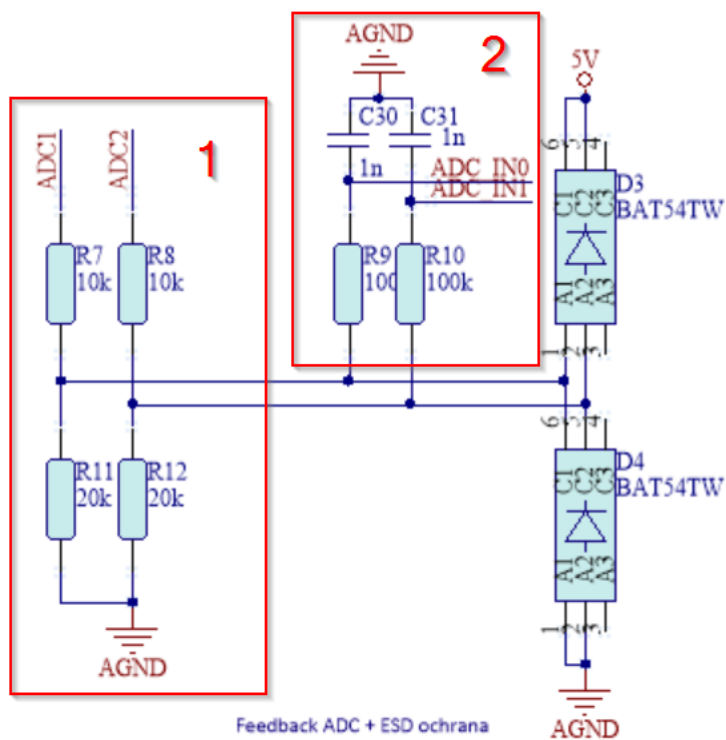
Měření proudu motoru

Jak bylo výše zmíněno, k měření proudu slouží výstup *VPROPI*. Napětí na výstupu tohoto pinu je dle (9) rovno pětinasobku napětí V_{TRIP} . V předchozím odstavci bylo uvedeno, že nejvyšší hodnota napětí $V_{TRIPmax}$ může být $0,5 \text{ V}$, a tedy nejvyšší hodnota napětí na výstupu *VPROPI* bude $2,5 \text{ V}$, a to při protékání proudem $I = I_{TRIP} = 2 \text{ A}$. Nakonec je vhodné říci, že přizemněný rezistor R1 na výstupu *VPROPI* zde slouží jako pull-down¹² rezistor.

¹² Eliminuje vlivy rušení vzniklé díky plovoucímu výstupu.

7.4.1.3.3 Zapojení obvodů pro zpracování analogového signálu

V jednotce ARB je tento obvod použit celkem čtyřikrát. Jednou obvod zpracovává analogové napětí ze snímačů polohy šavlí a jednou zpracovává napětí výstupu *VPROPI* z řadičů motorů. V prvním případě je nutné zapojení napěťové děličky, která zaručí, že do mikrokontroleru budou vstupovat napěťové úrovně v upraveném rozsahu 0 - 3,3 V, které jsou sníženy děličkou z původního rozsahu 0 - 5 V. V druhém případě tato napěťová dělička není nutná, protože výstup *VPROPI* se pohybuje v rozmezí 0 - 2,5 V. Dále obvody obsahují filtr typu dolní propust 1. řádu, který je realizován RC článkem a diody, které slouží jako ESD¹³ ochrana.



Obr. 30 - Zapojení obvodu pro zpracování analogového signálu s napěťovou děličkou

¹³ z ang. Electro Static Discharge – přeneseně ochrana proti elektrostatickému výboji

Blok 1 v Obr. 30

Tento blok plní funkci napěťové děličky. Hodnoty odporů R7 a R11 (analogicky k nim R8 a R12) jsou určeny dle rovnice:

$$U_{out} = U_{in} \cdot \frac{R_{GND(\sim R11)}}{R_{IN(\sim R7)} + R_{GND(\sim R11)}} \quad (\text{Rov. 3})$$

U_{out} → napětí vystupující z obvodu a vstupující do AD převodníku

U_{in} → napětí vstupující do obvodu ze senzoru

Možnosti volby rezistorů jsou prakticky neomezené. Pokud bude rovnice (Rov. 3) upravena a například rezistor R_{GND} bude považován za parametr, může být vypočítána potřebná hodnota R_{IN} při známém U_{out} a U_{in} takto:

$$R_{IN} = R_{GND}(\text{parametr}) \cdot \frac{U_{out}}{U_{in} - U_{out}} \quad (\text{Rov. 4})$$

Při volbě $R_{IN} = R7 = R8 = 10 \text{ k}\Omega$, vyjde $R_{GND} = R11 = R12 = 19,41 \text{ k}\Omega$. Zvolíme-li nejbližší dostupný rezistor z řady, tedy $R_{GND} = 20 \text{ k}\Omega$, výstupní napětí U_{out} bude pak rovno 3,33 V, což napětí přípustné pro vstup A/D převodníku.

Blok 2 v Obr. 30

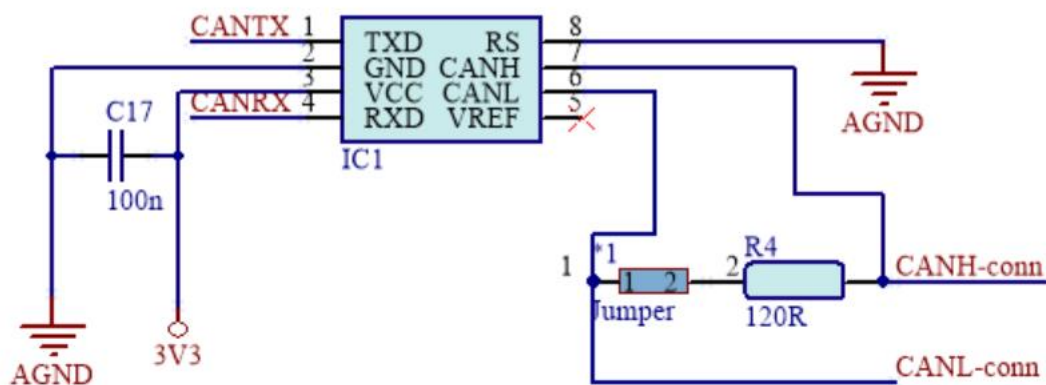
Tento blok slouží k filtraci analogového signálu. Jedná se, jak již bylo zmíněno na začátku této podkapitoly o filtr typu dolní propust 1. řádu. Řídí se tedy rovnicí:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (\text{Rov. 5})$$

f_0 je mezní frekvence, R a C hodnoty součástek R9 a C30 (analogicky k nim i R10 a C31). Mezní frekvence potom při volbě $R = 100 \text{ k}\Omega$, a $C = 1 \text{ nF}$ vyjde $f_0 = 1,59 \text{ kHz}$. Volba parametrů R a C zde probíhala na základě doporučení kolegů z týmu CTU CarTech a na základě „inženýrského“ zhodnocení vstupujícího signálu. Měření frekvenčních charakteristik vstupujícího signálu nebylo provedeno.

7.4.1.3.4 Zapojení budiče pro CAN sběrnici

Zapojení budiče pro sběrnici CAN je poměrně jednoduché. Budič je pouze připojený k vstupně výstupním portům mikrokontroleru. Dále je připojen kondenzátor C17 mezi napájení čipu a jeho zemnění, který slouží opět jako blokovací kondenzátor (princip popsáný v 7.4.1.3.2). Schéma zapojení budiče je doplněno ještě o rezistor R4 s hodnotou rezistence 120 Ω mezi výstupními piny CANH a CANL, který slouží jako tzv. terminační odpor. Tento odpor je nutný pro jednotku, která je koncovým uzlem sběrnice CAN (popsáno v O). Pro větší variabilitu je ještě tento odpor sériově propojen s jumperem (propojkou), který umožňuje jednoduše, bez nutnosti demontáže rezistoru, připojit nebo odpojit terminační odpor do obvodu.



Obr. 31 - Zapojení budiče pro sběrnici CAN

7.4.1.4 Realizace desky plošných spojů jednotky ARB a její osazení

Dalším krokem realizace hardwaru jednotky ARB bylo vytvoření návrhu desky plošných spojů (dále jen DPS). Návrh vychází ze schématu, kterého se týkala podkapitola 7.4.1.3. Základem samotné tvorby DPS byla specifikace komponent, které byly ve schématu znázorněny pouze schématickými značkami. Zde již muselo být více uvažováno o proudovém zatížení jednotlivých komponent, jejich elektrickými vlastnostmi, možnostmi ručního osazování desky (jiná varianta v mém případě nepřicházela v úvahu), délce cest a mimo jiné i například možnostmi chlazení výkonových komponent. Na

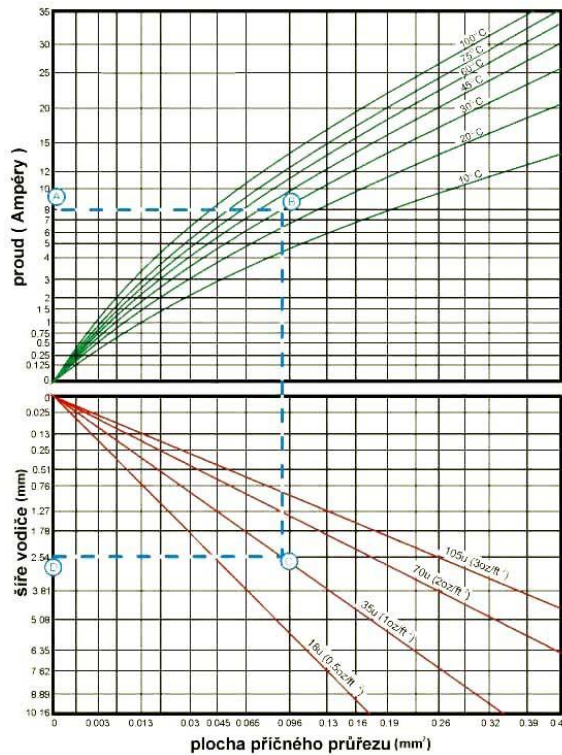
druhou stranu nebylo třeba se zabývat například EMC vlastnostmi, protože se nejedná o jednotku, která by měla být homologována a certifikována. Propojovací cesty jednotky taktéž nebudou přenášet signály s vysokými frekvencemi, proto nebylo nutné se zabývat délkou cest (stejnými délkami cest pro párovou dvojici atp.), která je v takových aplikacích poměrně kritická.

Základní požadavky, které byly vytyčeny, byly snaha o co nejmenší plochu desky a použití maximálně dvouvrstvé DPS. Jak již bylo uvedeno výše, záměrem bylo desku osazovat manuálně, tudíž připadalo v úvahu použití pouzder rezistorů a kondenzátorů minimálně 0603¹⁴ (rezistory a kondenzátory jsou nejmenší použité součástky na této jednotce). Dále bylo nutno dodržet technologické podmínky firmy, která dodává desky plošných spojů týmu CTU CarTech. Zároveň zde byl požadavek na co nejnižší cenu desek, tudíž bylo usilováno o dodržení podmínek bezpříplatkové standardní výroby v režimu POOLSERVIS¹⁵, kterou nabízí dodavatel týmu, firma PragoBoard s.r.o.

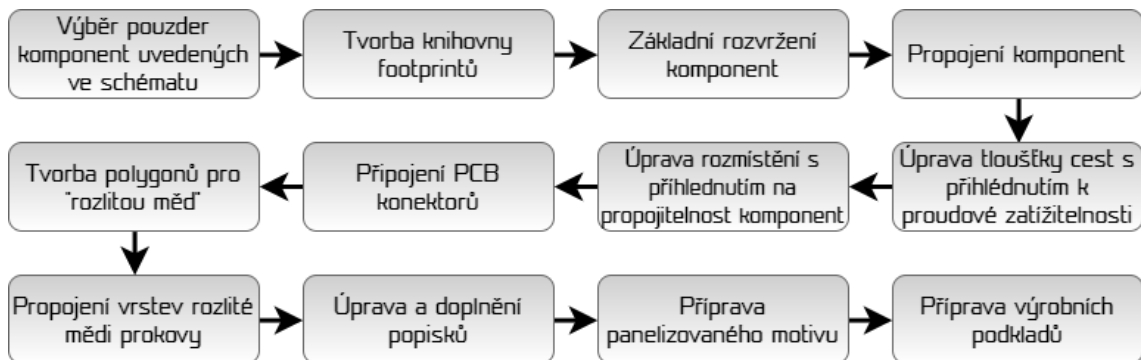
Obecně se dá říci, že při návrhu bylo spíše vycházeno z obecných pouček návrhu DPS, které byly místy doplněny o doporučení z (10) a rady zkušenějších kolegů z týmu CTU CarTech. Při určování velikostí pouzder (z hlediska proudového zatížení) bylo vycházeno pouze ze znalostí Ohmova zákona, kdy díky znalosti protékajícího proudu a napětí, mohl být určen výkon přenášený příslušnou součástkou. Poté již byla dle datových listů jednotlivých součástek vybrána příslušná velikost pouzdra. Proudová zatížitelnost vodičů (tloušťky cest) byla určena dle doporučení z (11), a je také graficky znázorněna na Obr. 32. Detailní postup návrhu PCB zde již nebude uveden. Princip návrhu popisuje diagram na Obr. 33. Výsledný návrh na 3D vizualizaci z programu Altium Designer je možné vidět na Obr. 34, vizualizaci lícové a rubové vodivé vrstvy včetně popisků součástek potom na Obr. 35. Seznam použitého materiálu jednotky ARB včetně objednacích čísel je přílohou této diplomové práce.

¹⁴ 0603 – pouzdro s rozměry 0,06 x 0,03 in (palce), tedy ca. 1,55 mm x 0,85 mm.

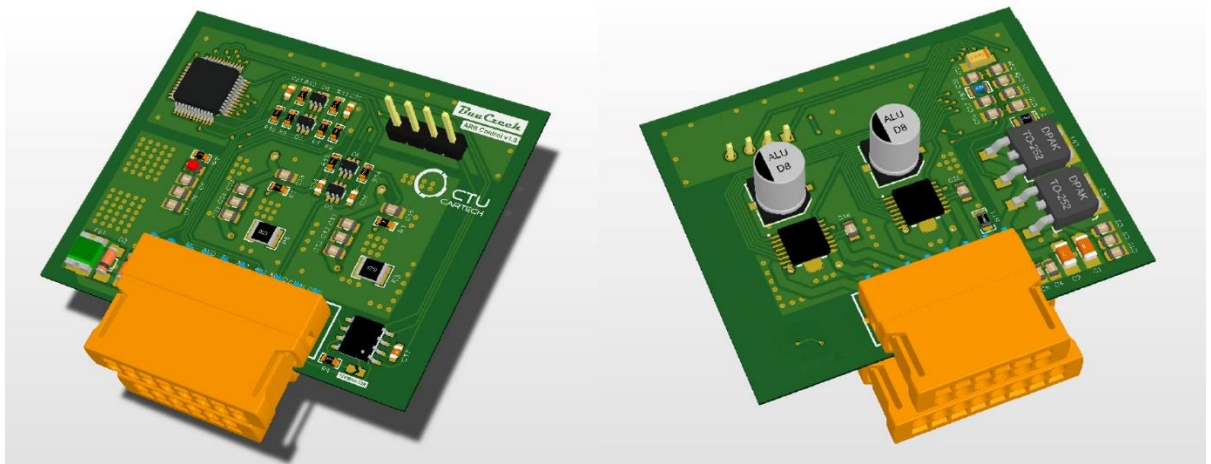
¹⁵ POOLSERVIS – služba, kterou nabízí firma PragoBoard s.r.o., slouží zejména k cenově velmi výhodné prototypové výrobě kusových zakázek DPS.



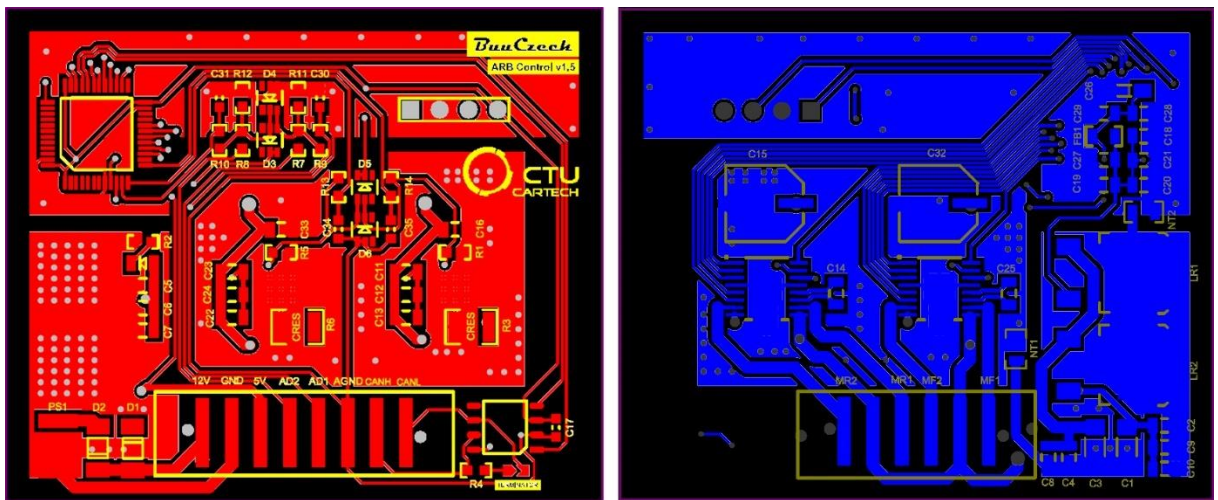
Obr. 32 - Proudová zatížitelnost vodiče (cesty) na DPS (11)



Obr. 33 - Aplikovaný postup tvorby desky plošných spojů.



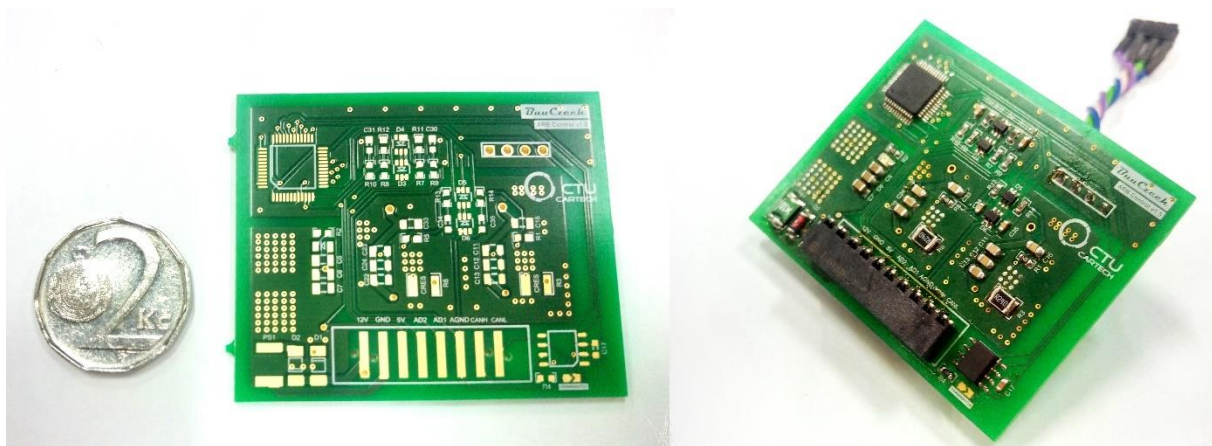
Obr. 34 - Navrhnutá deska plošných spojů jednotky ARB (3D vizualizace SW Altium Designer)



Obr. 35 - Vodivé vrstvy DPS pro jednotku ARB. Lícová strana (vlevo), rubová strana (vpravo)

Osazení desky součástkami

Hotové desky plošných spojů bylo k jejich zprovoznění samozřejmě nutné osadit elektrickými komponenty. Bylo rozhodnuto o použití ručního osazení DPS, a to ryze z praktického důvodu, kdy autor si toto osazení chtěl vyzkoušet. Osazení jedné desky jednotky ARB zabralo zhruba 4 hodiny práce, ale díky návrhu, v kterém se počítalo s ručním osazováním byl poměrně snadno realizovatelný.



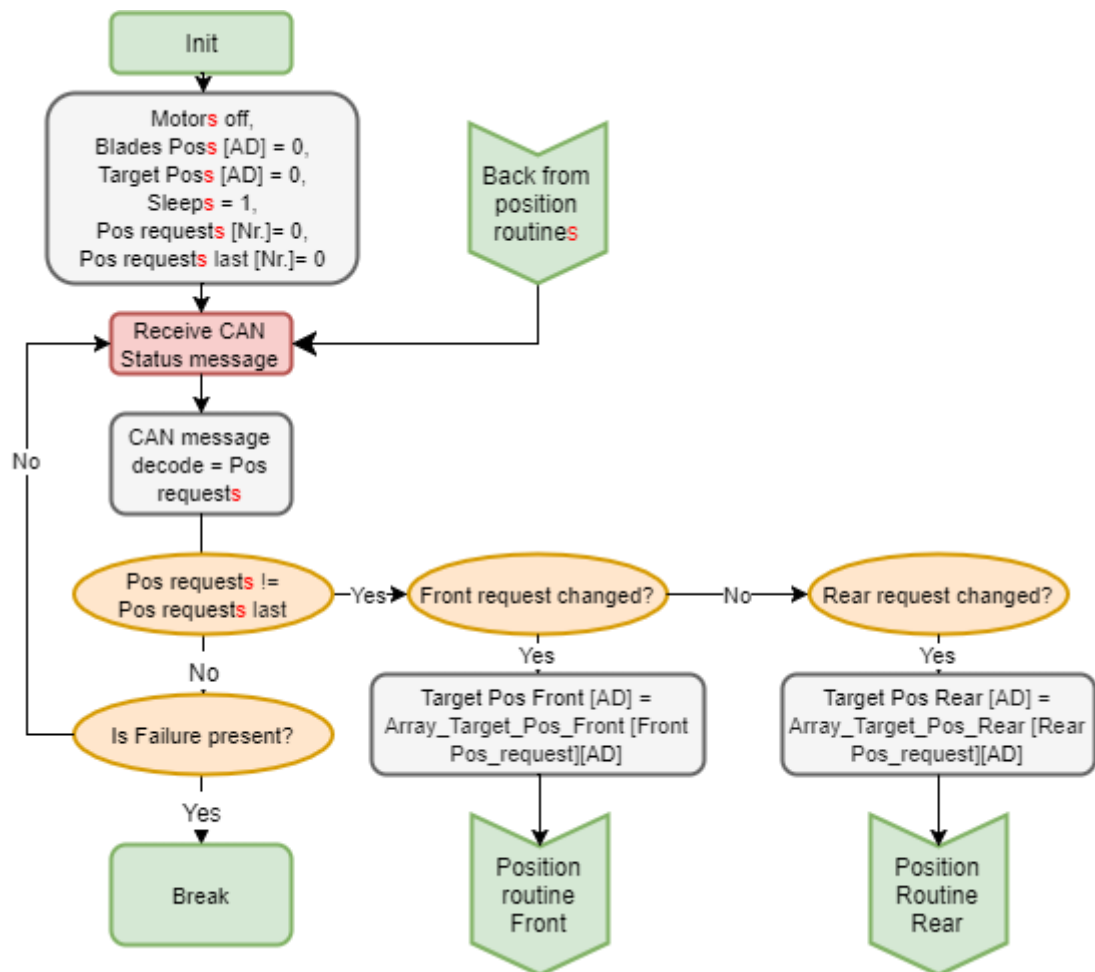
Obr. 36 - Neosazená DPS jednotky ARB (vlevo), Hotová jednotka ARB po osazení komponenty (vpravo)

7.4.2 Realizace firmwaru jednotky ARB

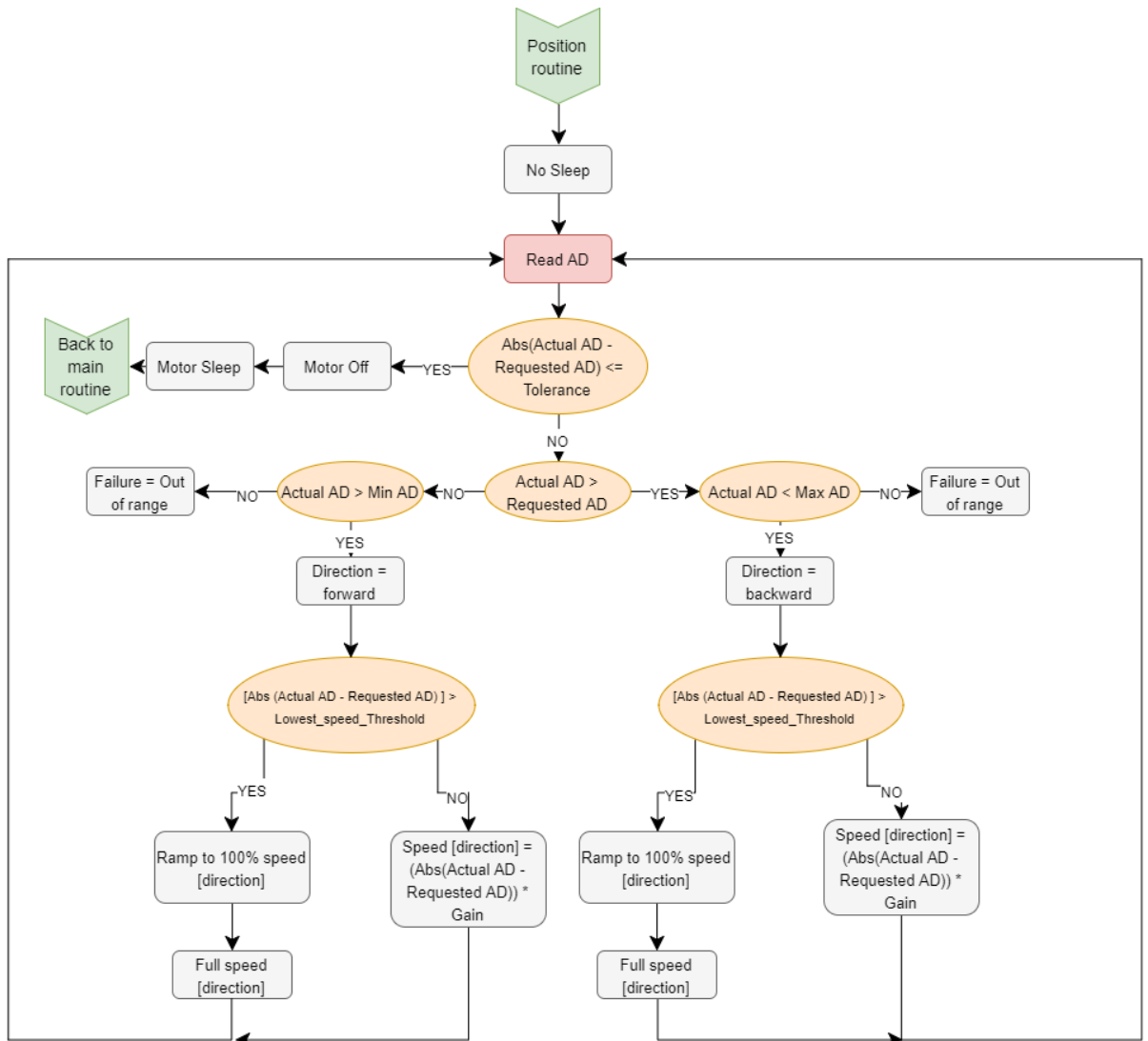
Vyrobená jednotka by samozřejmě nebyla schopná funkce bez příslušného řídicího firmwaru. V této podkapitole budou popsány nejdůležitější části řídicího algoritmu. Nebude zde rozebrána komunikace po sběrnici CAN Bus, protože její návrh a realizace úzce souvisí i s jednotkou STEERING a taktéž s ostatními systémy ve voze FS.09, a proto bude popsán v další samostatné podkapitole.

Funkce tohoto firmwaru již byla dle mého názoru dostatečně popsána v podkapitole 7.3, zde budou jen upřesněna některá důležitá fakta. Celý firmware je napsán v jazyku C, ve vývojovém prostředí Keil MDK-ARM s využitím standardních hardwarových knihoven dodávaných právě k tomuto vývojovému prostředí přímo pro použitý mikrokontroler. Hlavními C soubory, v kterých se odehrál vývoj jsou soubory main.c, io_arb.c a header soubor

io_arb.h. Zejména soubory io_arb.c a io_arb.h vychází z prázdného projektu, který byl zmíněn v podkapitole týkající se modulární koncepce návrhu. V souboru main.c je již obsažena hlavní rutina celého řízení, ve které se volají jednotlivé podprogramy. Nemá význam zde prezentovat přímo části a syntaxi kódu, a spíše než toto, zde budou popsány jednotlivé významné podprogramy slovně a schematicky. Funkce celého algoritmu je popsána na vývojových diagramech na Obr. 37 a Obr. 38.



Obr. 37 - Vývojový diagram hlavní rutiny firmwaru jednotky ARB



Obr. 38 - Vývojový diagram rutiny polohování stabilizátorů ve firmwaru jednotky ARB

Výše uvedené diagramy popisují funkci velice výstižně. Bude zde rozebrán pouze podprogram pro rozběh motorů, podprogramy pro ovládání směru při plné rychlosti a podprogram regulace, který používá P regulátor.

Ovládání směru a rychlosti motorů:

Směr motorů se ovládá pomocí 4 logických vstupů řadiče motoru, a tedy čtyřmi výstupy mikrokontroleru. Při aplikování modulace PWM (s doporučenou nosnou frekvencí 100kHz) minimálně na jeden z těchto vstupů řadiče je ovládána i rychlost motoru. Pro řízení rychlosti byla aplikována modulaci PWM, realizovaná pomocí hardwarového časovače na vstupy EN1 řadiče motoru, který byl aktuálně potřeba řídit. Ovládání PWM je dalším podprogramem, který je v případě potřeby volán v příslušné rutině

(podprogramu). Při plné rychlosti motorů jsou pouze přivedeny logické úrovně na příslušné vstupy řadiče dle Tab. 5.

EN1	EN2	IN1	IN2	Výstup 1	Výstup 2	Funkce
0	X	X	X	Z	X	Vypnuto
X	0	X	X	X	Z	Vypnuto
1	1	0	0	L	L	Brzda
1	1	0	1	L	H	Dozadu
1	1	1	0	H	L	Dopředu
1	1	1	1	H	H	Brzda

Tab. 5 - Logika řízení směru pohybu motoru - X = nezáleží na logické úrovni, Z = vysoká impedance, L = Výstup přizemněný, H = Výstup napájený

Rozběh motorů:

Podprogram pro rozběh motorů využívá právě modulaci PWM. Je zde pouze FOR cyklus, který při svém prvním průběhu nastaví PWM na 25 %. Po tomto nastavení je zde zpoždění 20 ms (z nativní knihovny mikrokontroleru delay.c) a při dalším průběhu je hodnota PWM zvýšena o dalších 25 %. Při dosažení 75% PWM a dalšího zpoždění je FOR cyklus ukončen. Celý rozběh tedy trvá 60ms a je zde implementován kvůli omezení proudových špiček, které vznikají ve fázích rozběhu motoru (fakticky při zkratu).

Regulace polohy:

Jak již bylo uvedeno, je využito jednoduchého P regulátoru. Tento regulátor pomáhá snížit rychlost motoru při přibližování se k žádané hodnotě. Pokud je hodnota rozdílu mezi žádanou polohou šavle a aktuální hodnotou menší nebo rovna hraniční hodnotě (ve vývojovém diagramu značena jako *Lowest_Speed_Threshold*), začíná systém snižovat rychlost z maximální možné rychlosti. Použitý princip je poměrně jednoduchý.

$$PWM [\%] = [abs(AD_{actual} - AD_{request})] \cdot gain_{parametr} \quad (Rov. 6)$$

Navržený regulátor není příliš robustní a zároveň nemá za úkol spojitě doregulovávat polohu. Jakmile je jednou poloha dosažena (splněna podmínka pro ukončení regulace, potažmo pohybu motoru), program motory uspí (pomocí pinů SLEEP řadičů motorů). Hodnota zesílení $gain_{parametr}$ musí být předem nastavena s přihlédnutím k hraniční hodnotě rozdílu žádané a aktuální polohy (ve vývojovém diagramu na Obr. 38 značeno jako

Lowest_Speed_Threshold), při jejímž dosažení začíná působit regulace namísto maximální možné rychlosti. Parametry musí být nastavené tak, aby součin *Lowest_Speed_Threshold* a *gain_{parametr}* byl roven 100, což odpovídá maximální možné hodnotě PWM, a tedy maximální rychlosti. Při přibližování se k žádané poloze je rychlost proporcionálně snižována. Jakmile je rozdíl aktuální hodnoty natočení šavle (v jednotkách AD) a požadované hodnoty natočení menší nebo roven hraniční hodnotě (ve vývojovém diagramu na Obr. 38 značeno jako *Tolerance*), program vyskočí z regulační smyčky a řadiče motorů uspí prostřednictvím pinů SLEEP. Dále program čeká na změnu žádané hodnoty.

Chybové stavy:

Chybové stavy ve firmwaru příliš ošetřené nejsou. Jedinými chybovými stavy je změření hodnoty natočení šavle (hodnoty AD), která je mimo definovaný povolený rozsah a potom logická úroveň jedna na výstupu FAULT řadiče motoru. Reakce firmwaru v těchto případech je zastavení běhu programu. Jediná možnost, jak běh programu v těchto případech obnovit, je tvrdý restart mikrokontroleru, tedy odpojení napájení. Zde je ještě velký prostor pro zlepšení. Zároveň firmwarem také není využito měření aktuálního protékajícího proudu motorem, i když hardware to umožňuje. Tato možnost měření proudu byla pouze vyzkoušena na testovacím firmwaru k ověření funkcionality HW.

Dalším stěžejním bodem firmwaru je komunikace po sběrnici CAN, ale tu detailněji popíšu až v podkapitole 7.6.

Použité interface pro konfiguraci periférií a interakci s perifériemi zde dle mého názoru nemá význam popisovat. Principiálně zde byly použity možnosti hardwarových knihoven a funkce, které jsou nativně podporovány prostřednictvím právě těchto knihoven. Kompletní archiv, který obsahuje kompilovatelný projekt s firmwarem je přílohou této práce.

7.5 Řídící jednotka STEERING

Úkolem jednotky STEERING je zjednodušeně řečeno pouze přijímat pokyny pilota vozu, zpracovat je a vyslat dále po sběrnici CAN, přičemž pokyny jsou myšleny polohy a stavy rotačních přepínačů, dvoupolohových přepínačů a tlačítek. Jednotka se taktéž musí vejít do těla volantu. Jelikož vícepolohové přepínače jsou přímo součástí DPS, jejich rozložení bylo navrženo s přihlédnutím k ergonomii volantu. Jednotlivé funkce multifunkčního volantu jsou popsány v podkapitole 7.8.

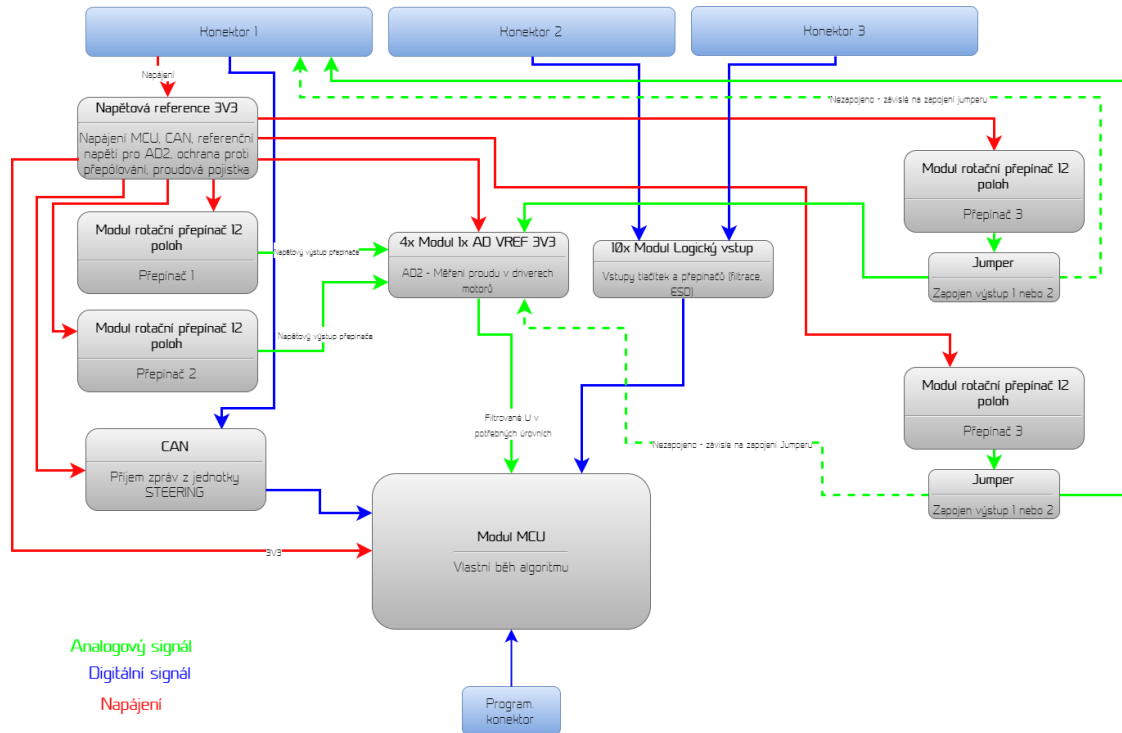
7.5.1 Realizace hardwaru pro jednotku STEERING

I na této jednotce byl uplatněn princip modulárního návrhu zmíněný v podkapitole 7.2. V následujících podkapitolách bude popsána funkce jednotky, základní požadavky na návrh a budou velice stručně uvedeny pouze rozdíly ve schématu oproti jednotce ARB.

7.5.1.1 Požadavky a základní návrh

Jak už z krátkého popisu výše vyplývá, hardwarové požadavky na jednotku STEERING nejsou příliš náročné. Jednotka tedy obsahuje stejný mikrokontroler STM32 jako jednotka ARB, dále obsahuje obvody pro zpracování a filtraci analogového signálu s referenčním napětím 3,3 V, které byly již také popsány v kapitole 7.4.1 a budič sběrnice CAN Bus popsány tamtéž. Jednotka navíc obsahuje 4 rotační přepínače zapojené jako dělič napětí. Toto zapojení umožňuje snímat analogové napětí, které je odstupňované v diskretních krocích dle zvolené polohy 12ti polohového rotačního přepínače. Tímto zapojením se povedlo zredukovat potřebné vstupy mikrokontroleru (bez tohoto zapojení by bylo třeba na každý přepínač 12 digitálních vstupů, tj. celkem 48). Analogová hodnota na výstupu dvou ze čtyř přepínačů může být podle zapojení přidruženého propojovacího odporu buď vstupem mikrokontroleru nebo může být připojena přímo na konektor jednotky. Toto zapojení bylo použito kvůli problematické CAN komunikaci s jednotkou řízení motoru a záměru použít jeden či dva přepínače jako vstup právě jednotky řízení motoru pro nastavování rozličných funkcí. Rozmístění přepínačů a vlastně i tvaru celé DPS bylo výrazně ovlivněno ergonomií volantu. Kvůli ergonomii byly také použity rotační přepínače s vysokým kroutícím

momentem a kvalitní haptickou odezvou. Posledními použitými moduly jsou potom velice jednoduché obvody digitálních vstupů, které slouží ke zpracování digitálního signálu (logického) z tlačítek a dvoupolohových přepínačů. Blokové schéma jednotky STEERING zobrazuje Obr. 39.



Obr. 39 - Schématické znázornění jednotky STEERING

7.5.1.2 Specifikace významných hardwarových komponent

Většina hardwarových komponent je stejná jako u jednotky ARB. Za zmínku zde stojí snad jen použitý rotační přepínač s vysokým kroutícím momentem, který se používá také ve volantech monopostů Formule 1.

Rotační přepínač Grayhill Series – 56 (56SDP30-01-1-AJN):

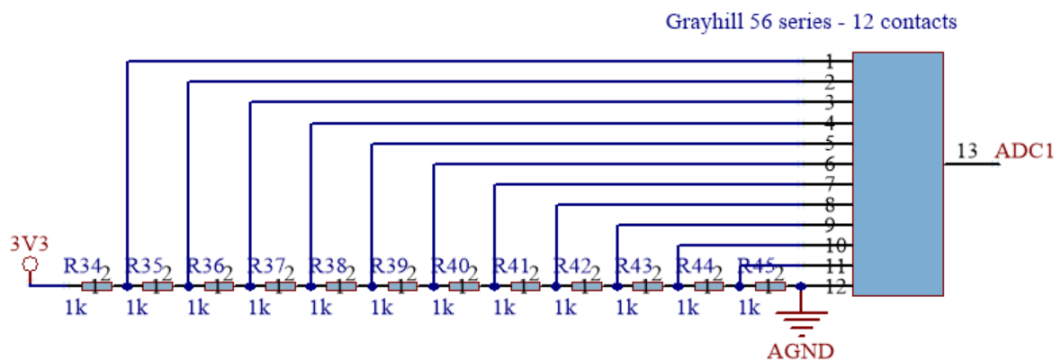
- Certifikace MIL-S-3786 (specifikována odolnost vibracím, stříkající vodě, teplotním šokům atp.)
- Polohovací moment – 53 mNm
- 12 poloh (krok 30°) s možností rotace 360° nebo nastavitelnými dorazy
- Rezistence kontaktů: max. 100 mΩ

7.5.1.3 Tvorba elektrického schématu jednotky STEERING

V této podkapitole budou zmíněny pouze hardwarové bloky, které ještě nebyly popsány v kapitole týkající se návrhu jednotky ARB. Kompletní schéma je opět přílohou této diplomové práce.

7.5.1.3.1 Zapojení rotačního přepínače s napěťovou děličkou

Tímto zapojením je možné, jak již bylo uvedeno, ušetřit vstupy mikrokontroleru. Výstupem obvodu je tedy analogové napětí v diskretních krocích mezi 0 V a referenčním napětím (3,3 V), což je v tomto případě 3,3 V (V_{IN}). Princip zapojení napěťové děličky byl již popsán v podkapitole 7.4.1.3.3. Napětí na výstupu rotačního přepínače v závislosti na poloze je uvedeno v Tab. 6.



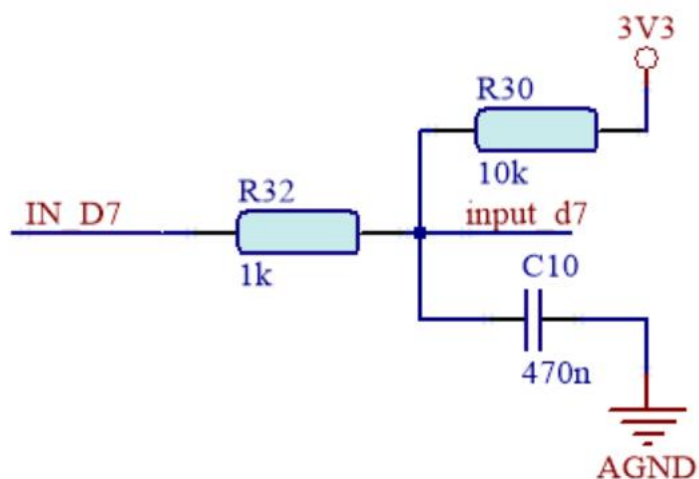
Obr. 40 - Zapojení rotačního 12 polohového přepínače

Poloha	R_{VIN} [k Ω]	R_{GND} [k Ω]	V_{out} [V]
1	1	11	3,025
2	2	10	2,75
3	3	9	2,475
4	4	8	2,2
5	5	7	1,925
6	6	6	1,65
7	7	5	1,375
8	8	4	1,1
9	9	3	0,825
10	10	2	0,55
11	11	1	0,275
12	12	0	0

Tab. 6 - Výstupní napětí rotačního přepínače v závislosti na poloze

7.5.1.3.2 Zapojení obvodu pro digitální vstupy

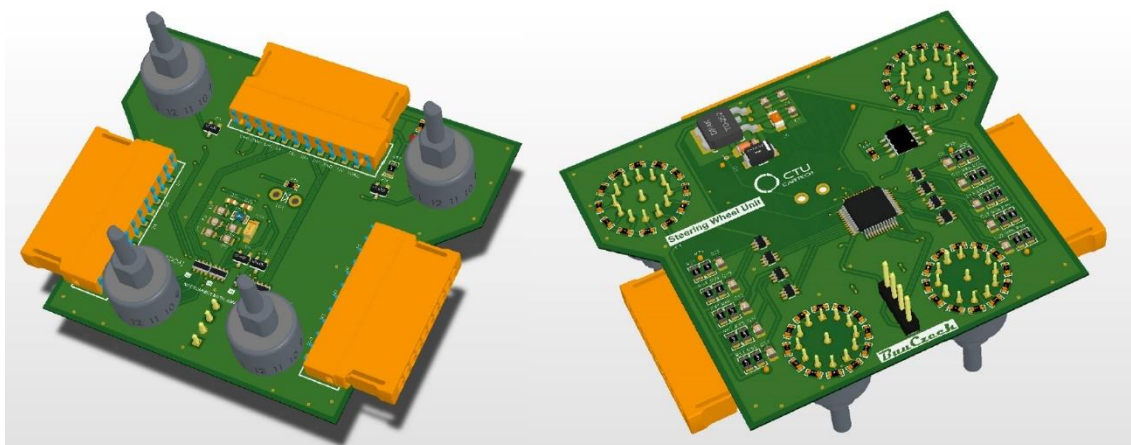
Tento obvod je ve schématu, a tedy i na DPS, použit celkově desetkrát. Tento fakt znamená, že jednotka má celkem 10 digitálních vstupů. Obvod je opět velice jednoduchý. Obsahuje filtr typu dolní propust 1. řádu již popsáný v 7.4.1.3.3 (rezistor R32 a kondenzátor C10) a potom tzv. Pull-Up rezistor (R30), který zabraňuje jevu tzv. plovoucího vstupu.



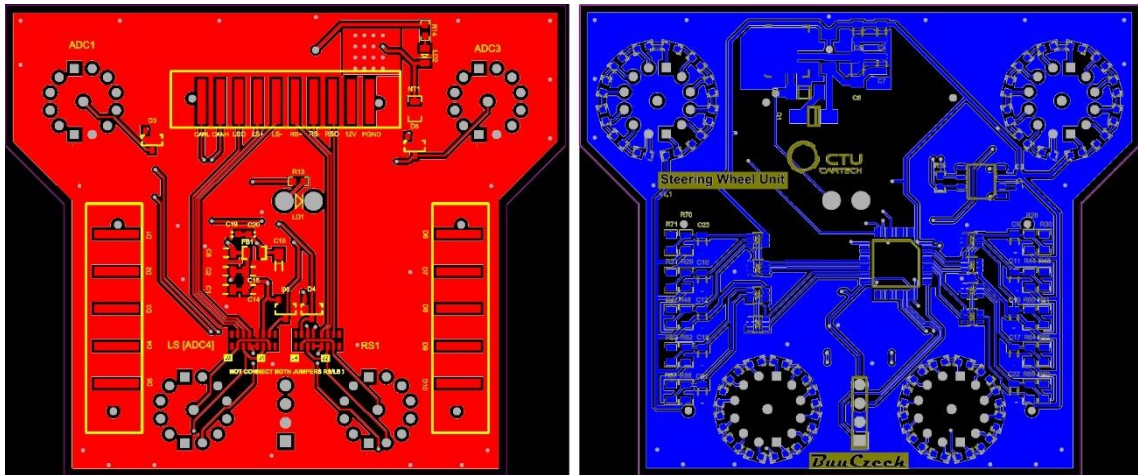
Stejně jako v 7.4.1.3.3 i zde jsou použity Schottkyho diody pro ochranu proti elektrostatickému výboji. Princip jejich použití se neliší pro analogový nebo digitální signál.

7.5.1.4 Realizace desky plošných spojů jednotky STEERING a její osazení

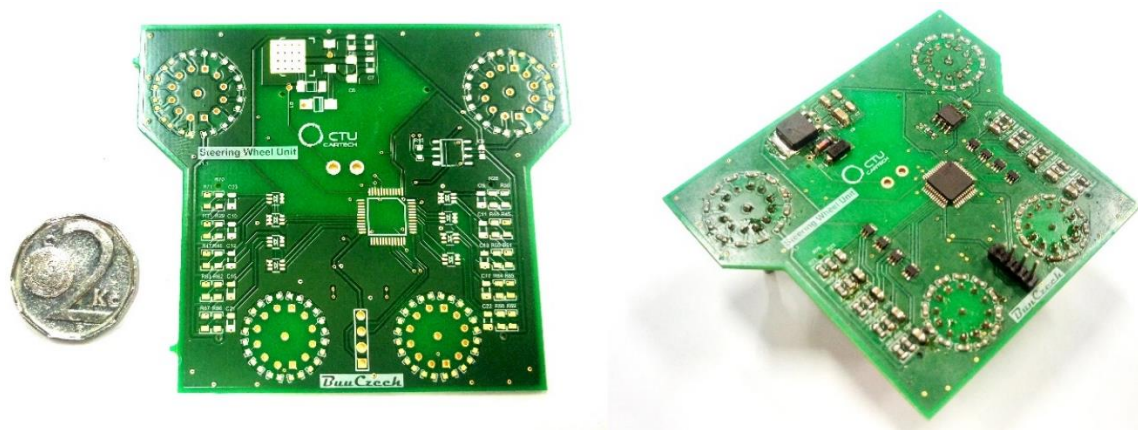
Principy a zásady návrhu byly již detailně popsány v kapitole 7.4.1.4. Při návrhu jednotky STEERING zde však nebyl požadavek na minimální plošné rozměry DPS. Deska musela pojmout zmíněné 4 rotační přepínače tak, aby mezi přepínači byl dostatek místa na knoflíky typu „chicken head“, které budou ovládány v závodních rukavicích. Vhodné rozmístění přepínačů bylo předem ověřeno experimentem. Dalším kritériem návrhu bylo umístění konektorů, které reflektuje zamýšlené rozložení tlačítek v těle volantu. Jinými slovy, konektory jsou umístěny symetricky vlevo a vpravo a pak na horní straně DPS. Výsledný návrh DPS na 3D vizualizaci je uveden na Obr. 41, návrh vodivých vrstev DPS včetně popisků na Obr. 42, hotové DPS a kompletní jednotka pak na Obr. 43.



Obr. 41 - Navrhnutá deska plošných spojů jednotky STEERING (3D vizualizace SW Altium Designer)



Obr. 42 - Vodivé vrstvy DPS pro jednotku STEERING. Lícová strana (vlevo), rubová strana (vpravo)



Obr. 43 - Neosazená DPS jednotky STEERING (vlevo), Hotová jednotka STEERING po osazení komponenty (vpravo)

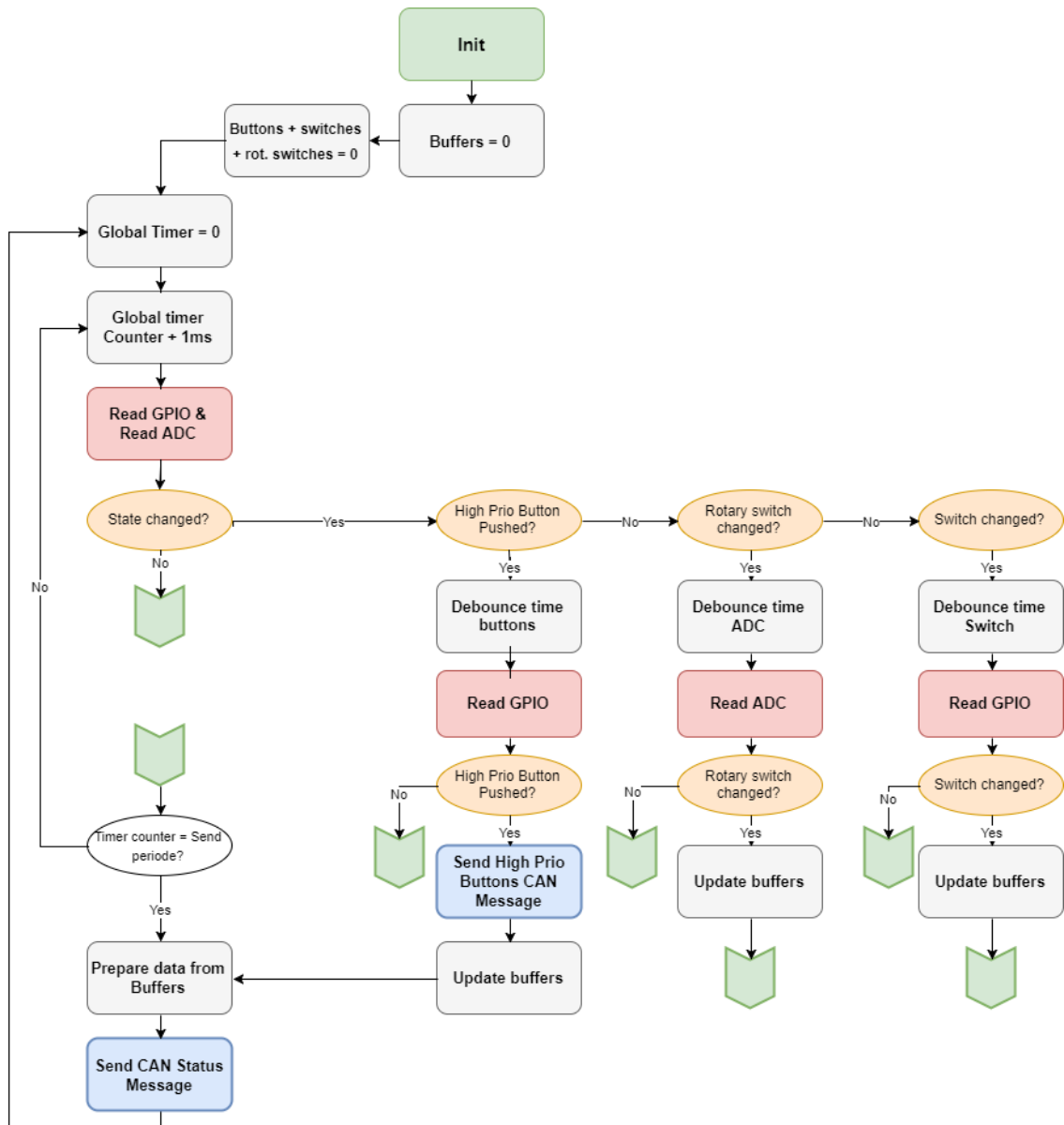
7.5.2 Realizace firmwaru jednotky STEERING

Úkolem firmwaru jednotky STEERING je snímat stavy přepínačů a tlačítek na volantu, tyto stavy zpracovat, připravit z nich data vhodná pro posílání po sběrnici CAN a nakonec je poslat. Zpracování dat a posílání dat po sběrnici bude popsáno až v kapitole 7.6. Příjem stavů tlačítek je velice jednoduchý a jedná se pouze o vyhodnocení logické úrovně příslušného pinu mikrokontroleru. Pro eliminaci tzv. false positive¹⁶ stavů je zde aplikován tzv.

¹⁶ Stav, kdy je měřená veličina nebo hodnota chybně vyhodnocena jako pravdivá.

polling¹⁷. Vyhodnocování polohy rotačních přepínačů využívá taktéž metodu polling, ale především je zde nutné vyhodnotit analogové napětí na výstupu vícepolohového přepínače (výstup přepínače je analogový – popsáno detailně v 7.5.1.3.1) a toto analogové napětí (které však má diskrétní úrovně, avšak ovlivněné šumem) správně přiřadit k příslušné poloze přepínače. Algoritmus použitý pro jednotku STEERING je opět názorně popsán na vývojovém diagramu na Obr. 44 a výše zmíněné postupy stručně popsány dále v této podkapitole.

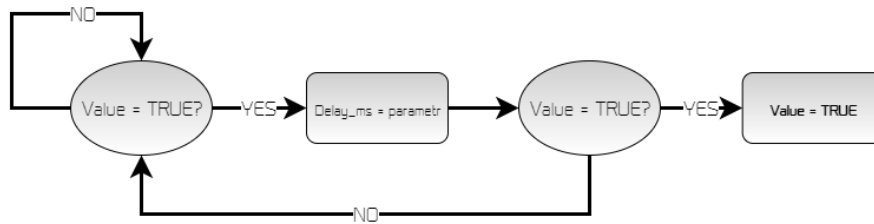
¹⁷ Způsob jak eliminovat například přes zpoždění, vícenásobné kontroly atp. false positive jevy.



Obr. 44 - Vývojový diagram firmwaru jednotky STEERING

Polling:

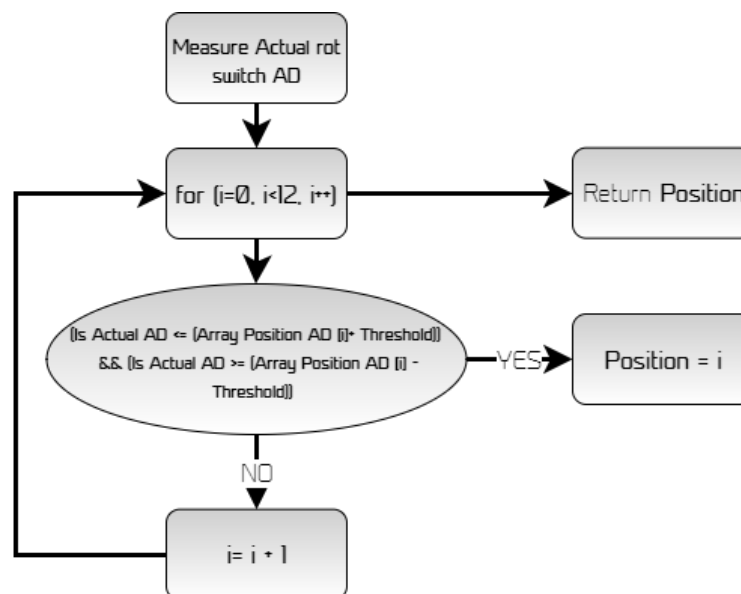
Byl zde použit pouze jednoduchý princip se zpožděním a dvojnásobnou kontrolou měřené hodnoty. Algoritmus je popsán na vývojovém diagramu na



Obr. 45 - Vývojový diagram použitého algoritmu "Polling"

Vyhodnocení polohy přepínačů:

Rotační přepínače mají analogový výstup (což ušetřilo vstupy mikrokontroleru), který je aktivně měřený. Není však příliš výhodné přímo tyto analogové 12ti bitové hodnoty posílat po sběrnici CAN, jelikož je to hodnota naprosto irelevantní a jediná informace, která je na sběrnici potřeba, je právě poloha přepínače reprezentována čísly 0 až v našem případě 12 (jsou použity přepínače s 12ti polohami). Díky tomuto je možné informaci o poloze přepínače vměstnat pouze do 4 bitů oproti 12 v případě nezpracované analogové hodnoty. Algoritmus, který byl použit, je znázorněn na Obr. 46.



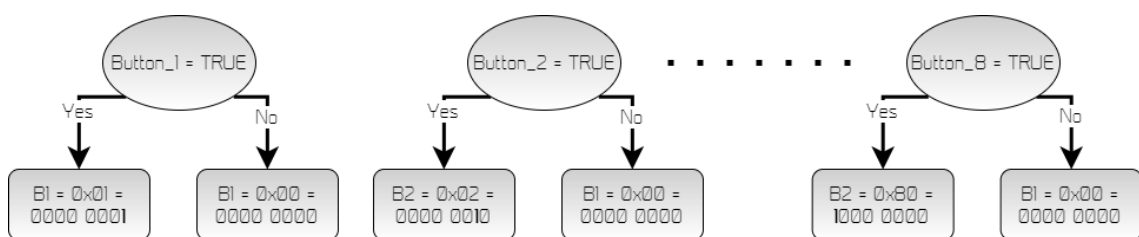
Obr. 46 - Vývojový diagram vyhodnocování polohy přepínače a jeho zpracování

7.6 Komunikace CAN

Navržený systém používá jednosměrnou komunikaci, kdy jednotka STEERING funguje v režimu „normal“¹⁸ a jednotka ARB v režimu „silent“¹⁹. Jednotka STEERING tak posílá veškeré informace na sběrnici a ostatní jednotky (SHIFTING, ARB, DASH atp.) tyto zprávy přijímají. Jsou vysílány dvě zprávy s dvěma adresami (se standardní délkou ID, tedy 11 bitů). Jedna zpráva s ID 0x11 je vysílána cyklicky s periodou 100 ms. V této zprávě se nacházejí údaje o všech přepínačích a tlačítkách. Druhá zpráva s ID 0x777 je zpráva, která je vysílána pouze a ihned po stisknutí pádel řazení a má vyšší prioritu. Takto rozdělené zprávy jsou používány z důvodu snadnější možnosti analýzy systému řazení (sběrnice CAN je zaznamenávána dataloggerem). Logika posílání a prioritizace zpráv je znázorněna na Obr. 44.

Příprava dat pro odeslání zprávy

Snahou a cílem komunikace bylo vměstnat všechna data do pokud možno nejmenšího množství bitů/bytů. Programovací jazyk C však nepoužívá datový typ Boolean²⁰, což by bylo vhodné a logické pro vyhodnocování a zpracování stavů tlačítek a dvupolohových přepínačů. Kódování, které bylo použito, se nazývá bitové maskování a je v něm využito pro tento případ pouhého algebraického součtu binárních čísel, která jsou určena již dle stavu tlačítek podle schématu na Obr. 47.



Obr. 47 - Bitové maskování pro případ tlačítek a dvupolohových přepínačů, pro další logické vstupy postupují analogicky - nastavují pouze jeden bit do jedničky.

Tento princip se odehrává v jednom podprogramu, na jehož konci se všechny hodnoty (dle schématu B1- B8) sečtou prostým algebraickým součtem.

¹⁸ Režim, při kterém jednotka pracuje s klasickými principy arbitráže zpráv a prioritami.

¹⁹ Režim, při kterém jednotka pouze poslouchá a přijímá zprávy na sběrnici, bez toho, aby se jakkoli aktivně podílela na komunikaci. Nemůže tak žádat o vysílání zpráv atp.

²⁰ Dvuhodnotová veličina. Nabývá hodnot 1 nebo 0.

Příslušný byte (v případě 8 vyhodnocovaných tlačítek) potom obsahuje logické stavy všech tlačítek a dvoupolohových přepínačů.

Pro případ rotačních přepínačů již pracuji přímo s hodnotou polohy přepínače v rozsahu 1-12. To znamená, že pro jednoznačné popsání stavu jednoho rotačního přepínače stačí pouze 4 bity neboli nibble. Proto, aby do jednoho bytu mohly být vměstnány údaje ze dvou těchto přepínačů, byl využit princip bitového posunu, a to právě o 4 bity vlevo. Výsledná komunikace pro zprávu s ID 0x11 (cyklicky odesílaná zpráva) popisuje Tab. 7 a lze v ní vyzorovat, že výsledná délka zprávy je pouze 4 byty, z čehož 3 byty jsou data. Nultý bit zde slouží jako jakási kontrolní adresa a je využíván při analýze dat, zaznamenaných dataloggerem.

Byte nr.	Higher nibble				Lower nibble			
Control adress	HEX control adress (0xAB, etc.)							
Data 1	Rotary 1 (0x0 - 0xB)				Rotary 2 (0x0-0xB)			
Data 2	Rotary 3 (0x0-0xB)						SW11	SW10
Data 3	B8	B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1

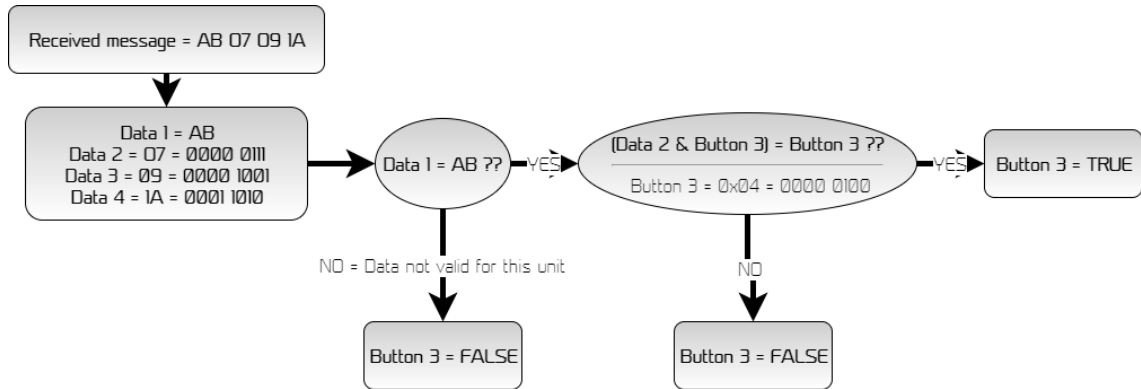
Tab. 7 - Zpracování dat z jednotky STEERING pro odeslání zprávy CAN

Dekódování zpráv jednotkami v „Silent“ módu:

Když jednotka na sběrnici přijme zprávu CAN, jedná se pouze o soubor bitů případně hexadecimálních čísel (záleží na úhlu pohledu). Aby s těmito zakódovanými daty bylo možné dále pracovat, je nutné je rozkódovat. Zde bylo použito také bitové maskování, ale bylo zde využito logického součinu. Jak takové rutiny fungují je opět prezentováno pro názornost na příkladech na dvou následujících vývojových diagramech.

Vyhodnocení stavu tlačítka 3:

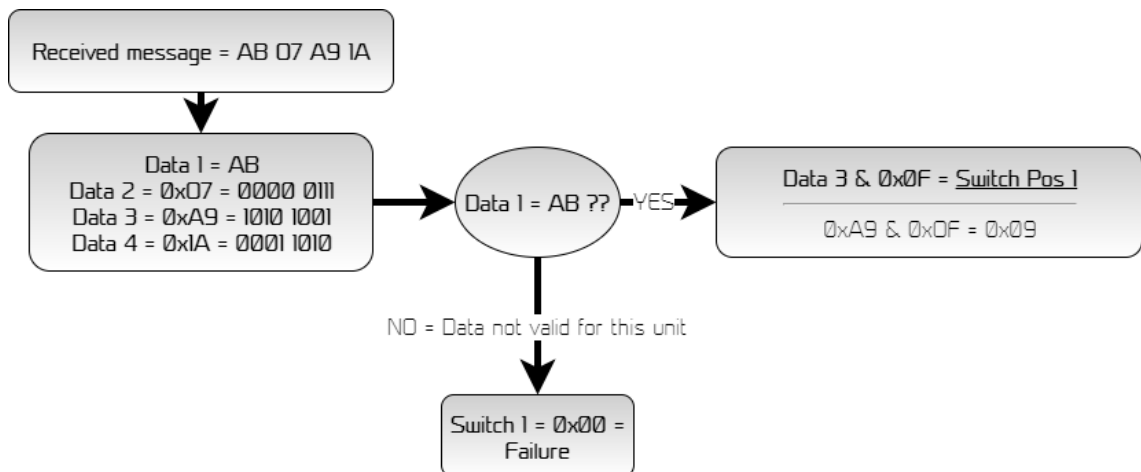
Stav tohoto tlačítka se nachází v druhém bytu zprávy na bitu číslo 2 (v případě, že bit vpravo je nultý bit). Dekódování probíhá dle Obr. 48.



Obr. 48 - Dekódování zprávy pro získání stavu tlačítka 3 na volantu

Vyhodnocení polohy rotačního přepínače:

Princip vyhodnocování je obdobný jako vyhodnocování tlačítek. Zde je však hodnota příslušného bytu sečtena logickým součtem s hodnotou 0xF (0x0F nebo 0xF0). Tím je získána poloha příslušného rotačního 12ti polohového přepínače. Názorně je algoritmus opět vyobrazen na Obr. 49.

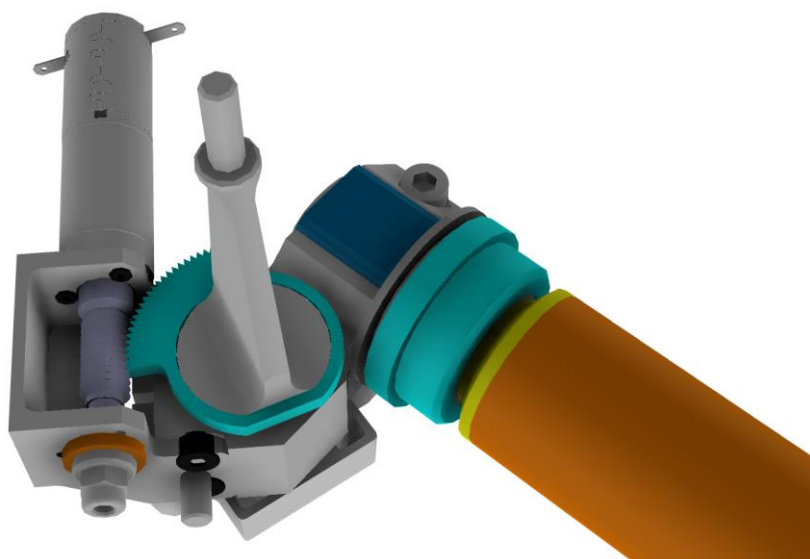


Obr. 49 - Dekódování zprávy pro získání stavu 12 polohového rotačního přepínače na volantu

Komunikace po sběrnici CAN byla dále validována. Výsledky validace a ukázky komunikace jsou prezentovány v podkapitole 8.1.

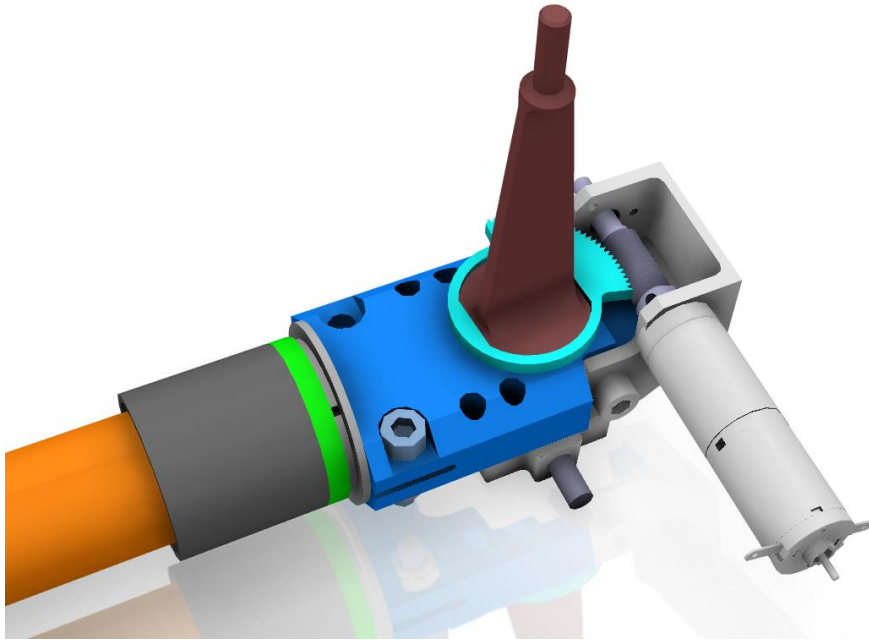
7.7 Realizace mechanismů polohování a snímání polohy

Při návrhu mechanismů polohování byla uvažována i snadnost výroby. Většina jeho součástí byla vyrobena členy týmu. Motory od firmy Maxon byly dodány partnerem týmu – firmou Kwapil & Co. Jedinými díly, které nebyly vyrobeny členy týmu, jsou ozubená kola polohování a samotné šavle stabilizátoru. Ozubená kola byla vyrobena metodou EDM²¹. Ostatní součásti s výjimkou šnekového kola a držáků magnetu pro snímač polohy byly vyrobeny metodou třískového obrábění na CNC soustruzích a frézkách. Šnekové kolo pak bylo vyrobeno na konvenčním soustruhu a ozubení závitovým očkem (stoupání závitu bylo navrhováno se záměrem možnosti použití závitového oka). Držák magnetů pro snímání polohy byl vyroben metodou 3D tisku z plastu PLA. Na obou modulech by se samozřejmě dalo ještě několik gramů ušetřit, ale tato úspora by vyžadovala zvýšení složitosti součástí, a tedy i zkomplikování výroby. Moduly, které jsou připevňovány k držákům šavlí (celý modul je tedy velmi snadné demontovat), jsou totožné pro přední a zadní nápravu a včetně motorů váží každý 88 g, což splňuje počáteční požadavky na maximální hmotnost systému.



Obr. 50 - Mechanismus polohování přední šavle stabilizátoru

²¹ Elektrojiskrové řezání drátem.



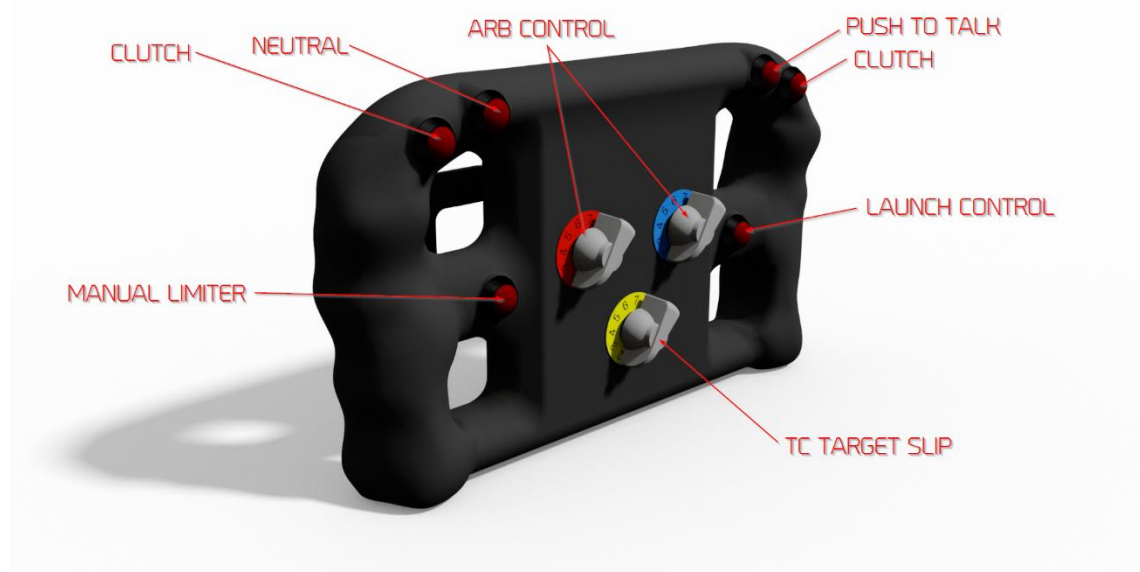
Obr. 51 - Mechanismus polohování zadní šavle stabilizátoru

7.8 Multifunkční volant

I když tělo volantu přímo nesouvisí se systémem polohování stabilizátorů, jeho návrh probíhal spolu s tímto systémem a bylo by vhodné se o něm velice stručně zmínit. Cílem návrhu volantu byla co možná nejlepší ergonomie úchopu a rozvržení ovládacích prvků. Zároveň bylo cílem umístění všech přepínačů a tlačítek, která jsou používána za jízdy na volant (na starších vozech byly na volantu pouze tlačítka pro ovládání řazení). S tímto požadavkem se ukázalo také výhodné použití sběrnice CAN.

Návrh začínal otisknutím dlaní do modelovací hmoty (plastelíny). Tyto otisky byly poté naskenovány na 3D skeneru. Z těchto skenů se začal tvořit 3D model samotných úchopů, které poté byly propojeny s tělem volantu. Před samotným zpracováním finálního modelu volantu byla také rozmístěna všechna tlačítka a přepínače do tzv. geometrical setu.

Od začátku návrhu bylo počítáno s technologií výroby z uhlíkového kompozitu a tzv. prepregu²². Na základě modelu volantu byly vytvořeny i modely forem dvou polovin volantu se zámkem pro lepení. Tyto formy byly obrobena partnerskou firmou z hliníku. Formy byly poté manuálně vyleštěny do vysokého lesku (jakost povrchu forem výrazně ovlivňuje i jakost povrchu finálního výrobku). Do těchto forem bylo vyskládáno dle požadavků na pevnost 3-6 vrstev uhlíkového prepregu. Formy s tkaninou byly poté vyvakuovány a vytvrzeny v autoklávu. Vzniklé poloviny byly poté předopracovány a následně slepeny konstrukčním epoxidovým lepidlem dohromady. Vzniklé tělo volantu bylo dále osazeno veškerou elektronikou, rychlospojkou s elektrickým konektorem a systémem pádel řazení. Model volantu s popisky jednotlivých funkcí (bez pádel řazení, které jsou na zadní straně volantu) je možné vidět na Obr. 52, finální výrobek na pořízené fotografii pak na Obr. 53.



Obr. 52 - Popis funkcí multifunkčního volantu, který skrývá jednotku STEERING

²² Uhlíková (kevlarová, skelná) tkanina, která je z výroby předsycena definovaným množstvím pasivované (nevytvazuje za běžných teplot, resp. vytvrzuje velmi pomalu v řádu měsíců) pryskyřice.



Obr. 53 - Finální výrobek volantu pro vůz FS.08 a FS.09

7.9 Vývojové problémy

Vývojových problémů se samozřejmě, jak už to tak bývá, objevilo poměrně velké množství. Prvními problémy, které bylo nutné vyřešit, byly samozřejmě problémy s hardwarem. První navržená jednotka nebyla schopná řízení motorů. Analýza poté ukázala, že díky chybě v zapojení radičů motorů, došlo ke zkratu na pinech mikrokontroleru. Zároveň na této verzi 0 byly problémy s měřením analogového signálu. Další verze jednotky již fungovala dle očekávání a požadavků. Testování systému v reálných podmínkách však poukázalo na nutnost nebo spíše vhodnost rozdělení pinů SLEEP pro každý radič zvlášť. Dále zde byla zjištěna chyba v návrhu schématu, kdy i při referenčním napětí 3V3 pro snímače polohy byl připojen dělič napětí, který zbytečně snižoval citlivost, potažmo rozsah měřených hodnot. Verze DPS, která byla popsána v této diplomové práci, všechny tyto problémy řeší. Zároveň byly v průběhu testování vyřešeny rozličné problémy firmwaru. Ty však nebudou konkrétněji specifikovány, protože se většinou jednalo pouze o detaily v algoritmu řízení nebo CAN komunikaci. Největším problémem, který

se objevil v počátcích testování systému na voze FS.08, bylo měření zpětné vazby. Tento fakt zde byl již jednou zmíněn a k jeho částečnému vyřešení došlo až s použitím bezkontaktních snímačů polohy, které především měří přímo polohu šavle (bez převodů). Problém se zpětnou vazbou se však i v tomto systému stále částečně nachází a je detailněji rozebrán v kapitole 9.

8 Testování systému

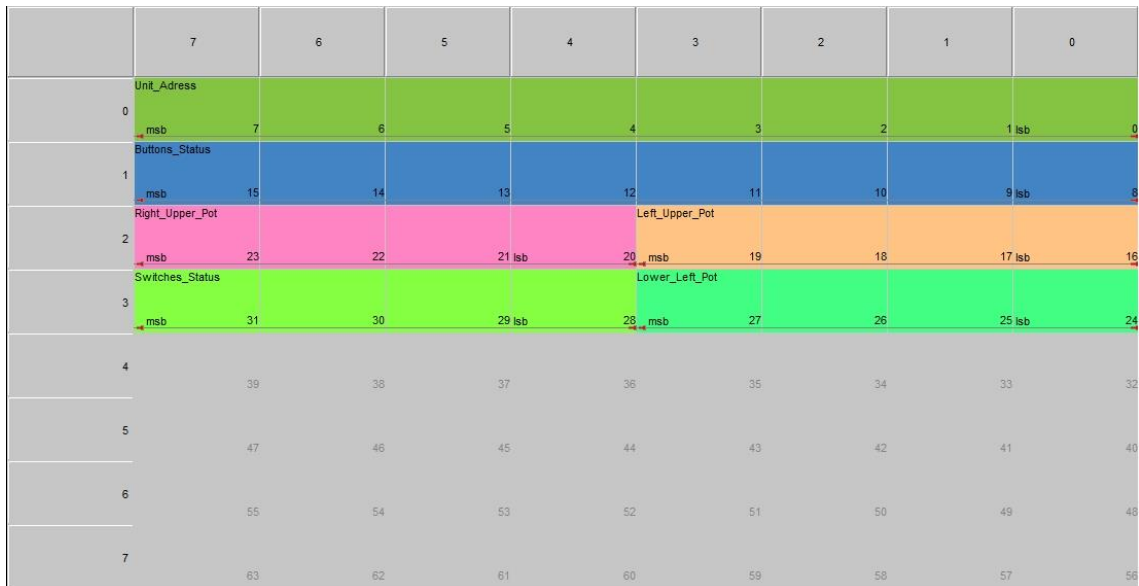
Jak bylo psáno již několikrát v této práci, záměrem návrhu bylo systém opravdu nasadit a aktivně používat. Tým CTU CarTech dbá na důkladné otestování veškerých systémů, které jsou později nasazeny v závodech. I když se samozřejmě někdy stane, že i přes důkladné otestování se závada na některých systémech objeví, je toto dle mého názoru přístup, který koresponduje s reálným světem průmyslové výroby. Proto i systém elektronického systému pro nastavování zkrutných stabilizátorů musel být před nasazením do závodu důkladně otestován. I přesto, že byl otestován a neobjevil se na něm závažnější problém, je stále možné systém z kokpitu vozu vypnout. Testování je popsáno v několika následujících podkapitolách.

8.1 Validace komunikace po sběrnici CAN

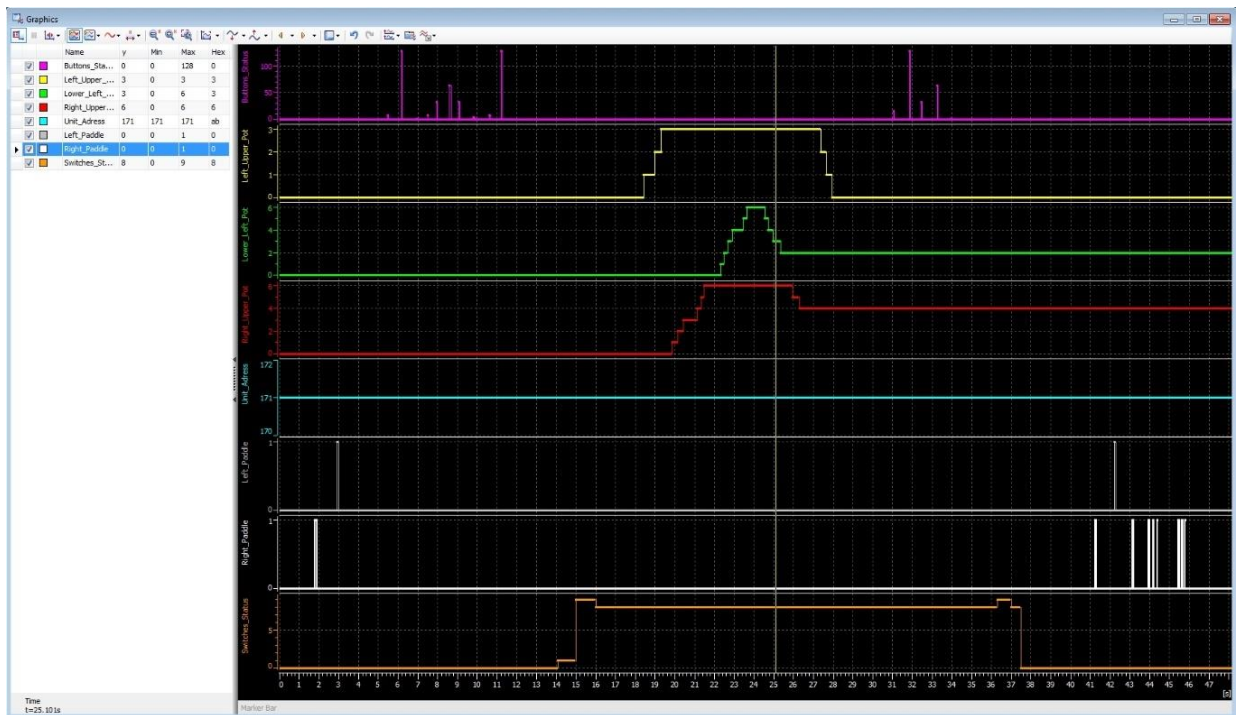
Prvním testem, který byl uskutečněn, byla validace komunikace po sběrnici CAN. Na sběrnici CAN jsou, jak již bylo zmíněno, i data pro ostatní jednotky vyvinuté týmem CTU CarTech. Validace proběhla pro celou komunikaci, tudíž jsou na přiložených obrázcích prezentována i data/zprávy, která nejsou relevantní přímo pro systém nastavování stabilizátorů. Testování komunikace bylo provedeno v programu CANoe v8.3 od firmy VECTOR s použitím hardwarové měřicí karty CANcase XL. Jedná se o profesionální řešení od firmy, která určuje trend na poli automotive řešení CAN komunikace.

Základem testu bylo vytvoření měřicího projektu, jeho správné nastavení a hlavně tvorba tzv. souboru DBC, což je jakási databáze, ve které jsou všechny informace o použité komunikaci CAN (DLC, Startbity, bitová délka signálů atp.). Grafické znázornění tohoto souboru DBC je na Obr. 54.

V neposlední řadě následovalo samotné testování, kdy byla sběrnice CAN jednotky STEERING připojena k výše zmíněné měřicí kartě. Dále byly měněny stavy všech přepínačů a tlačítek na volantě. Vystup tohoto měření je graficky zobrazen na Obr. 55 a v textovém výpisu potom na Obr. 56.



Obr. 54 - Vyobrazení souboru DBC zprávy Status (ID 0x11) v programu CANoe



Obr. 55 - Grafické znázornění komunikace po sběrnici CAN v programu CANoe v8.3

Time	Chn	ID	Name	DLC	Data	Diff Time
20.5010	CAN 1	777	Paddles	2	00 00	0.0010
20.6000	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 33 80	0.0990
20.6010	CAN 1	777	Paddles	2	00 00	0.0010
20.7000	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 33 80	0.0990
20.7010	CAN 1	777	Paddles	2	00 00	0.0010
20.8000	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 33 80	0.0990
20.8010	CAN 1	777	Paddles	2	00 00	0.0010
20.9000	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 33 80	0.0990
20.9010	CAN 1	777	Paddles	2	00 00	0.0010
21.0000	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 33 80	0.0990
21.0010	CAN 1	777	Paddles	2	00 00	0.0010
21.1000	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 33 80	0.0990
21.1010	CAN 1	777	Paddles	2	00 00	0.0010
21.1121	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 43 80	0.0111
21.2000	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 43 80	0.0879
21.2010	CAN 1	777	Paddles	2	00 00	0.0010
21.3000	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 43 80	0.0990
21.3010	CAN 1	777	Paddles	2	00 00	0.0010
21.3201	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 53 80	0.0191
21.4000	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 53 80	0.0799
21.4010	CAN 1	777	Paddles	2	00 00	0.0010
21.4811	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 63 80	0.0801
21.5000	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 63 80	0.0189
21.5010	CAN 1	777	Paddles	2	00 00	0.0010
21.6000	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 63 80	0.0990
21.6010	CAN 1	777	Paddles	2	00 00	0.0010
21.7000	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 63 80	0.0990
21.7010	CAN 1	777	Paddles	2	00 00	0.0010
21.8000	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 63 80	0.0990
21.8010	CAN 1	777	Paddles	2	00 00	0.0010
21.9000	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 63 80	0.0990
21.9010	CAN 1	777	Paddles	2	00 00	0.0010
22.0000	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 63 80	0.0990
22.0010	CAN 1	777	Paddles	2	00 00	0.0010
22.1000	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 63 80	0.0990
22.1010	CAN 1	777	Paddles	2	00 00	0.0010
22.2000	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 63 80	0.0990
22.2010	CAN 1	777	Paddles	2	00 00	0.0010
22.3000	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 63 80	0.0990
22.3010	CAN 1	777	Paddles	2	00 00	0.0010
22.3121	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 63 81	0.0111
22.4000	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 63 81	0.0879
22.4010	CAN 1	777	Paddles	2	00 00	0.0010
22.4890	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 63 82	0.0880
22.5000	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 63 82	0.0110
22.5010	CAN 1	777	Paddles	2	00 00	0.0010
22.6000	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 63 82	0.0990
22.6010	CAN 1	777	Paddles	2	00 00	0.0010
22.6961	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 63 83	0.0951
22.7000	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 63 83	0.0039
22.7010	CAN 1	777	Paddles	2	00 00	0.0010
22.8000	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 63 83	0.0990
22.8010	CAN 1	777	Paddles	2	00 00	0.0010
22.8890	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 63 84	0.0880
22.9000	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 63 84	0.0110
22.9010	CAN 1	777	Paddles	2	00 00	0.0010
23.0000	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 63 84	0.0990
23.0010	CAN 1	777	Paddles	2	00 00	0.0010
23.1000	CAN 1	AB	Steering_Wheel_Status	4	AB 00 63 84	0.0990

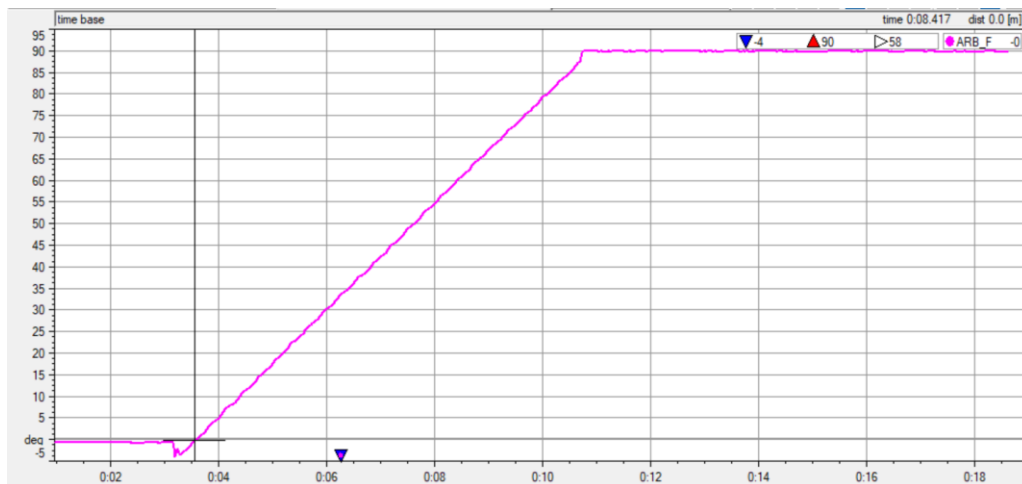
Obr. 56 - Výpis zpráv vyslaných na sběrnici CAN Bus z programu CANoe v8.3

Díky tomuto testu bylo validováno, že navržená a implementovaná komunikace funguje dle očekávání a také bylo prověřeno, že bylo dodrženo časování zpráv (i když časování zpráv není při této aplikaci nikterak kritické). Bohužel nebylo změřeno procentuální vytížení sběrnice, ale vzhledem ke struktuře komunikace (posílají se pouze 2 ID) se nedá počítat s tím, že by vytížení mělo být kritické.

Dalším krokem verifikace sběrnice CAN bylo propojení jednotky STEERING s dalšími jednotkami, takže také s jednotkou ARB a bylo ověřeno správné čtení zpráv a dekodování prostřednictvím debug režimu vývojového prostředí.

8.2 Testování rychlosti polohování

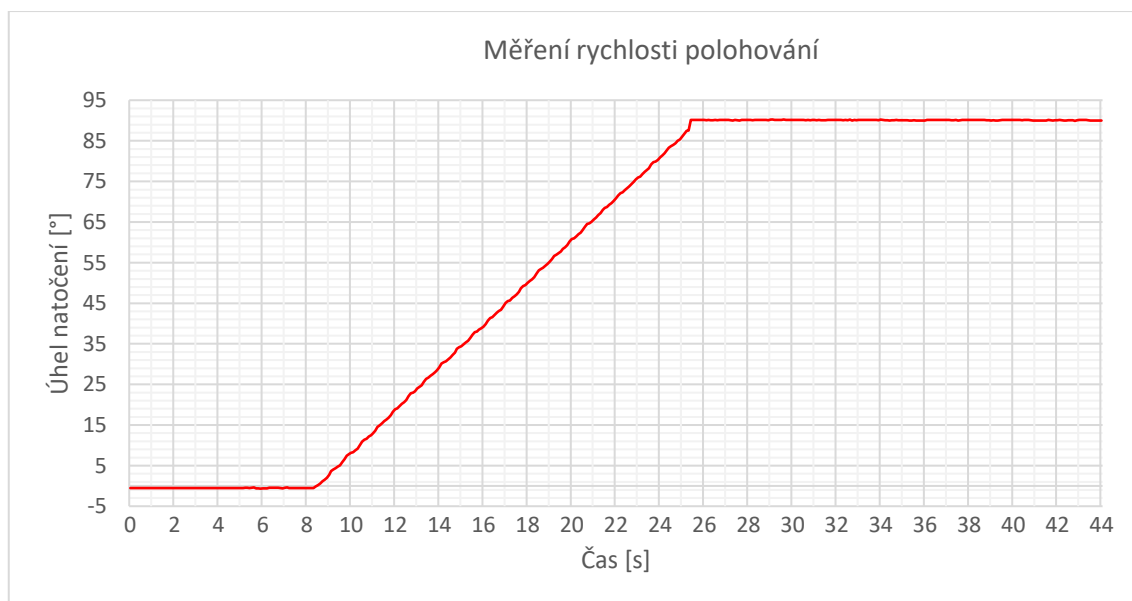
Dalším krokem validace bylo testování samotného systému ARB na voze FS.09. Prvním uskutečněným testem bylo statické měření rychlosti polohování. Testována byla rychlost, respektive čas nutný k přestavení z nulové polohy (minimální tuhost) šavle do maximální polohy (maximální tuhost). Měření mezi jednotlivými polohami sice bylo uskutečněno, ale není zde uvedeno, protože určení směrnice, a tedy rychlosti je patrné již z měření mezi nulovou a maximální polohou. Tato měření byla provedena s kompletním systémem a zaznamenána palubním dataloggerem. Zaznamenaná data byla však pro lepší názornost a přehlednost exportována do MS Excel. Pro ilustraci je zde na Obr. 57 ukázán grafický výstup programu AiM Race Studio 2, který se v týmu CTU CarTech používá k analýze dat, zaznamenaných během jízdy. Zde uvedené grafy a tabulky se týkají měření na přední nápravě. Měření na zadní nápravě bylo samozřejmě také provedeno, ale vzhledem k tomu, že rozdíly mezi přední a zadní nápravou byly pouze minimální nebo žádné, nejsou zde tyto grafy uvedeny.



Obr. 57 - Rychlost polohování v programu AiM Race Studio 2

Důvodem exportu dat bylo především podivné zobrazování časové osy, která nekorespondovala se skutečně naměřenými daty. Na Obr. 58 již lze vidět graf sestavený z exportovaných dat. Šavle se začala pohybovat (na základě přenastavení přepínače na volant) v čase 8,4 s. K přenastavení do úhlu 90° došlo v čase 25,4 s.

Čas potřebný k přestavení z 0° na 90° je tedy 17 s. Rychlost polohování je tedy po zaokrouhlení 5,3 °/s. Důležitým údajem by mohl být i čas potřebný k přestavení o 10°, který je dle tohoto měření cca 1,89 s/10°.



Obr. 58 - Graf testování rychlosti. Vstupem byly data exportovaná z programu AiM Race Studio 2

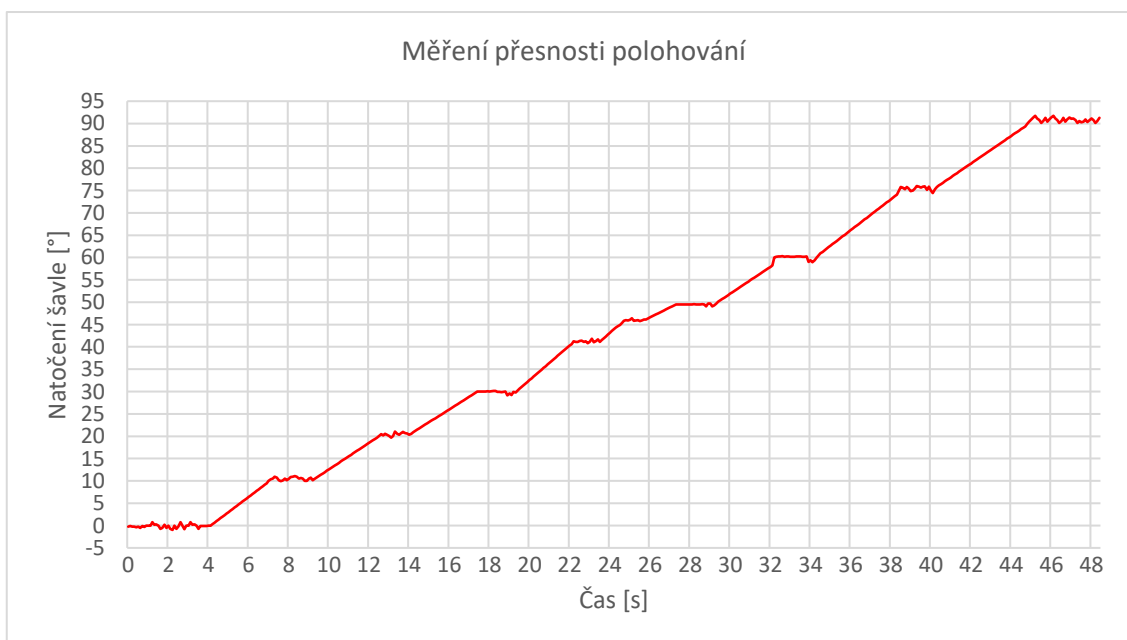
Na tomto měření se potvrdilo, že systém opravdu není rychlý a jeho použití pro aktivní řízení náprav nepřipadá v úvahu. S tímto se však již počítalo v samotném návrhu, tudíž měření jen potvrzuje předpoklady.

8.3 Testování přesnosti polohování

Dalším krokem bylo vyhodnocení přesnosti polohování. V testování byla měřena hodnota úhlu natočení pro každou polohu pro nastavování směrem od nejměkčího nastavení po nejtvrdší a opačně. Pro každou polohu byla vždy z dat vyčtena naměřená hodnota po ustálení signálu a ta byla zavedena do Tab. 9. Toto měření bylo opakováno celkem pětkrát. Požadované polohy šavlí v závislosti na poloze přepínačů na volantu prezentuje Tab. 8, ukázkou z jednoho cyklu pro měření směrem od nejnižší tuhosti k nejvyšší pak Obr. 59 (celý cyklus měření byl značně nepřehledný, proto je zde uváděn pouze jeho výřez).

Hodnota přepínače	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Úhel [°]	0	10	20	30	40	45	50	60	75	90

Tab. 8 - Požadované úhly šavlí v závislosti na poloze přepínačů



Obr. 59 - Graf testování přesnosti polohování. Vstupem byly data vyexportovaná z programu AiM Race Studio 2

Výsledky měření přesnosti polohování jsou uvedené v Tab. 9, Tab. 10 a Tab. 11.

Poloha přep.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Směr	Úhel 1 [°]	Úhel 2 [°]	Úhel 3 [°]	Úhel 4 [°]	Úhel 5 [°]	Úhel 6 [°]	Úhel 7 [°]	Úhel 8 [°]	Úhel 9 [°]	Úhel 10 [°]
0-90	0,34	10,56	21,01	30,14	39,91	45,05	50,98	61,21	74,87	90,1
90-0	-0,45	9,7	20,56	30,69	40,21	44,88	50,11	60,42	75,44	90,1
0-90	-0,45	10,1	20,13	31,04	40,81	46,31	49,81	60,22	75,07	89,04
90-0	0,12	10,28	19,78	30,89	40,19	45,12	50,31	59,68	76,9	89,04
0-90	0,12	10,3	20,69	29,59	39,78	44,66	50,15	60,35	75,44	91,4
90-0	0,62	9,45	20,53	30,56	39,88	45,34	49,12	60,79	74,66	91,4
0-90	0,62	10,98	19,68	31,35	40,81	45,01	49,98	59,45	76,08	90,1
90-0	-1,2	10,67	19,83	30,56	40,89	45,51	50,09	60,23	74,3	90,1
0-90	-1,2	10,03	20,36	30,44	40,37	45,72	50,22	61,63	75,01	90,82
90-0	0,09	9,79	20,51	29,99	40,82	44,69	50,22	60,74	74,24	90,82

Tab. 9 - Naměřené hodnoty natočení šavle pro 5 cyklů měření

Poloha. přep	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Max. odchylka od ž. polohy. [°]	1,2	0,98	1,01	1,35	0,89	1,31	0,98	1,63	1,9	1,4

Tab. 10 - Maximální odchylka od žádaných poloh

Poloha přepínače	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Rozsah hodnot [°]	1,82	1,53	1,33	1,76	1,11	1,65	1,86	2,18	2,66	2,36

Tab. 11 - Rozptyl hodnot pro jednotlivé žádané polohy

Maximální odchylka od žádané polohy tedy byla 1,63° při žádané poloze 60°. Největší rozptyl hodnot 2,66° byl pozorován při žádané poloze 75°. Průměrná odchylka od žádané polohy je potom 0,504° a medián 0,39°. Tyto průměrné hodnoty se dle mého názoru jeví poměrně pozitivně. Největší naměřené odchylky však poukazují na jisté limity.

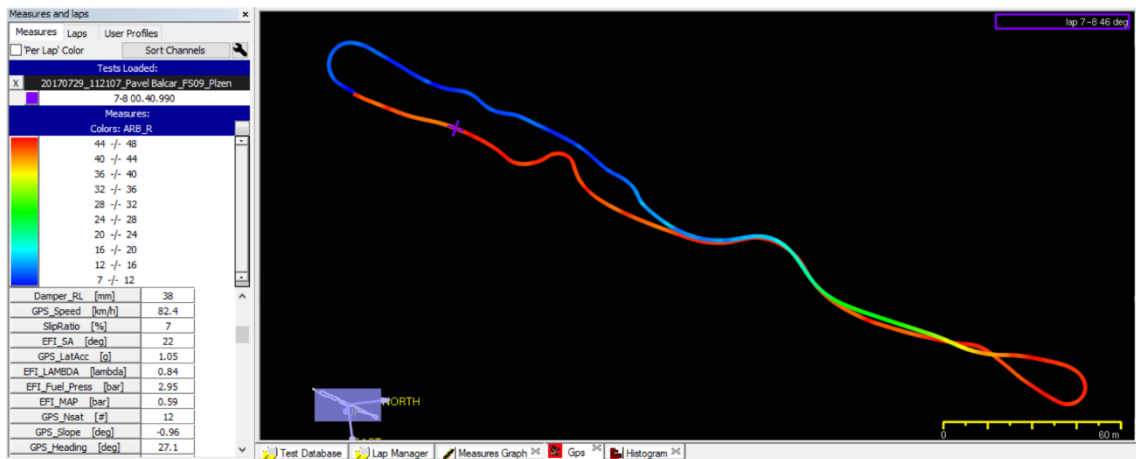
8.3.1 Vliv přesnosti na výslednou zkrutnou tuhost

Pokud by byla uvažována průměrná hodnota naměřené odchylky, dá se říci, že vliv na výslednou zkrutnou tuhost je zanedbatelný ba dokonce neměřitelný senzory dostupnými v současnosti na voze. Při nejvyšší odchylce 1,63° je rozdíl ve zkrutné tuhosti 1,42 %. Dle vyjádření návrháře odpružení je tato chyba přijatelná a je velice pravděpodobné, že se stejná procentuální chyba může projevit i kvůli nepřesnostem výroby šavlí, zkrutné tyče atp.

8.4 Dynamické testování

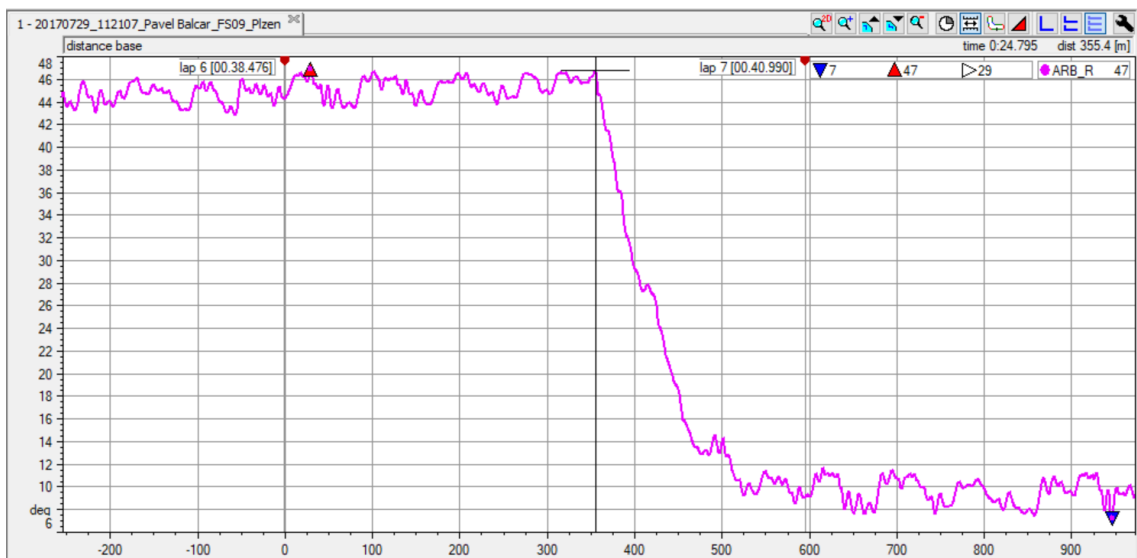
System byl dále testován již za jízdy na tratích v reálných podmínkách. Potvrdilo se, že mechanismus polohování nemá problém s polohováním šavlí i během jízdy v plném závodním tempu (kdy je systém stabilizátorů dynamicky namáhaný). Ukázalo se, že zde pouze kolísá rychlost polohování. Toto je způsobeno kolísavým zatěžováním v uložení šavle, a tudíž proměnlivými odporovými silami/momenty.

Na následujícím Obr. 60 je znázorněn úhel natočení šavle v závislosti na GPS souřadnicích tratě. Červená barva na obrázku znamená konstantní úhel natočení šavle v úhlu 45°. Na výjezdu ze zatáčky v pravém dolním rohu byla pilotem na volantu změněna žádaná poloha šavlí na polohu přepínače 2, což znamená požadovanou polohu šavlí 10°. Přestavování systému je v obrázku signalizováno postupným přechodem barvy od červené až po modrou. V momentě, kdy přejde barva do sytě modré, šavle stabilizátoru byla přestavena. Na tomto obrázku je tak možné, udělat si představu o reálné rychlosti nastavování vzhledem k časové konstantě děje.



Obr. 60 - Vyobrazení úhlu natočení šavle v závislosti na GPS datech. Červená barva - výchozí poloha (45°), přechod barvy- přestavování, sytě modrá - nová poloha šavle (10°)

Na následujícím Obr. 61 je zobrazena stejná situace, ale úhel natočení šavle je zde závislý na ujeté vzdálenosti. Je zde vidět, že vzdálenost, která byla ujeta od změny žádané hodnoty (z 45° na 10°) je cca 150 m. Zároveň je zde vidět značné rozkmitání měřeného signálu kolem žádaných hodnot (tj. po ukončení polohování). Pravděpodobně se jedná o šum, případně o velmi jemný pohyb šavle, který je umožněný kvůli drobné vůli v ozubeném převodu, případně je možná kombinace obou hypotéz. Pro potvrzení, že tento rozkmit není způsoben nežádoucími pohyby motoru polohování, byla na vozidlo připevněna akční kamera. Záznam jízdy ukázal, že opravdu nedochází k nežádoucímu pohybu motoru. Taktéž nebyl pozorován výrazný pohyb šavlí, tudíž je pravděpodobné, že vyobrazený rozkmit je opravdu způsoben šumem.



Obr. 61 - Ukázka změny natočení zadní šavle stabilizátoru při jízdě na trati (Závislost natočení na ujeté vzdálenosti na trati)

9 Zhodnocení výsledků

Kriticky a nezaujatě hodnotit vlastní odvedenou práci je poměrně složité. Systém, který byl navržen, má samozřejmě své limity a problémy. V následujících dvou odstavcích budou popsány klady a zápory navrženého systému tak, jak je subjektivně vnímám. V posledním odstavci této kapitoly pak budou rozebrána detailněji fakta, která ovlivnila rozhodnutí použít navržený systém.

Nesporným kladem navrženého systému je fakt, že byl i během relativně krátké doby zrealizovaný a dotažený do relativně zdárného konce. Byly splněny všechny požadavky návrhu a systém pomohl během dosavadních absolvovaných testovacích dní uspořít tolik cenný čas. Hlavním cílem však byla možnost přizpůsobení vozidla jízdnímu stylu pilotů během jízdy a zlepšení práce vozidla s teplotou pneumatik. I tady se systém osvědčil a byl aktivně využíván během závodů i testování. Nejvíce bylo systému využíváno právě pro účely přizpůsobení vozu, kdy si opravdu každý pilot během testování našel svou osobní kombinaci přednastavených tuhostí šavlí, které potom při samotném závodě byly během jízdy jen jemně doladěny dle příslušného povrchu. Práce s teplotou pneumatik byla využívána převážně jen nejzkušenějšími piloty a spíše než ovlivnění zahřívání pneumatik zpočátku jízdy se během závodů ukázala výhodná možnost kompenzovat ne úplně vhodné nastavení tlaku v pneumatikách na začátku disciplíny endurance, což mělo za následek přehřívání pneumatik od zhruba třetiny závodu. Díky této možnosti bylo možné eliminovat nebo alespoň omezit výraznou přetáčivost vozu, vzniklou v důsledku přehřátí zadních pneumatik. Zde by bylo vhodné tento fakt ukázat na naměřených datech, ale bohužel vůz FS.09 není vybaven systémem pro snímání teploty pneumatik za jízdy, proto bohužel musí stačit pouze subjektivní vyjádření pilotů. Z inženýrského pohledu musím konstatovat, že bylo přínosné si na vlastní kůži vyzkoušet vývoj a hlavně ladění celého systému, které nakonec zabralo výrazně více času než počáteční návrh, a to hlavně z pohledu návrhu firmwaru jednotky. Ukázalo se totiž, že i s nejlepším vědomím a svědomím teoreticky navržený firmware nemůže v reálném provozu fungovat, přesněji řečeno nemůže fungovat na sto procent bez řádného a intenzivního otestování a vyladění. Za úspěch považuji i navržený hardware elektronických jednotek, kdy zejména jednotka STEERING ukázala,

že je více než dostatečnou, a hlavně univerzální platformou pro případný budoucí vývoj firmwaru, který bude umožňovat i implementaci nových funkcí. I firmware jednotky STEERING fungoval dle požadavků, a tak pokud nebude nutná kompletní změna funkcionality, může sloužit po několik následujících let v budoucích vozech týmu CTU CarTech. Navržený hardware jednotky ARB fungoval také dle požadavků a může sloužit do budoucna vcelku úspěšně jako základna pro ladění firmwaru systému pro natáčení zkrutných stabilizátorů.

Největší zápor navrženého systému spatřuji v jeho nízké rychlosti polohování. Tento zápor nicméně pramení z počátečních požadavků na systém a již od počátečního určení konceptu systému jsem s tímto faktem počítal. Tento fakt v podstatě diskvalifikuje navržený systém z jakýchkoli úvah pro opravdu aktivní řízení stabilizátorů v závislosti na jízdních stavech. Subjektivně však tento fakt hodnotím spíše jako vlastnost než závadu. Větší závadou se může zdát relativně nízká přesnost polohování, která byla rozebrána v podkapitole 8.3. I když výsledná přesnost cca $\pm 1,5^\circ$ nemá výrazný vliv na jízdní dynamiku, z hlediska řízení a mechatroniky subjektivně konstatuji, že kdyby systém dosahoval přesnosti maximálně $\pm 0,5^\circ$, což by se dalo již uvažovat za nepřesnost měření způsobenou dynamikou vozidla a rušením, bylo by navržené řízení uspokojivější. Další nedostatek spatřuji v nedokonalém ošetření možných chybových stavů ve firmwaru jednotky ARB a také téměř úplně chybějící diagnostice celého systému (jediným zaznamenaným údajem z jízdy je úhel natočení šavlí). Zde by bylo vhodné do firmwaru implementovat část kódu, která by po sběrnici CAN posílala do dataloggeru důležité vnitřní proměnné a stavy systému. Díky těmto datům by bylo možné lépe vyladit celý firmware na základě dat z reálné jízdy. Takto byl firmware laděn především na základě režimu „debug“ a jistých zkušenostech se systémem a domněnkách o dění ve firmwaru za jízdy. Dle mého názoru posledním problémem navrženého systému je rozsah zvoleného bezkontaktního „potenciometru“, který je 360° . Tento fakt byl způsoben neúspěchem při poptávání snímače stejného typu, ale s rozsahem 110° . Pokud by se podařilo získat snímač s tímto rozsahem, je velice pravděpodobné, že i zde navržený firmware, by dosahoval zmíněné přesnosti $\pm 0,5^\circ$.

Záměrem celého systému bylo jej opravdu nasadit do reálných podmínek a využívat jej, ne se jen pyšnit super sofistikovaným způsobem řízení, které funguje v simulaci, ale v reálných podmínkách již ne. Proto byly stanoveny poměrně nízké, dle mého názoru ale reálné cíle, které ale byly opravdu splněny, otestovány a aktivně využívány.

10 Výhled do budoucna

V tomto odstavci bych rád uvedl některá doporučení pro případné budoucí vývojáře systému. Tyto nápady a připomínky vznikly během celého průběhu realizace systému, kterého se týká tato práce. Nápadů samozřejmě vzniklo mnoho, ale následující čtyři z nich, seřazené chronologicky podle složitosti realizace, bych zde uvedl jako reálné a hodné hlubšího zamyšlení.

Ladění firmwaru

Hardwarové jednotky a mechanismy polohování by v této variantě zůstaly zachovány. Nicméně bych doporučil sehnat zde použitý typ snímače polohy, ale s rozsahem 110° , který by měl být k dostání na objednání od firmy Contelec (mě osobně se však nepovedlo jej sehnat i po mnohonásobném kontaktování firmy). Zde je potřeba si dát pozor na vhodnou orientaci onoho rozsahu 110° , protože se při objednávce zadává počátek zvoleného rozsahu od nulové polohy. Dále bych doporučil implementovat do firmwaru rutiny, které budou posílat vnitřní proměnné a stavy po sběrnici CAN do dataloggeru, a to především hodnoty měřené A/D převodníkem, požadovanou rychlost polohování, požadovanou polohu ve formátu žádané hodnoty A/D, hodnotu vypočtené regulační odchylky. Dále bych doporučil softwarově využít měření proudu protékajícího motory, a tyto hodnoty proudu zároveň také posílat do dataloggeru. Určitě bych také doporučil detailněji identifikovat možné chybové stavy a ty posílat na sběrnici a zaznamenávat dataloggerem. Očekávám, že na základě těchto zaznamenaných dat se mohou ukázat nedostatky mnou navrženého algoritmu, případně alespoň objevit místa pro zlepšení.

Změna aktuátoru

Navržený hardware bude schopný ovládat servomotory pro rádiem řízené modely, a to dokonce čtyři kusy prostřednictvím PWM modulace. Zde by bylo určitě zajímavé vyzkoušet reálnou použitelnost a schopnost servomotorů polohovat šavle. Při těchto pokusech by bylo vhodné měřit a zaznamenávat proud protékající servy a vyhodnotit, zda jejich odběr i při pouhém udržování žádané polohy nezatěžuje neúměrně napájení vozu. Přínosem tohoto řešení v případě úspěchu by mohlo být zvýšení rychlosti systému.

Řízení vzhledem k žádanému klopení a poměru klopení mezi přední a zadní nápravou

Vzhledem k tomu, že data o klopení jsou dostupná (mohou být dostupná) na sběrnici CAN, bylo by zajímavé systém řídit na základě těchto dat. Vzhledem k rychlosti polohování by bylo možné nebo spíše vhodné systém přestavovat, například jednou během kola, případně jednou za daný časový okamžik (např. max. jednou za 10 s), nikoliv však spojitě. Díky tomuto by se dala na volantu nastavovat přepínači hodnota žádaného klopení pro jednotlivou nápravu. Dalším vhodným krokem by pak mohlo být také nastavování žádané přetáčivosti/nedotáčivosti vozu, avšak v této variantě pouze s přímým řízením, které by vycházelo ze znalostí vozu a návrhových hodnot a bylo by uvažováno o zpětné vazbě klopení jednotlivých náprav (díky znalosti návrhových hodnot a hodnot skutečného klopení je možné víceméně empiricky určit, jestli vozidlo bude přetáčivé nebo nedotáčivé a jak moc). Zde by již bylo nutné aplikovat hlubší znalosti náprav vozu, dynamiky jízdy, ale je možné opět vyjít z hardwaru a částečně i softwaru (alespoň co se inicializace periférií týče) navrženého a realizovaného v této práci.

Aktivní řízení

Pro plně aktivní řízení systému by bylo vhodné využít dynamického simulačního modelu a řídit systém na jeho základě. Tohoto řešení by sice navržená hardwarová jednotka byla teoreticky schopná, ale bylo by třeba neúměrné množství času pro programování a bylo by nutné se například vypořádávat s absencí možnosti práce s plovoucí desetinou čárkou, kterou zde použitý mikrokontroler neumožňuje. Proto bych v tomto případě doporučil změnu hardwaru, která by se však pravděpodobně měla zaměřit pouze na výměnu procesoru, jenž umožňuje operace s plovoucí desetinou čárkou. Další navržené hardwarové bloky jednotky ARB by mělo být možné použít. Zde bych doporučil vybírat mikrokontroler, který umožňuje co možná nejsnadnější spolupráci s prostředím MATLAB/Simulink a jeho nástrojem Embedded Coder, případně ekvivalentním řešením a také případně možnost implementace standardu AUTOSAR. Tato diplomová práce by tak již byla vstupem varianty s aktivním řízením již minimálně, ale alespoň je zde ukázán směr, kterým by bylo vhodné se vydat a jakému řešení se raději vyhnout.

11 Závěr

V práci byla stručně popsána problematika zkrutných stabilizátorů osobních a také závodních vozů a mechanismy popisující výhody jejich použití a také velmi stručně popsány jevy dynamiky vozidel, které stabilizátory ovlivňují. Byly zde popsány principy aktivního řízení odpružení vozidel, a především systémy aktivního řízení zkrutných stabilizátorů. Tyto systémy byly prezentovány a popsány na reálných, realizovaných příkladech v osobních vozech, závodních vozech a také vozech pro soutěž Formula Student SAE, pro které je navrhován i systém elektronického nastavování zkrutných stabilizátorů v této práci. V úvodu práce byly také velmi stručně popsány tyto soutěže a vysvětleny základní principy závodů, pravidel a organizace týmů, a to i ve vztahu k týmu CTU CarTech, pro jehož nejnovější monopost je systém nastavování stabilizátorů navrhován.

Dále byly popsány cíle práce a určeny její výstupy včetně omezujících podmínek a popsány i zásady návrhu, kterých jsem se snažil při tvorbě systému držet.

Dále jsem analyzoval možné varianty řešení mechanismů polohování, aktuace, řízení, komunikace atp. Tyto varianty jsem popsal a určil výhody a nevýhody případného řešení. Detailněji jsem zde také rozebral požadavky na systém. Nakonec jsem vybral optimální řešení, které dle mého názoru nejlépe splňuje určené požadavky.

V následující kapitole jsem popsal samotnou realizaci celého systému. Byly popsány principy modulárního návrhu, které umožnily redukovat potřebný čas realizace. Popsal jsem koncept celého systému a určil jeho funkce, z kterých vzešla potřeba návrhu elektronických jednotek STEERING a ARB. Návrh elektronických schémat pro jednotku ARB a STEERING byl postupně v práci detailně rozebrán a byly popsány jednotlivé hardwarové bloky včetně určení vlastností elektronických komponent. Pro tyto jednotky byly také navrženy desky plošných spojů, které byly ručně osazeny elektronickými součástkami. Pro tyto jednotky byly dále navrženy příslušné řídicí algoritmy – firmwary, které obsahují komunikaci po sběrnici CAN Bus. Jejich funkce byla popsána na vývojových diagramech a byly popsány význačné funkce navrženého kódu. V

závěru kapitoly, která se týkala realizace, byly prezentovány a analyzovány problémy vývoje a realizace.

Systém byl otestován staticky a dynamicky. Těmito testy se zabývá další kapitola práce. Testování bylo realizováno na stojícím voze, kde byla otestována rychlost a přesnost polohování. Rychlost polohování byla analyzována ve vztahu k časové konstantě děje (jždě formule po okruhu), přesnost polohování pak ve vztahu na výslednou zkrutnou tuhost systému zkrutných stabilizátorů. Byla také validována komunikace po sběrnici CAN Bus. V této podkapitole diplomové práce byl také proveden rozbor rychlosti polohování ve vztahu k ujeté vzdálenosti na trati, a tudíž při dynamickém testování systému.

Byly kriticky zhodnoceny dosažené výsledky a analyzovány klady a zápory navrženého systému. Byly vysvětleny důvody mého přístupu k návrhu řešení tak, jak je popsáno v této diplomové práci a v neposlední řadě i omezující faktory při zpracování návrhu řešení.

V závěru diplomové práce jsem vypracoval doporučení pro případné budoucí pokračovatele a navrhl možné směry vývoje, které se mi jeví jako subjektivně vhodné ze zkušeností, které jsem získal při zpracování této práce. Zmínil jsem zde i výhody, které by tato doporučení přinesla oproti navrženému řešení, které bylo aplikováno v reálných podmínkách.

Navržené řešení bylo skutečně nasazeno v praxi na voze FS.09 týmu CTU CarTech, bylo aktivně využíváno při testování a závodech a byla ověřena jeho funkčnost a pozitivní vliv na celkové fungování vozu FS.09.

Seznam použité literatury

1. **SAE International.** Formula Student SAE Rules. *www.fsaeonline.com*. [Online] 2. září 2016.
<http://www.fsaeonline.com/content/2017-18%20FSAE%20Rules%209.2.16a.pdf>.
2. **CTU CarTech.** Interní materiály týmu CTU CarTech. 2014-2017.
3. **CTU CarTech.** Interní materiály vývojové podskupiny: Elektro, týmu CTU CarTech. 2014-2017.
4. **Neznámý.** White-Smoke. *white-smoke.wikifoundry.com*. [Online] 1. 20 2016. [Citace: 1. 10 2016.]
<http://white-smoke.wikifoundry.com/page/Heave%2C+Pitch%2C+Roll%2C+Warp+and+Yaw>.
5. **Gillespie, Thomas D.** *Fundamentals of vehicle dynamics*. Warrendale, PA : Society of Automotive Engineers, 1992. ISBN 1560911999.
6. **Neznámý.** Speed Academy. [Online] 5. 10 2016. [Citace: 30. 6 2017.] <http://speed.academy/how-swaybars-work/>.
7. **William F. Milliken, Douglas L. Milliken.** *Race Car Vehicle Dynamics*. místo neznámé : SAE International, 1995. 1560915269.
8. **Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG.** *presskit.porsche.de*. *presskit.porsche.de*. [Online] 2017. [Citace: 20. 6 2017.] <https://presskit.porsche.de/specials/en/porsche-fahrwerkentwicklung/topic/drei-spezifische-varianten-aktive-wankstabilisierung-pdcc.html>.
9. **ST.** *www.st.com*. *STM32F103C6*. [Online] červen 2015.
<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/0d/93/e0/d7/77/bf/4c/54/CD00210843.pdf/files/CD00210843.pdf/jcr:content/translations/en.CD00210843.pdf>.
10. **Texas Instruments.** *www.ti.com*. *DRV8816 DMOS Dual 1/2-H-Bridge Motor Drivers*. [Online] Únor 2016. [Citace: 25. Leden 2017.] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8816.pdf>.
11. **Záhlava, Vít.** *Návrh a konstrukce desek plošných spojů*. Praha : Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. 80-01-03351-1.

12. **PragoBoard s.r.o.** www.pragoboard.cz. [Online] 12. 10 2016. [Citace: 10. 1 2017.]
https://www.pragoboard.cz/vodic_mezera.

13. **Smith, Carrol.** *Tune to win.* místo neznámé : Carroll Smith Consulting, 1978. 0879380713.

14. **Trzesniowski, Michael.** *Rennwagentchnik: Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme.*
místo neznámé : Springer-Verlag, 2014. 3658049197.

15. **Wuwei Chen, Hansong Xiao, Qidong Wang, Linfeng Zhao, Maofei Zhu.** *Integrated Vehicle Dynamics and Control.* místo neznámé : John Wiley & Sons, 2016. 1118380010.

Seznam obrázků

OBR. 1 - RENDER 3D MODELU MONOPOSTU CTU CARTECH FS.09 – (2)	3
OBR. 2 - RENDER 3D MODELU Z PROSTŘEDÍ ALTIUM DESIGNER 15 JEDNOTKY ELEKTROPNEUMATICKÉHO ŘAZENÍ	5
OBR. 3 - SCHÉMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ELEKTRONIKY VOZU FS.08 – (3)	7
OBR. 4 - SOUŘADNÝ SYSTÉM VOZIDLA DLE NORMY ISO8855, VČETNĚ VYZNAČENÍ VÝZNAČNÝCH POHYBŮ ŠASI .	9
OBR. 5 - PRINCIP VZNIKU KLOPENÍ VOZU (5)	10
OBR. 6 - ZNÁZORNĚNÍ PRINCIPU ZKRUTNÉHO STABILIZÁTORU.....	12
OBR. 7 - ROZLOŽENÍ SIL V ČASE NA JEDNOTLIVÉ SOUČÁSTI ODPRUŽENÍ (TLUMIČ, PRUŽINA, STABILIZÁTOR) PŘI KVAZISTATICKÉM JEVU ZATÁČENÍ (7).....	13
OBR. 8 - ODPRUŽENÍ VOZU F1 S TŘEMI TLUMIČI A ZKRUTNÝM STABILIZÁTOREM	14
OBR. 9 - ZNÁZORNĚNÍ SYSTÉMU ŘÍZENÝCH STABILIZÁTORŮ PORSCHE – PDCC (8).....	16
OBR. 10 - SCHÉMA SYSTÉMU BMW ARS (ACTIVE ROLL STABILIZATION)	17
OBR. 11 - TYČ ZKRUTNÉHO STABILIZÁTORU S HYDRAULICKÝM AKTUÁTOREM PRO SYSTÉM BMW ARS	17
OBR. 12 - UKÁZKA NÁVRHU ELEKTRONICKY NASTAVITELNÝCH ZKRUTNÝCH STABILIZÁTORŮ V FSAE – RENNTEAM UNI STUTTGART – F0711-11.....	18
OBR. 13 - UKÁZKA REALIZACE ELEKTRONICKY NASTAVITELNÝCH ZKRUTNÝCH STABILIZÁTORŮ - FS TEAM TALLINN	18
OBR. 14 - UKÁZKA REALIZACE ELEKTRONICKY NASTAVITELNÝCH ZKRUTNÝCH STABILIZÁTORŮ - RENNTEAM UNI STUTTGART - F0711-9.....	19
OBR. 15 - SYSTÉM POLOHOVÁNÍ ŠAVLE STABILIZÁTORU NA VOZE FS.08 TÝMU CTU CARTECH.....	23
OBR. 16 - 3D MODEL PŘEDNÍ NÁPRAVY VOZU FS.08.....	24
OBR. 17 - 3D MODEL PŘEDNÍ NÁPRAVY VOZU FS.09 TÝMU CTU CARTECH S VYZNAČENÍM JEDNOTLIVÝCH PRVKŮ STABILIZÁTORU	25
OBR. 18 - 3D MODEL ZADNÍ NÁPRAVY VOZU FS.09 TÝMU CTU CARTECH (2)	26
OBR. 19 - VÝŘEZ VÝROBNÍHO VÝKRESU ŠAVLE PŘEDNÍHO STABILIZÁTORU	28
OBR. 20 - PARAMETRY VYBRANÉHO MOTORU MAXON A-MAX 16	33
OBR. 21 - PARAMETRY VYBRANÉ PŘEVODOVKY MAXON GP 16 C.....	33
OBR. 22 - ILUSTRACE PLANETOVÉ PŘEVODOVKY, PŘIPOJENÉ K DC MOTORU.....	34
OBR. 23 - ZNÁZORNĚNÍ UCHYCENÍ SNÍMAČE NATOČENÍ ŠAVLE VČETNĚ MAGNETICKÉHO AKTUÁTORU	36
OBR. 24 - PŘÍKLAD HW MODULU: ZDE ZOBRAZEN MODUL - ŘADIČ DC MOTORU (DRIVER MOTORU).....	40
OBR. 25 - PROCES TVORBY NOVÉHO FIRMWARE Z "PŘÁZDNÉHO PROJEKTU"	41
OBR. 26 - KONCEPT SYSTÉMU PRO NASTAVOVÁNÍ ZKRUTNÝCH STABILIZÁTORŮ.....	42
OBR. 27 - SCHÉMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ JEDNOTKY ARB	44
OBR. 28 - ZAPOJENÍ MCU PRO JEDNOTKU ARB.....	46
OBR. 29 - ZAPOJENÍ ŘADIČE STEJNOSMĚRNÝCH KOMUTÁTOROVÝCH ELEKTROMOTORŮ PRO JEDNOTKU ARB. 48	
OBR. 30 - ZAPOJENÍ OBVODU PRO ZPRACOVÁNÍ ANALOGOVÉHO SIGNÁLU S NAPĚŤOVOU DĚLIČKOU	50

OBR. 31 - ZAPOJENÍ BUDIČE PRO SBĚRNICI CAN.....	52
OBR. 32 - PROUDOVÁ ZATÍŽITELNOST VODIČE (CESTY) NA DPS (11).....	54
OBR. 33 – APLIKOVANÝ POSTUP TVORBY DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ.....	54
OBR. 34 - NAVRHNUTÁ DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ JEDNOTKY ARB (3D VIZUALIZACE SW ALTIUM DESIGNER).....	55
OBR. 35 - VODIVÉ VRSTVY DPS PRO JEDNOTKU ARB. LÍCOVÁ STRANA (VLEVO), RUBOVÁ STRANA (VPRAVO) ...	55
OBR. 36 - NEOSAZENÁ DPS JEDNOTKY ARB, HOTOVÁ JEDNOTKA ARB PO OSAZENÍ KOMPONENTY	56
OBR. 37 - VÝVOJOVÝ DIAGRAM HLAVNÍ RUTINY FIRMWAREU JEDNOTKY ARB	57
OBR. 38 - VÝVOJOVÝ DIAGRAM RUTINY POLOHOVÁNÍ STABILIZÁTORŮ VE FIRMWAREU JEDNOTKY ARB	58
OBR. 39 - SCHÉMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ JEDNOTKY STEERING.....	62
OBR. 40 - ZAPOJENÍ ROTAČNÍHO 12 POLOHOVÉHO PŘEPÍNAČE	63
OBR. 41 - NAVRHNUTÁ DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ JEDNOTKY STEERING	65
OBR. 42 - VODIVÉ VRSTVY DPS PRO JEDNOTKU STEERING. LÍCOVÁ STRANA , RUBOVÁ STRANA	66
OBR. 43 - NEOSAZENÁ DPS JEDNOTKY STEERING , HOTOVÁ JEDNOTKA STEERING PO OSAZENÍ KOMPONENT ..	66
OBR. 44 - VÝVOJOVÝ DIAGRAM FIRMWAREU JEDNOTKY STEERING	68
OBR. 45 - VÝVOJOVÝ DIAGRAM POUŽITÉHO ALGORITMU "POLLING"	69
OBR. 46 - VÝVOJOVÝ DIAGRAM VYHODNOCOVÁNÍ POLOHY PŘEPÍNAČE A JEHO ZPRACOVÁNÍ	69
OBR. 47 - BITOVÉ MASKOVÁNÍ PRO PŘÍPAD TLAČÍTEK A DVOUPOLOHOVÝCH PŘEPÍNAČŮ.....	70
OBR. 48 - DEKÓDOVÁNÍ ZPRÁVY PRO ZÍSKÁNÍ STAVU TLAČÍTKA 3 NA VOLANTU	72
OBR. 49 - DEKÓDOVÁNÍ ZPRÁVY PRO ZÍSKÁNÍ STAVU 12 POLOHOVÉHO ROTAČNÍHO PŘEPÍNAČE NA VOLANTU	72
OBR. 50 - MECHANISMUS POLOHOVÁNÍ PŘEDNÍ ŠAVLE STABILIZÁTORU	73
OBR. 51 - MECHANISMUS POLOHOVÁNÍ ZADNÍ ŠAVLE STABILIZÁTORU	74
OBR. 52 - POPIS FUNKCÍ MULTIFUNKČNÍHO VOLANTU, KTERÝ SKRÝVÁ JEDNOTKU STEERING.....	75
OBR. 53 - FINÁLNÍ VÝROBEK VOLANTU PRO VŮZ FS.08 A FS.09	76
OBR. 54 - VYOBRAZENÍ SOUBORU DBC ZPRÁVY STATUS (ID 0X11) V PROGRAMU CANOE	79
OBR. 55 - GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ KOMUNIKACE PO SBĚRNICI CAN V PROGRAMU CANOE V8.3	79
OBR. 56 - VÝPIS ZPÁV VYSLANÝCH NA SBĚRNICI CAN BUS Z PROGRAMU CANOE V8.3.....	80
OBR. 57 - RYCHLOST POLOHOVÁNÍ V PROGRAMU AIM RACE STUDIO 2.....	82
OBR. 58 - GRAF TESTOVÁNÍ RYCHLOSTI.	82
OBR. 59 - GRAF TESTOVÁNÍ PŘESNOSTI POLOHOVÁNÍ.....	83
OBR. 60 - VYOBRAZENÍ ÚHLU NATOČENÍ ŠAVLE V ZÁVISLOSTI NA GPS DATECH.	85
OBR. 61 - UKÁZKA ZMĚNY NATOČENÍ ZADNÍ ŠAVLE STABILIZÁTORU PŘI JÍZDĚ NA TRATI	86

Seznam tabulek

TAB. 1 - ROZLOŽENÍ TUHOSTI SYSTÉMU STABILIZÁTORŮ [NM/°], V ZÁVISLOSTI NA NATOČENÍ ŠAVLÍ, HODNOTY JSOU VZTAŽENÉ KE KLOPENÍ VOZU Φ [°]. (2)	27
TAB. 2 - PROCENTUÁLNÍ ROZLOŽENÍ TUHOSTI V ZÁVISLOSTI NA NATOČENÍ ŠAVLÍ. VZTAŽENO K REFERENČNÍ NÁVRHOVÉ HODNOTĚ NATOČENÍ ŠAVLÍ 45° A 45°. (2).....	27
TAB. 3 - UVAŽOVANÉ VARIANTY AKTUÁTORU. *MAXIMÁLNÍ HMOTNOST UVAŽOVANÝCH VARIANTÁM KTERÁ SPLŇOVALA POŽADAVKY NA POTŘEBNÝ MOMENT.	29
TAB. 4 - SOUPIS HARDWAROVÝCH POUŽÍVANÝCH HARDWAROVÝCH MODULŮ	40
TAB. 5 - LOGIKA ŘÍZENÍ SMĚRU POHYBU MOTORU - X = NEZÁLEŽÍ NA LOGICKÉ ÚROVNI, Z = VYSOKÁ IMPEDANCE, L = VÝSTUP PŘIZEMNĚNÝ, H = VÝSTUP NAPÁJENÝ	59
TAB. 6 - VÝSTUPNÍ NAPĚTÍ ROTAČNÍHO PŘEPÍNAČE V ZÁVISLOSTI NA POLOZE	63
TAB. 7 - ZPRACOVÁNÍ DAT Z JEDNOTKY STEERING PRO ODESLÁNÍ ZPRÁVY CAN	71
TAB. 8 - POŽADOVANÉ ÚHLY ŠAVLÍ V ZÁVISLOSTI NA POLOZE PŘEPÍNAČŮ	83
TAB. 9 - NAMĚŘENÉ HODNOTY NATOČENÍ ŠAVLE PRO 5 CYKLŮ MĚŘENÍ	84
TAB. 10 - MAXIMÁLNÍ ODCHYLKA OD ŽÁDANÝCH POLOH	84
TAB. 11 - ROZPTYL HODNOT PRO JEDNOTLIVÉ ŽÁDANÉ POLOHY	84

Seznam příloh

Příloha 1 – Přílohou práce je CD, které obsahuje soubory dle seznamu: Obsah příloženého CD.

Obsah příloženého CD

1. Zdrojový kód firmwaru ARB
2. Zdrojový kód firmwaru STEERING
3. Elektrické schéma jednotky ARB
4. Elektrické schéma jednotky STEERING
5. Soupis materiálu jednotky ARB
6. Soupis materiálu jednotky STEERING
7. Datový list mikrokontroleru STM32 F103
8. Referenční manuál mikrokontroleru STM32 F103
9. Datový list řadiče motoru DRV8816
10. Datový list budiče CAN SN65HVD230