

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrických pohonů a trakce



Návrh měniče pro hlavní pohon formule student

Diplomova práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony

Vedoucí práce: **Ing. Vít Hlinovský, CSc.**

Martin Koman

2018



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Koman** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **406207**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektrické stroje, přístroje a pohony**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh měniče pro hlavní pohon formule student

Název diplomové práce anglicky:

Formula Student Main Drive Converter Design

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popište stávající měnič hlavního pohonu automobilu typu formule student
- 2) Vytvořte dokumentaci k měniči pro napájecí napětí 400 V DC
- 3) V prostředí Matlab/Simulink vytvořte simulační model odpovídající současnému pohonu
- 4) Upravte model pro napětí 600V
- 5) Na základě výsledků simulace navrhnete měnič na napájecí napětí 600 V DC s možností přechodu na moderní spínací prvky typu Semikron - SEMITOP E1/E2

Seznam doporučené literatury:

- [1] JAVŮREK, Jiří. Regulace moderních elektrických pohonů. Praha: Grada, 2003.
- [2] VAS, Peter. Sensorless vector and direct torque control. Oxford: Oxford University Press, 1998. Monographs in electrical and electronic engineering.
- [3] QUANG, Nguyen Phung a Jörg-Andreas DITTRICH. Vector control of three-phase AC machines: system development in the practice. Berlin: Springer, c2008. Power systems.
- [4] RÝZEK, Miroslav. Řízení pohonu elektrického vozidla Formula Student. Diplomová práce ČVUT v Praze FEL. 2015.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Vít Hlinovský, CSc., katedra elektrických pohonů a trakce FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2018** Termín odevzdání diplomové práce: **25.05.2018**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

Ing. Vít Hlinovský, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prehlásenie

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne: 24.05 2018

Martin Koman

Pod'akovanie

Rád by som poďakoval vedúcemu diplomovej práce pánovi Ing. Vítovi Hlinovskému, CSc. za odbornú pomoc, cenné rady, informácie a ochotu.

Taktiež by som chcel poďakovať pánovi Ing. Pavlovi Koblre, Ph.D. a pánovi Bc. Stanislavovi Tomáškovovi za odbornú pomoc a cenné rady.

Anotácia

Táto diplomová práca sa zaoberá popisom súčasného meniča pre hlavný pohon automobilu Formula Student Electric. V rámci práce je vytvorený model v prostredí Matlab Simulink odpovedajúcemu súčasnému pohonu. Model je upravený pre napätie 600V. Na základe simulácie je navrhnutý nový menič na napätie 600V s použitým moderných spínacích prvkov typu Semikron - SEMITOP E1/E2.

Abstract

This diploma thesis starts with description of current used inverter of main drive Formula Student Electric. Then is created model of drive in simulation environment Matlab Simulink, Model is modified for voltage 600V. Based on this simulation is designed new inverter for voltage 600V with use modern power modules Semikron - SEMITOP E1/E2.

Kľúčové slová

menič, IGBT, Formula Student Electric, budič, synchronný motor s permanentnými magnetmi

inverter, IGBT, Formula Student Electric, driver, permanent magnet synchronous motor

KOMAN, Martin. *Návrh měniče pro hlavní pohon formule student*. Praha, 2018.
Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing.
Vít Hlinovský, CSc.

Obsah

Úvod.....	1
1 Formula Student	2
1.1 eForce Prague Formula.....	2
1.2 Pravidlá	3
1.3 Disciplíny.....	3
1.3.1 Engineering Design	4
1.3.2 Cost and Manufacturing	4
1.3.3 Business Presentation.....	4
1.3.4 Akceleration.....	4
1.3.5 Skid pad.....	4
1.3.6 Autocross	4
1.3.7 Endurance	4
1.3.8 Fuel efficiency	4
2 Súčasný menič hlavného pohonu	5
2.1 FSE.07.....	5
2.1.1 Akumulátor	5
2.1.2 Pohony	5
2.2 Menič	8
2.2.1 Výkonová časť.....	9
2.2.2 Meranie fázových prúdov	10
2.2.3 Poloha hriadeľa	10
2.2.4 Meranie teplôt	11
2.3 Simulácia.....	12
3 Návrh nového meniča hlavného pohonu	21
3.1 Nove vozidlo pre sezónu 2019.....	21
3.1.1 Akumulátor	21
3.1.2 Pohony	22
3.2 Simulácia.....	24
3.3 Menič	29
3.3.1 Koncept.....	30
3.3.2 Výkonový modul	31
3.3.3 Budič	32

3.3.4	Blokovacie kondenzátory	35
3.3.5	Vybíjací odpor	36
3.3.6	Meranie napätia	36
3.3.7	Meranie prúdu	37
3.3.8	Meranie teploty	37
3.3.9	Mikrokontrolér	39
3.3.10	Altium Designer	40
Záver		49
Použitá literatúra		50
Zoznam obrázkov a grafov		52
Zoznam tabuliek		54

Úvod

Formula Student je konštruktérska súťaž pre študentov technických vysokých škôl. Súťaží sa v troch triedach: vozidlá so spaľovacími motormi, elektrické vozidlá a vozidlá bez vodiča. V práci zameriavam na kategóriu elektrických vozidiel.

K stavbe formuly sa viažu prísne pravidlá. Medzi hlavné pravidlá patrí maximálne napätie akumulátora nesmie prekročiť 600VDC a maximálny odoberaný výkon nesmie prekročiť 80kW. V práci predkladám návrh meniča práve pre maximálne napätie. Hlavným dôvodom je fakt, že pri vyššej napäťovej hladine pri konštantnom odoberanom výkone preteká vodičmi menší prúd. Pri menšom prúde klesajú činné straty a je potrebné mať vodiče s menším priemerom, čo sa pozitívne prejavuje na výkone vozidla. Nevýhodou vyššej napäťovej hladiny je väčšie rušenie. Taktiež nevyhnutné venovať zvýšenú pozornosť izoláciám.

Cieľom je navrhnuť menič pre hlavný pohon Formula Student Electric s čo najnižšou hmotnosťou, pri zachovaní všetkých funkčných a bezpečnostných vlastností.

V práci popisujem súčasný menič pre hlavný pohon automobilu Formula Student Electric. Následne vytváram jeho model v prostredí Matlab Simulink. Navrhujem akumulátor a vyberiem motor na 600V. Upravujem model s komponentmi na 600V. Na základe neho navrhnem nový menič s použitím moderných spínacích prvkov typu Semikron - SEMITOP E1/E2. Snaha je priblížiť sa špičkovým tímom a využiť pretekanie výkonu motorov pri stálom výkone odoberanom z batérie.

1 Formula Student

Formula Student je konštruktérska súťaž pre študentov technických vysokých škôl. Bola založená v roku 1981 v USA. Od roku 1998 sa súťaží aj v Európe. V roku 2010 vznikla nová kategória elektrických vozidiel. V roku 2017 vznikla najnovšia kategória vozidiel bez vodiča.

Cieľom súťaže je postaviť prototyp závodného vozu formulového typu s produkčným plánom 1000 vozov za rok. Cieľová skupina je neprofesionálnych autokrosových jazdcov. Vozidlo musí preukázať vysokú dynamiku, bezpečnosť a nenáročnosť na údržbu.

1.1 eForce Prague Formula

V roku 2010 vznikol na FEL ČVUT tím eForce Prague Formula [1], ktorý súťaží v elektrickej kategórii. Jedná sa o jediný elektrický tím v Českej republike.

Členovia tímu sú prevažne z Fakulty elektrotechnickej a Fakulty strojnej ČVUT. Celá participácia členov v tíme prebieha v ich voľnom čase.

V sezóne 2018 sa zúčastní závodov Formula Student Netherland, Formula Student East v Maďarsku a Formula Student Czech Republic.



Obrázok 1 Formula Student Czech Republic 2017 [1]

1.2 Pravidlá

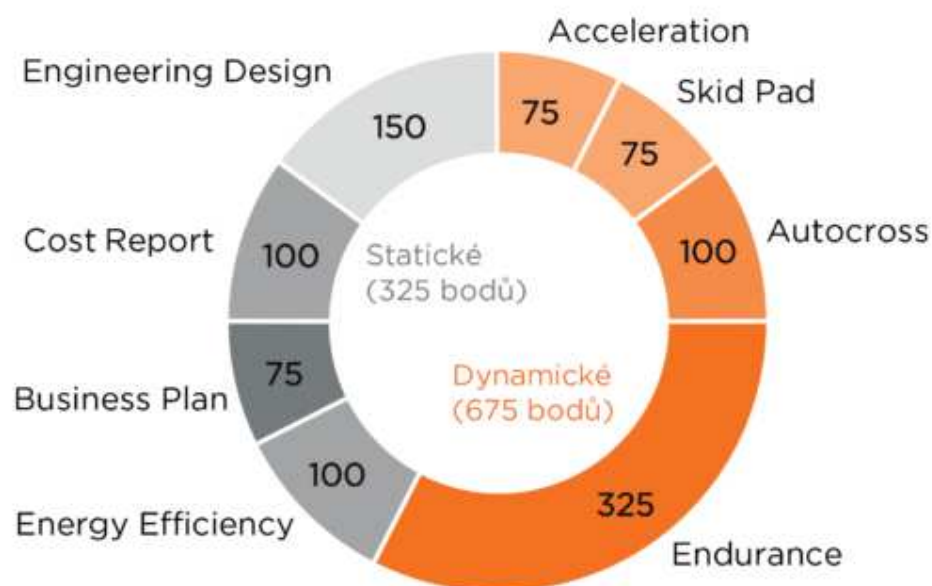
K stavbe formuly sa viažu prísne pravidlá, ktoré sa upravujú každý rok. Každý rok sa musí postaviť nový rám vozidla. To motivuje tímy k zlepšovaniu konštrukcií.

Medzi hlavné pravidlá patrí: maximálny odoberaný výkon z batérie nesmie byť väčší ako 80kW a napätie akumulátora nesmie prekročiť 600VDC. Trakčné napätie musí byť galvanicky oddelené od ostatných elektrických systémov .

Tím sa snaží v čo najväčšej miere vyvinúť a vyrobiť vlastné systémy vozidla, a tým získať výhodu nad často obmedzenými komerčnými riešeniami.

1.3 Disciplíny

Tímy každý rok postavlia nové vozidlo a súťažia v troch statických a piatich dynamických disciplínach. Každá disciplína je bodovo ohodnotená. Závod vyhráva tím s najväčším súčtom bodov.



Obrázok 2 Bodové ohodnotenie disciplín [1]

Statické disciplíny sú :

1.3.1 Engineering Design

Prezentujú sa a obhajujú technické riešenia použité na aute. Komisári hodnotia a diskutujú o technických riešeniach.

1.3.2 Cost and Manufacturing

Hodnotenie všetkých výrobných nákladov na stavbu plánovanej sériovej produkcie formule.

1.3.3 Business Presentation

Tímy prezentujú business plán na sériovú výrobu danej formuly. Snažia sa presvedčiť teoretických výrobcov o výhodnosti ich formuly.

Dynamické disciplíny sú :

1.3.4 Akceleration

Akcelerácia na 75m.

1.3.5 Skid pad

Pretek na trati v tvare 8. Preveruje sa postranná akcelerácia vozidla.

1.3.6 Autocross

Kvalifikácia do hlavného závodu Endurance. Vozidlo s najlepším časom vyhráva.

1.3.7 Endurance

Hlavná disciplína. Vytrvalostný závod na 22km. Piloti sa menia v polke závodu.

1.3.8 Fuel efficiency

Hodnotí sa množstvo spotrebovanej energie voči celkovému času.

2 Súčasný menič hlavného pohonu

V tejto kapitole budem popisovať súčasný menič hlavného pohonu MiRy X-Boss Motor Controller. Menič je použitý na 4x4 pohon, dosahuje vynikajúcich parametroch výkonu a spoľahlivosti pri nízkej hmotnosti.

Jeho autorom je Ing. Miroslav Rýzek, ktorý ho popísal v diplomovej práci [2].

2.1 FSE.07

Vozidlo pre sezónu 2018 vychádza z úspešného vozidla FSE.06. V oblasti trakčného systému došlo k drobným zmenám. Zadným pohonom sa znížil výkon, a naopak u predných pohonoch došlo k jeho navýšeniu. Maximálny kombinovaný výkon motorov je 109kW [4].

2.1.1 Akumulátor

Akumulátor tvoria články Sony VTC5A v sériovo - paralelnej konfigurácii.

Konfiguráciu vidno v Tabuľka 1.

Technológia batériového článku	Lithium-Ion
Typ batériového článku	Sony VTC5A
Maximálne napätie	400 VDC
Nominálne napätie	345.6 VDC
Minimálne napätie	182 VDC
Maximálne výstupný prúd	315 A
Nominálny výstupný prúd	270 A
Konfigurácia	96s9p
Kapacita	7,1 kWh
Vnútorň odpor	0.128 Ohm

Tabuľka 1 Parametre akumulátora [4]

2.1.2 Pohony

Použitie sú synchronne motory s permanentnými magnetmi. Tento typ synchronneho motora nepotrebuje budenie rotora. Budenie zabezpečujú permanentné magnety, vďaka čomu dosahujú vysokej efektivity spotreby. Disponujú vysokým pomerom výkonu vztiahnutý k váhe a objemu. Negatívom sú práve permanentné

magnety. Musí sa sledovať teplota a udržiavať relatívne nízka hodnota. Pri kritických hodnôtach dôjde k nezvratnému odmagnetovaniu permanentných magnetov.

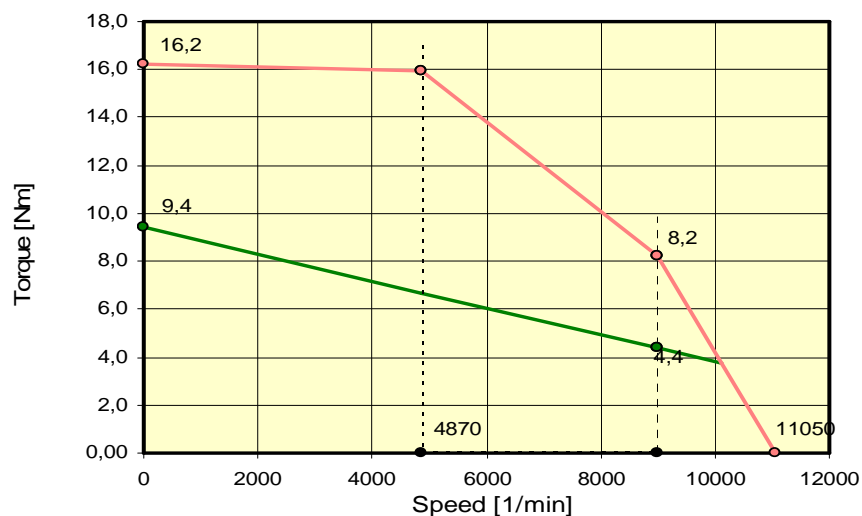
Vozidlo FSE.07 má pohon 4x4, pre každé koleso jeden motor. Motory pre predné a zadné kolesá sa líšia v parametroch. Výrobcom motorov je spoločnosť TG Drives.

Predné motory sa nachádzajú v nábojoch kolies. Typ predného motora je **M4-0470-90-380a-h**. Ich technické parametre sa uvádzajú v Tabuľka 2. Momentovú charakteristiku uvádzam Obrázok 3.

M4 0470 90 380		
Preliminary data		
Rated Speed	n_n	9000 min^{-1}
DC Bus Voltage	U_{dc}	380 V
Nominal AC Voltage	U_n	260 V
Rated Motor Voltage	U_m	228 V
Rated Torque	M_n	4,4 Nm
Rated AC Current	I_n	12,2 A
Stall Torque	M_o	9,4 Nm
Stall AC Current	I_o	24,2 A
Peak Torque	M_{max}	16,2 Nm
Peak Current	I_{max}	67 A
Max. Speed	n_{max}	9000 min^{-1}
EMF Constant	K_E	23,5 V/1000
Torque Constant	K_T	0,39 Nm/A
Terminal Resistance	R_{2ph}	0,24 Ω
Terminal Inductance	L_{2ph}	1,30 mH
Number of poles	$2p$	10
No Load Speed	n_o	11050 min^{-1}
Torque at I_{max}/U_n	M_z	16,0 Nm
Speed at I_{max}/U_n	n_z	4870 min^{-1}
Max. Torque at n_n	M_x	8,2 Nm
El. Time Constant	T_{el}	5,4 ms
Mech. Time Constant	T_{mech}	0,80 ms
Thermal Time Constant	T_{th}	35 min
Rotor Inertia	J	2,9 kgcm^2

Tabuľka 2 Parametre motora M4-0470-90-380a-h [3]

Torque/speed curves



Obrázok 3 Momentová charakteristika motora M4-0470-90-380a-h [3]

N5	1600	100	380
-----------	-------------	------------	------------

Water cooling

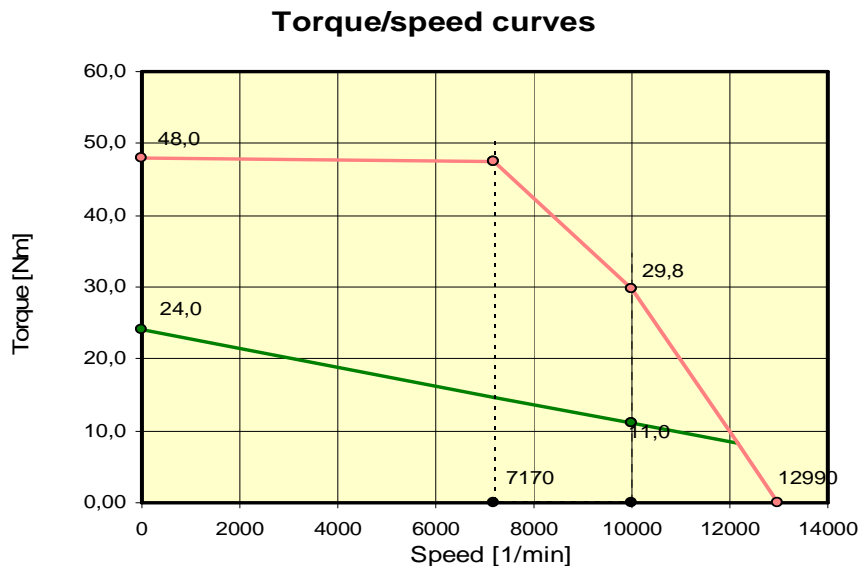
Rated Speed	n_n	10000 min ⁻¹
DC Bus Voltage	U_{dc}	380 V
Nominal AC Voltage	U_n	260 V
Rated Motor Voltage	U_m	197 V
Rated Torque	M_n	11,0 Nm
Rated AC Current	I_n	38,2 A
Stall Torque	M_o	24,0 Nm
Stall AC Current	I_o	73 A
Peak Torque	M_{max}	48 Nm
Peak Current	I_{max}	171 A
Max. Speed	n_{max}	9000 min ⁻¹
EMF Constant	K_E	20,0 V/1000
Torque Constant	K_T	0,33 Nm/A
Terminal Resistance	R_{2ph}	0,04 Ω
Terminal Inductance	L_{2ph}	0,33 mH
Number of poles	$2p$	10

No Load Speed	n_o	12990 min ⁻¹
Torque at I_{max}/U_n	M_z	47 Nm
Speed at I_{max}/U_n	n_z	7170 min ⁻¹
Max. Torque at n_n	M_x	30 Nm

El. Time Constant	T_{el}	8,3 ms
Mech. Time Constant	T_{mech}	0,73 ms
Thermal Time Constant	T_{th}	55 min
Rotor Inertia	J	11,5 kgcm ²

Tabuľka 3 Parametre motora N5-1600-100-380a-h [3]

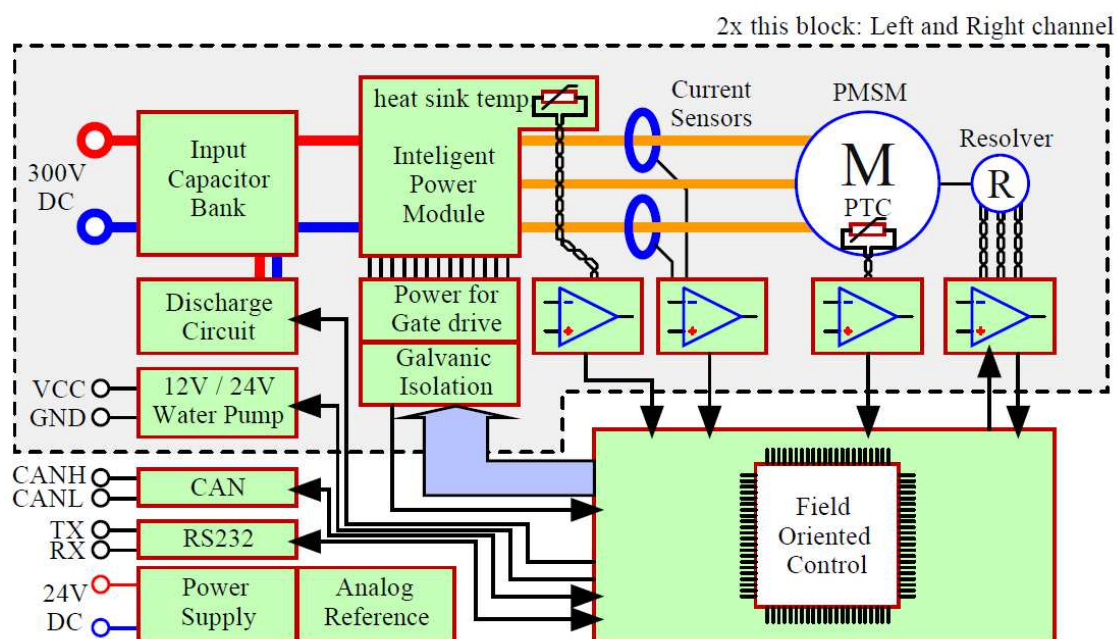
Zadný pohon sa nachádza v monokoku a s kolesami je spojený poloosami. Typ motora je **N5-1600-100-380a-h-special-v2**. Technické parametre uvádzam Tabuľka 3. Momentová charakteristika je na Obrázok 4.



Obrázok 4 Momentová charakteristika motora N5-1600-100-380a-h-special-v2 [3]

2.2 Menič

Menič pozostáva z oddelenej výkonovej časti a riadiacej časti. Koncept meniča sa nachádza na obrázku Obrázok 5.



Obrázok 5 Koncept súčasného meniča [2]

Koncept je určený pre vozidlo FSE.04. Na Obrázok 5 je vstupné napätie 300V pre vozidlo FSE.07 je vstupné napätie z batérie 400VDC.

Na riadenie je použitý Digital Signal Controller (DSC) Freescale MC56F84789VLL. Menič komunikuje so zvyškom vozidla po CAN zbernici. Jeden frekvenčný menič ovláda dva motory.

V meniči je použité vektorové riadenie. Táto regulácia vyžaduje dva vstupy: fázové prúdy a polohu rotora. Na meranie polohy rotora sa používa resolver. Výstupy vektorovej regulácie vedú k PWM periférii. PWM výstupy sú galvanicky oddelené, následne vedú k inteligentnému výkonovému modulu (Intelligent Power Module).

Na vstupe k výkonovému modulu je blokovací kondenzátor s vybíjacím obvodom.

Monitorujú sa teploty na motore a na výkonovom module.

2.2.1 Výkonová časť

Použitý je inteligentný IGBT výkonový modul Fuji Electric 6MBP300VEA060-50 [5]. Modul už obsahuje budiče a teplotnú ochranu. Maximálny spínaný prúd je 300A, po 1ms je možných až 600A. Maximálne DC napätie na vstupe je 400V. Maximálna spínacia frekvencia je 20kHz, ale kvôli vysokým stratám je použitá 10kHz. Váha je 940g.

Kapacita blokovacích kondenzátorov je 590μ . Sú použité dva fóliové VISHAY MKP1848C62550JP4 s kapacitou $29\mu F$ a na napätie 500V a tri elektrolytické EPCOS B43540A9187M000 s kapacitou $180\mu F$ a na napätie 400V.

Pre vybíjací obvod sú použité dva odpory v sérii THS101K5J – $1,5k\Omega$, 10W. Odpory vybíjajú kondenzátory za 5s na $U_c = 23,72V$.

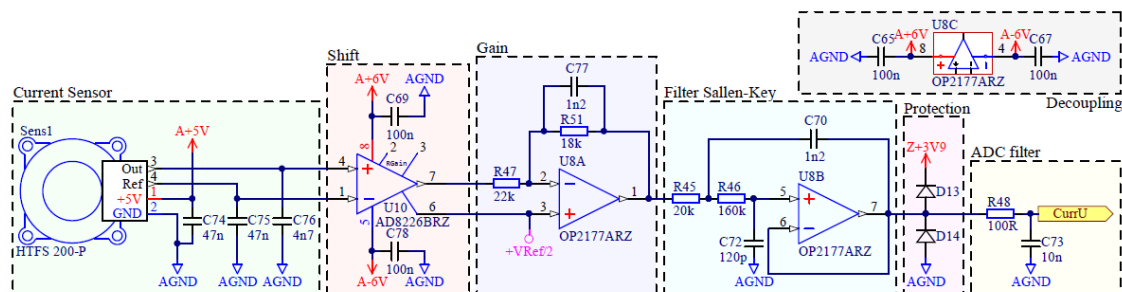
$$U_c = U_{max} * e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)} = 600 * e^{\left(\frac{-6}{3000 * 590 * 10^{-6}}\right)} = 23,72 V$$

Galvanické oddelenie medzi výkonovou a riadiacou časťou je vytvorené rýchlym optočlenom HCPL-4504.

Galvanicky oddelený zdroj použitý na napájanie riadenia spodných IGBT je typu JCD0524S15 05W a pre vrchné JCA0224S15 02W. Vstupné napätie týchto zdrojov je od 18V do 36V, výstupný výkon je 5W, resp. 2W.

2.2.2 Meranie fázových prúdov

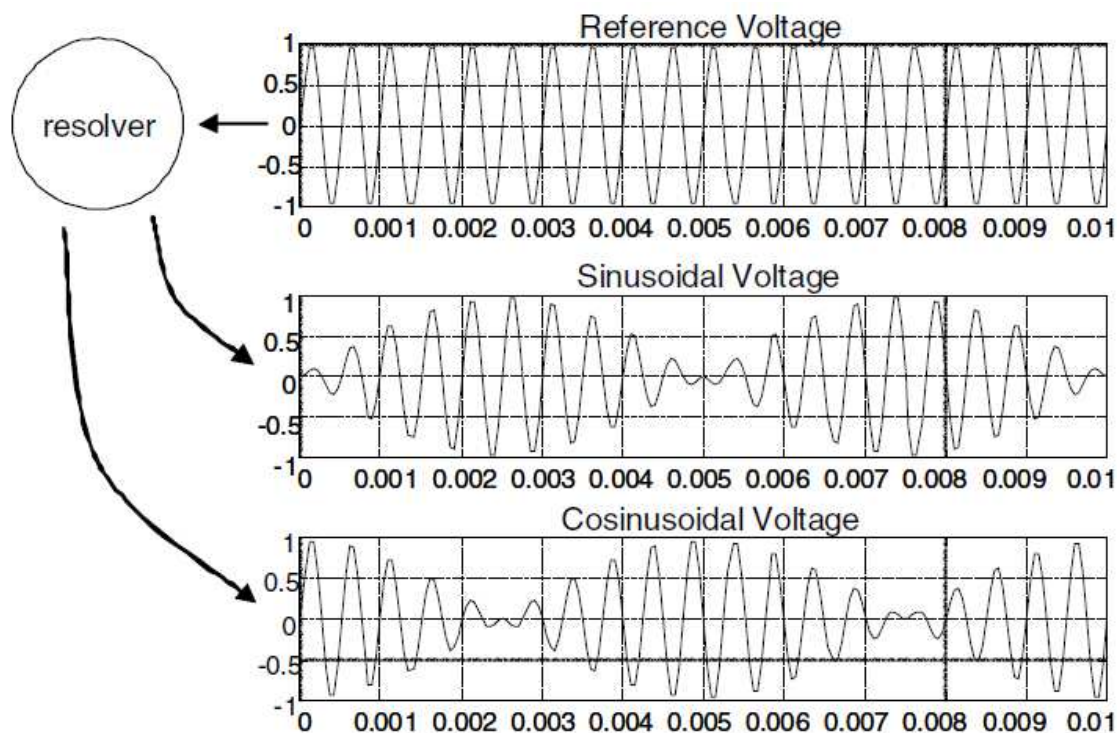
Na meranie je použitý LEM HTFS 200-P. Senzor využíva Hallového javu. Má rozsah $\pm 300A$ a je napájaný 5V. Schému zapojenia uvádzam Obrázok 6.



Obrázok 6 Schéma merania fázových prúdov [2]

2.2.3 Poloha hriadeľa

Poloha hriadeľa sa meria pomocou resolvera. Resolver je rotačný transformátor skladajúci sa z troch vinutí. Primárne vinutie je súčasťou rotora a dve sekundárne vinutia posunuté navzájom 90° .



Obrázok 7 Resolver s budiacimi a výstupnými signálmi

Primárne vinutie resolvera je budené harmonickým signálom s frekvenciou 5 kHz až 10 kHz. Tento signál sa transformuje na dve sekundárne vinutia označované Sin a

Cos v typickom transformačnom pomere 1:2. Uhol natočenia rotora ovplyvňuje spôsob, akým sa transformuje signál medzi primárnym a sekundárnymi vinutiami.

$$E_{R1-R2} = E_0 * \sin\omega t$$

$$E_{S1-S3} = T_r * E_{R1-R2} * \cos\theta$$

$$E_{S2-S4} = T_r * E_{R1-R2} * \cos\theta$$

Kde

E_{R1-R2} je primárne vinutie

E_{S1-S3} je kosínusové sekundárne vinutie

E_{S2-S4} je sínusové sekundárne vinutie

$\sin\omega t$ je harmonický budiaci signál

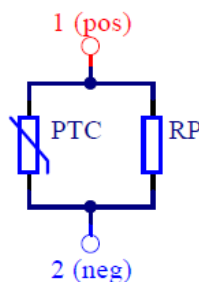
E_0 je amplitúda budiaceho signálu

T_r je transformačný pomer

θ je uhol natočenia rotora

2.2.4 Meranie teplôt

Na meranie teplôt je použitý PTC termistor KTY84-130. Termistor je zlinearizovaný paralelným odporom pre zlepšenie lineárnej charakteristiky senzora.



Obrázok 8 Schéma zapojenia PTC senzora s paralelným odporom [2]

Senzor sa nachádza v motore a na chladiči výkonového modulu. Toto nie je ideálne riešenie, pretože sa monitoruje teplota chladiča a nie výkonového IGBT prvku.

2.3 Simulácia

Na simuláciu bol použité grafické programovacie prostredie Simulink programu Matlab 2018a. V prostredí bolo namodelovaný súčasný pohonný systém na 400V. Medzi inými bola použitá knižnica Simscape, ktorá obsahuje fyzikálne modely súčiastok.

Ako model motora som použil blok Permanent Magnet Synchronous Machine. Model som doplnil skutočnými parametrami motora z kapitoly 2.1.2.

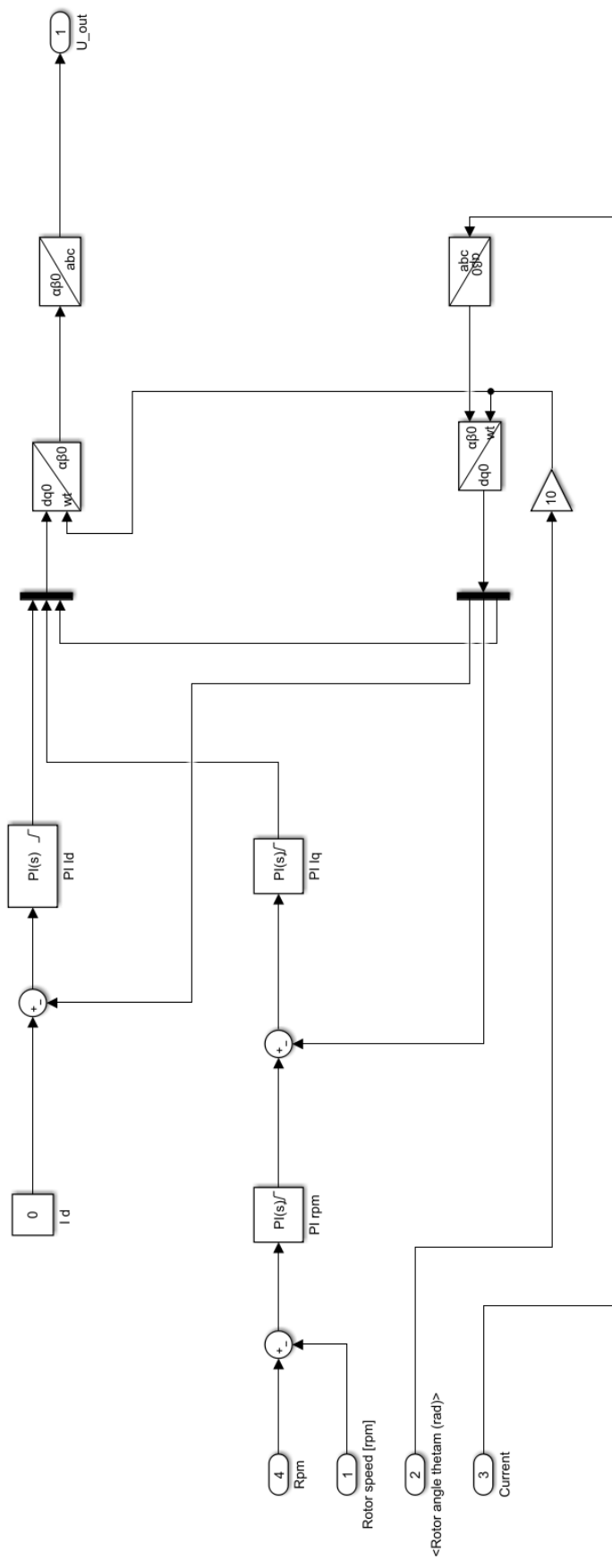
Na reguláciu je použité vektorové riadenie. Model riadenia vidno na Obrázok 9. Vstupné parametre sú aktuálne otáčky, uhol rotoru, fázové prúdy a požadované otáčky.

Praktický stačí merať len dva z troch fázových prúdov. Tretí fázový prúd sa dá dopočítať, pretože súčet všetkých prúdov sa rovná 0. Túto možnosť som nevyužil, pretože nám model dával všetky tri prúdy.

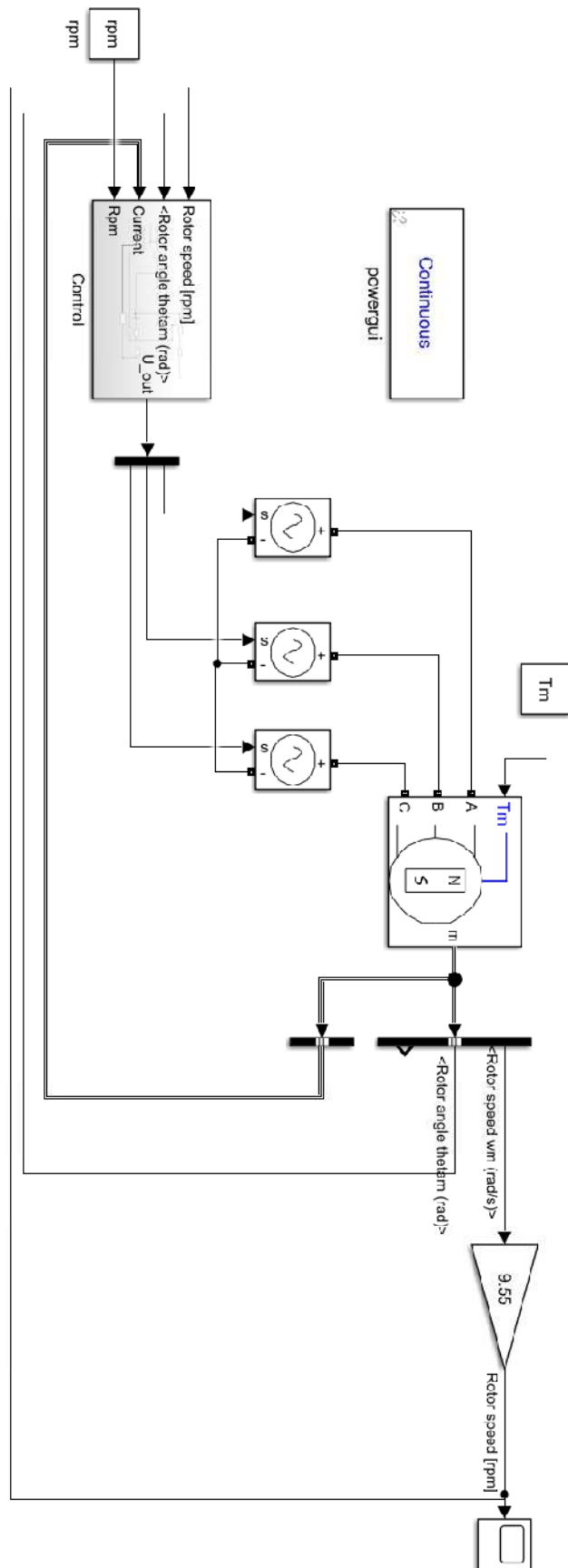
Fázové prúdy vstupujú do abc do Alpha-Beta-Zero bloku, kde prejdú cez Clarkovu transformáciu. Systém Alpha-Beta je zviazaný so statorom. Z neho idú Alpha-Beta-Zero to dq0, kde prejdú cez Parkovú transformáciu. Systém dq je zviazaný s rotorom.

Po týchto transformáciách dostaneme d,q a nulovú zložku prúdu. Id je zviazaná so spráženým magnetickým tokom v motore tvorí tokotvornú zložku. Iq je zviazaná s činným výkonom a teda aj s momentom. Tvorí momentotvornú zložku prúdu.

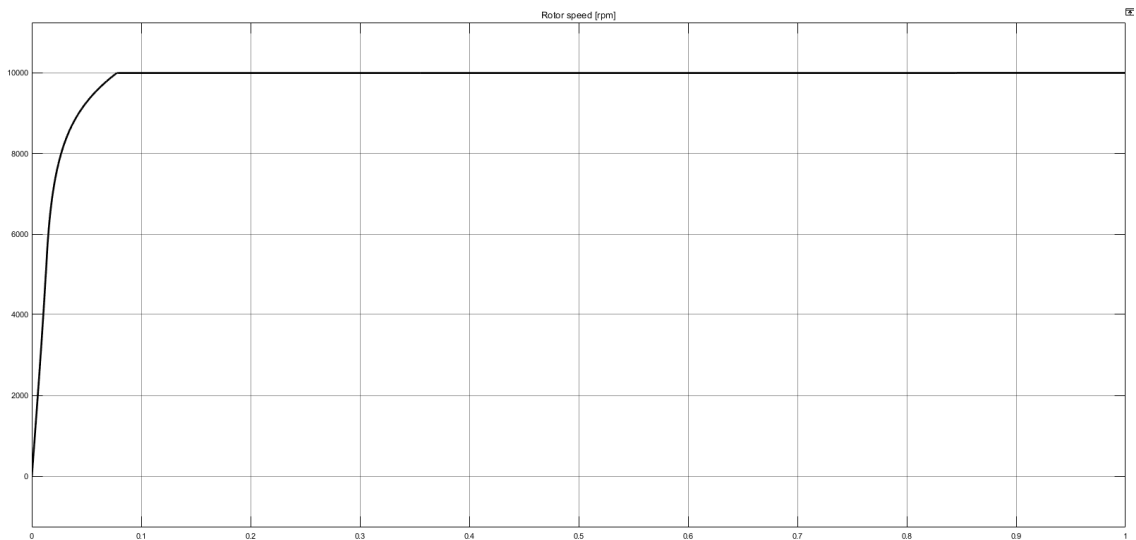
Simulovaný motor ma v rotore permanentné magnety, tým pádom netreba generovať tokotvornú zložku, resp. treba držať Iq na 0.



Obrázok 9 Riadenie ideálny model 400V



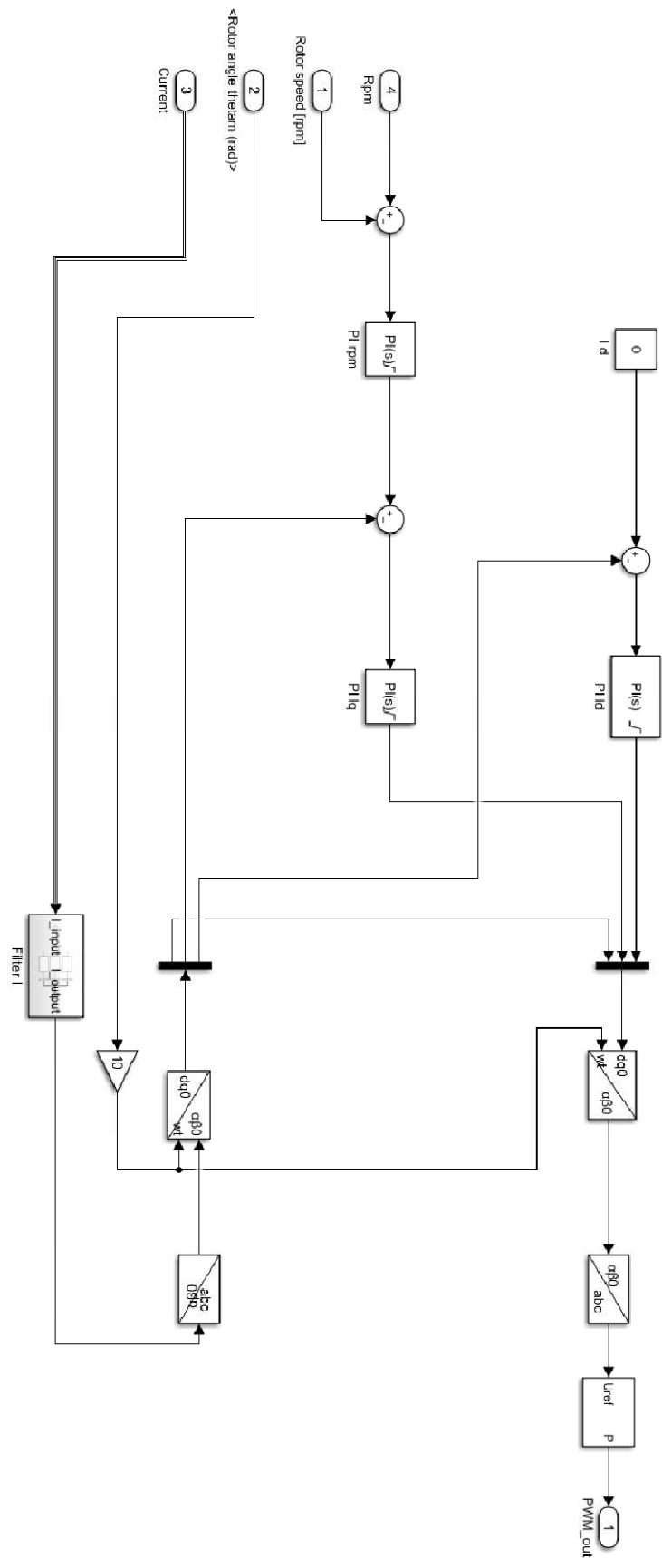
Obrázok 10 Model 400V s ideálnymi zdrojmi napätia



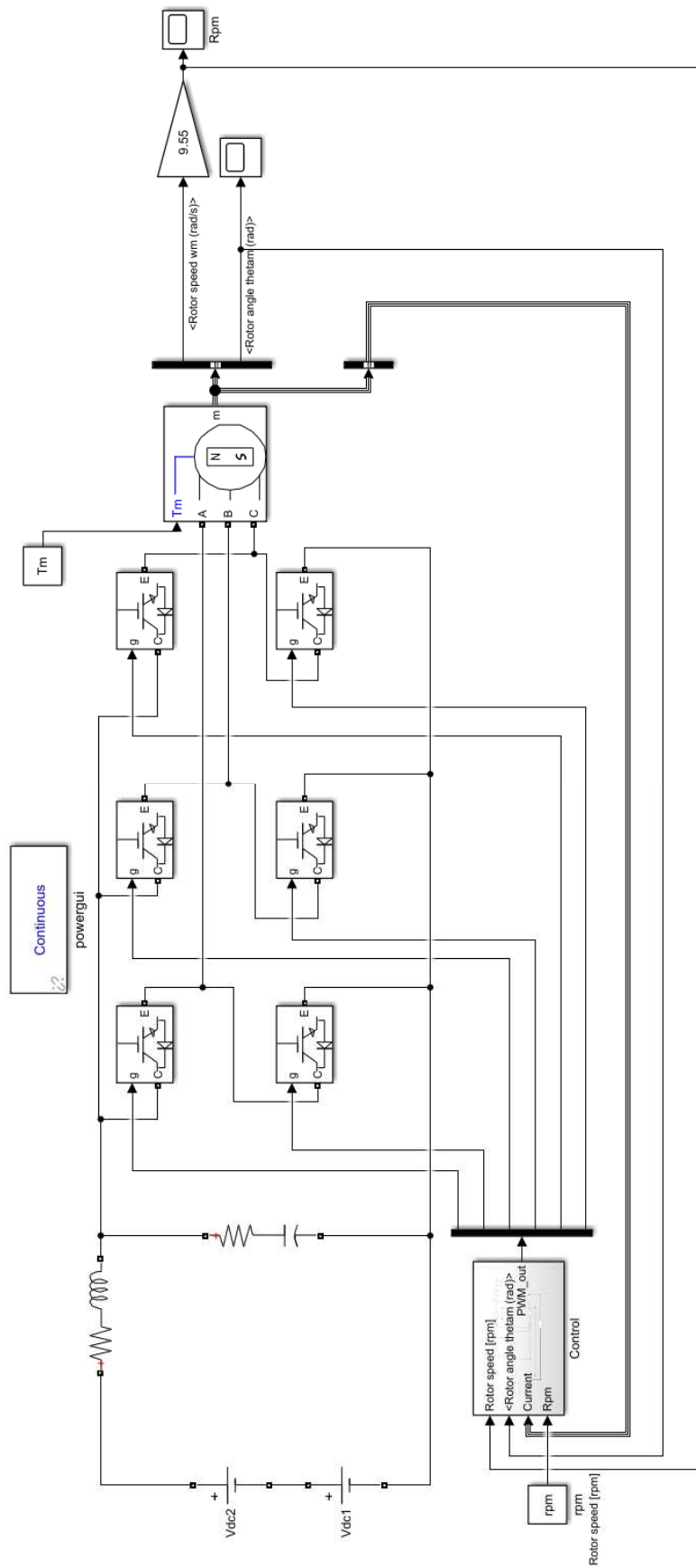
Obrázok 11 Otáčky model 400V s ideálnymi zdrojmi napätia

Najprv som si vytvoril ideálny spojitý model s riadenými zdrojmi napätia. V tomto modeli som si našiel hodnoty pre regulátory. Model vidno na Obrázok 10. Simulácia na nominálne otáčky 10000rpm pri nominálnej záťaži 11Nm je na Obrázok 11.

Následne som model upravil na použitie ideálnych IGBT modulov. Do modelu som pridal tvrdý zdroj napätia na 400V, IGBT moduly a blok PWM generátora. Riadenie vidno na Obrázok 12, kde bola ešte pridaná filtrácia vstupných prúdov. Celkový model vidno na Obrázok 13.

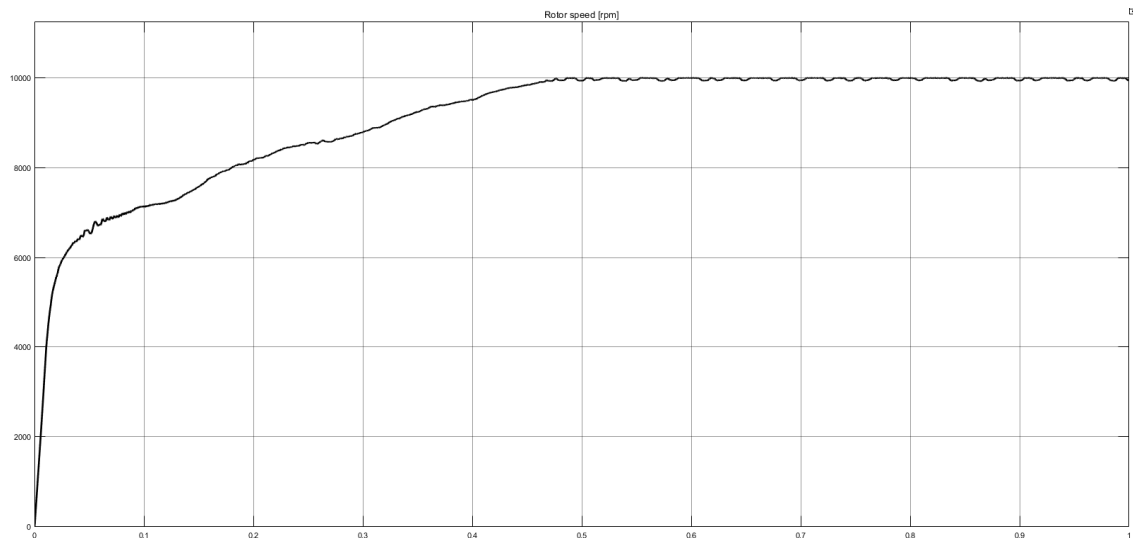


Obrázok 12 Riadenie model 400V s ideálnymi IGBT



Obrázok 13 Model 400V s ideálnymi IGBT

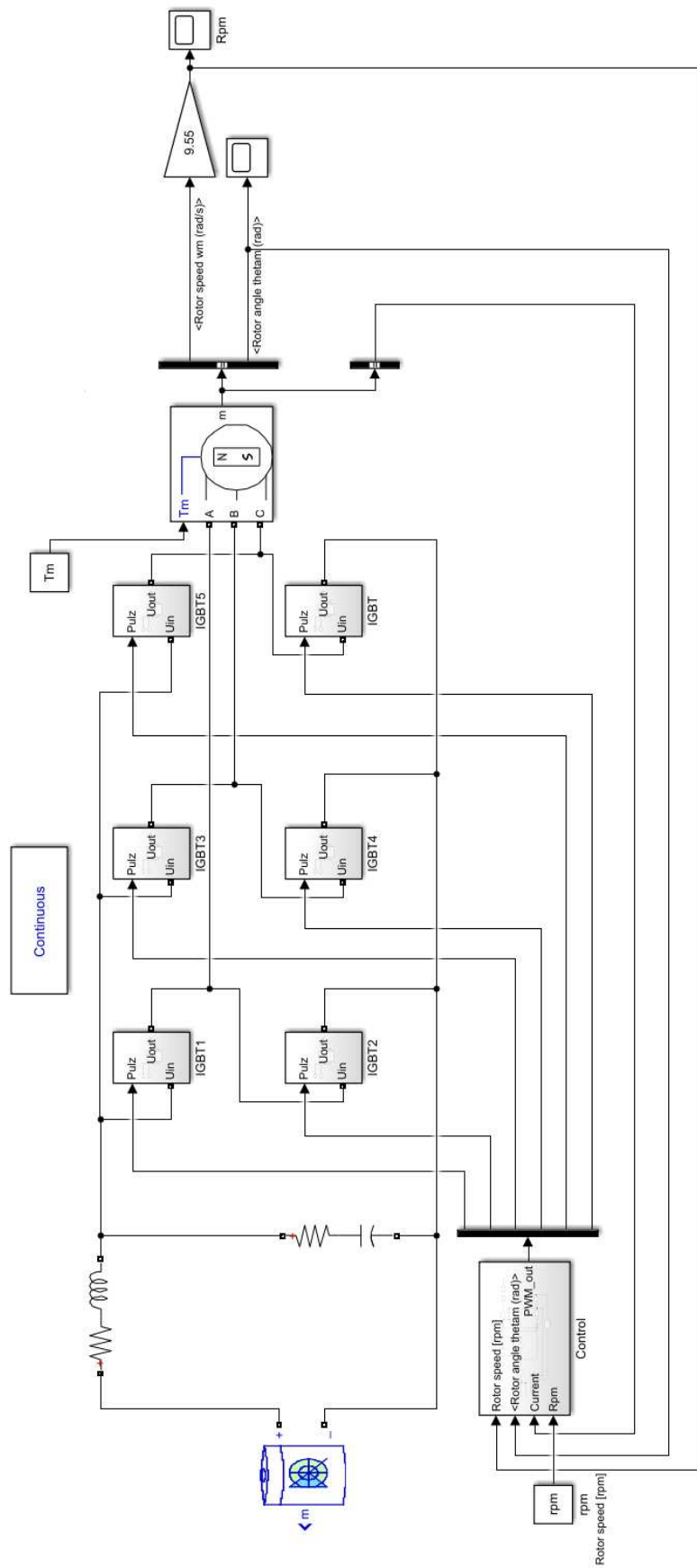
Na Obrázok 14 je výsledná regulácia na nominálne otáčky 10000rpm pri nominálnej záťaži 11Nm. Na tomto modeli som upravil parametre regulátorov získané z ideálneho modelu.



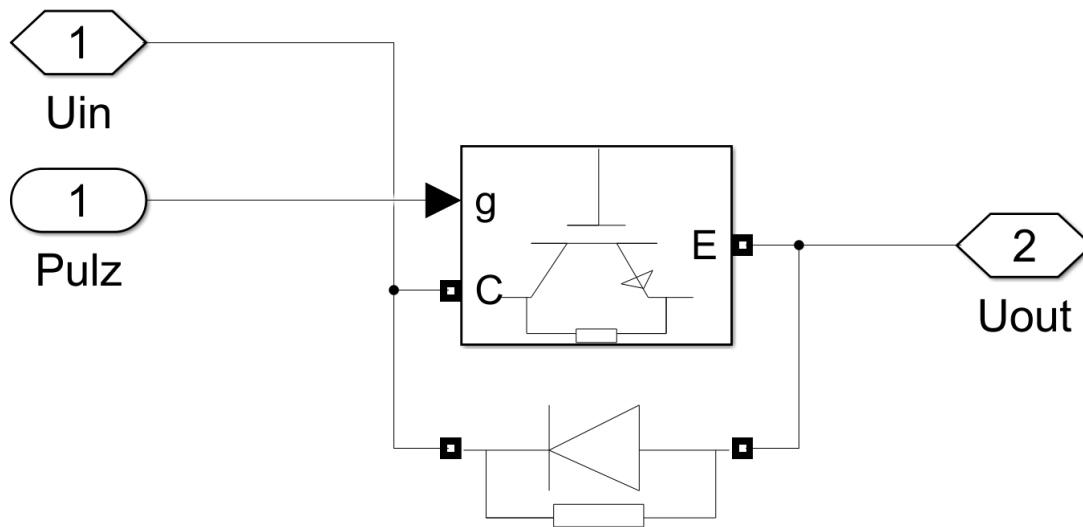
Obrázok 14 Otáčky model 400V s ideálnymi IGBT

Pokračoval som doplnením modelu modelom batérie a reálnymi modelmi IGBT. Model vidno na Obrázok 15. Na obrázku Obrázok 16 vidno detailné zapojenie IGBT so spätnou diódou. Na obrázku Obrázok 17 je výsledná regulácia na nominálne otáčky 10000rpm pri nominálnej záťaži 11Nm.

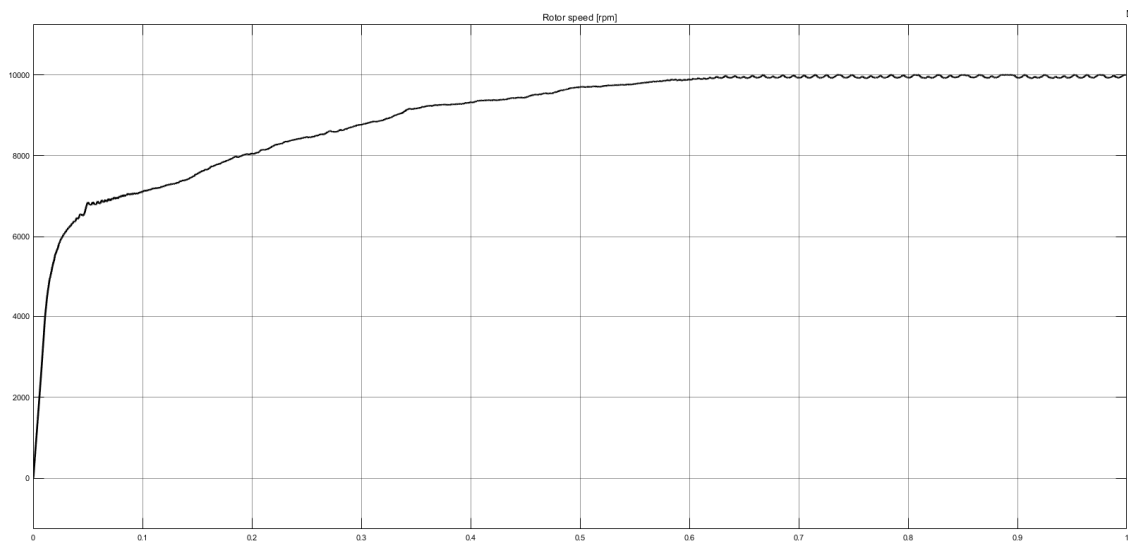
Výsledný nábeh otáčok sa výrazne líši od ideálneho spojitého modelu. Dôvodom je priebeh fázových prúdov, z ktorých sa počíta spätná väzba riadenia a nespojitý priebeh napájacieho napätia, ktorý je daný spínacou frekvenciou PWM generátora.



Obrázok 15 Model 400V s reálnymi IGBT



Obrázok 16 Model 400V detail IGBT



Obrázok 17 Otáčky model 400V s reálnymi IGBT

3 Návrh nového meniča hlavného pohonu

Nový menič je navrhovaný pre sezónu 2019, kde sa predpokladá prechod na napäťovú hladinu akumulátora 600V. Zvýšenie napäťovej hladiny pri rovnakom výkone znamená menší odoberaný prúd. Tento fakt sa pozitívne prejaví na nižších činných stratách a nižšej hmotnosti vozidla.

Nové vozidlo bude vybavené štyrmi motormi tak ako súčasné vozidlo. Menič bude dimenzovaný na motory s vyšším výkonom.

3.1 Nove vozidlo pre sezónu 2019

Vozidlo pre sezónu bude vychádzať z koncepcie vozidla FSE.06, parametre upravím podľa predpokladu prechodu na napäťovú hladinu akumulátora 600V.

Vstupné parametre pre nový menič predstavím v nasledujúcich častiach. Reálne parametre pre sezónu 2019 budú určite iné, ale rádovo by mali byť totožné.

3.1.1 Akumulátor

Pre napäťovú hladinu 600 V navrhujem použiť akumulátor s parametrami v Tabuľka 4.

Technológia batériového článku	Lithium-Ion
Typ batériového článku	Sony VTC5A
Maximálne napätie	600 V
Nominálne napätie	518,4 V
Minimálne napätie	432
Maximálne výstupný prúd	210A
Nominálny výstupný prúd	180A
Konfigurácia	144s6p
Kapacita	7,7 kWh
Vnútorý odpor	0.288 Ohm

Tabuľka 4 Parametre akumulátora pre sezónu 2019

Je pravdepodobné, že daný návrh nespĺňa všetky pravidlá pre bezpečný návrh akumulátora podľa pravidiel Formula Student Rules 2018 [6] prípadne pre sezónu 2019, ale návrh akumulátora nie je náplňou tejto diplomovej práce. Parametre budú použité pre potreby simulácie a slúžia ako orientačné hodnoty.

3.1.2 Pohony

Ako základ pre návrh a vstupné dáta pre simuláciu použijem motor **N5-1200-100-560a-water-cooling**. Jedná sa o jeden z predchádzajúci návrhov motora od firmy TG Drives na napätie 600 V.

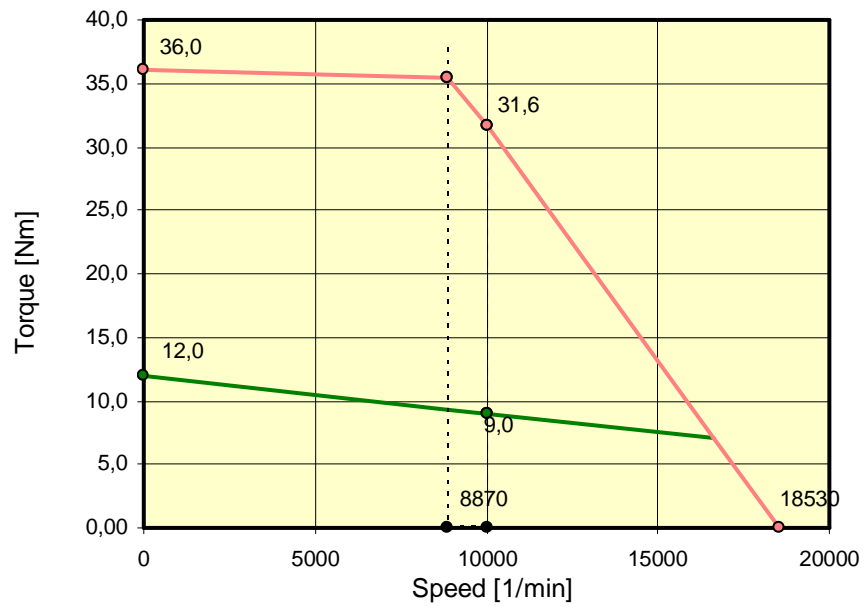
Rated Speed	n_n	10000	min^{-1}
DC Bus Voltage	U_{dc}	560	V
Nominal AC Voltage	U_n	380	V
Rated Motor Voltage	U_m	207	V
Rated Torque	M_n	9,0	Nm
Rated AC Current	I_n	31,2	A
Stall Torque	M_o	12,0	Nm
Stall AC Current	I_o	35,4	A
Peak Torque	M_{max}	36	Nm
Peak Current	I_{max}	131	A
Max. Speed	n_{max}	9000	min^{-1}
EMF Constant	K_E	20,5	V/1000
Torque Constant	K_T	0,34	Nm/A
Terminal Resistance	R_{2ph}	0,07	Ω
Terminal Inductance	L_{2ph}	0,54	mH
Number of poles	$2p$	10	

No Load Speed	n_o	18530	min^{-1}
Torque at I_{max}/U_n	M_z	35	Nm
Speed at I_{max}/U_n	n_z	8870	min^{-1}
Max. Torque at n_n	M_x	32	Nm

El. Time Constant	T_{el}	7,7	ms
Mech. Time Constant	T_{mech}	0,83	ms
Thermal Time Constant	T_{th}	45	min
Rotor Inertia	J	7,9	kgcm^2

Tabuľka 5 Parametre motora N5-1200-100-560a-water-cooling [3]

Torque/speed curves



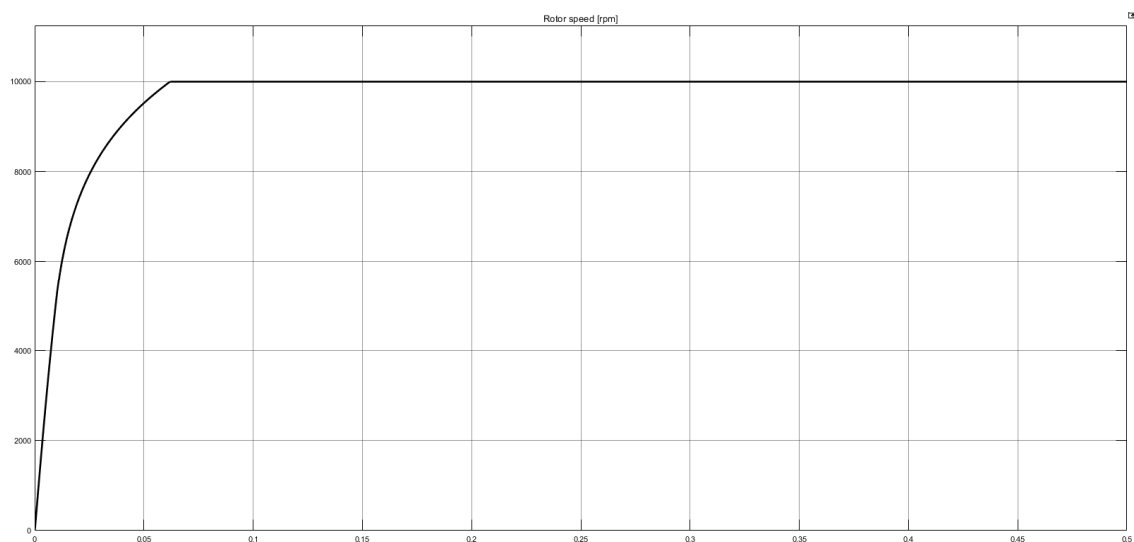
Obrázok 18 Momentová charakteristika motora N5-1200-100-560a-water-cooling [3]

Technické parametre sa nachádzajú v Tabuľka 5. Momentová charakteristika je na Obrázok 18. Pri svojom návrhu budem predpokladať, že prípadný motor pre sezónu 2019 bude mať rádovo rovnaké parametre.

3.2 Simulácia

V prostredí Simulinku som simuloval pohonný systém na 600V. Postupoval som rovnako ako v kapitole 2.3.

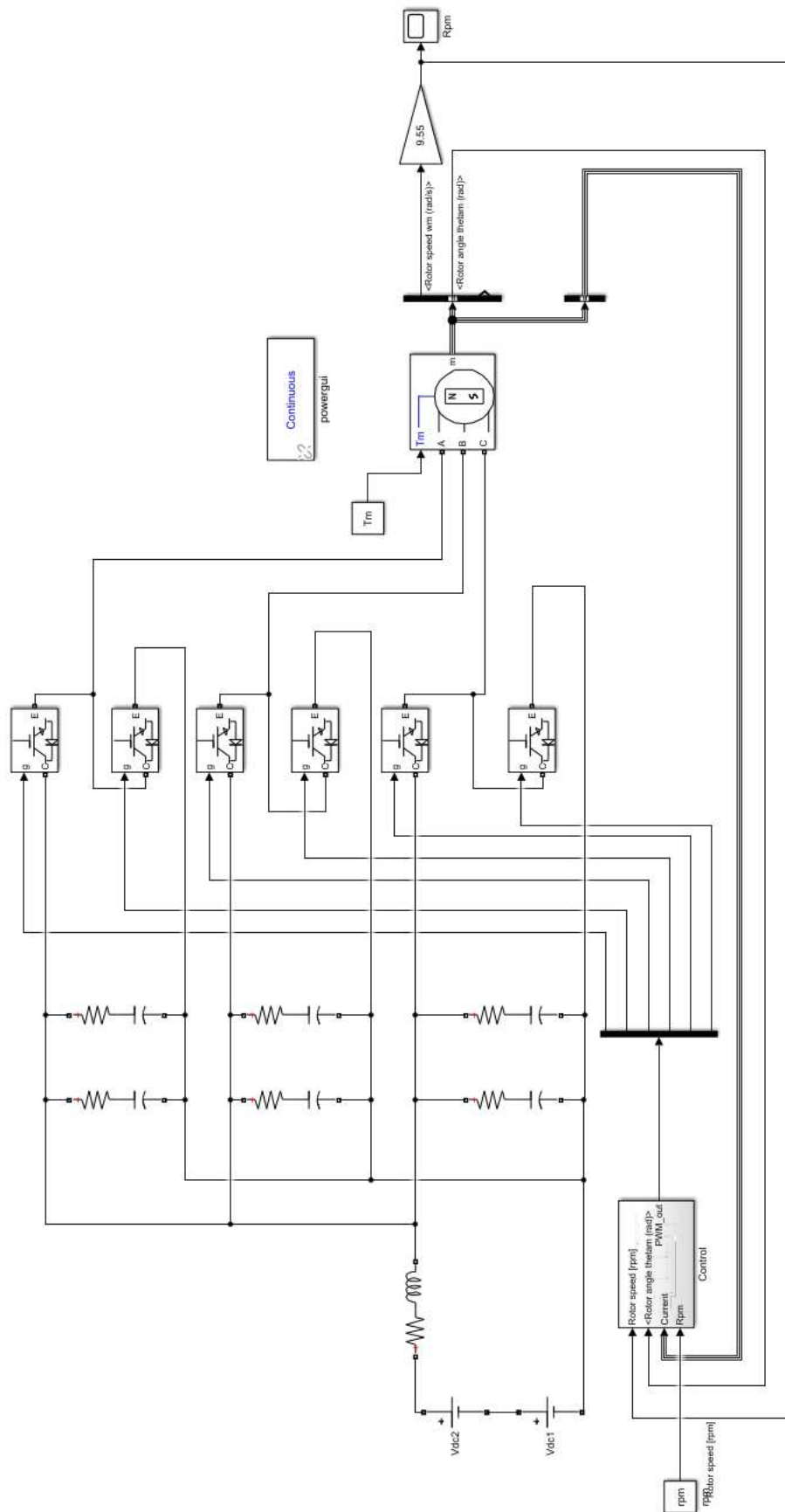
Začal som so simuláciou ideálneho modelu s riadenými zdrojmi napätia, kde som našiel ideálne hodnoty pre regulátory. Na obrázku Obrázok 19 je výsledná regulácia na nominálne otáčky 10000rpm pri nominálnej záťaži 9Nm.



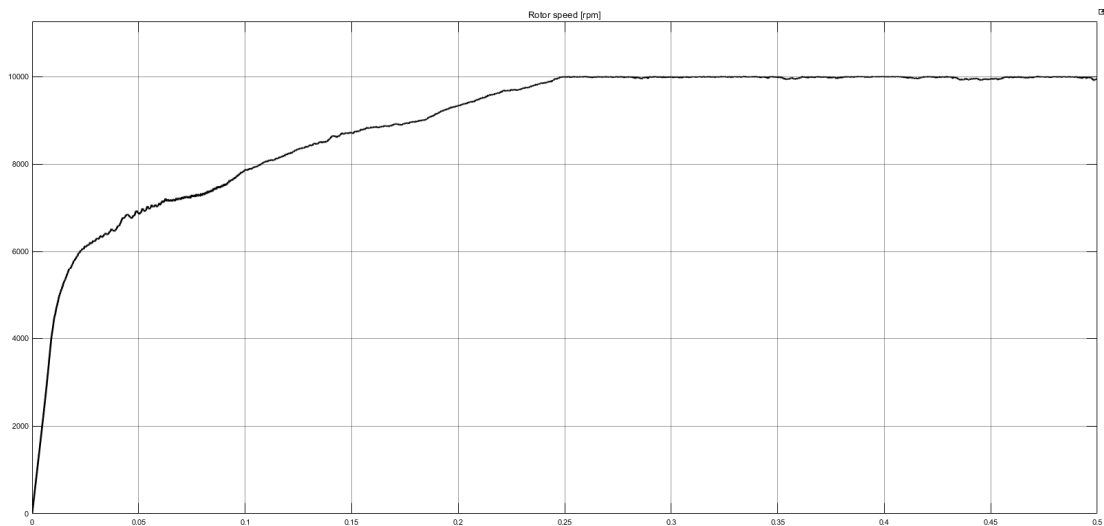
Obrázok 19 Otáčky model 600V s ideálnymi zdrojmi napätia

Následne som vytvoril model s ideálnymi IGBT, ktorý vidno na Obrázok 20. Model už má už tvar konceptu meniča podrobne rozoberaného v kapitole nižšie.

Na Obrázok 21 je výsledná regulácia nominálne otáčky 10000rpm pri nominálnej záťaži 9Nm.



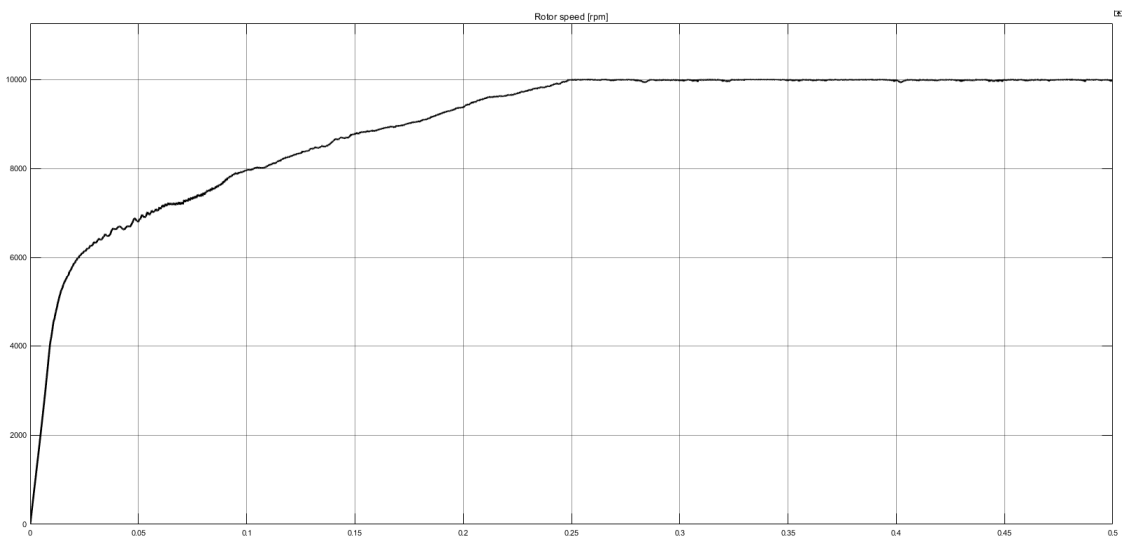
Obrázok 20 Model 600V s ideálnymi IGBT



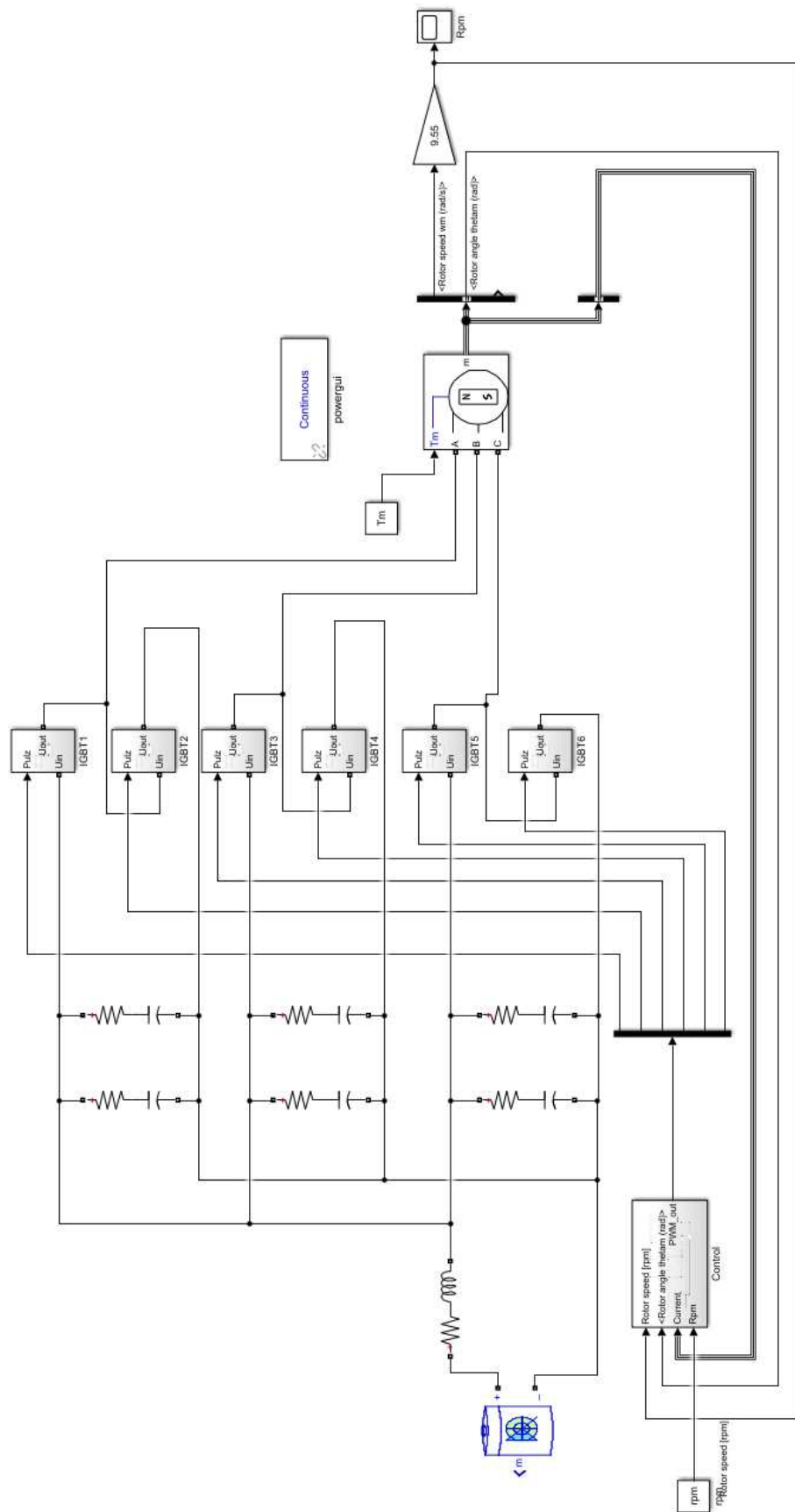
Obrázok 21 Otáčky model 600V s ideálnymi IGBT

Do finálneho modelu som pridal reálne IGBT a batériu. Schéma je na Obrázok 23.

Na obrázku Obrázok 22 je výsledná regulácia na nominálne otáčky 10000rpm pri nominálnej záťaži 9Nm.



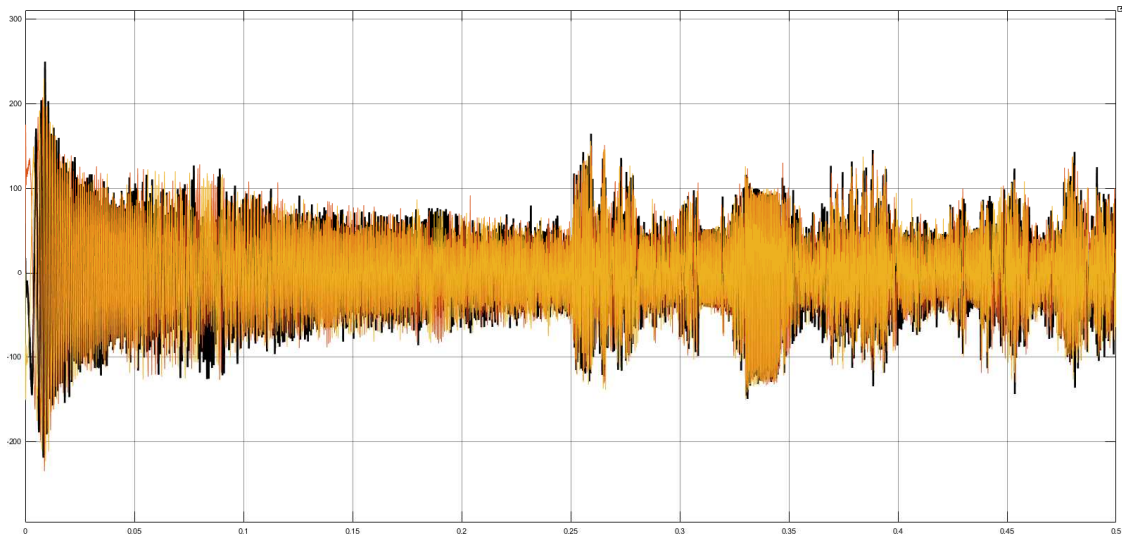
Obrázok 22 Otáčky model 600V s reálnymi IGBT



Obrázok 23 Model 400V s reálnymi IGBT

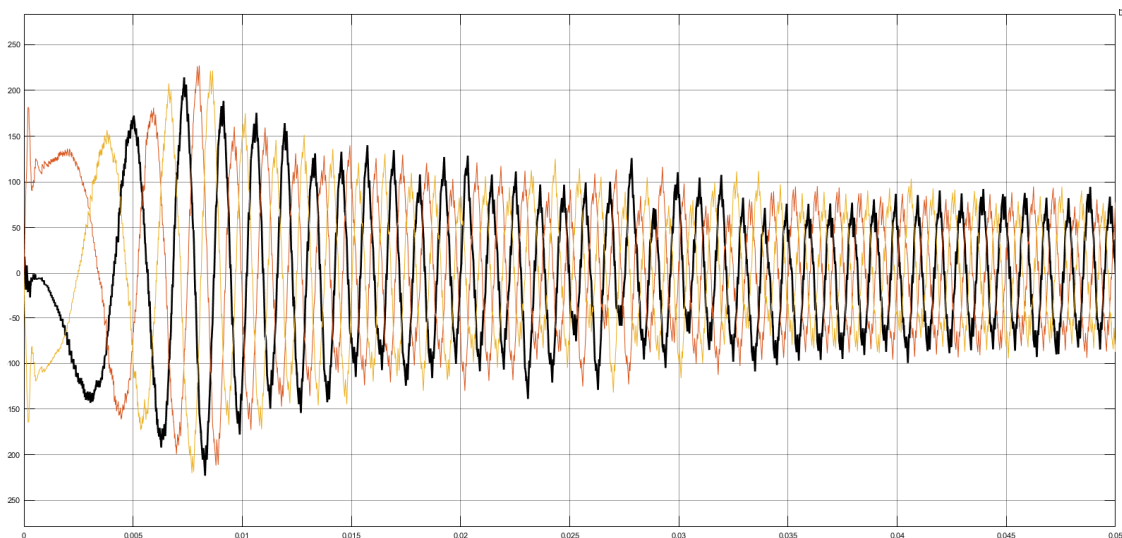
Výsledný nábeh otáčok sa opäť výrazne líši od ideálneho spojitého modelu. Dôvodom je priebeh fázových prúdov, z ktorých sa počíta spätná väzba riadenia a nespojitý priebeh napájacieho napätia, ktorý je daný spínacou frekvenciou PWM generátora.

Priebeh prúdov pri rozbehu vidno na Obrázok 24. Zo simulovaných dát som dostal hodnotu $I_{max} = 249 A$ a $I_{RMS} = 47A$. Tieto hodnoty budú použité pri dimenzovaní súčiastok.



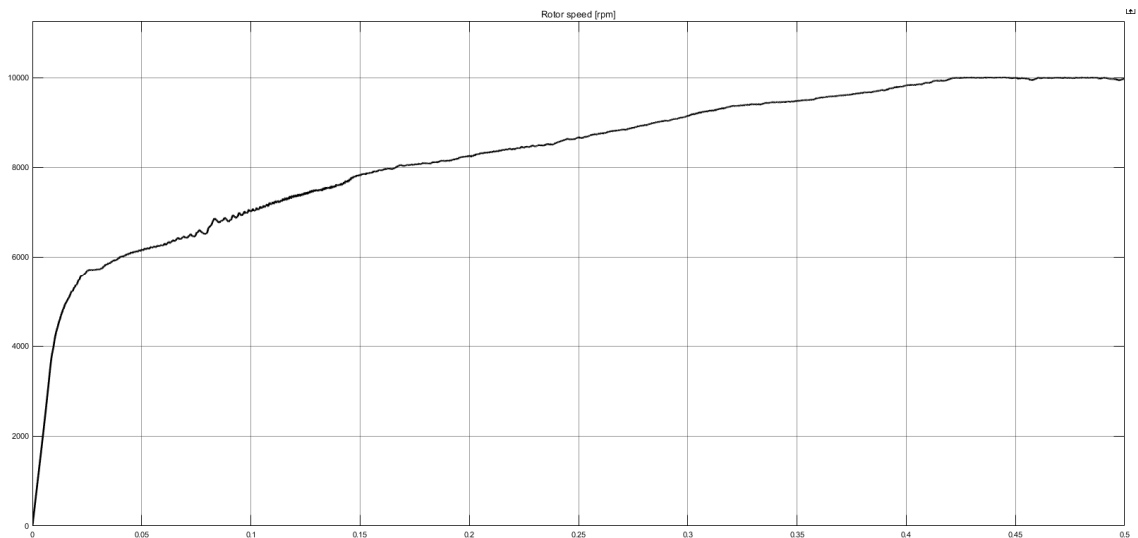
Obrázok 24 Priebeh prúdov model 600V s reálnymi IGBT

Detail priebehu rozbehových prúdov je na Obrázok 25.



Obrázok 25 Priebeh prúdov model 600V s reálnymi IGBT detail

Na Obrázok 26 vidno priebeh otáčok pri simulácii 10% nabitia batérie. Nábeh otáčok na nominálnu hodnotu je dlhší ale model reguluje správne. Získané hodnoty regulátorov je preto možné použiť ako orientačné hodnoty pri reálnom ladení motora.



Obrázok 26 Priebek prúduv model 600V s reálnymi IGBT pri 10% nabití batérie

3.3 Menič

Pravidlá pre preteky sa zvereňujú pred každou sezónou. V rámci predkladanej práce budem vychádzať z pravidiel pre sezónu 2018 [6][5]. Niektoré najdôležitejšie pravidlá pre menič sú vypísané nižšie.

EV2.2.1 Maximálny odoberaný výkon z akumulátora nesmie presiahnuť 80 KW.

EV5.1.1 Maximálne povolené napätie medzi dvoma elektrickými spojeniami nesmie presiahnuť 600VDC a pre menič vnútorné nízko energetické kontrolné signály 620 VDC.

EV5.1.2 Všetky komponenty v trakčnom systéme musia navrhnuté pre maximálne trakčné napätie.

EV5.3.1 Celý trakčný systém a ostatné elektrické systémy musia byť galvanicky izolované.

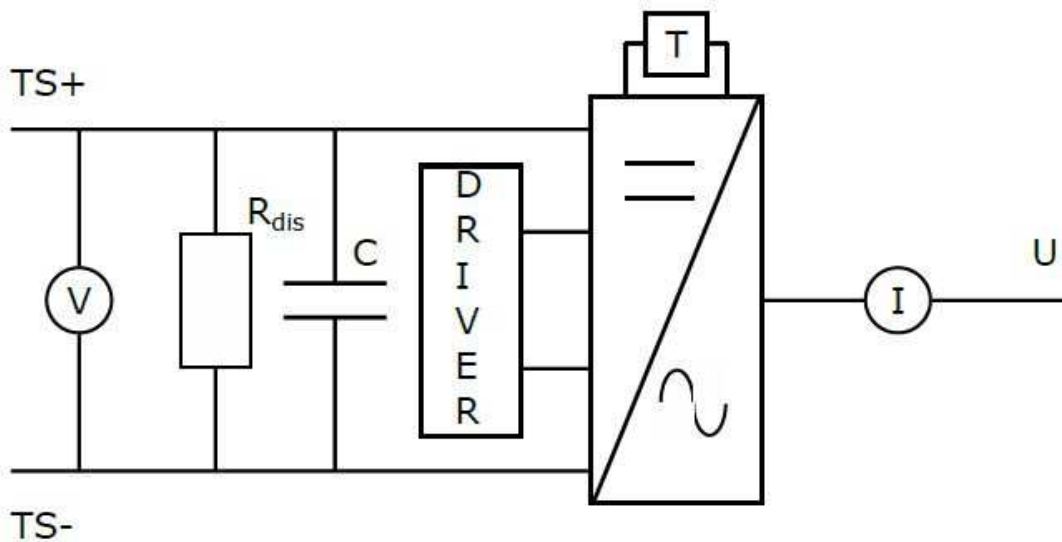
EV5.9.1 Ak je vybíjací obvod požadovaný aby spĺňal EV7.1.5., musí byť navrhnutý tak, aby trvalo zvládol maximálne trakčné napätie .

EV5.9.2 Vybíjací obvod musí byť zapojený tak, aby bol aktívny vždy, keď je bezpečnostný obvod otvorený. Musí byť schopný vybíjať kondenzátory, aj keď je obvod vysokého napätia rozpojený.

EV7.1.5 Ak bude bezpečnostný obvod otvorený, trakčný systém sa musí rozpojiť a napätie v trakčnom systéme musí padnúť, pod 60VDC alebo 25VACRMS za menej ako 5 sekúnd.

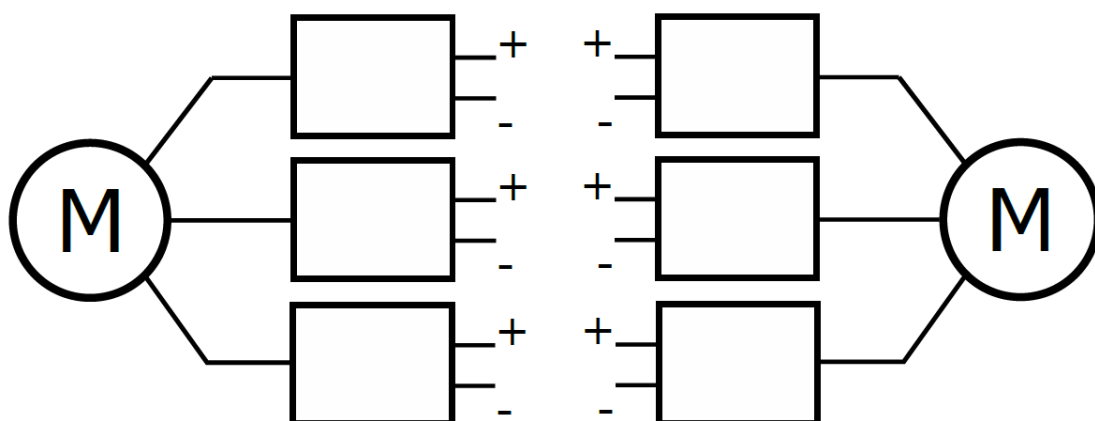
3.3.1 Koncept

Menič bude pozostávať z modulov, každý bude s jedným výkonovým modulom s polmostom. Schému vidno na Obrázok 27.



Obrázok 27 Schéma modulu

Výsledný menič bude pozostávať z troch modulov na jeden motor, prípadne sa bude dať ľahko vyskladať menič pre viac motorov. Preferovaná konfigurácia pre formulu bude šesť modulov na ovládanie dvoch motorov, viď schéma na Obrázok 28.

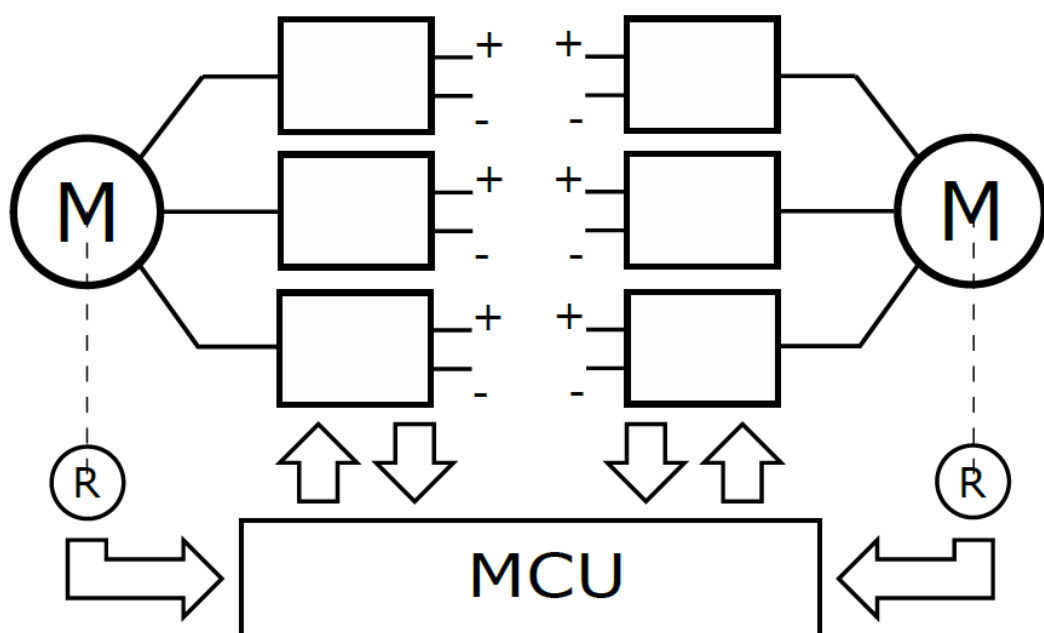


Obrázok 28 Schéma meniča

Na vektorovú reguláciu treba okrem presnej polohy rotora aj fázový prúd. Okrem toho sa bude merať aj napätie a teplota výkonového modulu.

Každý modul bude obsahovať na vstupe blokovací kondenzátor spolu s výbijacím obvodom (R_{dis}). Schému uvádzam na Obrázok 27.

Vo výslednom meniči nebude potrebné realizovať na všetkých moduloch všetky merania. Meranie prúdu stačí na dvoch fázach, tretí vieme vypočítať. Meranie teploty bude stačiť merať len na jednom z modulov. Meranie teploty na zvyšných moduloch nie je potrebné osadiť súčiastkami. V prípade merania prúdu sa modul jednoducho upraví počas návrhu dosky plošných spojov.



Obrázok 29 Schéma celkového meniča

Okrem trakčného napätia budú moduly napájané 24VDC. Toto napätie sa použije na napájanie logiky.

3.3.2 Výkonový modul

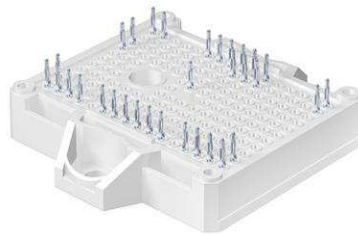
Nový menič bude pre napäťovú hladinu 600V. Z dôvodov prekmitov pri spínaní nemožno použiť priamo moduly pre 600V, ale musí sa ísť na vyššiu napäťovú hladinu. Vybral som napäťovú hladinu 1200V.

V rámci práce mam použiť produktovú radu SEMITOP E1/E2 spoločnosti Semikron [7].

Spomedzi ponúkaných modulov vychádza najlepšie SK75GD12T4ETE2. Je to modul s integrovanými tromi polmostami a trojfázovým výstupom. Problém tohto modulu je,

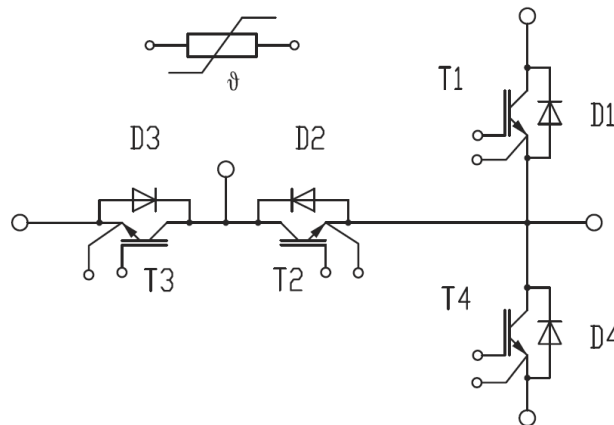
že je pre nominálny výstupný prúd $I_{Cnom} = 75A$. Náš modelový motor vybratý v kapitole 3.1.2 má nominálny prúd $I_o = 35,4A$, lenže maximálny prúd je však $I_{max} = 131A$, s amplitúdou $I_{maxP} = 185A$. Modul zvládne krátkodobo trojnásobok svojho nominálne prúdu $I_{CRM} = 225A$. Ako zo simulácie vyplýva, v kapitole 3.2 tieto hodnoty sú orientačné. Predovšetkým v našej aplikácii závodného špeciálu akou je formula sa ide na hranicu výkonu na úkor životnosti. Z toho dôvodu modul nevyhovuje.

Preto som vybral modul SK200TMLI12F4TE2 [8].



Obrázok 30 SK200TMLI12F4TE2 [8]

Modul má nominálny prúd $I_{Cnom} = 200A$, čo stačí na pokrytie celého výkonového spektra motora. Má veľmi nízku váhu 34g. Modul je určený pre trojstupňový menič, v rámci práce ho použijeme len ako dvojstupňový. Obsahuje taktiež NTC teplotný článok.



Obrázok 31 Schéma SK200TMLI12F4TE2 [8]

3.3.3 Budič

Na výber budiča pre modul som použil webový nástroj SemiSel [9]. Následné som vybral budič SKYPER 32 PRO R [10]. Budič riadi rovno 2 IGBT, čiže jeden polmost.



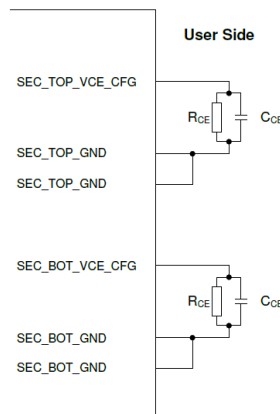
Obrázok 32 SKYPER 32 PRO R [10]

Obsahuje množstvo ochrán. Vypíšem tie, ktoré treba nastavovať.

Halt logic umožní v prípade externého signálu okamžite pozastaviť činnosť budiča. V prípade signálu HIGH nebudú žiadne spínacie signály z mikrokontroléra prenesené na výstup .

Dead time obvod zabraňuje situácii, aby neboli horný a dolný IGBT zapnutý naraz. Sú na výber časy od 1 – 4,3 μ s a vypnutie ochrany. Nastavujú sa kombináciou pripájaním v k zemi. Tieto piny pripojím k solder bridge, čo je pad, ktorý je v základe rozpojený, ale dá sa ľahko pájkou prepojiť. Počas testovania sa určí ktorý dead time je ideálny a podľa toho sa spájajú. Prednastavený je čas 4 μ s. Posledný pin, ktorý je jedine použitý pre vyradenie tejto ochrany dám natrvalo na nepripojený stav, aby sa zabránilo nechcenému vypnutiu tejto ochrany.

Dynamic Short Circuit Protection meria napätie medzi kolektorom a emitorom IGBT a v prípade poruchy vypne IGBT. Nastavuje sa odporom R_{CE} a kondenzátorom C_{CE} . Vstupné údaje na ich vypočítanie sú V_{CEstat} , čo je saturačné napätie pri spínaní IGBT čas t_{bl} , čo je čas, po ktorý je vypnuté meranie V_{CEstat} . Pre počiatočné testovanie som určil $V_{CEstat} = 3V$, pri predpoklade $R_{VCE} = 0\Omega$ mi vyšiel $R_{CE} = 7,3 k\Omega$. Pre $t_{bl} = 5\mu s$ mi vyšiel kondenzátor $C_{CE} = 1 nF$. Zapojenie uvádzam Obrázok 33.

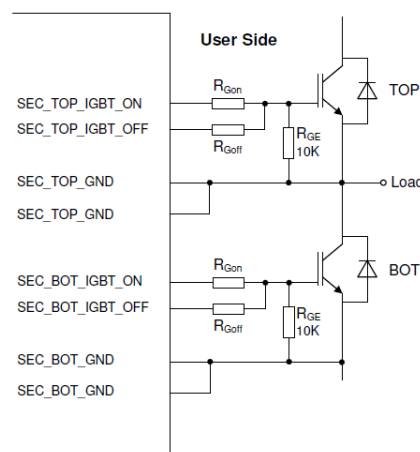


Obrázok 33 Zapojenie Dynamic Short Circuit Protection [12]

High Voltage Diode chráni pre prepätím počas stavu zatvoreného IGBT. Vybral som diodu BY203-20S s $V_R = 2000V$. Odpor R_{VCE} tu neuplatníme, lebo operujeme na napätí menšom ako 1700V.

Gate resistor sú odpory na výstupe budiča a na vstupe na gate IGBT. Ovládajú zapínanie a vypínanie rýchlosť pulzov IGBT. Budič má výstupy pre R_{Gon} a R_{Goff} čím reguluje rýchlosť zapínania a vypnutia separátne. Čím väčší odpor, tým dlhšie trvá zapínanie/vypínanie. Datasheet od modulu udáva hodnotu $R_{Gin} = 2,5 \Omega$. V aplikačných poznámkach [12] sa píše, že $R_{Gon/off}$ je minimálna hodnota, resp. dosiahnutá na testovacom systéme. Odporúča sa začať na dvojnásobnej hodnote, čiže pre $R_{Gon} = 5 \Omega$. V poznámkach sa taktiež píše, že R_{Goff} býva vo väčšine aplikáciách väčší ako R_{Gon} a to približne 2x. Preto navrhujem $R_{Goff} = 10 \Omega$.

V aplikačných poznámkach sa odporúča zapojiť tieto odpory paralelne, a tým vytvoriť redundanciu. Preto navrhujem zapojiť paralelne $R_{Gon} 2 \times 10 \Omega$ a pre $R_{Goff} 2 \times 20 \Omega$. Zapojenie uvádzam Obrázok 34.



Obrázok 34 Zapojenie Gate resistor [12]

Soft Turn-Off umožňuje v prípade skratu pridať do série s R_{Goff} ďalší odpor R_{Goff_SC} , čím zabezpečí dlhší vypínací čas. V mojom prípade túto možnosť nevyužijem a dám $R_{Goff_SC} = 0 \Omega$.

External Error Input je vstup na strane vysokého napätia, ktoré umožní vypnutie budiča. Je to funkcia podobná Halt logic spomenutej vyššie. Keďže nemám žiadne takto koncipované ochrany, tak túto možnosť nevyužijem.

Budič má galvanický oddelené vstupy a výstupy, z tohto dôvodu nie je potrebné galvanický oddeľovať napájanie a radiace signály. Napájanie 15VDC je zabezpečené čipom Mag1³C-VDRM Variable Step Down Regulator Module [11] od výrobcu Wurth.

3.3.4 Blokovacie kondenzátory

Blokovací kondenzátor chráni IGBT pred napäťovými špičkami a slúži ako lokálna zásoba energie pri prechodových javoch.

Pre výpočet minimálnej hodnoty kondenzátora som použil vzťah Rovnica 1.

Rovnica 1 Minimálna hodnota blokovacieho kondenzátora [2]

$$C_{min} = \frac{4 * L}{R^2} = \frac{4 * 2\Omega H}{0.288^2 \Omega} = 96,45\mu F$$

Vychádzal som z môjho modelu akumulátora z kapitoly 3.1.1 a vyšla mi hodnota 96 μ F. Toto je minimálna hodnota na zabránenie kmitania medzi akumulátorom a vstupným kondenzátorom.

Na výpočet veľkosti som použil aj druhý prístup, kde sa berie do úvahy rozkmit napätia kondenzátore. Tento rozkmit vytvára rušivé elektromagnetické pole, ktoré môže rušiť inú elektroniku vo formule. Pri výpočte budem brať v úvahu vybíjanie maximálnym konštantným prúdom. Zmenu napätia na kondenzátore budem brať 10% pri najhoršom prípade a to pri minimálnom napätí akumulátora.

$$\Delta U = U_{min} * 10\% = 432V * 0,1 = 43,2 V$$

$$t = \frac{1}{2 * f_{sw}} = \frac{1}{2 * 10\,000Hz} = 50\mu s$$

$$I_{max} = 200A$$

$$C = \frac{I_{max} * t}{\Delta U} = 231\mu F$$

Vyšla mi hodnota 231 μ F. Z praktických skúsenosti tímu vyplýva, že poddimenzovať kapacity sa neoplatí a predimenzovanie nemá žiaden negatívny vplyv. Preto som vybral kapacitu 280 μ F pre jeden modul, pre celý menič to bude 3x. Kondenzátory som vybral nasledovne:

KEMET C4DEIPQ6100A8TK, 100 μ F , 800V, fóliové kondenzátor,

EPCOS B43541B8187M000, 180 μF , 600V, hliníkový elektrolytický kondenzátor

3.3.5 Vybíjací odpor

Podľa pravidla EV7.1.5 musí kondenzátor vybiť za 5 sekúnd pod 60VDC.

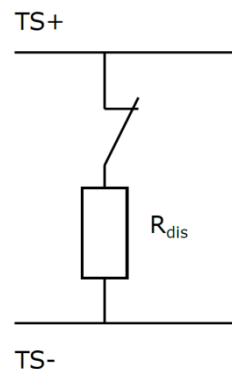
Pri maximálnom nabitom kondenzátore za 5 sekúnd klesne napätie na:

$$U_c = U_{max} * e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)} = 600 * e^{\left(\frac{-5}{7500 * 280 * 10^{-6}}\right)} = 55,47 V$$

$$I_{max} = 80mA$$

$$P_{max} = R * I_{max}^2 = 48W$$

Odpor som vybral Ohmite L100 J7K5E s odporom $R = 7500 \Omega$ a výkonom 100W, takže zvládne dlhodobo maximálny výkon.



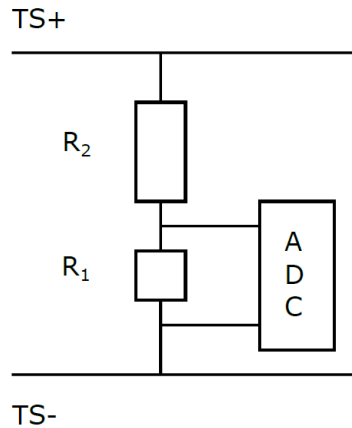
Obrázok 35 Schéma vybíjajúceho odporu

Ako relé som vybral PLB171 od firmy IXIS. Jedná sa o Solid state relé, normálne zatvorené, tým pádom spĺňa pravidlo EV5.9.2.

3.3.6 Meranie napätia

Meranie napätia sa bude realizovať cez napäťový delič merať diferenčným AD prevodníkom AMC1306E25DWVR od firmy Texas Instruments. Jedná sa o izolovaný prevodník s rozsahom $\pm 250mV$ a rozlíšením 16bit.

Napäťový delič bude pozostávať z odporov $R_1 = 1k\Omega$ a $R_2 = 3,2M\Omega$. Pri tomto pomere budeme môcť merať napätie do výšky 800V s rozlíšením $12 \frac{mV}{bit}$.



Obrázok 36 Schéma merania napätia

Analógová časť bude napájaná z zdroja 15VDC, ktorý bude odizolovaný DC/DC meničom RECOM Power RM-1515S a napätie bude znížené na 5V LDO regulátorom Texas Instruments TPS7B6950DBVR.

Digitálna časť bude napájaná priamo z dosky s mikrokontrolérom a privedená spolu so signálmi. S mikrokontrolérom komunikuje pomocou sériovej linky s výstupom sigma-delta.

3.3.7 Meranie prúdu

Meranie prúdu bude merať senzor ACS770ECB-200B-PSF-T od Allegra. Jedná sa o senzor na báze Hallového efektu. Je odizolovaný s rozsahom $\pm 200A$ a citlivosťou $10 \frac{mV}{A}$. Výstup bude $\pm 2V$. Tento výstup pôjde do diferenčného 16 bitového AD prevodníka ADS8317IBDGKT od firmy Texas Instruments s referenciou 2,048V LM4128DQ1MF2.0/NOPB. AD Prevodník má rozsah $\pm U_{REF}$.

Napájané budú z 15V LDO regulátorom Texas Instruments TPS7B6950DBVR.

3.3.8 Meranie teploty

V module sa nachádza NTC (Negative Temperature Coefficient) článok, tzn. so zvyšujúcou sa teplotou klesá odpor. V datasheete [7] je definovaný

$$R_{25} = 5k\Omega$$

$$R_{100} = 493 \pm 5\% \Omega$$

$$B_{100/125} = 3550 \pm 2\% K$$

$$R_T = R_{100} * e^{\left(\frac{B_{100}}{125} * \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{100}}\right)\right)} \Omega; T[K]$$

Na meranie som vybral čip MAX6691MUB. Je to Thermistor-to-Digital Converter, ktorý prenáša nameraný odpor NTC článku na PWM signál. Dokáže merať až štyri články, postačujúci je jeden vstup. Je tu ale možnosť pre pridanie ďalších meraní teploty, napr.: kondenzátorov, konektorov,...

NTC článok a odpor R_{ext} vytvára odporový delič, ktorý je meraný a porovnávaný s vnútornou napäťovou referenciou. Pre R_{ext} platí

$$R_{ext} = \frac{R_{MID} * (R_{MIN} + R_{MAX}) - 2 * R_{MIN} * R_{MAX}}{R_{MIN} + R_{MAX} - 2 * R_{MID}}$$

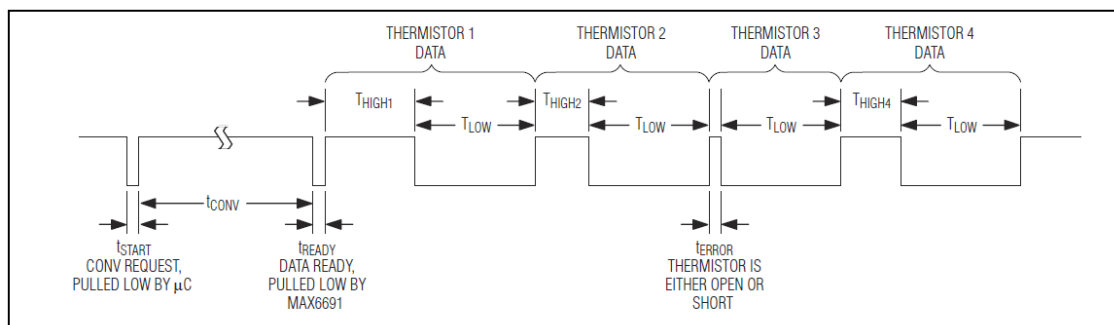
Kde R_{MIN} je minimálny meraný odpor termistoru pri maximálnej teplote, R_{MAX} maximálny a R_{MID} je odpor termistoru pri strednej teplote. Pri výbere R_{ext} si musím dať pozor, aby pri minimálnom odpore termistoru v sérii s R_{ext} nespôsobil pri referenčnom napätí väčší prúd ako $1mA$. Vybral som teplotný rozsah od $25^{\circ}C$ do $110^{\circ}C$.

$$R_{25} = 5k\Omega$$

$$R_{110} = 384\Omega$$

$$R_{ext} = 930 \Omega$$

Pri tejto konfigurácii je $I_{max} = 0.92mA$ čím som splnil podmienku. Výstup je ukázaný na Obrázok 37.



Obrázok 37 Výstup z MAX6691MUB [13]

Nameraná hodnota je definovaná podľa pomeru

$$\frac{T_{HIGH}}{T_{LOW}} = \frac{V_{EXT}}{V_{REF}} - 0.0002 = \frac{R_{ext}}{R_{ext} + R_{TH}} - 0.0002$$

Napájaný budú z 15V LDO regulátorom Texas Instruments TPS7B6950DBVR.

3.3.9 Mikrokontrolér

Menič bude riadiť externá doska s mikrokontrolérom, ktorá bude najpravdepodobnejšie obsluhovať šesť modulov pre dva motory.

Vo vozidle sa používajú mikrokontroléry prakticky výlučne od Firmy STMicroelectronics. Pri výbere by som zostal u nich. Vyrábajú široké portfólio mikrokontrolérov, vrátane vývojárskych prípravkov.

V rámci merania som použil AD prevodník s výstupom sigma-delta. To bude požiadavka, aby mikrokontrolér obsahoval vstup pre spracovanie tohto typu signálu. U STM sa to nazýva Digital filter sigma-delta modulation DFSDM. Na výber vhodného mikrokontroléra so použil program STM32Cube [14] od výrobcu. Ten umožňuje, mimo iné, vyhľadávať spomedzi rozľahlého portfólia mikrokontrolérov podľa parametrov. Po selekcii umožňuje nastavenie periférii a ich export do programovacích editorov. Ja som predbežne vybral STM32F413ZH, ktorý má aj vývojársky prípravok.

Part No.	Reference	Marketing Status	Unit Price for 10kU (US\$)	Board	Package	Flash	RAM	IO	Freq.
STM32F030C6	STM32F030C6Tx	Active	0.542		LQFP48	32 kBytes	4 kBytes	39	48 MHz
STM32F030C8	STM32F030C8Tx	Active	0.657		LQFP48	64 kBytes	8 kBytes	39	48 MHz
STM32F030CC	STM32F030CCTx	Active	1.0		LQFP48	256 kBytes	32 kBytes	37	48 MHz
STM32F030F4	STM32F030F4Px	Active	0.385		TSSOP20	16 kBytes	4 kBytes	15	48 MHz
STM32F030K6	STM32F030K6Tx	Active	0.471		LQFP32	32 kBytes	4 kBytes	25	48 MHz
STM32F030R8	STM32F030R8Tx	Active	0.685	N...	LQFP64	64 kBytes	8 kBytes	55	48 MHz
STM32F030RC	STM32F030RCTx	Active	1.1		LQFP64	256 kBytes	32 kBytes	51	48 MHz
STM32F031C4	STM32F031C4Tx	Active	0.97		LQFP48	16 kBytes	4 kBytes	39	48 MHz
STM32F031C6	STM32F031C6Tx	Active	1.013		LQFP48	32 kBytes	4 kBytes	39	48 MHz
STM32F031E6	STM32F031E6Tx	Active	0.776		WLCSP25	32 kBytes	4 kBytes	20	48 MHz
STM32F031F4	STM32F031F4Px	Active	0.711		TSSOP20	16 kBytes	4 kBytes	15	48 MHz
STM32F031F6	STM32F031F6Px	Active	0.755		TSSOP20	32 kBytes	4 kBytes	15	48 MHz

Obrázok 38 STM32CubeMX

Vozidlo FSE.07 bude obsahovať desať kontrolných jednotiek s mikrokontrolérmi. V rámci optimalizácie sa v budúcich vozidlách počíta so znižovaním jednotiek, a tým pádom so zlučováním funkcií.

Výsledný mikrokontrolér s riadiacou doskou pre menič bude najskôr kompromis rôznych funkcií, preto je výber len orientačný.

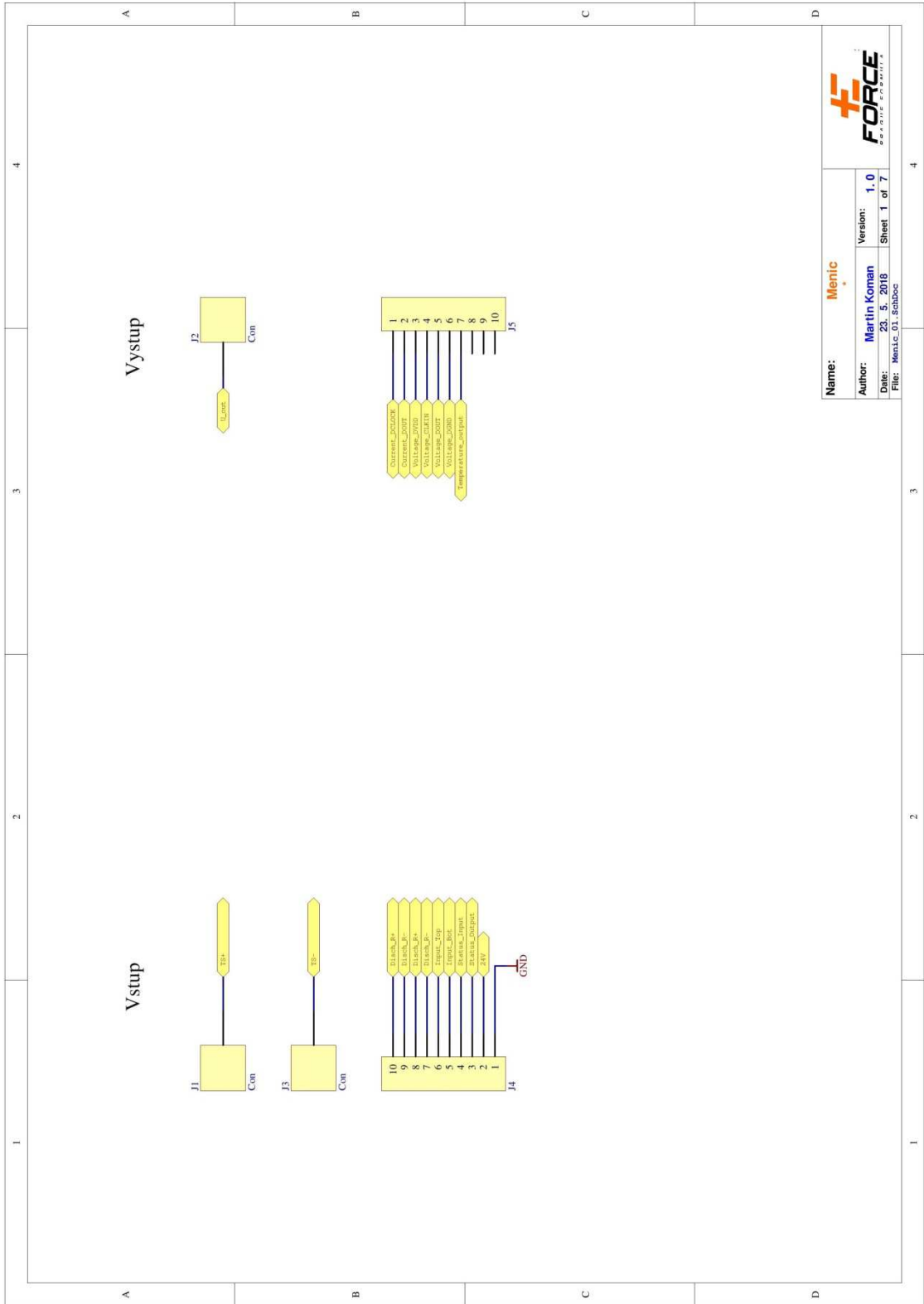
3.3.10 Altium Designer

Altium je software pre elektronický návrh dosiek plošných spojov. Umožňuje návrh schématických zapojení, a následne návrh dosiek plošných spojov. Dokáže okrem iného 3D model dosiek plošných spojov s exportom do CAD formátov.

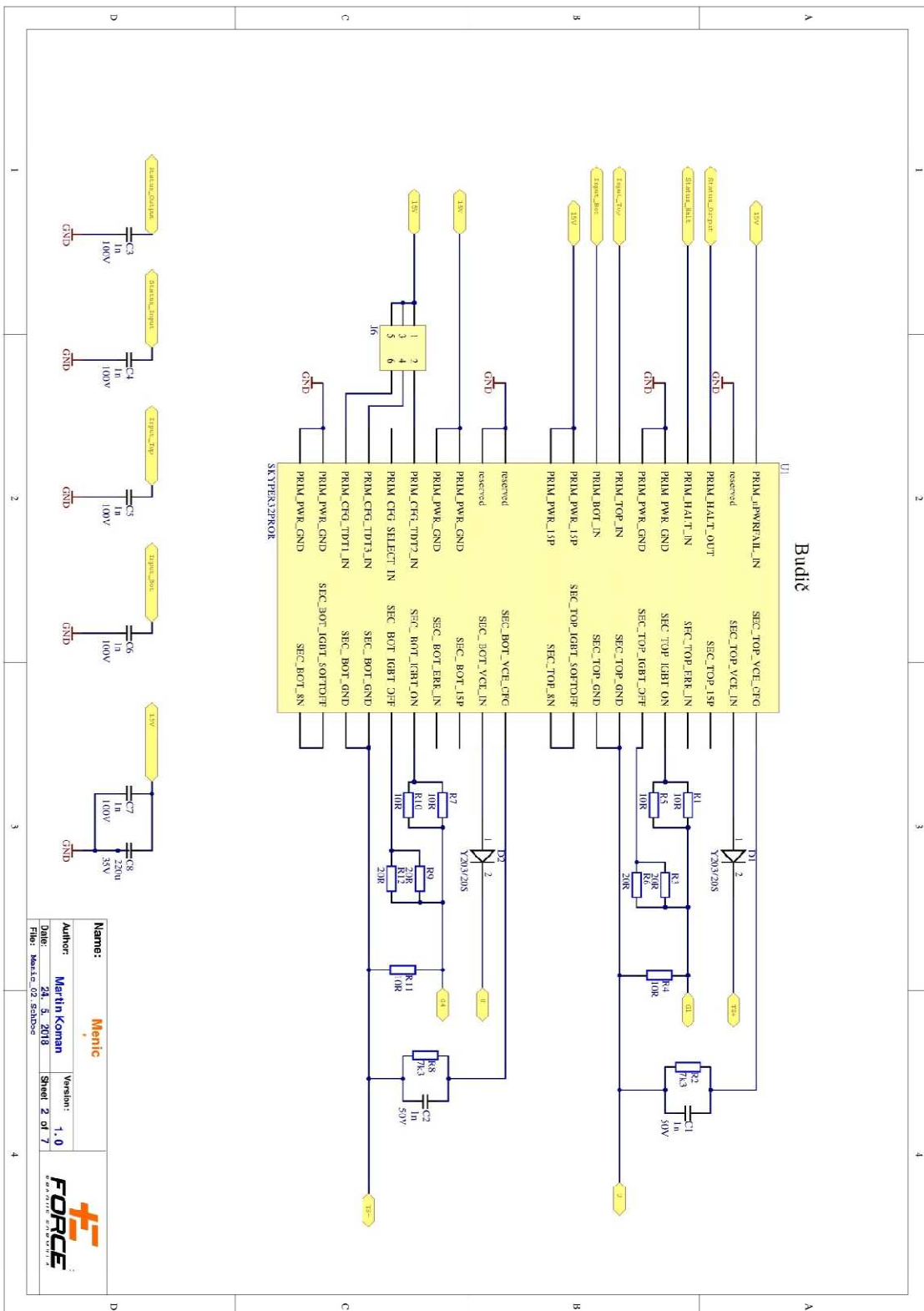


Obrázok 39 Altium PCB Designer [15]

Altium je sponzorom tímu, a preto väčšina dosiek plošných spojov sa vytvára v tomto programe. V programe som vytvoril prvotný schématický návrh meniča.



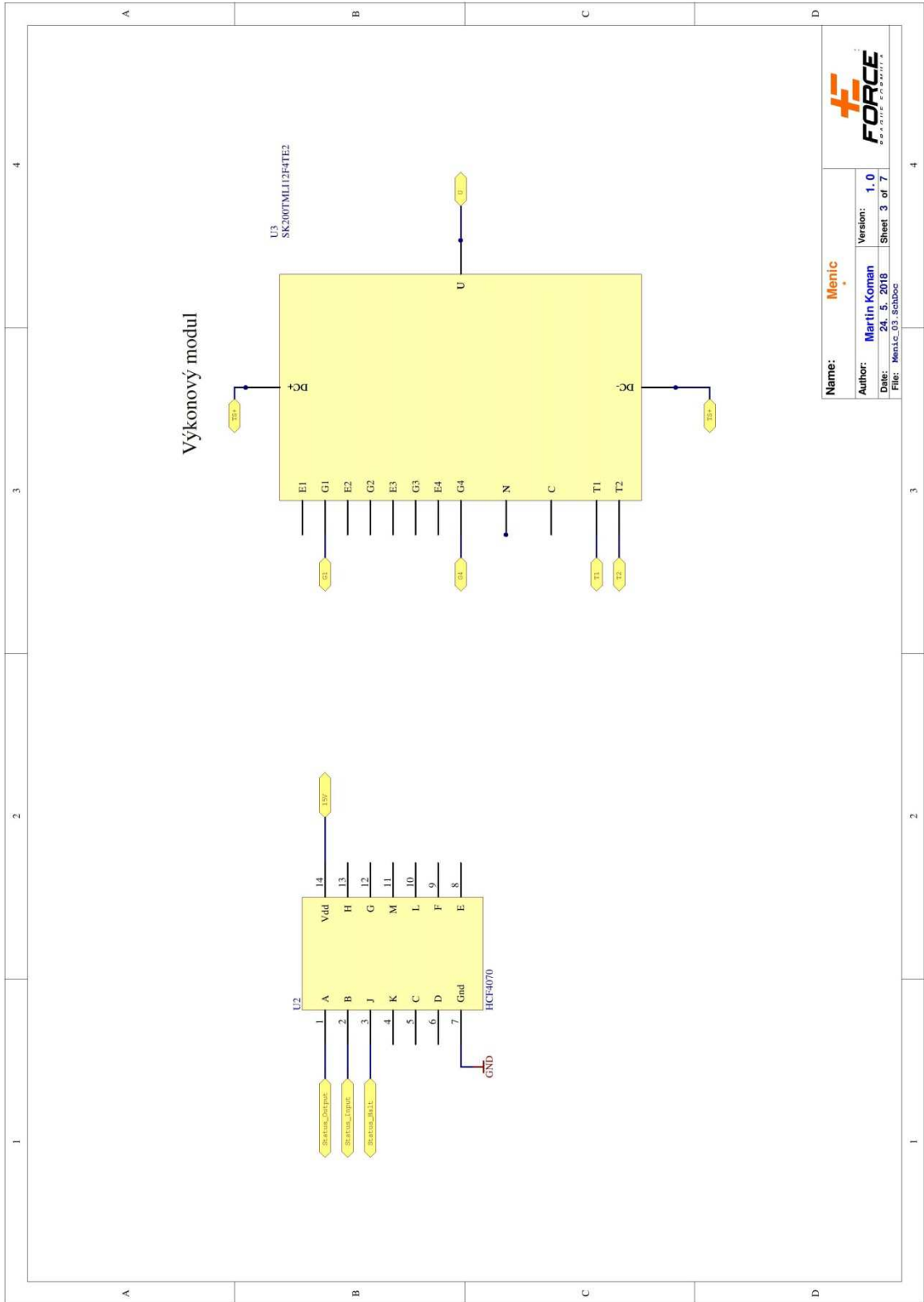
Obrázok 40 Schéma strana 1



Name: **Menic**
 Author: Martin Koman
 Date: 24. 5. 2018
 Version: 1.0
 Sheet: 2 of 7
 File: Measico_02_SchDoc



Obrázok 41 Schéma strana 2

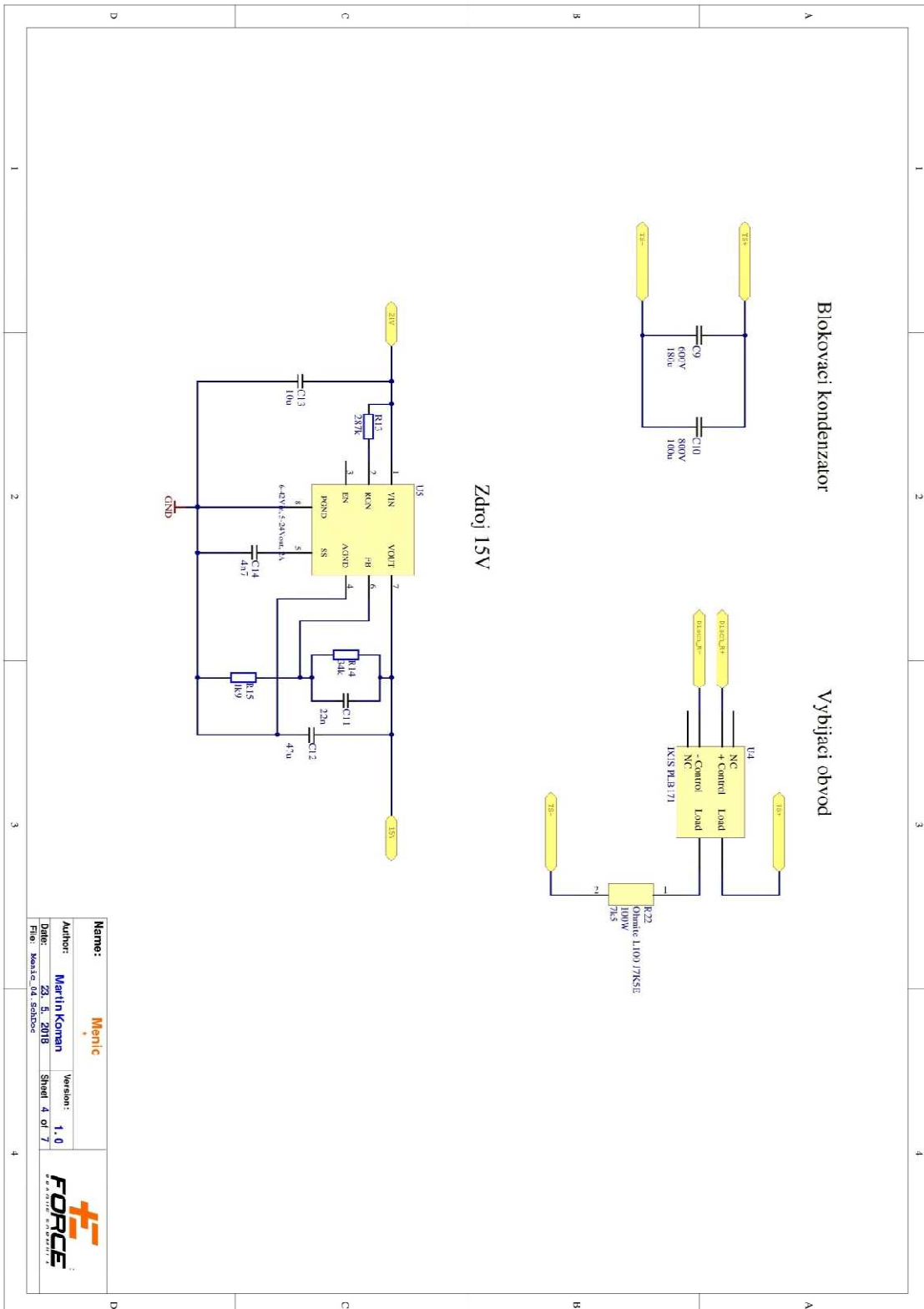


Name: **Menic**
 Author: **Martin Koman**
 Date: **24. 5. 2018**
 File: **Menic_03.schdoc**

Version: **1.0**
 Sheet **3** of **7**

FORCE
 GROUP OF COMPANIES

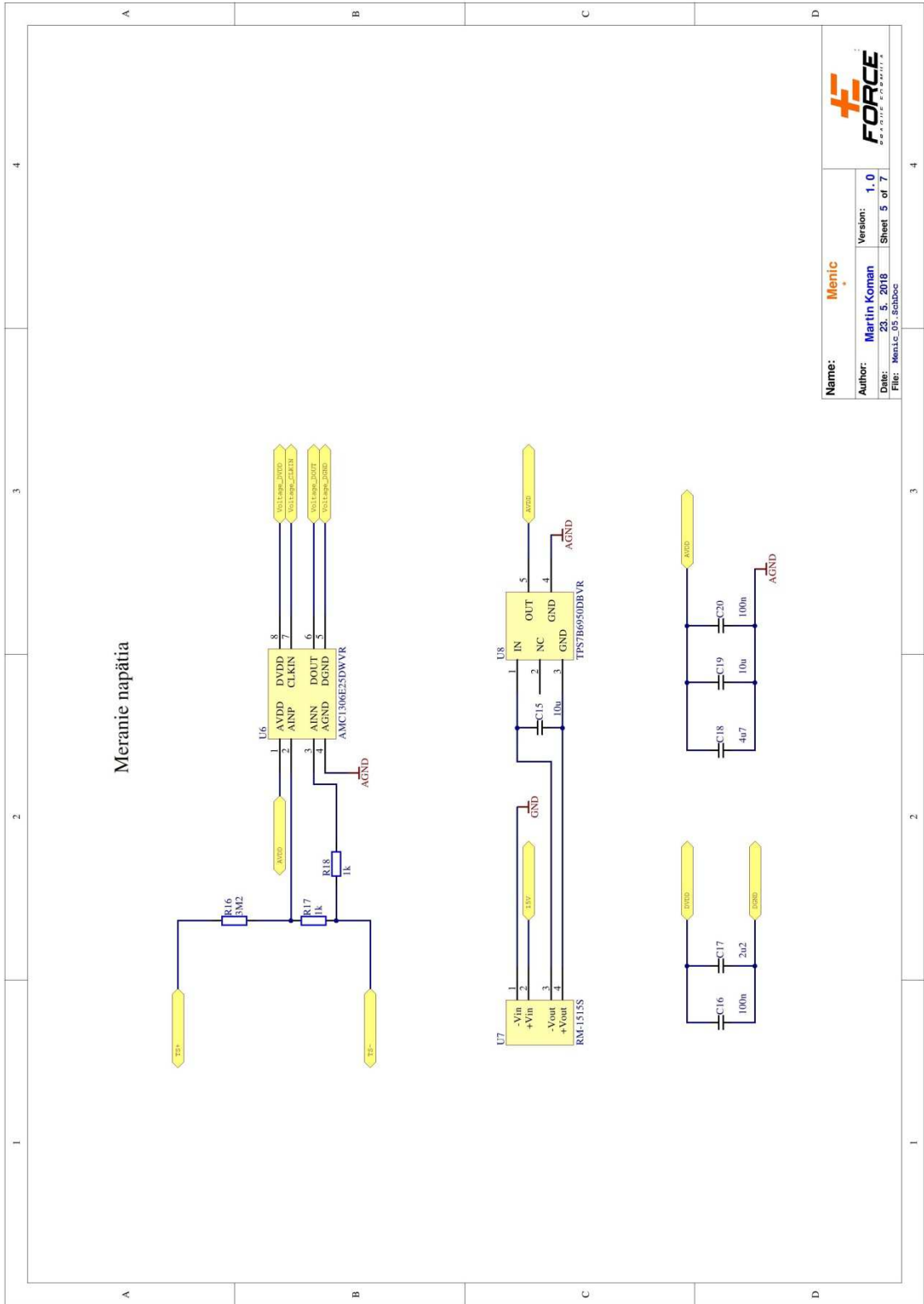
Obrázok 42 Schéma strana 3



Name:	Mentle
Author:	Martin Kompan
Date:	23. 5. 2018
File:	Konst_04_sch.docx
Version:	1.0
Sheet:	4 of 7



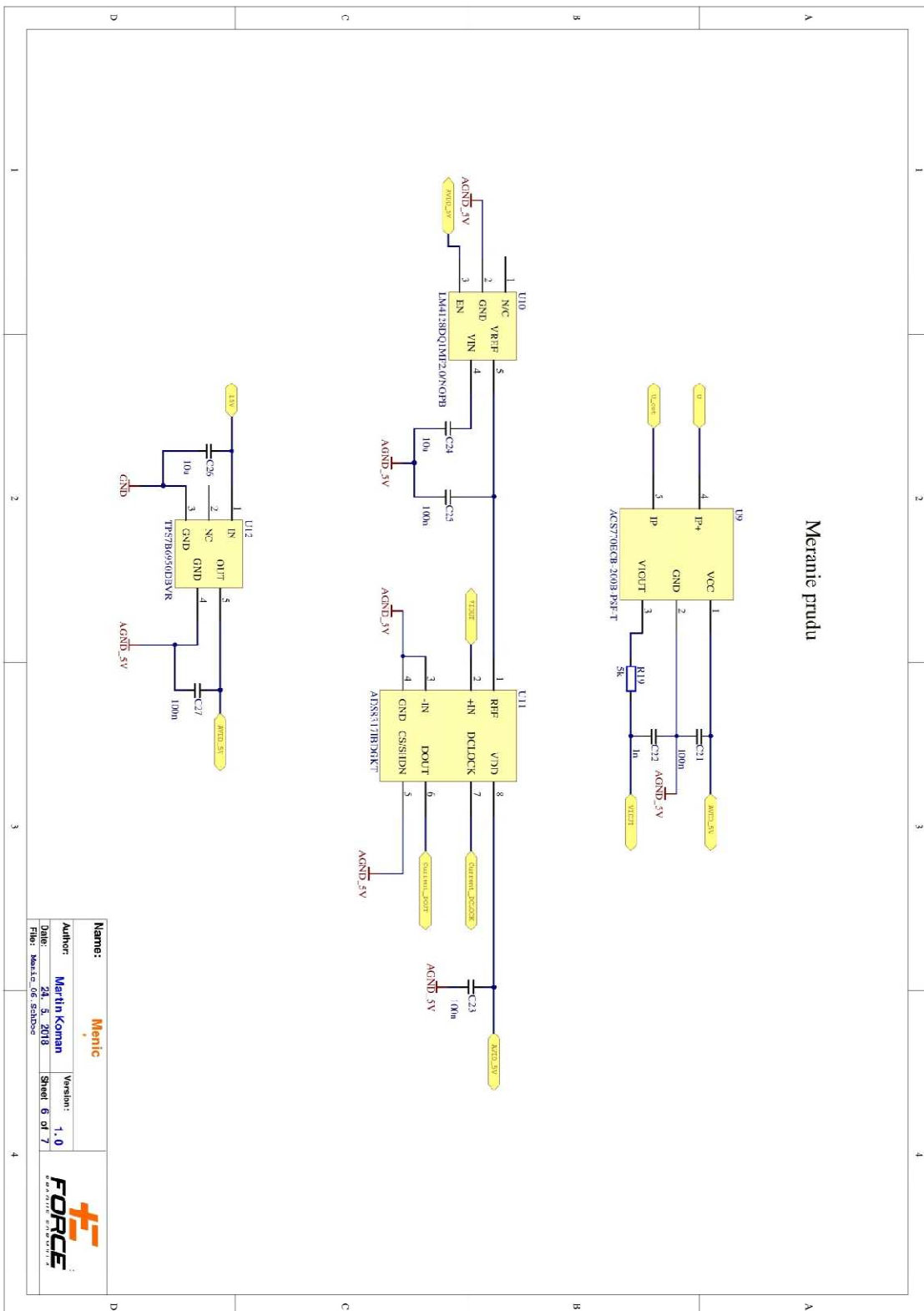
Obrázok 43 Schéma strana 4



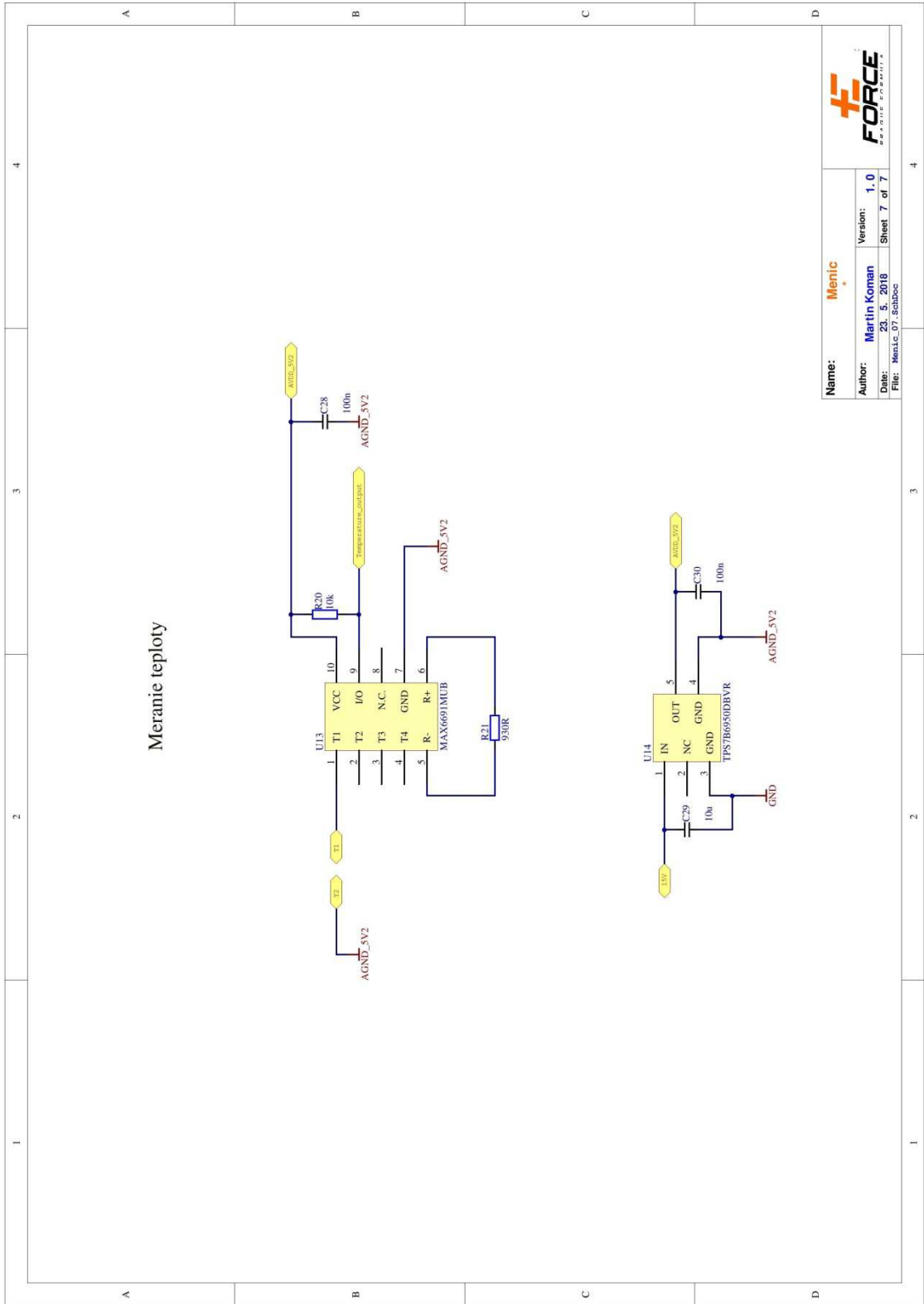
Name:	Menic
Author:	Marin Koman
Date:	23. 5. 2018
Version:	1.0
Sheet:	5 of 7
File:	Menic_05_schDoc



Obrázok 44 Schéma strana 5



Obrázok 45 Schéma strana 6



Obrázok 46 Schéma strana 7

Záver

V práci som popísal súčasný menič hlavného pohonu Formule student electric a to konkrétne pre vozidlo FSE.07.

Výrobnú dokumentáciu som nemal možnosť vytvoriť schopný vytvoriť, pretože autor meniča nemá autorské práva na poskytnutie akejkoľvek dokumentácie tretím stranám.

V prostredí Matlab Simulink som nasimuloval model odpovedajúcemu súčasnému trakčnému systému. Následne som ho upravil na napäťovú hladinu 600V.

Na základe výsledkov simulácie som navrhol menič za použitia moderných spínacích prvkov Semikron Semitop SK200TMLI12F4TE2, ktorý v porovnaní so súčasne použitým modulom FUJI SK200TMLI12F4TE2 má potenciál byť neporovnateľne ľahší. Inteligentný IGBT modul FUJI použitý v súčasnom meniči má váhu 940g. Moduly Semitop E2 a aj budiče SKYPER 32 PRO R majú váhu po 34g. Váha výkonových prvkov je dokopy 204g. Len na výkonových moduloch sa ušetrilo na váhe 736g, pre celé vozidlo je to 2,9 kg.

Použitá literatura

- [1] Eforce FEE Prague Formula [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <https://eforce.cvut.cz>
- [2] RÝZEK, Miroslav. *Řízení pohonu elektrického vozidla Formula Student*. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [3] *TG Drives* [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.tgdrives.cz>
- [4] *Electrical Safety Form FSAE-E 2018*. Prague: eForce FEE Prague Formula, 2018.
- [5] *Fuji Electric 6MBP300VEA060-50* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: https://www.fujielectric-europe.com/downloads/6MBP300VEA060-50_1734946.PDF
- [6] *Formula Student Rules 2018* [online]. 2017 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2018/rules/FS-Rules_2018_V1.0.pdf
- [7] *SEMISTOP E1/E2* [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <https://www.semikron.com/products/product-lines/semistop/semistop-e1e2.html>
- [8] *SK200TMLI12F4TE2* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.semikron.com/products/product-classes/igbt-modules/detail/sk-200-tmli-12f4-te2-24920840.html>
- [9] *SemiSel* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.semikron.com/service-support/semisel-simulation.html>
- [10] *SKYPER 32 PRO R* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-datasheet-skyper-32-pro-r-l6100202/>
- [11] *Mag³C-VDRM Variable Step Down Regulator Module* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://katalog.w-online.com/pm/datasheet/171012401.pdf>
- [12] *Gate Resistor – Principles and Applications*[online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.semikron.com/dl/service->

support/downloads/download/semikron-application-note-gate-resistor-principles-and-applications-en-2007-11-12-rev-00/

- [13] *MAX6691MUB* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z:
<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6691.pdf>

- [14] *STM32Cube* [online]. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z:
<http://www.st.com/en/ecosystems/stm32cube.html?querycriteria=productId=SC2004>

- [15] *Altium PCB Designer* [online]. In: . [cit. 2018-05-22]. Dostupné z:
<https://www.altium.com>

Zoznam obrázkov a grafov

Obrázok 1 Formula Student Czech Republic 2017 [1]	2
Obrázok 2 Bodové ohodnotenie disciplín [1].....	3
Obrázok 3 Momentová charakteristika motora M4-0470-90-380a-h [3].....	7
Obrázok 4 Momentová charakteristika motora N5-1600-100-380a-h-special-v2 [3]	8
Obrázok 5 Koncept súčasného meniča [2].....	8
Obrázok 6 Schéma merania fázových prúdov [2]	10
Obrázok 7 Resolver s budiacimi a výstupnými signálmi	10
Obrázok 8 Schéma zapojenia PTC senzora s paralelným odporom [2].....	11
Obrázok 9 Riadenie ideálny model 400V	13
Obrázok 10 Model 400V s ideálnymi zdrojmi napätia	14
Obrázok 11 Otáčky model 400V s ideálnymi zdrojmi napätia	15
Obrázok 12 Riadenie model 400V s ideálnymi IGBT	16
Obrázok 13 Model 400V s ideálnymi IGBT.....	17
Obrázok 14 Otáčky model 400V s ideálnymi IGBT.....	18
Obrázok 15 Model 400V s reálnymi IGBT	19
Obrázok 16 Model 400V detail IGBT.....	20
Obrázok 17 Otáčky model 400V s reálnymi IGBT	20
Obrázok 18 Momentová charakteristika motora N5-1200-100-560a-water-cooling [3]	23
Obrázok 19 Otáčky model 600V s ideálnymi zdrojmi napätia	24
Obrázok 20 Model 600V s ideálnymi IGBT.....	25
Obrázok 21 Otáčky model 600V s ideálnymi IGBT.....	26
Obrázok 22 Otáčky model 600V s reálnymi IGBT	26
Obrázok 23 Model 400V s reálnymi IGBT	27
Obrázok 24 Priebeh prúdov model 600V s reálnymi IGBT.....	28
Obrázok 25 Priebeh prúdov model 600V s reálnymi IGBT detail.....	28
Obrázok 26 Priebeh prúdov model 600V s reálnymi IGBT pri 10% nabití batérie.....	29
Obrázok 27 Schéma modulu	30
Obrázok 28 Schéma meniča.....	30
Obrázok 29 Schéma celkového meniča	31
Obrázok 30 SK200TMLI12F4TE2 [8]	32
Obrázok 31 Schéma SK200TMLI12F4TE2 [8].....	32
Obrázok 32 SKYPER 32 PRO R [10].....	33
Obrázok 33 Zapojenie Dynamic Short Circuit Protection [12]	33
Obrázok 34 Zapojenie Gate resistor [12]	34
Obrázok 35 Schéma vybíjajúceho odporu	36
Obrázok 36 Schéma merania napätia	37
Obrázok 37 Výstup z MAX6691MUB [13]	38
Obrázok 38 STM32CubeMX	39
Obrázok 39 Altium PCB Designer [15].....	40
Obrázok 40 Schéma strana 1	41
Obrázok 41 Schéma strana 2	42
Obrázok 42 Schéma strana 3	43
Obrázok 43 Schéma strana 4	44

Obrázok 44 Schéma strana 5	45
Obrázok 45 Schéma strana 6	46
Obrázok 46 Schéma strana 7	47

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1 Parametre akumulátora [4].....	5
Tabuľka 2 Parametre motora M4-0470-90-380a-h [3].....	6
Tabuľka 3 Parametre motora N5-1600-100-380a-h [3].....	7
Tabuľka 4 Parametre akumulátora pre sezónu 2019	21
Tabuľka 5 Parametre motora N5-1200-100-560a-water-cooling [3].....	22

