

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole

Návrh systému aktivního přítlaku pro elektrickou formuli

David Poborský

Vedoucí práce: Ing. Vít Hlinovský, CSc.
Studijní program: Elektronika a komunikace
Květen 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Poborský**

Jméno: **David**

Osobní číslo: **510859**

Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**

Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**

Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh systému aktivního přitlaku pro elektrickou formuli

Název bakalářské práce anglicky:

Design of Active Downforce System for an Electric Formula

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popište principy aktivního přitlaku, vysvětlete, proč je tato metoda výhodná, uveďte příklady v minulosti využívaných systémů pro aktivní aerodynamiku.
- 2) Navrhněte řídicí elektroniku pro bateriový napájecí systém aktivního přitlaku.
- 3) Vyberte vhodnou výkonovou elektroniku a ventilační jednotku pro odvádění vzduchu s cílem generování přitlaku.
- 4) Berte při návrhu ohled na pravidla soutěže Formula student.
- 5) Navrhněte metody pro validaci návrhu a kvantifikaci přínosu aktivního aero systému.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ROSEN, M. et al. Battery Technology: From Fundamentals to Thermal Behavior and Management. 1. vyd. Academic Pr Inc, 2023. ISBN: 9780443188626.
- [2] FRANK, B. Fan Handbook: Selection, Application, and Design. Irwin, 1997. ISBN: 9780070059337.
- [3] KATZ, Josef. Race Car Aerodynamics. Robert Bentley Inc., 1996. ISBN:9780837601427.
- [4] Formula Student Germany. Formula Student Rules 2024. [online]. Version 1.1. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **24.01.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

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

_____ podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé práce panu Ing. Vítu Hlinovskému CSc. za vedení mé práce a všechny jeho hodnotné rady. Dále bych chtěl poděkovat svým přátelům z týmu eForce za skvělé zážitky i jejich nadšení pro techniku a pro hledání co nejlepších technických řešení. Nakonec chci poděkovat své rodině za vytrvalou podporu během celého mého studia.

Prohlášení

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. 5. 2024

David Poborský

Abstrakt

Tématem bakalářské práce je návrh systému pro aktivní přítlak. V kontextu této práce je jako aktivní přítlak bráno využití výkonových ventilátorů pro generování přítlaku, který závodnímu vozidlu umožňuje rychlejší průjezd zatáčkou. V práci je popsána potřebná teorie pro správný návrh, dále pak základní technické rozhodnutí o tom, jak bude systém napájen. Od toho se odvíjí návrh a výběr veškeré potřebné elektroniky. V závěrečné kapitole jsou navrženy metody pro kvantifikaci přínosu systému aktivního přítlaku pro vozidlo navržené pro soutěž Formula student.

Klíčová slova: Aktivní přítlak, řídicí elektronika baterie, výkonové ventilátory, dynamické vlastnosti vozidla, Formula student

Vedoucí práce: Ing. Vít Hlinovský, CSc.

Abstract

The topic of this bachelor thesis is the design of an ground effect powered system. In this context ground effect powered system means the use of power fans for generating downforce to allow the race car to corner faster. The thesis describes the necessary theory for a proper design, then the basic technical decision on how the system will be powered. This is the ground stone for the whole desing of all of the necessary electronics. The final chapter proposes methods for quantifying the benefits of the active downforce system for the vehicle designed for the Formula Student competition.

Keywords: Ground effect powered system, battery controll electronics, high power fans, vehicle dynamic properties, Formula student

Title translation: Design of active downforce for an electric formula

Obsah

Seznam zkratk	1	6 Řídící elektronika baterie	27
1 Úvod	3	6.1 Požadavky na návrh dle pravidel Formula student	27
2 Principy aktivního přitlaku	5	6.2 Blokové schéma řídicí elektroniky	27
2.1 Přízemní efekt	5	6.2.1 Použité komunikační protokoly	28
2.1.1 Vliv přitlaku na dynamiku vozidla	6	6.3 Battery management system (BMS)	29
2.1.2 Výkonové ventilátory pro zvýšení přitlaku	7	6.3.1 Měření teplot	30
2.2 Historie	7	6.4 Accumulator management system (AMS)	30
2.3 Současnost	9	6.4.1 Měření proudu	30
2.4 Formula student	9	6.4.2 Měření napětí	31
2.4.1 Výhodnost aktivního přitlaku pro Formula student	11	6.4.3 Regulace ventilátorů	32
2.4.2 Vlastní návrh	12	6.5 Připojení a odpojení baterie	33
2.4.3 Nastavení rozvážení vozidla .	12	6.5.1 Spínání baterie přes relé	33
3 Přehled návrhu elektroniky	15	6.5.2 Přednabíjení kapacit měničů	34
3.1 Možnosti napájení	15	6.5.3 Vybíjení kapacit měničů	35
3.1.1 DC - DC měnič	15	7 Validace přínosu aktivního přitlaku	37
3.1.2 Napájení z baterie	16	7.1 Problematika testování	37
3.2 Výběr ventilátoru	16	7.2 Navrhované metody	38
3.2.1 Axiální ventilátory	16	8 Závěr	39
3.2.2 Centrifugální ventilátory	16	Bibliografie	41
3.2.3 Požadavky na ventilátor	17	A Schéma zapojení a vizualizace měřicí desky BMS	44
3.3 Požadavky na výkon	19	B Schéma zapojení a vizualizace BMS	51
3.4 Výběr měniče pro zvolený ventilátor	19	C Schéma zapojení a vizualizace hlavní desky AMS	61
3.5 Blokové schéma navrhovaného systému	20		
4 Návrh baterie	21		
4.1 Parametry bateriových článků ..	21		
4.1.1 Rychlost nabíjení a vybíjení .	21		
4.1.2 Napětí	21		
4.1.3 Kapacita	22		
4.1.4 Vnitřní odpor	23		
4.2 Skládání bateriových článků do baterií	23		
4.2.1 Skládání článků do série	23		
4.2.2 Skládání článků paralelně ...	23		
4.2.3 Skládání článků sério-paralelně	24		
5 Výběr bateriových článků a elektrické konfigurace	25		
5.1 Výběr článku	25		
5.2 Parametry zvolené konfigurace .	26		

Obrázky

2.1 Ilustrace možností vedení vzduchu pod podlahou vozidla [20]	6
2.2 Obrázek vozidla Chaparral 2J [24]	8
2.3 Obrázek vozidla Brabham-Alfa BT46B [7]	8
2.4 Obrázek vozidla McMurty Spéirling [28]	9
2.5 Obrázek formulí z ČVUT postavených pro rok 2023	11
2.6 Jeden z výsledků simulace proudění kolem formule	12
3.1 Obrázky ukazující vliv směru otáčeni na laterální síly vozidla	19
3.2 Blokové schéma systému	20
4.1 Náhradní model bateriového článku s vnitřním odporem	23
6.1 Blokové schéma řídicí elektroniky	28
6.2 Přepínání bitových rychlostí u CAN FD	28
6.3 Zapojení diferenciálního operačního zesilovače pro měření proudu	31
6.4 Zapojení napěťového děliče s dolní propustí pro měření napětí	31
6.5 Možné řešení spínání baterie pouze tranzistory	34
6.6 Průběh napětí na kondenzátorech při přednabíjení baterie	35
6.7 Zapojení relé pro přednabíjení a vybíjení kondenzátorů	36

Tabulky

3.1 Tabulka vybíraných ventilátorů .	18
3.2 Tabulka vybíraných měničů	20
5.1 Tabulka vybíraných článků	25
6.1 Tabulka vybíraných relé	33



Seznam zkratek

Zkratka	Význam
ADC	analog digital converter, převodník mezi změřenou analogovou hodnotou a digitální reprezentací naměřené hodnoty
AMS	accumulator management system, řídicí jednotka kontrolující stav baterie
BMS	battery management system, řídicí jednotka kontrolující jednotlivé bateriové segmenty
CAN	controller area network, dvou vodičový diferenciální komunikací protokol, odolný proti chybám a rušení
CAN FD	controller area network flexible data rate, novější definice protokolu, umožňující vyšší rychlosti přenosu dat
CCW	counter clockwise, směr otáčení proti směru hodinových ručiček
CW	clockwise, směr otáčení po směru hodinových ručiček
EDF	electric ducted fan, axiální ventilátor s tunelem sloužícím k vedení vzduchu a rozbíjení turbulentního proudění
NTC	negative temperature coefficient, polovodič s negativním teplotním koeficientem, který se používá ke snímání teploty
PMSM	permanent magnet synchronous motor, motory s permanentními magnety osazenými na rotoru a vinutími na statoru
PWM	pulse width modulation, pulzně šířková modulace
UART	universal asynchronous receiver / transmitter, jednoduchý dvou vodičový komunikační protokol pro sériový přenos dat

Poznámka: Popisy obrázků jsou uváděny v angličtině proto, že budou využívány k prezentacím v rámci soutěže Formula student.

Kapitola 1

Úvod

Systém pro aktivní přítlak je v této práci definován jako systém, využívající výkonových ventilátorů k úpravě proudění kolem vozidla tak, aby toto proudění vytvářelo přítlak. Na rozdíl od pasivního přítlaku, který je generován pouze aerodynamickými vlastnostmi vozidla, a který tudíž nemůže být v reálném čase přizpůsobován podmínkám jízdy, využívá aktivní přítlak pro úpravu proudění vzduchu kolem vozidla ventilátorů s řízeným výkonem. Vyšší přítlak umožňuje vozidlu projíždět zatáčky ve větší rychlosti, aniž by vozidlo vyjíždělo z trati. Vyšší rychlost průjezdu zatáčky pak zpravidla znamená rychlejší časy na kolo. Výjimkou mohou být vozidla, která dosahují velmi vysokých rychlostí na rovných úsecích trati. Čas získaný rychlejším průjezdem zatáčkou u těchto vozidel nedorovná čas ztracený na rovince, který je způsoben vyšším aerodynamickým odporem.

První kapitoly práce se budou věnovat teoretickým základům potřebným pro porozumění tomu, jak má tento systém fungovat a proč je využití aktivního přítlaku výhodné pro vozidla soutěžící v inženýrské soutěži Formula student.

V následujících částech bude popsáno, jaké vlastnosti bude systém mít a budou vybírány vhodné komponenty tak, aby měl systém skutečně požadované vlastnosti. Důležité bude rozhodnout, jak bude možné systém pro aktivní přítlak napájet, aby systém vyhověl pravidlům soutěže. Další kapitoly nastíní, jak bude celý systém aktivního přítlaku navržen.

V závěru práce bude popsáno, jak by mohl být přínos systému validován, aby studentský tým eForce z Českého vysokého učení technického, jehož členem je i autor práce, mohl zhodnotit, zda je pro jejich monopost výhodné systém pro aktivní přítlak využívat.

Kapitola 2

Principy aktivního přitlaku

Pod pojmem aktivní přitlak se mohou skrývat hlavně dva různé přístupy. Prvním z nich je využívání nastavitelných křídel pro snížení aerodynamického odporu v situacích, kdy přitlak není potřeba. Druhým, kterým se bude zabývat zbytek této práce, je využívání výkonových ventilátorů za účelem vytvoření podtlaku pod podlahou auta a tím zvýšení přitlaku vozidla [16].

2.1 Přízemní efekt

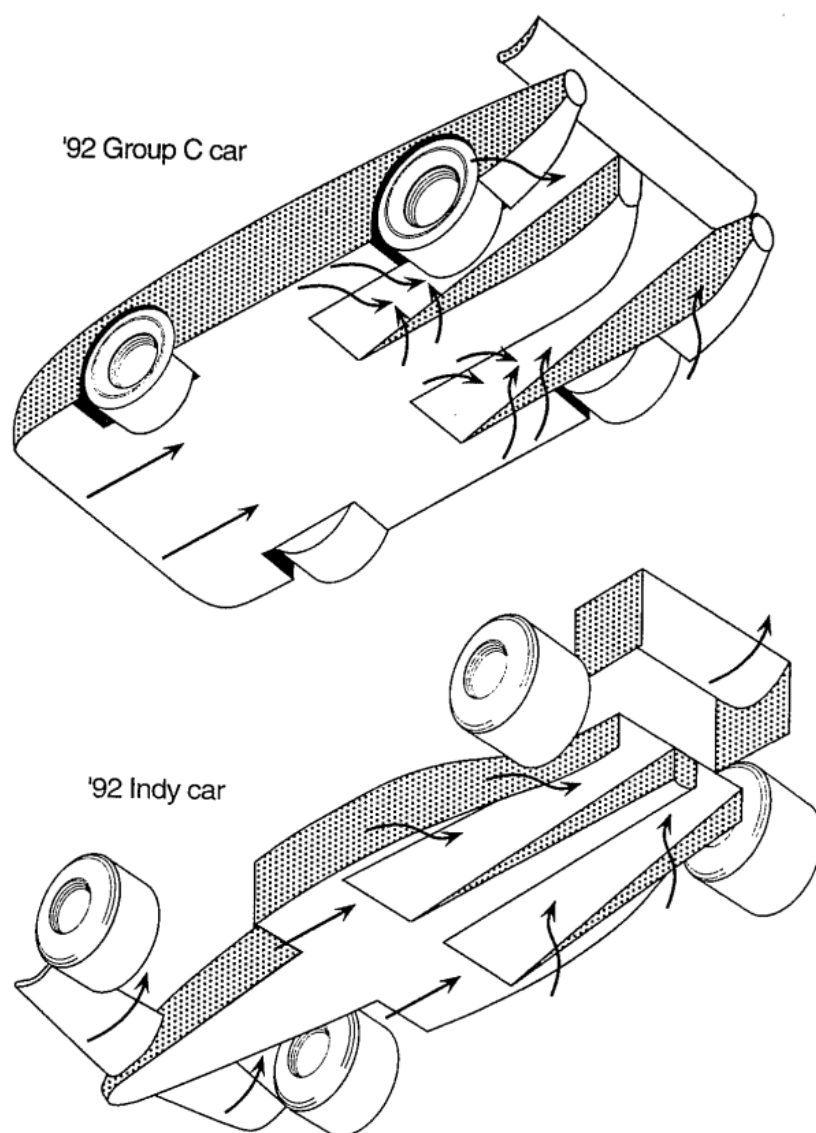
Přízemní efekt v aerodynamice popisuje jev, kdy dojde k prudkému zvýšení vztlaku nebo v případě závodních vozů přitlaku, ke kterému dochází, když se aerodynamický kryt nebo vozidlo nachází blízko země. U závodních vozů se přízemní efekt využívá ke zlepšení časů na kolo tím, že zvyšuje přilnavost vozu k trati díky zvýšenému přitlaku, aniž by se výrazně zvýšil aerodynamický odpor. Tento princip funguje především na spodní části vozu, konstrukce podvozku pak při pohybu vozidla vysokou rychlostí vytvoří pod vozem oblast s nízkým tlakem [19].

Kouzlo přízemního efektu začíná ve chvíli, kdy je vzduch pod vozem veden přes pečlivě navržené kanály, ventilační otvory nebo prahy, které utěšňují boky vozu k zemi. Tyto prvky zrychlují proudění vzduchu pod vozidlem a snižují jeho tlak. Podle Bernoulliho principu platí 2.1, že čím rychleji se vzduch pohybuje, tím nižší je jeho tlak. Vzniká tak sací efekt, který přitahuje vůz k zemi [19].

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p + \rho u(x) = konst. \quad (2.1)$$

V rovnici je ρ hustota tekutiny, v rychlost proudění, p je tlak v tekutině a u značí potenciál vnějšího pole objemové síly. Toto pole je konzervativní, spadají do něj unášivé setrvačné síly, gravitační síly a další síly v daném bodě [1].

Tvar a provedení prvků pro zrychlení proudění pod vozidlem se může lišit, v principu však mají společné rysy. Vzduch je pod vozidlo vháněn na předku vozidla. Pod středem vozidla, kde je žádoucí mít přitlak co nejvyšší, je podlaha vozidla umístěna co možná nejbližší k zemi a v zadní části znovu stoupá, aby za vozidlem nevznikalo turbulentní proudění vzduchu [19].



Obrázek 2.1: Ilustrace možností vedení vzduchu pod podlahou vozidla [20]

Jednou z hlavních výhod přízemního efektu je, že zvýšeného přitlaku dosahuje efektivně, což znamená, že nezvyšuje aerodynamický odpor tolik jako jiné metody, například velká zadní křídla. Tato účinnost je klíčová při závodech, kde je rovnováha mezi přitlakem v zatáčkách a minimálním odporem pro rychlost v přímém směru velmi citlivá [19].

■ 2.1.1 Vliv přitlaku na dynamiku vozidla

Zvýšení přitlaku zvyšuje vertikální sílu působící na kola, což zvyšuje jejich přilnavost k závodní trati. To umožňuje vyšší rychlosti při průjezdu v zatáčkách, protože pneumatiky tak mohou lépe čelit laterálním silám, které se vytlačují

vozdilo ven ze zatáčky a tím i ze závodní tratě. Zvýšením přítlaku se také závodní vozidlo chová více prediktivně, což znamená, že dokáže lépe reagovat na pokyny pilota ke změnám směru jízdy. Tento zvýšený komfort z jízdnicích vlastností vozidla má také nezanedbatelný vliv na výkonnost vozidla, protože lidský faktor silně ovlivňuje to, kolik potenciálu vozidla je využíváno. Díky zvýšenému přítlaku dokáže závodní vozidlo efektivněji využívat brzdy. To vede k lepší bezpečnosti, protože zkracuje brzdné dráhy a umožňuje tak vyhnout se kolizím, ke kterým by s delší brzdou dráhou mohlo dojít. Dále zrychluje časy na kolo, protože dovoluje pilotům před zatáčkou začít brzdit až později a tím jet déle v plné rychlosti [19].

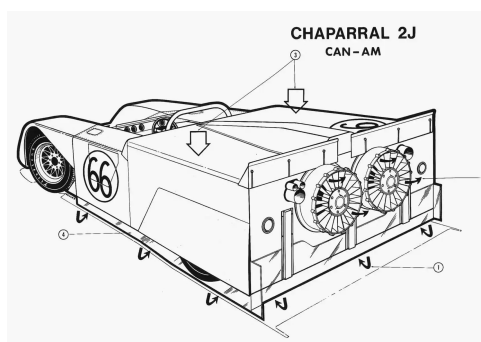
■ 2.1.2 Výkonové ventilátory pro zvýšení přítlaku

Využití výkonových ventilátorů pro generování přítlaku díky přízemnímu efektu není nový koncept, jde o metodu, která už v minulosti s různou mírou úspěchu a kontroverze byla používána ve více motorsportových kategoriích. Aktivním odváděním vzduchu od podlahy vozidla vzniká pod vozidlem ještě rychlejší proudění, které generuje velký podtlak, větší tlak nad vozidlem ho pak silně přitlačí k zemi. Mezi výhody tohoto přístupu patří i to, že na rozdíl od křidel pro generování přítlaku, aktivně vytvořený přítlak je nezávislý na rychlosti. Dokáže tak pomáhat i při jízdě v nízkých rychlostech, kdy jsou běžně používaná křídla sloužící ke generování přítlaku výrazně méně efektivní, protože jimi generovaný přítlak je úměrný aerodynamickému odporu a podle rovnice 2.2 aerodynamický odpor stoupá s mocninou rychlosti [16, 19].

S generováním přítlaku tímto způsobem však přicházejí také rizika. Mezi hlavní rizika této metody patří náhlá ztráta přítlaku například při najetí na nerovnost na trati, nebo při náhlém vypnutí aktivního odvádění vzduchu. Ztráta přítlaku by v případě najetí na nerovnost byla způsobena zvýšením podvozku, což by vedlo k vniku vzduchu do prostoru pod autem, tím pádem ke ztrátě podtlaku a k prudké ztrátě přítlaku [16].

■ 2.2 Historie

První pokusy o využití aktivního vytváření přítlaku na závodních autech pocházejí z roku 1961, kdy americký konstruktér Jim Hall začal s myšlenkou aktivního přítlaku experimentovat. Zpočátku se však nedařilo dosáhnout požadovaného efektu. To se mu podařilo až v roce 1970 s prototypem Chaparral 2J. Ten obsahoval dva ventilátory na zadní straně vozidla, které byly poháněny samostatným dvoutaktním motorem. Efektivita celého systému byla dále znásobena využitím oddělovačů, které rychle proudící vzduch pod podvozkem auta oddělovaly od vzduchu kolem vozidla. i přes to, že Chaparral 2J nikdy nevyhrál žádný závod závodní série Can-Am, ve které soutěžil, byly kvůli tomuto vozidlu změněny technické regulace soutěže, které nově zakázaly využívání přízemního efektu a využívání výkonových ventilátorů k manipulaci proudění vzduchu kolem vozidla [24].



Obrázek 2.2: Obrázek vozidla Chaparral 2J [24]

Další závodní vozidlo, které aktivně využívalo výhod aktivního odvodu vzduchu kolem podvozku, byla Formule 1 Brabham-Alfa BT46B. Tato formule využívala jednoho velkého ventilátoru přímo připojeného na převodku motoru. Ventilátor byl tak účinný, že bylo možné vidět, jak se vůz při roztáčení motoru s vyřazenou rychlostí v boxech náhle přisaje k zemi. Proti jeho legalitě bylo brzy protestováno, ale závodit na jeho prvním závodě na velké ceně Švédska mu bylo povoleno, hlavně z důvodu, že konstruktéři vozidla kontrolory legality formule přesvědčili, že ventilátor slouží výhradně k chlazení motoru. Niki Lauda a John Watson, v té době piloti za Brabham-Alfa, se kvalifikovali na 2. a 3. místě. Poté co ale vítěz kvalifikace musel odstoupit kvůli technickým komplikacím, byly už na startu obě BT46B v čele závodu, ze kterého se ani na okamžik nevzdálily. Přínos přidaného přtlaku byl pak nejvíce vidět poté, co se na trať dostal olej z jedné z ostatních formulí. Zatímco ostatní piloti museli na kluzké části tratě výrazně zpomalovat, zvýšený přtlak formulí Brabham-Alfa BT46B jim umožnil místo projíždět v plné rychlosti [7, 16].



Obrázek 2.3: Obrázek vozidla Brabham-Alfa BT46B [7]

Přestože byl vůz Brabham-Alfa BT46B prohlášen za legální, Bernie Ecclestone (manažer týmu/majitel Brabhamu) se rozhodl, že je lepší obětovat krátkodobou výhodu formule s ventilátory, než ohrozit Asociaci konstruktérů Formule 1 (FOCA), jejímž byl prezidentem. Tento revoluční koncept tak závodil pouze jednou [7].

2.3 Současnost

I přes obecné regulace, zakazující využití aktivního přitlaku ve většině motorsportových soutěží, stále existují soutěže, které se vydaly úplně jiným směrem a mají regulace pouze bezpečnostní. Tyto soutěže poté dovolují konstruktérům vozidel experimentovat s novými technickými řešeními a přijít se skutečně inovativním technologickým řešením [30].

Jedeno z těchto závodních vozidel je i McMurtry Spéirling, který vznikl primárně jako důkaz konceptu. Hlavní myšlenkou tohoto vozidla je vyrobit malé vozidlo s nízkou hmotností a velmi dobrými dynamickými vlastnostmi [30].



Obrázek 2.4: Obrázek vozidla McMurtry Spéirling [28]

Ty jsou dosaženy využitím dvou výkonových ventilátorů, plně zakomponovaných do středu šasi vozidla. Přestože oficiální technické parametry nejsou pro vozidlo McMurtry Spéirling známé, odhaduje se, že aktivní odvádění vzduchu v tomto vozidle dokáže při nulové rychlosti generovat až přibližně 20 000 N přitlaku [30].

Toto vozidlo momentálně drží světový rekord na trati Goodwill uphill racing, což je jeden z nejznámějších a nejprestižnějších závodů, který nepodléhá žádným technickým regulacím kromě bezpečnostních omezení. Z historie, ale i na tomto současném příkladě je tak jasně vidět, že správně navržený systém aktivního přitlaku dokáže hodně dodat výkonnosti vozidla [30].

2.4 Formula student

Formula student je mezinárodní inženýrská soutěž, ve které týmy, které se musí skládat pouze z vysokoškolských studentů, staví formule a soutěží s nimi



Obrázek 2.5: Obrázek formulí z ČVUT postavených pro rok 2023

■ 2.4.1 Výhodnost aktivního přitlaku pro Formula student

Jak již bylo zmíněno, jedním z hlavních záměrů pravidel, ale vlastně všech organizačních záležitostí Formula student, je zajistit soutěži co nejvyšší možnou míru bezpečnosti. Toho soutěž dosahuje i tak, že výběrem trati striktně omezuje maximální rychlosti, kterých vozidla dosahují.

To znamená, že typická trať pro Formula student závody je úzká trať s krátkými rovinkami a mnoha pomalými zatáčkami. V těchto podmínkách je kladen velmi vysoký nárok jak na dovednosti pilota, tak i na přitlak, který dokáže vozidlo vygenerovat. Protože aerodynamický odpor stoupá s mocninou rychlosti 2.2 a protože vozidla Formula student se nepohybují ve vysokých rychlostech, je běžnou praxí týmů soutěže se účastnících maximalizovat přitlak i na úkor zvýšení aerodynamického odporu vozidla, protože podle jejich výpočtů popřípadě simulací vychází pro celkovou rychlost projetí kolem výhodnější maximalizovat rychlost průjezdu zatáčkou [19, 8].

$$F_d = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d A \quad (2.2)$$

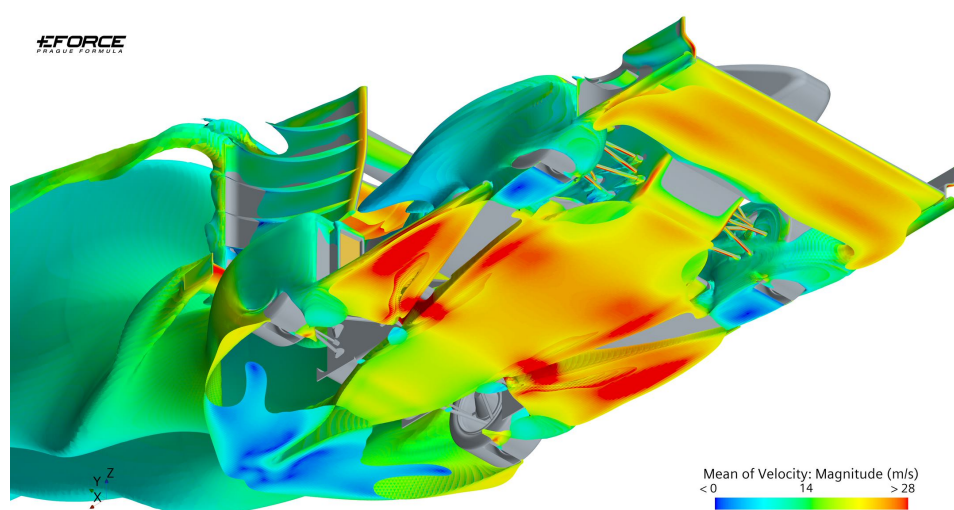
F_d značí sílu, která bude působit proti vozidlu působením proudění vzduchu kolem vozidla, ρ je hustota tekutiny, v popisuje rychlost pohybu vztaženou k rychlosti proudění tekutiny, C_d popisuje koeficient aerodynamického odporu a A značí plochu pohybujícího se objektu.

Další výhodou pro Formula student je to, že na rozdíl od většiny ostatních motorsportových soutěží Formula student nijak neomezuje využitelnost aktivního přitlaku nebo například nastavitelné tuhosti podvozku, což jsou v jejich soutěžích zakázané technologie [9].

2.4.2 Vlastní návrh

Vlastní interpretace byla silně založená na simulacích proudění, jejichž samotné nastavení a validace by byly na celou samostatnou práci. Pro kontext této práce je tak pouze nastíněno, jak se tento inženýrský problém z hlediska proudění řešil.

Simulace jsou zvoleny, protože návrháři dovolují pomocí numerických řešení rovnic proudění jasně vidět, kolik přitlaku navržené aerodynamické prvky vygenerují. Pro optimální funkci systému je nutné s vlivem systému pro aktivní přitlak počítat i při návrhu ostatních aerodynamických vlastností vozidla. Výsledky simulací, které často zaberou dlouhé hodiny, jsou poté využity k úpravám aerodynamických prvků, které jsou znovu simulovány.



Obrázek 2.6: Jeden z výsledků simulace proudění kolem formule

2.4.3 Nastavení rozvážení vozidla

Vyvážení závodního vozidla je klíčovým faktorem pro dosažení optimálního výkonu a ovladatelnosti na závodní dráze. Zahrnuje jak hmotnostní rozvážení, tak rozvážení přitlaku, a každý aspekt má zásadní vliv na to, jak se auto chová v různých fázích jízdy - od brždění, přes zatáčení, až po akceleraci [19, 37].

Při návrhu vozidla je potřeba s oběma těmito vlivy počítat, aby bylo možné dosáhnout optimálního chování vozidla v dynamických disciplínách. Pokud při návrhu vychází vozidlo z jednoho aspektu nevyvážené, je možné tuto nevyváženost kompenzovat v druhém, avšak jen do omezené míry [19, 37].

Hmotnostní rozvážení

Hmotnostní rozvážení ovlivňuje distribuci hmotnosti vozidla mezi přední a zadní nápravu. Ideálně by mělo být auto vyvážené, což znamená, že hmotnost

je rozložena přibližně rovnoměrně mezi obě nápravy, což se obvykle pohybuje okolo poměru 50:50. Toto rozvážení může být upraveno posunem těžkých komponentů [19, 37].

Pokud je přední náprava více zatížená, pak má zpravidla vozidlo lepší brzdné vlastnosti, ale zároveň bývá nedotáčivé, to znamená, že má vozidlo sklon ve vysokorychlostních zatáčkách pokračovat v jízdě v přímém směru a pro průjezd zatáčkou je tak nutné více brzdit [19, 37].

Pokud je více zatížená zadní náprava, pak má zpravidla vozidlo lepší vlastnosti při akceleraci, avšak způsobuje přetáčivost, to znamená, že zadní náprava vozidla mívá sklon jít do smyku [19, 37].

■ Rozvážení přítlaku

Rozvážení přítlaku se týká distribuce síly, kterou aerodynamické prvky (křídla, difuzory, atd.) aplikují na vozidlo. Cílem je dosáhnout rovnováhy, která maximalizuje přilnavost na obě nápravy bez přetížení jedné strany vozidla [19, 37].

Vyvážený přítlak znamená, že přední a zadní aerodynamické prvky jsou nastaveny tak, aby generovaly podobné množství přítlaku, což vede k stabilnímu chování v zatáčkách. Přední přítlak obvykle kompenzuje nedotáčivost vozidla tím, že zvýší přilnavost předních kol. Tím se však snižuje efektivita zadních kol a to snižuje stabilitu vozidla ve vysokých rychlostech. Zadní přítlak zlepšuje trakci a stabilizuje auto ve vysokých rychlostech, ale způsobuje nedostatek přilnavosti na přední nápravě, což obvykle vede k nedotáčivosti [19, 37].

Kapitola 3

Přehled návrhu elektroniky

Pro správný návrh elektronické části systému bylo velmi důležité nastínit si požadavky. Hlavní požadavek byl na maximální elektrický výkon, který by měl systém být schopný dodávat po dobu nejvýše 70 sekund. To je zhruba doba, kterou vozidlům Formula student maximálně trvá odjet disciplínu autocross, kde ze stojícího startu pilot musí projet jedno kolo zhruba kilometr dlouhé trati. Hodnotí se pak čas, ke kterému se přičítají penalizace za sražené kuželky. Dalším požadavkem bylo, aby bylo možné absolvovat všechna čtyři pravidly dovolená kola autocrossu, aniž by se muselo nabíjet. Maximální výkon byl následně stanověn podle maximálního dovoleného výkonu vybraných výkonových ventilátorů, viz kapitola 3.3.

3.1 Možnosti napájení

Protože pravidla soutěže výslovně zakazují používat ventilátory napájené z vysokého trakčního napětí, které je omezeno pravidly soutěže na maximálně 600 V, je nutné napájení systému pro aktivní přítlak napájet z nízkého napětí. Nízké napětí je pravidly omezeno na maximálně 60 V, což byl další omezující parametr pro výběr ventilátorů [9].

3.1.1 DC - DC měnič

První možností bylo napájet celý systém z trakční baterie, která dosahuje právě 600 V, a následně přes izolovaný DC - DC měnič napětí snížit na velikost použitelnou pro ventilátory.

Toto řešení se v týmu využívá pro napájení celého nízkonapěťového systému už více sezón. Pro zapnutí auta je pak nutné z malé baterie nebo bateriového článku dodat DC - DC měniči signál pro probuzení (wake up signal). Tento měnič je připojen na stranu trakční baterie, která je stále pod napětím. Měnič je zapnutý po celou dobu, kdy má na vstupu budícího signálu vysokou úroveň.

Toto řešení by bylo značně komplikované, hlavně kvůli výkonovým požadavkům, kterými se zabývá odst. 3.3. Kvůli těmto požadavkům by byl DC - DC měnič nejen dost složitý, ale navíc i těžký a objemný.

■ 3.2.3 Požadavky na ventilátor

Nejvýhodnější pro generování přítlaku ve chvíli, kdy není možné oblast pod vozidlem úplně zatěsnit, je využít přízemního efektu, který je popsán v odst. 2.1, podle Bernoulliho principu urychlit proudění kolem podvozku a vytvořit tím podtlak [19].

Z tohoto důvodu se při dalším návrhu uvažovalo pouze o axiálních ventilátorech. Hlavním parametrem pro výběr se tak stala rychlost proudění, účinnost a složitost zástavby.

V případě, že by podmínky závodiště a také pravidel soutěže Formula student dovolovaly mít prostor pod vozidlem dokonale zatěsněný, bylo by vhodnější využití centrifugálního ventilátoru a vytváření statického podtlaku pod autem [9].

■ Výběr axiálního ventilátoru

Vzhledem k požadavkům na vlastnosti ventilátoru se uvažovalo pouze o ventilátorech s vysokými rychlostmi proudění vzduchu, aby tak bylo možné dosáhnout požadovaného proudění kolem podvozku vozidla a tím dostatečného dodaného přítlaku.

Z širokého průzkumu trhu vycházely nejlépe ventilátory určené pro modelářská letadla. Ty jsou určené pro napájení z baterie a parametry se tak velmi blíží požadavkům této aplikace, hlavně nutnosti napájet ventilátor z maximálně 60 V pro dodržení pravidel, jak již bylo zmíněno v sekci 3.1.

Ventilátory, nejlépe vyhovující požadavkům, jsou EDF ventilátory (electric ducted fan, elektrický ventilátor s dutým válcem sloužícím k vedení vzduchu). Hlavní konstrukční výhodou EDF ventilátorů je využití dutého válce, kterým je hnán vzduch o vysoké rychlosti. To umožňuje vyšší účinnost ventilátoru při vysoké rychlosti proudění vzduchu [2].

Po průzkumu trhu se uvažovalo hlavně o těchto ventilátorech:

EDF	Tah [N]	Rychlost výfuku [m/s]	hmotnost [g]	DC proud [A]	DC napětí [V]	Směr rotace	cena [eur]
A [12]	95.00	95.0	1165	142	50.4	CW & CWW	566
B [33]	90.50	-	710	142	50.4	CWW	503
C [32]	88.20	-	865	115	51.8	CWW	630
D [31]	76.58	-	735	100	49.8	CWW	557

[12, 33, 32, 31]

Tabulka 3.1: Tabulka vybíraných ventilátorů

- A - Schubeler DS-86-AXI HDS® (120 mm) + Tenshock X-501/5,5Y
- B - EDF JP Hobby 120mm + 12s Motor 760KV
- C - EDF Hacker Stream-Fan 120 + 12s Motor 600KV
- D - EDF VASAFAN 120mm Carbon 14 blades + Moteur HET 800-73-590KV

Z těchto možností ventilátorů byl vybrán model A. Hlavní motivací pro výběr tohoto ventilátoru bylo, že měl oproti ostatním možnostem nejvyšší tah a jako jediný garantoval rychlost proudění vzduchu. Dalším silným motivačním faktorem pro výběr tohoto modelu byl fakt, že ventilátor podporuje jak konstrukci se směrem otáčení podle hodinových ručiček (CW), tak proti směru hodinových ručiček (CCW). To je obzvláště výhodné, protože použití ventilátorů s protichůdným směrem otáčení odečte laterální síly, které by jinak na vozidlo působily.



Obrázek 3.1: Obrázky ukazující vliv směru otáčení na laterální síly vozidla

3.3 Požadavky na výkon

Dvojice zvolených ventilátorů bude mít tedy maximální příkon podle vzorce

$$P_{max} = 2I_{max}U_{max} = 14\,313\text{ W} \quad (3.1)$$

P_{max} je maximální dodávaný příkon do systému, I_{max} je maximální proud, na který jsou ventilátory navrženy, U_{max} je maximální stejnosměrné napětí, které je možné dodávat měničům.

Pro systém je tak důležité navrhnout řešení, které dokáže takové množství energie dodávat, aby bylo možné ventilátory používat až na maximální výkon.

3.4 Výběr měniče pro zvolený ventilátor

Motory používané v EDF ventilátorech jsou svou konstrukcí PMSM (motory s permanentními magnety osazenými na rotoru a vinutími na statoru). Tento typ elektromotorů je třeba řídit frekvenčním měničem, který ze stejnosměrného napětí generuje třífázový proud pro ventilátory a změnou frekvence se mění rychlost otáčení. V situaci, kdy už k vybranému ventilátoru existuje výrobcem ventilátoru doporučený měnič, je pro co nejsnazší implementaci vhodné tohoto měniče využít. To je i situace s ventilátory od firmy Schubeler, které mají doporučené měniče od firmy Young generation electronics. Bylo rozhodnuto vybrat výkonově odpovídající měnič této firmy [13].

Výkonové měniče této firmy se řadí do dvou kategorií, chlazené vzduchem a chlazené vodou. Na základě mechanických požadavků vznesených od konstrukce vozu byla vybrána verze s chlazením vodou. z produktů výrobce těmto požadavkům vyhovovaly dva různé modely [10].

Model	$I_m [A]$	$I_c [A]$	$U_m [V]$	$m [g]$
YGE 205HVT Navy	205	270	51,8	296
YGE Opto 255 Navy	255	400	59,2	365

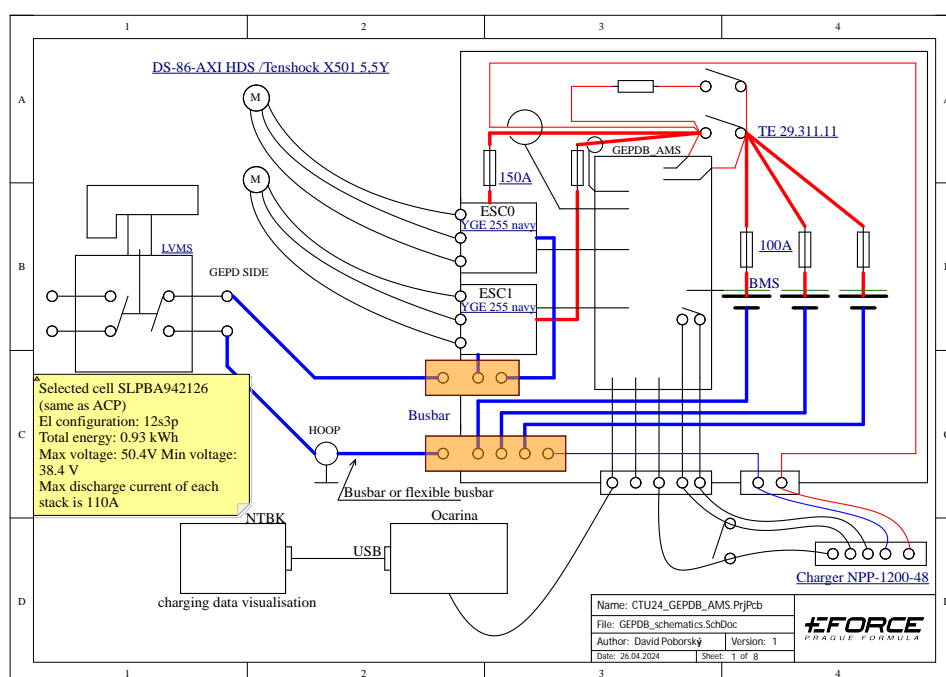
[10]

Tabulka 3.2: Tabulka vybíraných měničů

Tabulka obsahuje modely jednotlivých měničů, maximální stenosměrný proud I_m , kontinuální stejnosměrný proud I_c , maximální napětí U_m a hmotnost m . Pro tuto aplikaci byly zvoleny měniče YGE Opto 255 Navy, protože po poradě s výrobcem bylo doporučeno, zvolit raději měnič s vyššími maximálními hodnotami proudů i napětí, kvůli delší životnosti a nižšímu přetěžování měniče i komponent.

3.5 Blokové schéma navrhovaného systému

z popsaných součástí je pak možné navrhnout blokové schéma celého systému. Hlavními komponenty jsou bateriové články, řídicí elektronika k baterii popsaná v kapitole 6, výkonové ventilátory a zvolené měniče k vybraným ventilátorům.

**Obrázek 3.2:** Blokové schéma systému

Dále je v tomto blokovém schématu možné vidět rozvržení vodivých spojení pro napájení celého systému: hlavní relé, přes které poteče všechny stejnosměrný proud do měničů, vedlejší relé, sloužící k přednabíjení kapacit na měničích, rezistor limitující proud při nabíjení kapacit, viz 6.5.2. Dále pak nadproudové ochrany, měření proudu a napětí a další funkce.

Kapitola 4

Návrh baterie

4.1 Parametry bateriových článků

Parametry bateriových článků jsou technické informace udávané výrobcem, podle kterých je možné poznat, jak je daný bateriový článek vhodný pro určitou aplikaci. Pro správnou aplikaci těchto parametrů je nutné pozumět, jak se bateriové články zapojují do samotných baterií, jak bude popsáno zde v samostatné sekci 4.2.

4.1.1 Rychlost nabíjení a vybíjení

Rychlost nabíjení a vybíjení je parametrem baterií, který se zpravidla udává v poměrové jednotce C. Tato poměrová jednotka je vztažena ke kapacitě baterie a rychlosti, s jakou může být nabita nebo vybita. Této jednotce je možné rozumět jako poměrové jednotce určující čas, po který bude dostupný určitý proud. Pokud má například baterie kapacitu 2 Ah a maximální konstantní vybíjecí proud 1 C, bude jí možné vybit jednou hodinu proudem o velikosti 2 A [6, 29].

Maximální vybíjecí proud může být výrobcem udáván, nebo je na zákazníkovi, aby si ho dopočítal z jednoduchého vzorce:

$$I_m = CC_A \quad (4.1)$$

Jednotka C se obvykle udává vztažená k hodinám, proto i výsledný čas, po který je proud I_m dostupný, vyjde v hodinách. Kapacita baterie v Ah je ve vztahu udávána jako C_A , I_m je maximální vybíjecí proud [6].

4.1.2 Napětí

Napětí se u bateriových článků většinou udává ve třech parametrech. Tyto parametry jsou rozdílné pro takzvané primární, to znamená nenabíjitelné články a pro sekundární, to znamená nabíjitelné články. Pro velmi vysoké množství aplikací, včetně napájení systému pro aktivní přítlak, jsou primární články nevhodné, proto zde budou uvedeny parametry pouze pro sekundární články [34].

Jmenovité napětí

Jmenovité (nominální) napětí článku je hodnota, která je na článku napsaná. Většinou se tento parametr pohybuje blízko středu mezi maximálním nabíjecím a minimálním vybíjecím napětím [34].

Maximální a minimální nabíjecí napětí

Maximální nabíjecí napětí je maximální napětí, na které je možné článek nabít, aniž by došlo k poškození článku nebo dlouhodobému zhoršení jeho parametrů [34].

Minimální nabíjecí napětí je krajní hodnotou, na kterou je možné článek vybit, aniž by došlo k poškození článku podbitím [34].

4.1.3 Kapacita

Kapacita (obvykle udávaná v Ah) určuje, kolik energie bude v konkrétním článku uloženo. Z kapacity jsou poté přímo odvozené další, navazující jednotky. Mezi ně patří energetická hustota, do které se započítává kromě kapacity také nominální napětí a vztahuje se na hmotnost. Dále také objemová energetická hustota, pro kterou se bere v potaz velikost článku a jeho finální zástavba do baterie [34].

Energetická hustota

Energetická hustota je veličinou odvozenou, avšak o bateriovém článku umí velmi dobře vypovídat, protože pro širokou škálu aplikací baterií je hmotnost jedním z důležitých parametrů. Energetická hustota se dá vypočítat pomocí vzorce:

$$E_d = \frac{U_{nom} C_A}{m} \quad (4.2)$$

Kde E_d je energetická hustota (udávaná obvykle v Wh/kg), U_{nom} je nominální napětí, C_A je kapacita článku a m je hmotnost článku [34].

Objemová energetická hustota

Objemová energetická hustota popisuje koncentraci energie v objemu, tento parametr je velmi důležitý obzvláště u malých zařízení, kde velikost bateriového článku hraje významnou roli, protože baterie samotná tvoří velkou část objemu zařízení. Například u bezdrátových špuntových sluchátek. Energetická objemová hustota se dá vypočítat pomocí vzorce:

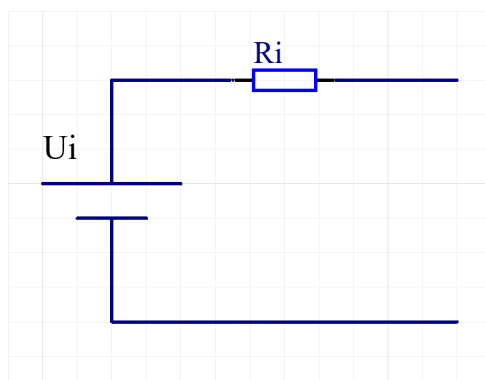
$$E_{vd} = \frac{U_{nom} C_A}{V} \quad (4.3)$$

Kde E_{vd} je objemová energetická hustota článku (udávaná obvykle v Wh/m³), U_{nom} je nominální napětí, C_A je kapacita článku a V je objem článku.

Jak energetickou hustotu, tak objemovou hustotu je možné vypočítat jak pro samotný bateriový článek, tak pro celou baterii [34].

4.1.4 Vnitřní odpor

Vnitřní odpor vyjadřuje, jak k jak velkému poklesu napětí článku dojde při odběru proudu. Tento pokles napětí spolu s velikostí vnitřního odporu určuje, kolik výkonu se na článku při dodávání proudu přemění na teplo. To je hlavně důležité pro rozhodnutí, zda bude baterii nutné chladit, případně zda bude tepelná kapacita baterie stačit k tomu, aby vytvořené teplo nezpůsobilo nárůst teploty mimo pracovní možnosti bateriových článků. Pro modelování baterie se obvykle používá náhradní schéma: [34]



Obrázek 4.1: Náhradní model bateriového článku s vnitřním odporem

4.2 Skládání bateriových článků do baterií

Výrobní proces baterie se skládá z výběru samotného článku a výběru sério-paralelního zapojení článků, podle kterého jsou nadefinovány finální parametry samotné baterie. Kvůli ostatním parametrům článků (vnitřní odpor, kapacita, chemické složení článku a teplotní vlastnosti) je nutné vždy skládat baterii ze stejných článků [34].

4.2.1 Skládání článků do série

Při skládání článku do série se sčítá jejich napětí, ale kapacita a maximální vybíjecí proud zůstávají stejné. Například při spojení dvou bateriových článků do série je výsledná baterie schopná dodávat stejný proud na dvojnásobném napětí, to znamená dvojnásobný výkon. Energie, uložená v baterii se také zdvojnásobí, protože můžeme počítat dvojnásobné napětí na stejnou kapacitu [34].

4.2.2 Skládání článků paralelně

Při skládání článků paralelně roste kapacita, ale napětí zůstává stejné. Spojením dvou článků paralelně tak vznikne baterie na stejném napětí jako samotný článek. Bude schopna dodávat dvojnásobný proud, takže bude znovu dvojnásobný výstupní výkon [34].

■ 4.2.3 Skládání článků sério-paralelně

Na skládání článků do sério-paralelních kombinací je nutné se dívat jako na skládání článků do série a zároveň jako na skládání článků paralelně. Velké množství současných baterií je složeno nějakou sério-paralelní kombinací, protože umožňuje návrháři baterie lépe pracovat s parametry baterie a navrhnout ji tak vhodněji pro svou aplikaci [34].

Kapitola 5

Výběr bateriových článků a elektrické konfigurace

Při výběru článku pro konkrétní aplikaci hraje roli mnoho faktorů a je důležité jim věnovat pozornost, aby bylo finální provedení co nejbližší požadovaným parametrům. Pro udržení objektivitu je ideální mít co nejdříve základ řešení a porovnávat tak co nejvíce jednotlivých modelů článků [34].

5.1 Výběr článku

Pro výběr článku bylo jednoduchým počítačovým programem zpracováno větší množství možných bateriových článků od více výrobců, které byly porovnány s cílem nalezení co nevhodnějšího článku pro potřeby této aplikace. Z těchto průzkumů trhu vyplynuly jako dobré možnosti hlavně tři články zmíněné v následující tabulce:

Jméno	EPA097197VVP	EPB098215SP	SLPBA942126
C_A [Ah]	27	27	7
U_n [V]	3,9	3,7	3,7
I_{c_m} [A]	405	405	90
U_m [V]	4,45	4,2	4,2
I_m [A]	675	810	111
Z_t [mΩ]	0,68	0,48	1,3
E_d [Wh/kg]	250	200	202,34

[18, 17, 35]

Tabulka 5.1: Tabulka vybíraných článků

Tabulka obsahuje pro vybrané články kapacitu C_A , nominální napětí článku U_n , maximální stálý vybíjecí proud I_{c_m} , maximální nabíjecí napětí U_m , typický vnitřní sériový odpor článků Z_t a energetickou hustotu E_d . Všechny tyto parametry jsou pro nalezení optimálních elektrických vlastností baterie klíčové. Kromě těchto parametrů hrají roli i vlastnosti mechanické, které ale nebyly vyhodnocovány, protože mechanický návrh baterie byl připravený přizpůsobit se požadovanému článku a konfiguraci.

Ze všech článků byl vybrán článek SLPBA942126, hlavně pro rozsáhlé

zkušenosti s tímto článkem, protože byl v předchozích sezónách používán v rámci vysokonapěťových baterií. V minulosti bylo provedeno měření vzorků těchto článků, díky kterému jsou známé i jiné parametry tohoto článku a při návrhu je jistota, že parametry článku udávané výrobcem se shodují s vlastnostmi fyzických článků výrobcem dodaných [25, 15].

■ 5.2 Parametry zvolené konfigurace

Výsledná zvolená konfigurace pro vybraný článek je dvanáct článků v sérii a tři články paralelně (12s3p). Tato konfigurace splňuje všechny požadavky, které při návrhu systému na baterii vznikají. Napětí baterie (50,4 V) je přizpůsobeno maximálnímu napětí zvolených ventilátorů, maximální baterií dodávaný proud (333 A) je dostatečně velký na to, aby ventilátory nebyly výkonově omezovány baterií.

Kapitola 6

Řídící elektronika baterie

Bateriové články mají definované pracovní parametry. Když jsou provozovány mimo tyto parametry, s vysokou pravděpodobností dojde k částečnému nebo úplnému zničení článku [34].

Z tohoto důvodu mají větší baterie komplexní řídicí elektroniku, která hlídá provozní podmínky jednotlivých článků. V případě provozu baterie, nebo i jediného z konkrétních bateriových článků mimo definované pracovní parametry musí řídicí elektronika baterii odpojit, nebo jinak zastavit trvání nevyhovujícího stavu [34].

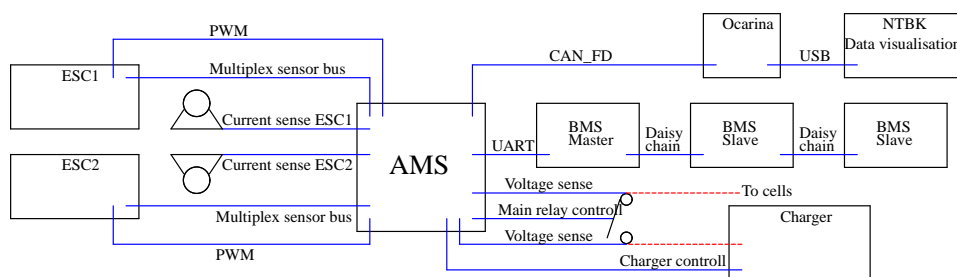
6.1 Požadavky na návrh dle pravidel Formula student

Vzhledem k bezpečnosti soutěže Formula student pravidla jasně definují, co vše je nutné kontrolovat, aby bylo možné baterii prohlásit za bezpečnou. Pravidla mají odlišné požadavky pro nízkonapěťové baterie a pro vysokonapěťové baterie.

Nízkonapěťové baterie musí být podle pravidel odpojeny, pokud teplota na jednom z něřených článků překročí $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu delší než jedna sekunda. Pravidla dále definují, že teplota článků musí být měřena minimálně na 30 % bateriových článků. Dále je nutné kontrolovat napětí každého článku a v případě, že napětí jednoho z článků překročí výrobcem udávané provozní hodnoty po dobu delší, než 500 ms, musí být baterie odpojena. Dále pravidla vyžadují zobrazovat všechna napětí jednotlivých článků [9].

6.2 Blokové schéma řídicí elektroniky

Níže je uvedeno blokové schéma řídicí elektroniky samotné, oproti blokovému schématu v 3.5 je toto blokové schéma primárně zaměřené na jednotlivé funkce, které bude samotná řídicí elektronika vykonávat.



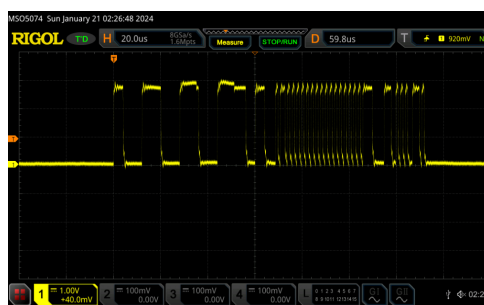
Obrázek 6.1: Blokové schéma řídicí elektroniky

6.2.1 Použité komunikační protokoly

V blokovém schématu kontrolní elektroniky je možné vidět využití vícero různých komunikačních protokolů. Ty jsou voleny tak, aby byl návrh co možná nejjednodušší. V následujících odstavcích budou postupně popsány jednotlivé protokoly a co bylo potřeba zajistit, aby mohly být využívány.

CAN FD

Za zkratčnou CAN se skrývá Controller Area Network, jde o dvouvodičový, diferenciální komunikační protokol, který se běžně používá v prostředích s velkou mírou rušení, vysokými nároky na spolehlivost komunikace případně potřebou přenášet data na velké vzdálenosti. Toho je docíleno kontrolou dat v rámci poslední části každé zprávy, pokud se při vysílání vyskytl problém, tato kontrola odhalí chybu a zpráva se bude odesílat znovu. Protokol CAN má také vyřešené situace, kdy chce vysílat více zařízení ve stejnou chvíli. V tu chvíli probíhá takzvaná arbitrace a pouze zpráva s nejvyšší prioritou, vyhraje arbitraci a může tak na sběrnici vysílat [21].



Obrázek 6.2: Přepínání bitových rychlostí u CAN FD

Definice CAN protokolu se od jeho prvního představení v roce 1986 častokrát měnila, modernizovala, aby byly CAN sběrnice vyhovující pro více aplikací. V roce 2015 byla zavedena nejnovější změna v definici tohoto protokolu a tou bylo zavedení CAN FD protokolu [21].

Zkratka FD, flexible datarate, flexibilní rychlost dat je nejnovější rozšíření CAN protokolu a CAN FD má oproti běžné CAN sběrnici hlavně tři výhody. První z nich je možnost odesílat delší datové rámce, to znamená v jedné zprávě

poslat více dat. Druhou výhodou CAN FD protokolu je zlepšená kontrola dat, je tak jistější, že se sběrnici neodešlou poškozená data. Hlavní výhodou CAN FD sběrnice je však to, že dovoluje odesílat zprávy na dvou různých datových rychlostech. Přejechod mezi jednou a druhou datovou rychlostí umožňuje odesílat část zprávy s vyšší datovou rychlostí [21].

Vyšší datová rychlost pouze na část zprávy je výhodná, protože během arbitrace může vysílat na sběrnici více zařízení a požadavky na časování jsou tak větší, než když jedno zařízení arbitraci vyhraje a v tu chvíli odesílá data na sběrnici jediné. Arbitrace je proces, během kterého všichni, kteří chtějí na sběrnici vysílat, odesílají svojí adresu. Adresa se skládá z dominantních a recesivních bitů, vyjádřující s vyšší prioritou zprávy mají v adrese více dominantních bitů a ve chvíli kdy vysílají dominantní bit poráží všechny ostatní, kteří chtěli vysílat ale na konkrétní pozici adresy mají bit recesivní. Arbitraci vždy vyhraje pouze jeden vysílající [21].

Z těchto důvodů bylo pro tuto sezónu rozhodnuto, že nová formule nebude využívat běžný CAN, ale právě CAN FD. To znamenalo využití nových komponentů, které umožňují komunikaci pomocí CAN FD protokolu. Pro rozšířenou imunitu sběrnice proti rušení je navíc CAN FD sběrnice izolovaná.

■ Multiplex sensor bus

Získávání dat, která si měří zvolené frekvenční měniče, je možné po datové sběrnici Multiplex sensor bus (obousměrná datová sběrnice pro senzory). Tento komunikační protokol je běžný pro modely na dálkové ovládání. Sběrnice obsahuje fyzicky pouze jeden vodič a má řídicí a podřízenou jednotku. Řídicí jednotka posílá požadavky na zprávy a pak uvolní sběrnici, aby podřízená jednotka mohla odesílat [3].

■ UART

UART je běžný komunikační protokol, využívaný ve velké části elektroniky. V návrhu systému pro aktivní přítlak je UART použit pro komunikaci mezi BMS čipy a řídicí jednotkou baterie AMS [27].

Jde o dvouvodičovou datovou sběrnici, kde jeden vodič slouží k odesílání dat od zařízení, zatímco druhý slouží k přijímání dat. Jde tak o asynchronní sériovou komunikaci s nastavitelnou rychlostí přenosu [27].

■ 6.3 Battery management system (BMS)

Měření napětí na článcích, teplot článků a balancování článků jsou hlavní funkce jednotlivých BMS. První návrh v týmu eForce používaných BMS pochází z roku 2018, kdy pro sedmou generaci elektrické formule byly poprvé použity BMS čipy bq76PL455A-Q1. Detaily návrhu této konkrétní BMS se zabývá bakalářská práce Jana Mánka. Od roku 2018 byly v týmu BMS několikrát upravovány, například v diplomové práci Petra Haince [15].

Vzhledem k týmovým zkušenostem s tímto BMS čipem tak byla nová BMS znovu navržena podle už ověřeného návrhu, pouze bylo provedeno malé množství úprav, hlavně aby mechanický tvar BMS vyhovoval prostoru vyhrazenému pro baterii.

■ 6.3.1 Měření teplot

Měření teplot článků má na starosti BMS čip, který má pro tyto potřeby připravených až osm ADC kanálů. Měření je realizováno pomocí NTC sensorů, jejichž odpor je silně závislý na teplotě. Měření je tak realizováno na více místech, konkrétně na pěti různých místech mezi dvěma články a na jedenácti místech pod záporným kontaktem článků, kde je měření vyžadováno pravidly [9].

■ 6.4 Accumulator management system (AMS)

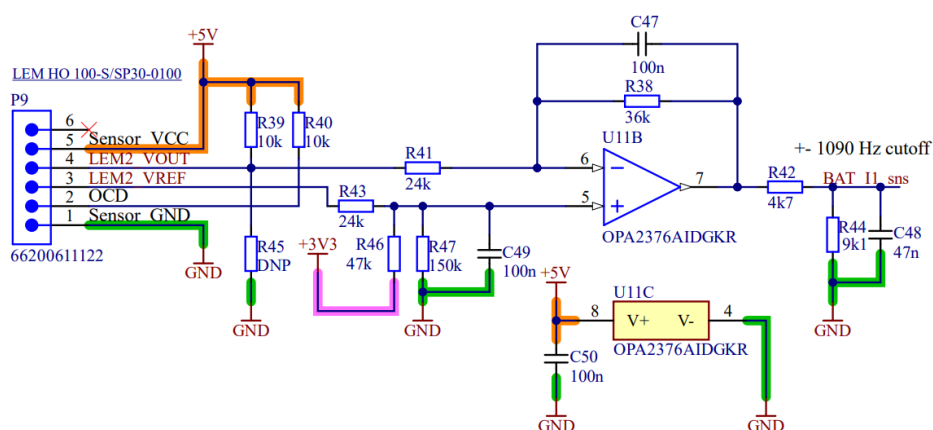
Za zkratku AMS se skrývá systém pro správu akumulátoru, který slouží jako správce celé baterie. Zapíná a vypíná hlavní relé, frekvenční měniče řídící ventilátory, posílá měničům požadované otáčky, měří proud, který si měniče odebírají, přijímá data od BMS o napětích a teplotách jednotlivých článků v baterii a odesílá tato data do ostatních řídicích jednotek ve vozidle po datové sběrnici CAN FD.

■ 6.4.1 Měření proudu

Pro validaci dat posílaných od frekvenčních měničů ovládajících ventilátory bylo rozhodnuto nezávisle na měničích měřit proudový odběr každého z nich.

Pro měření byl využit sensor od firmy LEM typu HO 100-SP30-0100, pracující na principu Hallova jevu. Sensor dovoluje měření proudu až do 250 A obousměrně, případně dovoluje plný rozsah rozdělit závisle na směru proudu jinak, například 350 A směrem z baterie do měničů a 150 směrem z měničů do baterie [22].

Proud sensor převádí na napětí oproti referenčnímu napětí; je tak nutné tento rozdíl převést na rozdíl napětí proti zemi, aby bylo možné tento rozdíl následně změřit pomocí analogově číslicového převodníku (ADC) v rámci AMS. Tento převod zajišťuje diferenciální zesilovač realizovaný pomocí operačního zesilovače.



Obrázek 6.3: Zapojení diferenciálního operačního zesilovače pro měření proudu

Převodní charakteristiky zapojení jsou:

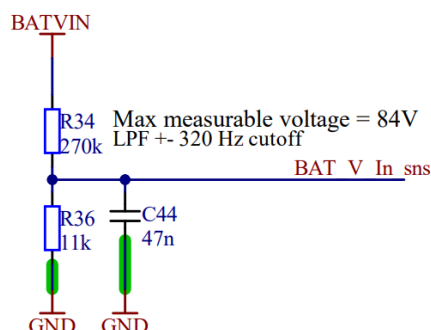
$$I = kU_{diff} \quad (6.1)$$

$$U_{ADC} = \frac{91}{138}U_{diff} \quad (6.2)$$

kde k je převodní konstanta vybraného senzoru, její hodnota je 125 A/V. U_{diff} je napětí na výstupu diferenciálního zesilovače a je z něj možné dopočítat proud baterií I . U_{ADC} je napětí měřené mikrokontrolérem na AMS, k podělení dochází proto, že sensor je pětivoltový, zatímco mikrokontrolér samotný má maximální rozsah do 3,3 V. Převodní konstanta senzoru je využita pro dopočítání hodnoty proudu.

6.4.2 Měření napětí

Pro validaci dat měřených BMS čipy, rychlejší možnost měření a také pro kontrolu úbytku napětí na výstupu baterie oproti vstupu je pomocí jednoduchého napěťového děliče navrženo měření napětí celé baterie. Tato měření jsou prováděna jak na vstupu, tak výstupu relé, je tak možné zkontrolovat napěťový úbytek přes relé.



Obrázek 6.4: Zapojení napěťového děliče s dolní propustí pro měření napětí

Zvolený napěťový rozsah je schválně výrazně vyšší, než by měla baterie za normálního provozování dosahovat. Je to tak navrženo z toho důvodu, že při moc prudké rekuperaci může napětí výrazně překročit očekávané rozsahy. Může se tak stát, že bude baterie, frekvenční měniče, nebo jiné komponenty po cestě poničeny. Pro odhalení těchto jevů a případnou okamžitou diagnostiku je tak nutné, aby tento jev nepřesáhl rozsah měřeného napětí.

6.4.3 Regulace ventilátorů

Systém AMS určuje požadované otáčky a regulaci otáček ventilátorů zajišťují frekvenční měniče.

Řízení ventilátorů se řídí mnoha různými protokoly, avšak nejstarší a nejběžnější z nich je PWM regulace. Pulzně šířková modulace (PWM) nastavuje otáčky motorů podle délky jednotlivých pulzů. Délka pulzu $1000 \mu\text{s}$ slouží k inicializaci komunikace a znamená, že se motor nemá točit. Délka pulzu $2000 \mu\text{s}$ pak dává měničům signál k tomu, aby roztočily motory na maximální otáčky. Regulace se tak dělá upravováním šířky těchto pulzů v rozmení od 1000 do $2000 \mu\text{s}$ [26].

Regulace ventilátorů při závodech Formula student

Pro správné fungování systému je také nutné rozhodovat, kdy je a není vhodné ventilátory používat a jak co nejlépe využít přidělenou energii při nejdelší dynamické disciplíně Formula student závodů viz kapitola 2.4. Ta se jezdí na 22 km a energii v baterii pro systém aktivního přítlaku je tak vhodné do celé délky závodu co nejlépe využívat.

Přínos systému pro aktivní přítlak, jak již bylo zmíněno v kapitole o aktivním přítlaku 2.1.2, je největší v nízkých rychlostech, ve vyšších rychlostech mají navíc větší vliv křídla pro generování přítlaku. Aby byla energie ve vytrvalostním závodě dobře rozložena, je vhodné odhadnout čas, který bude formuli trvat dojet celou disciplínu. Podle odhadovaného času lze vypočítat nominální příkon a pro první kolo nechat systém běžet konstantně na tuto nominální hodnotu.

Po prvním kole je možné vyhodnotit rozložení rychlostí a přiřazovat rychlosti hodnotu příkonu do ventilátorů podle toho, jak rychle se v danou chvíli formule pohybuje. Přítlak se touto regulací nebude měnit skokově, takže pro pilota formule bude chování vozidla prediktivnější. Nebude se plýtvat energií ve vysokých rychlostech, kdy je přínos aktivního přítlaku nižší. Navíc tato metoda není moc náročná na implementaci.

Ještě jednodušší varianta je nechat výkon po celou dobu jízdy regulovaný na konstantní vypočtenou hodnotu. Náročnější variantou je, s přítlakem pracovat prediktivně na základě dat o pozici formule. Ta je možné získat z předchozích průjezdů tratí, připravovat tak aktivní přítlak pro zatáčky a naopak ho kompletně vypínat ve chvílích, kdy není potřeba.

Navrhnout však tento způsob regulace je velmi náročné a pro naladění je potřeba důkladně otestovat a upravit tento algoritmus, což je pro první sezónu nevhodné.

6.5 Připojení a odpojení baterie

Pravidla kvůli bezpečnosti vyžadují odpojit baterii od zbytku systému v situaci, kdy některý z parametrů baterie překročí výrobcem udávané pracovní podmínky. Pro vysokou míru bezpečnosti je také vhodné, aby metoda odpojení byla velmi spolehlivá [9].

6.5.1 Spínání baterie přes relé

Velmi spolehlivá metoda je využívat pro připojování a odpojování baterie relé. Relé jsou obecně schopna krátkodobě přežít i násobné překročení proudu, pro který jsou navržena, v takovém případě tak dříve přehoří pojistka, než se relé poškodí.

Vhodné relé na takto velké proudy však není snadné najít. Během výběru byly vzaty v potaz hlavně maximální proud a napětí, které pro relé výrobce udává. Dále pak velikost a hmotnost.

Relay	U_{coil} [V]	U_{br} [V]	I_{coil} [mA]	I_{max} [A]	d [mm]	š [mm]	v [mm]
A	12 - 24	900	130	250	80,7	65,7	72,6
B	12	800	230	500	80,5	56	72,6
C	12	80	500	300	55	50	102
D	12	1000	230	500	80,4	60	73

[23, 14, 4, 5]

Tabulka 6.1: Tabulka vybíraných relé

- A - Littelfuse DCNEV250
- B - GIGAVAC GV200
- C - TE 29.312.11
- D - TE ECK200B

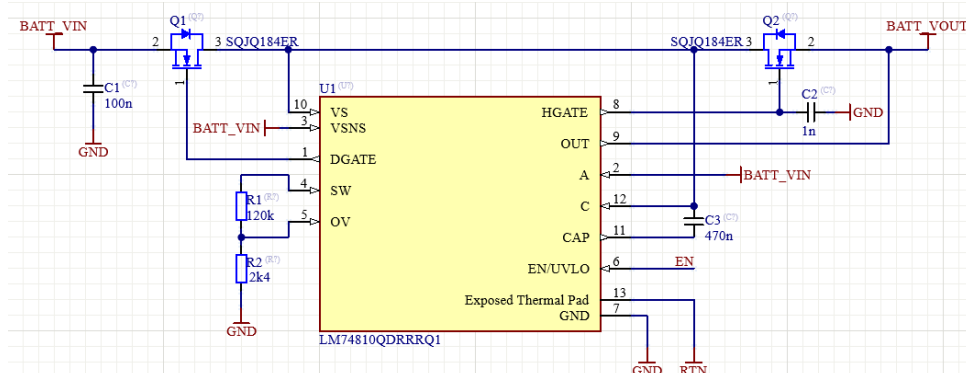
Tabulka obsahuje napětí cívky relé U_{coil} , maximální napětí, které relé dokáže rozpojit U_{br} , proud protékající cívku relé pro udržení relé otevřeného I_{coil} , maximální proud kontaktů I_{max} , dále pak rozměry relé, délku d , šířku $š$ a výšku v .

Z tohoto seznamu bylo nakonec vybráno relé C, přestože elektrické parametry jiných kandidátů byly lepší, hlavní motivací pro výběr tohoto relé bylo, že mechanická zástavba baterie do vozu nedovolila využití relé s dvěma rozměry většími než 55 mm.

Spínání baterie tranzistory

Další alternativou oproti relé je využít pro spínání baterie dvou výkonových mosfetů. Výhoda tohoto spínání baterie je hlavně menší velikost a hmotnost, nevýhodou však je, že je v tom případě nutné všechny z baterie vycházející

proud vést deskou plošných spojů. To je pro takto vysoké proudy nesnadný úkol a samotná cena desky plošných spojů, která by tyto proudy dokázala unést, by pak prudce stoupala.



Obrázek 6.5: Možné řešení spínání baterie pouze tranzistory

Na obrázku je návrh, jak by spínání tranzistory oproti relé mohlo fungovat. Zvolené komponenty, jak tranzistory, tak driver pro tranzistory, jsou vybrány tak, aby tyto proudy unesly.

6.5.2 Přednabíjení kapacit měničů

Při připojování baterie k frekvenčním měničům je nutné omezit proud, kterým budou kapacity měničů nabíjeny. Kapacitor se při začátku nabíjení chová jako zkrat. Přímé připojení by tak znamenalo překročení maximálních proudů bateriových článků a namáhání všech komponent, které jsou dimenzované na očekávané hodnoty proudů. Z tohoto důvodu je běžná praxe využívat při připojování baterií ke kapacitám takzvaný přednabíjecí obvod, který připojením rezistoru do série nastaví maximální nabíjecí proud pro kapacity [36].

K připojení sériového odporu slouží samostatné předbíjecí relé, které je po době potřebné k nabití kapacit nahrazeno hlavním relé. Čas, který bude přednabíjení trvat je závislý na připojované kapacitě a na velikosti sériového odporu. V případě tohoto návrhu je celková kapacita obou připojených měničů C 3,6 mF, sériový odpor R byl vybrán 50 Ω , čas potřebný pro nabití kapacit je možné vypočítat následovně [36].

$$\tau = RC = 50 \cdot 3,6 \cdot 10^{-3} = 0,18 \text{ s} \quad (6.3)$$

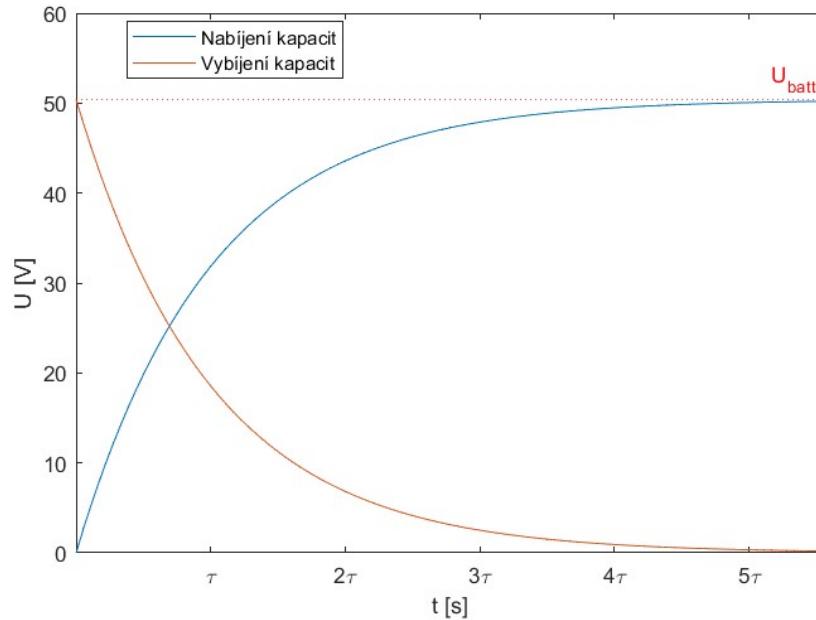
$$t = 5\tau = 0,9 \text{ s} \quad (6.4)$$

Doba předbíjení je přímo závislá na úrovni, na kterou je mají být kondenzátory nabity před tím, než bude sepnuto hlavní relé (v tomto případě). Běžně je tento čas udáván buď jako tři τ nebo pět τ . Pro tři τ je napětí na kondenzátorech přibližně devadesát pět procent napětí baterie. Pro pět τ je napětí na kondenzátorech přibližně devadesát devět procent napětí baterie [36].

Napětí na kondenzátorech je popsáno vztahem:

$$U_C(t) = U_B(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (6.5)$$

Průběh napětí pro nabíjení i vybíjení kondenzátorů je poté na následujícím obrázku.



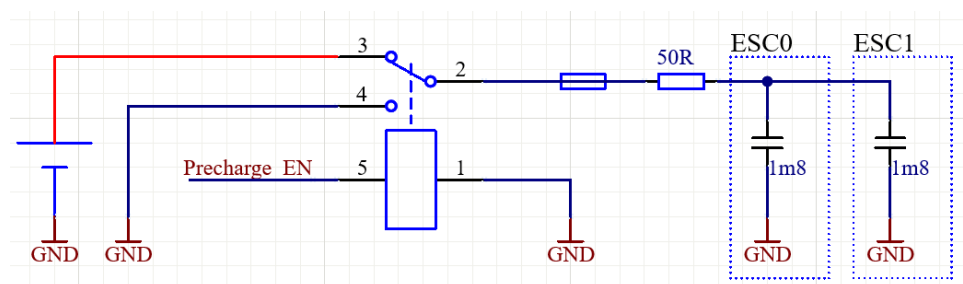
Obrázek 6.6: Průběh napětí na kondenzátorech při přednabíjení baterie

V obrázku je zvolené maximální napětí baterie (50,4 V), na časové ose jsou zvýrazněny jednotlivé body τ , které je podle výpočtů v 6.3 0,18 s.

6.5.3 Vybíjení kapacit měničů

Po rozpojení hlavního relé je vhodné kondenzátory v měničích znovu vybit, aby bylo při případné následné manipulaci s měniči jisté, že nejsou pod napětím. Pro minimalizaci počtu součástek je možné využít přednabíjecího rezistoru, časové průběhy vybíjení budou stejné jako pro nabíjení.

Pro využití stejného rezistoru je možné využít pro přednabíjení relé, obsahující jak normálně otevřený (NO), tak normálně zavřený (NC) kontakt. Finální zapojení pro přednabíjení a vybíjení kapacit tak vypadá následovně.



Obrázek 6.7: Zapojení relé pro přednabíjení a vybíjení kondenzátorů

Kapitola 7

Validace přínosu aktivního přitlaku

Hlavním cílem této kapitoly je připravit postupy pro testování formule, aby bylo možné ve chvíli, kdy je formule dostavená, rovnou přejít k testování.

Mezi využitelné metody pro validaci tohoto přínosu patří měření, jak velký přitlak tento systém vytvořil. Jde tak o přímou validaci dat ze simulací, o kterých je napsáno v kapitole 2.4.2. Hlavním nedostatkem těchto měření je náročná realizace. Na druhou stranu je pro ně snadné porovnat naměřené hodnoty se zapnutým a poté s vypnutým systémem pro aktivní přitlak.

Pro vyšší vypovídající hodnotu této validace je optimální provádět měření bez systému aktivního přitlaku nejen s vypnutými ventilátory, ale ideálně se všemi komponenty, které jsou ve formuli kvůli systému aktivního přitlaku vyjmutými z auta ven. Bylo by tak možné porovnat formuli ve stavu s plným aktivním přitlakem, ale také úplně bez něj a porovnat, v jaké z těchto dvou konfigurací bude formule rychlejší. Rychlost, s jakou formule dokáže projet jednotlivé disciplíny je ostatně hlavní vypovídající faktor o vlastnostech formule jako takové.

Dalším možným způsobem validace přínosu systému pro aktivní tvorbu přitlaku je měřit velikost vygenerovaného přitlaku. Tato měření je buď možné provádět přímo, například měřením absolutního tlaku na jednotlivé senzory, nebo měřením rychlosti proudění vzduchu ve vybraných bodech, kde je možné podle rychlosti poté určit, jak velký přitlak budou tyto aerodynamické prvky generovat.

Nejsnazší a nejpravděpodobnější metodou testování přínosu tohoto systému je však měření přímo jednotlivých časů na kolo.

7.1 Problematika testování

Hlavním problémem testování jsou rozdílné vlivy na čas na kolo. Mezi tyto vlivy patří počasí, stav vozidla, ale velkou měrou také lidský faktor.

Počasí ovlivňuje mimo jiné teplotu trati, což ovlivňuje přilnavost pneumatik. Dále pak také například povětrnostní podmínky mohou mít neblahý vliv na vlastnosti vozidla. Jakákoliv vlhkost na povrchu trati má také velký vliv na přilnavosti pneumatik k povrchu trati, vhodné počasí je tak důležitým předpokladem.

Do stavu vozidla se započítávají všemožné proměnné ohledně vozidla. Mohou to být rozdílná nastavení podvozku, tlaky pneumatik, kvalita povrchu pneumatik, která u závodních pneumatik rychle klesá, ale také teplota pneumatik, která je pro přilnavost důležitá.

Lidský faktor má však na čas na kolo asi nejvýraznější vliv. Na výkony pilota při řízení je velmi vysoký počet vlivů.

Mezi kladné vlivy patří iterativní učení se trati při více projetích tratí, sžívání se s vlastnostmi vozidla, drobné optimalizace nastavitelných vlastností vozidla pro lepší projetí trati a další.

Mezi záporné vlivy na rychlost projetí kola patří únava jak fyzická, tak pokles pozornosti, který může vést k chybám. Dále pak sem patří inherentní vlastnosti vozidla, negativně může rychlost projetí trati ovlivňovat nepohodlí v řídicíové sedačce, nevhodná pozice ovládacích prvků, jako i například nevhodný tvar volantu.

7.2 Navrhované metody

Testování je vhodné provést na tři ze čtyř dynamických disciplín soutěže, které už byly popsány v kapitole 2.4, a to konkrétně pro akceleraci, skidpad, a autocross. Hlavním důvodem pro testování těchto tří disciplín je dojezd formule, ten je přesně navržený, aby právě stačil na čtvrtou ze závodních disciplín, endurance, testovat tak jízdu endurance se systémem aktivního přitlaku i bez něj je téměř nereálné.

Testování akcelerace a skidpadu bude vcelku snadné, protože tratě těchto disciplín jsou na všech závodech stejné a tak bude stačit zajet pár časů se systémem aktivního přitlaku a pár časů po jeho vyjmutí. Tým má dvě baterie, proto bude vhodné první kolo testů provést s jedním z trakčních akumulátorů a druhé kolo s druhým.

Testování poslední disciplíny-autocrossu bude nejnáročnější, přitom ale právě na této kategorii je očekáván největší přínos systému. Vzhledem k velkému vlivu lidského faktoru na čas na kolo při autocrossu nebude snadné přínos systému pro aktivní přitlak kvantifikovat; bylo by navíc vhodné, nechat zajet pár kol ideálně více pilotů. Dále je vhodné během vyndávání systému pro aktivní přitlak z vozidla změnit trať, aby se piloti museli adaptovat na novou trať a neměli tak trať pro druhou konfiguraci naučenou.

Pokud budou výsledky všech disciplín znatelně rozdílné, je možné touto metodou kvantifikovat přínos; ve chvíli, kdy výsledky znatelně rozdílné nebudou, by bylo vhodné věnovat se přesnějšímu měření a zkusit ověřit, jestli má skutečně systém v reálných podmínkách stejný vliv, jako vycházel ze simulací.

Kapitola 8

Závěr

Tématem bakalářské práce bylo navrhnout systém pro aktivní přítlak pro elektrickou formuli. Pod pojmem aktivní přítlak je v kontextu této práce rozuměno využití ventilátorů pro urychlení proudění pod podvozkem vozidla, které podle Bernoulliho principu vytvářejí podtlak.

V prvních kapitolách práce byly popsány principy, které jsou potřebné pro správný návrh systému aktivního přítlaku. Stručně zde bylo popsáno jak funguje proudění kolem vozu a proč je využití aktivního přítlaku ve Formula student výhodné.

Další část práce se věnovala konkrétním vlastnostem systému, výběru vhodných komponentů a návrhu kontrolní elektroniky, které řídí celý systém. Konkrétní návrhová rozhodnutí byla také ilustrována na blokových schématech ukazujících jednotlivé prvky navrhovaného systému. Nejdůležitější rozhodnutí celého návrhu bylo vybrat vhodnou metodu pro napájení systému. To podle pravidel soutěže Formula student nesmí být z vysokého napětí. Možnosti napájení tak byly buď systém napájet přes DC - DC měnič, snižující trakční napětí na napětí pravidly povolené pro systém (maximálně 60 V), nebo z dedikované baterie. Po zhodnocení pozitiv a negativ obou návrhů bylo rozhodnuto využívat pro napájení systému samostatnou baterii.

Její návrh byl popsán v další kapitole, spolu s popisem, jaký bateriový článek byl vybrán. V další kapitole byl popsán návrh řídicí elektroniky baterie, která však mimo kontrolu stavu baterie zároveň řídí i zbytek systému.

Pro zhodnocení přínosu navrženého systému byly popsány možné metody validace, zda navržený systém dosáhl svého hlavního účelu a dokázal studentskou formuli zrychlit. Vzhledem k tomu, že formuli, pro kterou je systém navrhován, tým studentů dostaví až po termínu odevzdání této práce, není možné přínos na formuli vyhodnotit a v práci tento přínos popsat, proto práce pouze popisuje metody, pro toto vyhodnocení využitelné.



Bibliografie

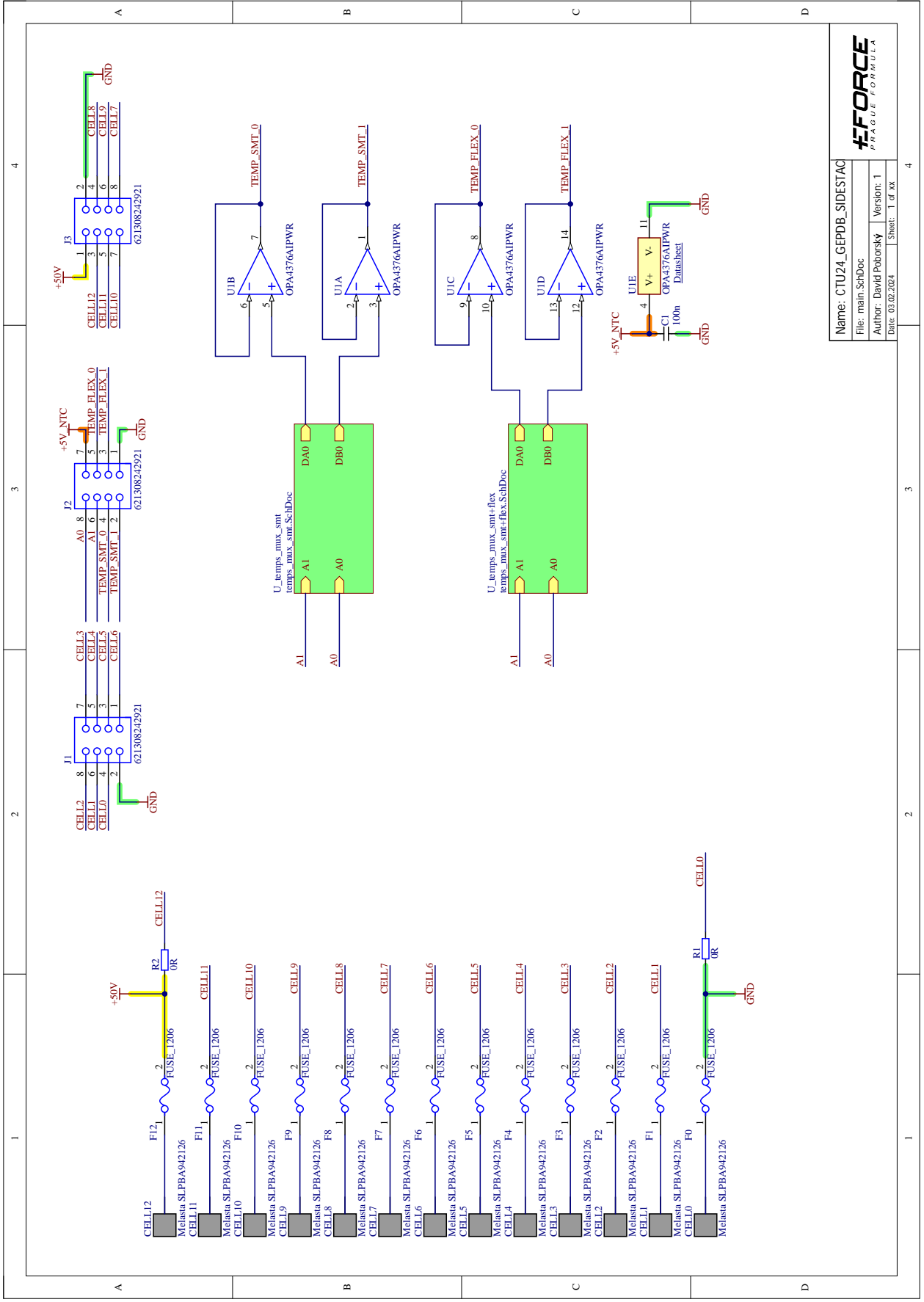
- [1] George Keith Batchelor. *An introduction to fluid dynamics*. 3. vyd. Cambridge University press, 2000. ISBN: 0521663962.
- [2] Frank P. Bleier. *Fan Handbook: Selection, Application, and Design*. The McGraw-Hill Companies, Inc., 1997. ISBN: 0070059330.
- [3] Modellsport GmbH & Co.KG. *MULTIPLEX Sensor Bus*. [online]. [cit. 28.4.2024] Dostupné z: <https://www.multiplex-rc.de/userdata/files/beschreibung-sensor-bus-v2.pdf>. 2012.
- [4] TE connectivity. *TE 29 series relay datasheet*. [online]. [cit. 28.4.2024] Dostupné z: https://www.te.com/content/dam/te-com/documents/industrial-and-commercial-transportation/global/kissling-documents-data-sheets/Data_Sheets_Documents_Kissling/contractors/KI-Relay29-300A-ds-a4-K1166700-en-2008.pdf. 2024.
- [5] TE connectivity. *TE ECK200B Relay series datasheet*. [online]. [cit. 28.4.2024] Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/418/9/ENG_DS_ECK200B_Datasheet_3-3398023.pdf. 2024.
- [6] Power Sonic Corporation. *What is a battery C rating*. [online]. [cit. 12.12.2023] Dostupné z: <https://www.power-sonic.com/blog/what-is-a-battery-c-rating/>. 2023.
- [7] Darren Galpin. *Ground Effect and the Fan Car*. [online]. [cit. 27.3.2024] Dostupné z: <https://www.forix.com/8w/fancar.html>. 1999.
- [8] Formula Student Germany. *Disciplines*. [online]. [cit. 12.4.2024] Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/about/disciplines/>.
- [9] Formula Student Germany. *Formula student Rules 2024*. [online]. [cit. 12.4.2024] Dostupné z: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2024/rules/FS-Rules_2024_v1.0.pdf. 2023.
- [10] Formula Student Germany. *High Voltage Telemetry (HVT)*. [online]. [cit. 28.4.2024] Dostupné z: <https://www.yge.de/en/high-voltage-hv-2/>. 2024.
- [11] Formula Student Germany. *What is formula student competition?* [online]. [cit. 12.4.2024] Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/about/concept/>.

- [12] mdGroup Germany GmbH. *DS-86-AXI HDS® (120 mm) EDF*. [online]. [cit. 16.4.2024] Dostupné z: <https://www.schubeler.com/product/ds-86-axi-hds/?v=928568b84963>. 2024.
- [13] mdGroup Germany GmbH. *Speed Controllers*. [online]. [cit. 28.4.2024] Dostupné z: <https://www.schubeler.com/product-category/speed-controllers/?v=928568b84963>. 2020.
- [14] Sensata - GIGAVAC. *GV200 Relay series datasheet*. [online]. [cit. 28.4.2024] Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/657/sensata_gigavac_gv200_series_open_contactors_datas-3074934.pdf. 2024.
- [15] Petr Hainc. „Návrh elektroniky pro akumulátorovou baterii elektromobilu“. Dipl. pr. České vysoké učení technické, 2021.
- [16] Alan Henry. *Brabham The Grand Prix Cars*. 1. vyd. Hazleton Publishing, 1985. ISBN: 0-905138-36-8.
- [17] Ltd. Hong Kong Mingda Industrial Co. *Extreme Light High-Power Li-polymer Cells for FSE Competition*. [online]. [cit. 31.3.2024] Dostupné z: <https://hkmingda.com/Uploads/file/2019-08-30/5d68d8951654a.pdf>. 2023.
- [18] Ltd. Hong Kong Mingda Industrial Co. *Specification for HV Super Power Type Li-Po Battery Part No.: EPA097197VVP*. [online]. [cit. 31.3.2024] Dostupné z: <https://www.hkmingda.com/Uploads/file/2022-04-08/624f89403fb79.pdf>. 2023.
- [19] Joseph Katz. *Race Car Aerodynamics*. 1. vyd. ROBERT BENTLEY INC, 1996. ISBN: 9780837601427.
- [20] Joseph Katz. „Race Car Aerodynamics“. In: *Ilustrace možností vedení vzduchu pod podvozkem vozidla [Ilustrace]*, 1996. Kap. 1, s. 8. ISBN: 9780837601427.
- [21] Kvaser. *CAN FD Protocol Tutorial*. [online]. [cit. 28.4.2024] Dostupné z: <https://www.kvaser.com/can-fd-protocol-tutorial/>. 2024.
- [22] LEM. *Current Transducer HO-S/SP30 series*. [online]. [cit. 28.4.2024] Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/2149999.pdf>. 2015.
- [23] Littelfuse. *DCNEV Relay series datasheet*. [online]. [cit. 28.4.2024] Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/240/media-3323743.pdf>. 2024.
- [24] Karl Ludvigsen. *The Astonishing Chaparral 2J*. [online]. [cit. 24.3.2024] Dostupné z: <https://automeia.revsinstitute.org/the-astonishing-chaparral-2j>. 2022.
- [25] Josef Med. „Svařování vývodů bateriových článků do vozidla Formula student“. Dipl. pr. České vysoké učení technické, 2023.

- [26] Lauren Nagel. *What is an Electronic Speed Controller & How Does an ESC work*. [online]. [cit. 28.4.2024] Dostupné z: <https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/what-is-an-esc-how-does-an-esc-work>. 2023.
- [27] Adam Osborne. *An introduction to Microcomputers*. 1. vyd. Osborne-McGraw Hill Berkely California USA, 1980. ISBN: 0931988349.
- [28] Andries van Overbeeke. *Mcmurthy Speirling exterior desing*. [online]. [cit. 11.4.2024] Dostupné z: <https://andriesvanoverbeeke.com/mcmurtry-speirling-exterior-design>. 2021.
- [29] Ing. Pavel Hrzina Ph.D. *Cykly a životnost baterie*. [online]. [cit. 12.12.2023] Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/21096-cykly-a-zivotnost-baterie>. 2020.
- [30] Greg Potts. *The McMurtry Speirling has broken the Goodwood hillclimb record*. [online]. [cit. 12.4.2024] Dostupné z: <https://www.topgear.com/car-news/motorsport/mcmurtry-speirling-has-broken-goodwood-hillclimb-record>. 2022.
- [31] Turbines RC. *Ducted Fan EDF VASAFAN 120mm Carbon 14 blades + Moteur HET 800-73 590Kv*. [online]. [cit. 16.4.2024] Dostupné z: <https://www.turbines-rc.com/en/vasamodel/2259-ducted-fan-edf-vasafan-120mm-carbon-14-blades-moteur-het-800-73-590kv.html>. 2024.
- [32] Turbines RC. *EDF Ducted Fan Hacker Stream-Fan 120 / 600kv*. [online]. [cit. 16.4.2024] Dostupné z: <https://www.turbines-rc.com/en/hacker-stream-fan/3131-edf-ducted-fan-hacker-stream-fan-120-600kv.html>. 2024.
- [33] Turbines RC. *EDF Ducted Fan JP Hobby 120mm + 12s Motor 760KV (CCW)*. [online]. [cit. 16.4.2024] Dostupné z: <https://www.turbines-rc.com/en/jp-hobby/1620-edf-ducted-fan-jp-hobby-120mm-12s-motor-760kv.html>. 2024.
- [34] Marc a. Rosen. *Battery Technology: From Fundamentals to Thermal Behavior and Management*. 1. vyd. Academic Pr Inc, 2023. ISBN: 9780443188626.
- [35] Ltd Shenzhen Melasta Battery Co. *Lithium Polymer (Li-Po) Batteries/Cells*. [online]. [cit. 31.3.2024] Dostupné z: <https://www.melasta.com/cells/lithium-polymer-li-po-batteries-cells-.html>. 2021.
- [36] Brian Munari Andrew Schneer. *How to design a precharge circuit for hybrid and electric vehicle applications*. Tech. zpr. Sensata Technologies, 2020.
- [37] Allan Staniforth. *Competition Car Suspension: Design, Construction, Tuning*. 3. vyd. Haynes North America, 1999. ISBN: 9781859606445.

Příloha A

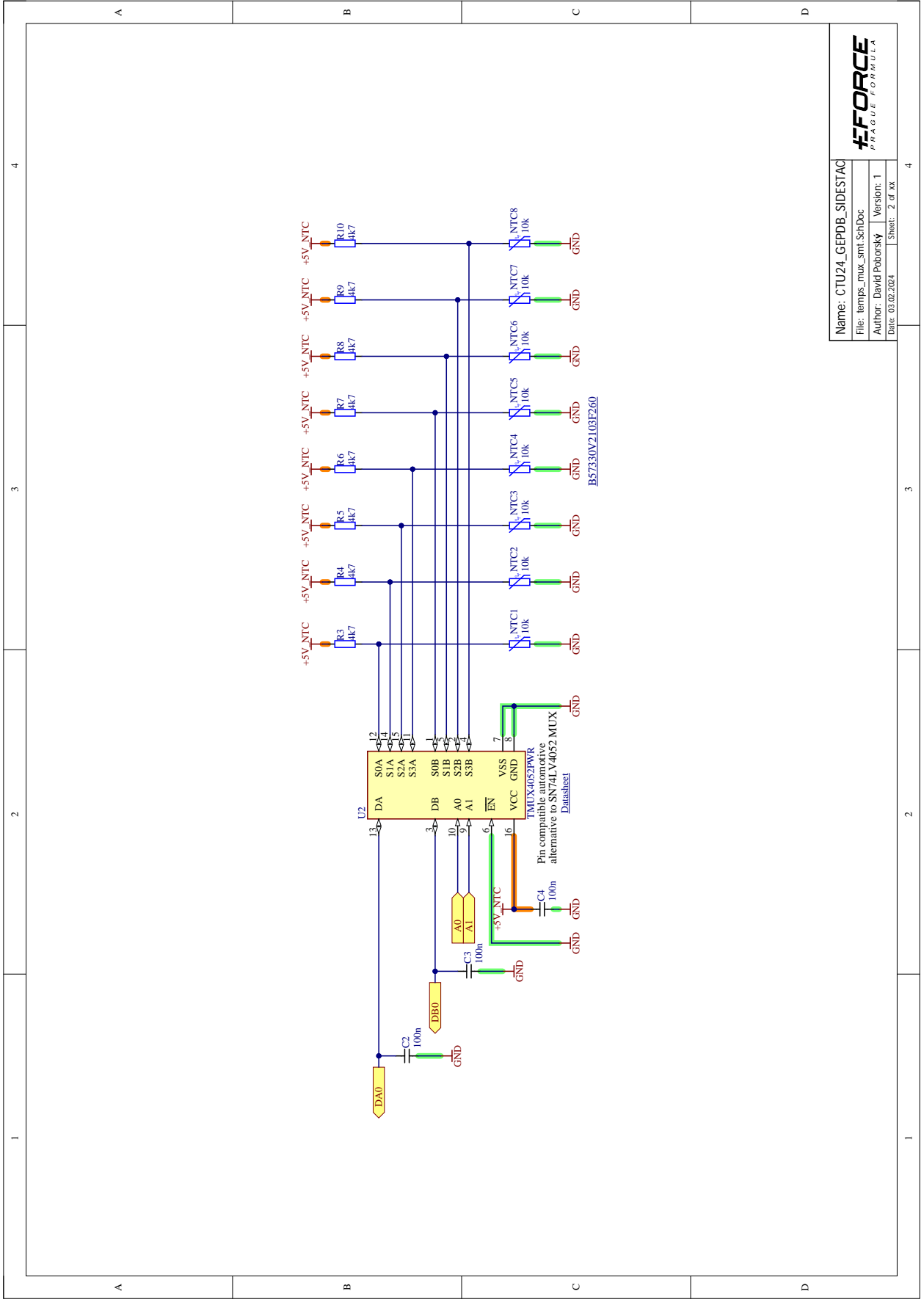
Schéma zapojení a vizualizace měřící desky BMS



Name: CTU24_GEPDB_SIDESTAC
 File: math.SchDoc
 Author: David Poborsky
 Date: 03.02.2024

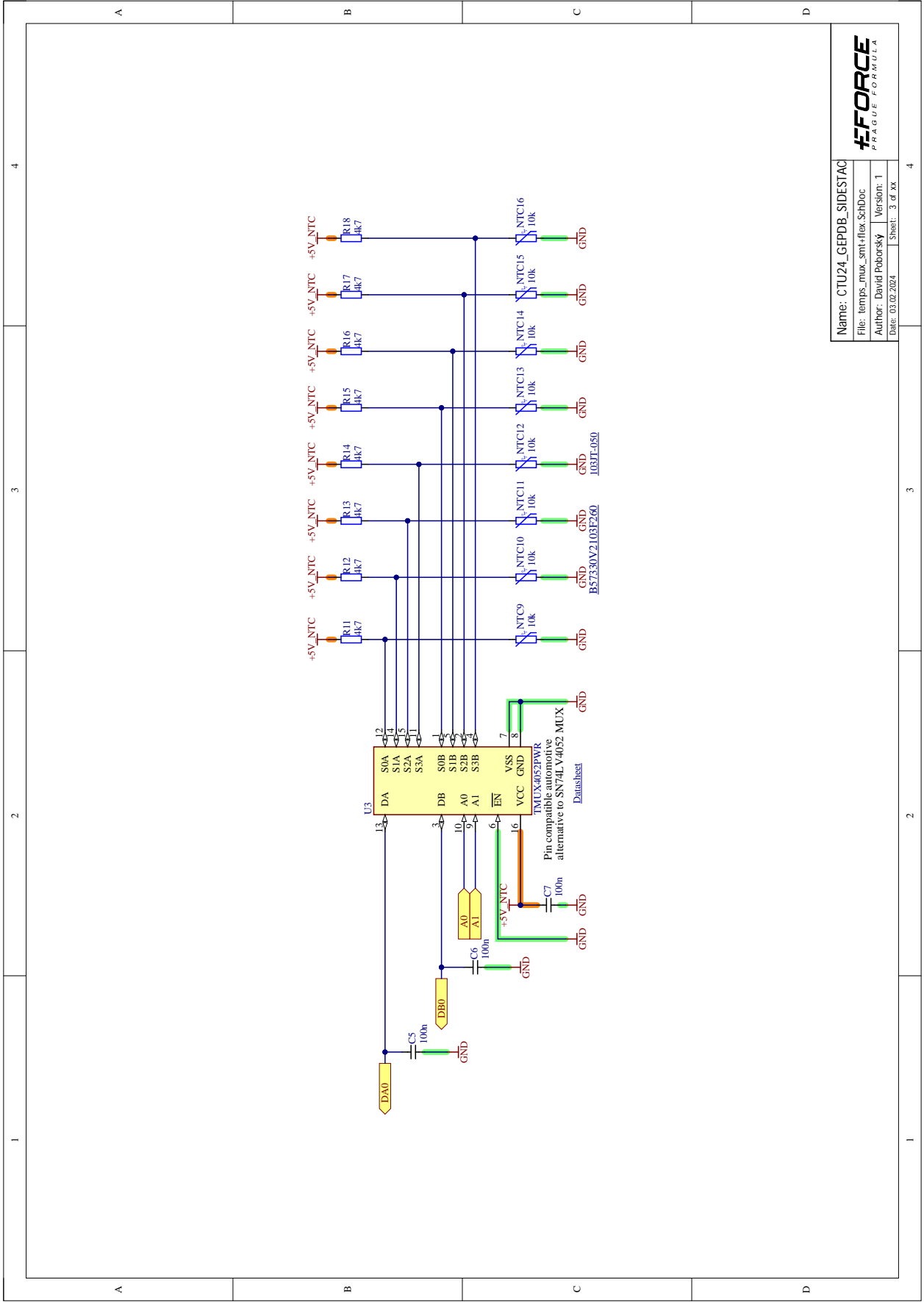


Version: 1
 Sheet: 1 of xx



Name: CTU24_GEPDB_SIDESTAC
 File: temps_mux_srm.SchDoc
 Author: David Poborsky | Version: 1
 Date: 03.02.2024 | Sheet: 2 of xx



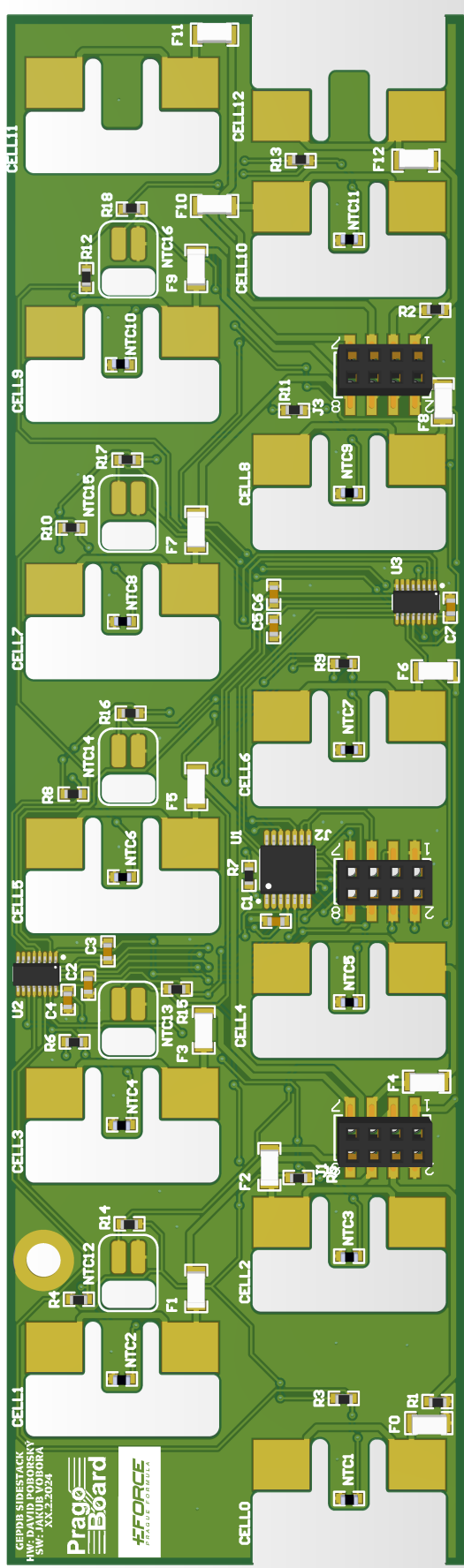


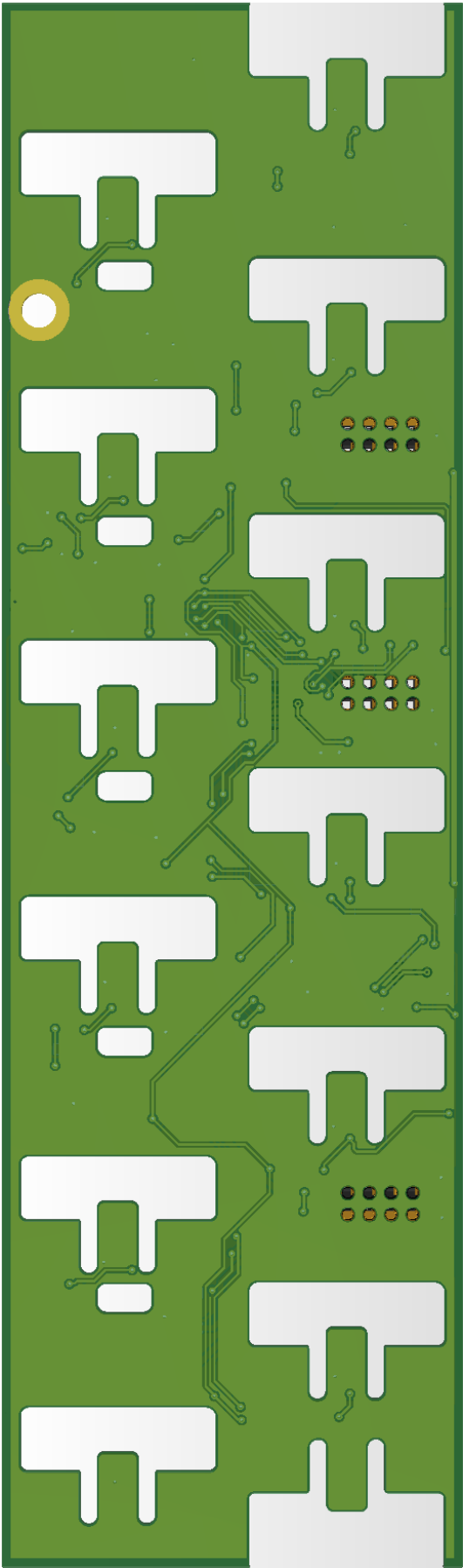
Name: CTU24_GEPDB_SIDESTAC
 File: temps_mux_smt+flex.SchDoc
 Author: David Poborsky | Version: 1
 Date: 03.02.2024 | Sheet: 3 of xx

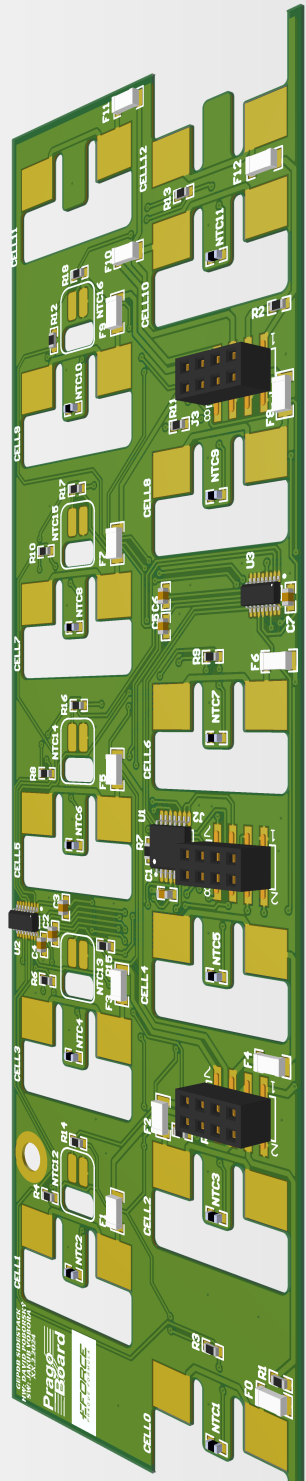


1 2 3 4

A B C D



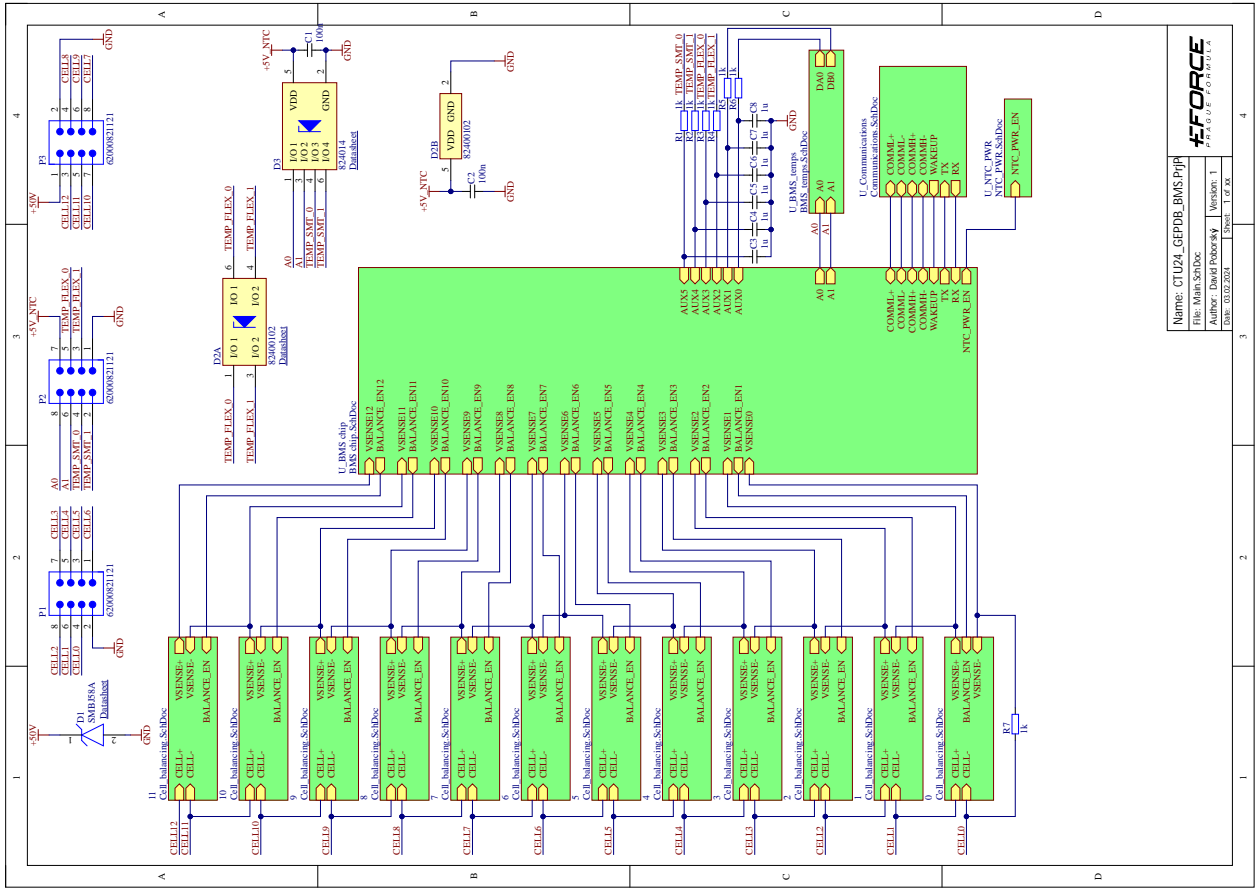






Příloha B

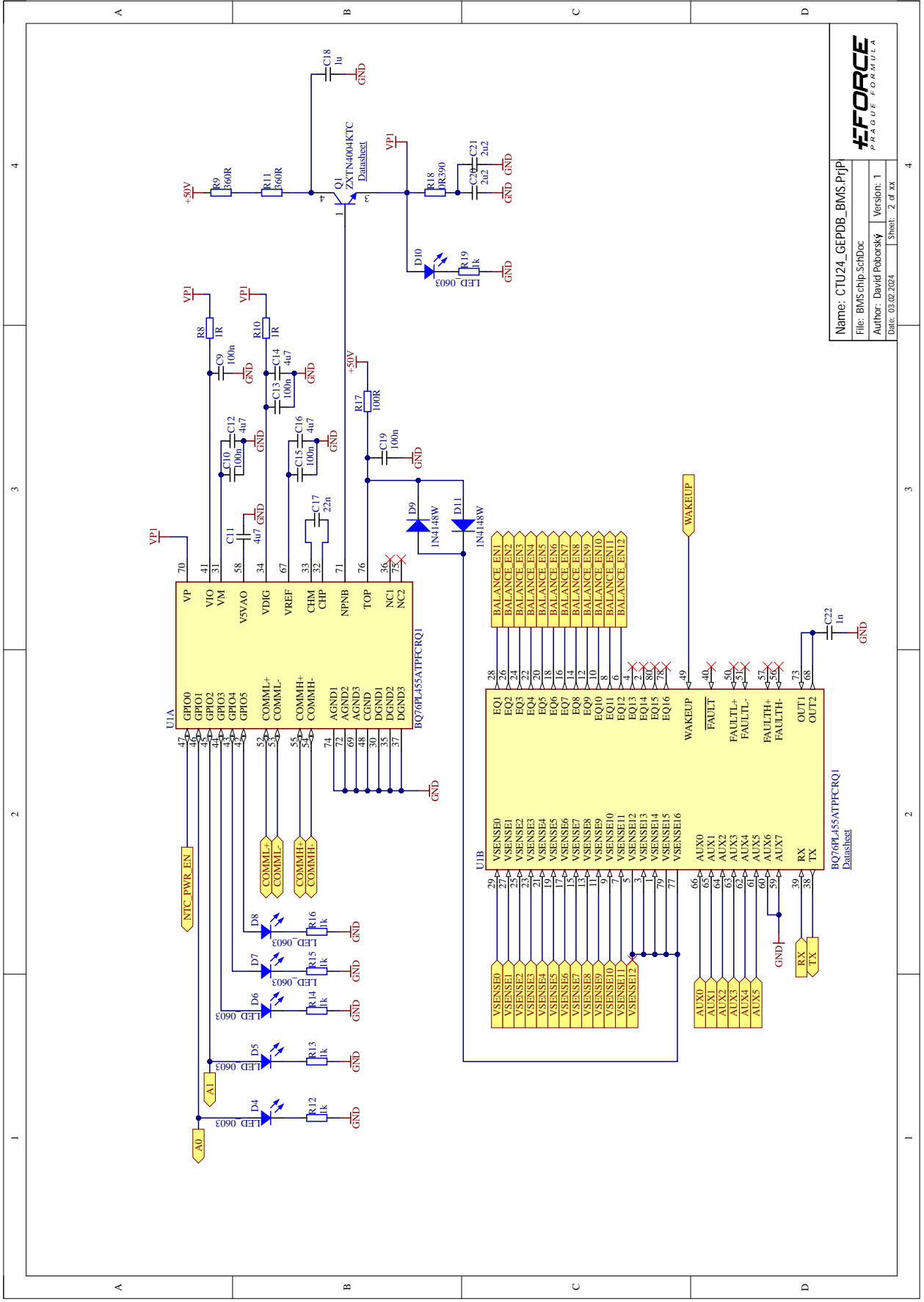
Schéma zapojení a vizualizace BMS

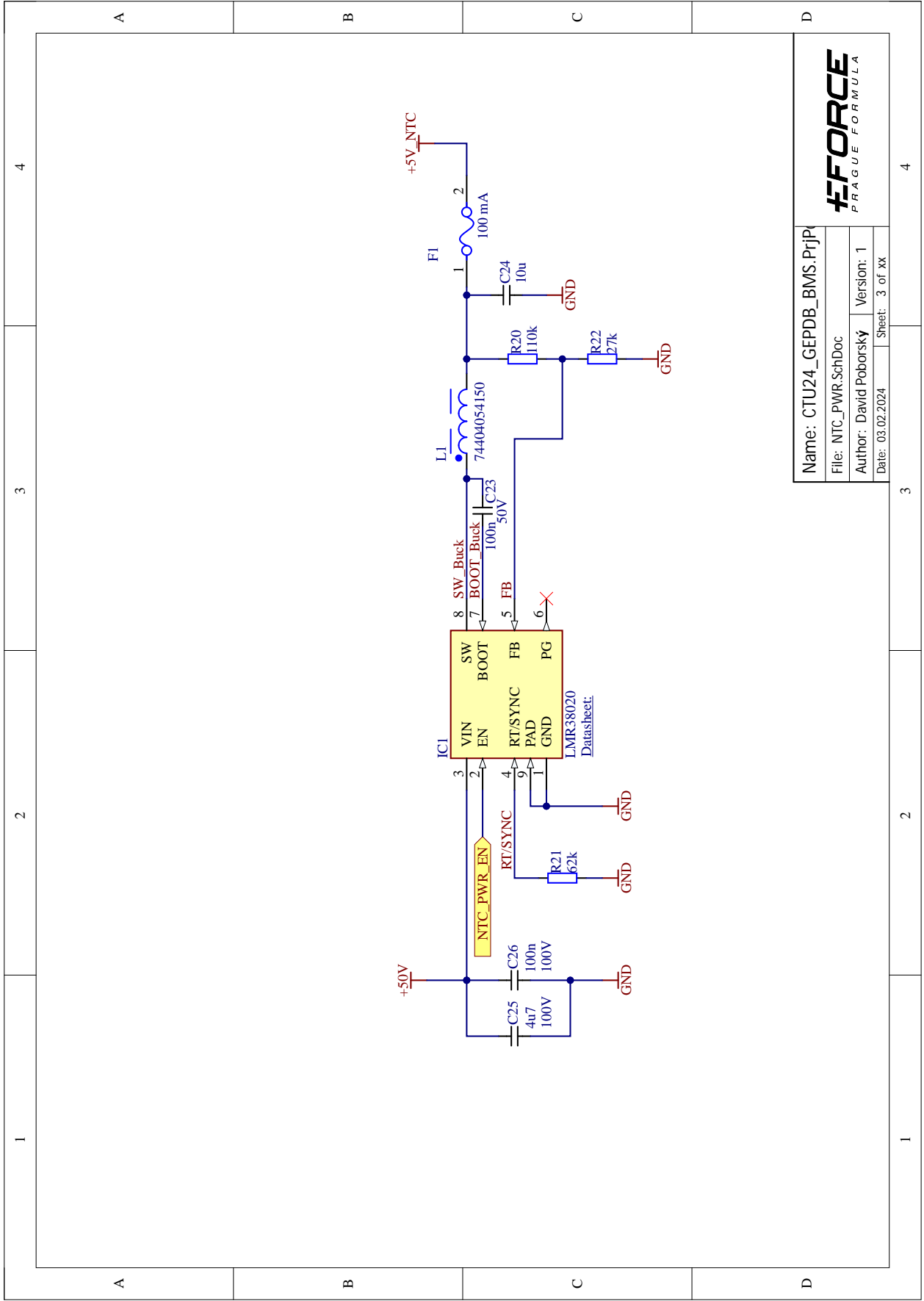


Name: CTU24_GEPDB_BMAS.Prl
 File: Main.SchDoc
 Author: David Pokorsky
 Date: 03.02.2024
 Sheet: 1 of xx



FFORCE
 PREMIUM SOLUTIONS





Name: CTU24_GEPDB_BMS.PrjP	
File: NTC_PWR.SchDoc	Version: 1
Author: David Poborský	Sheet: 3 of xx
Date: 03.02.2024	



1 2 3 4

A

B

C

D

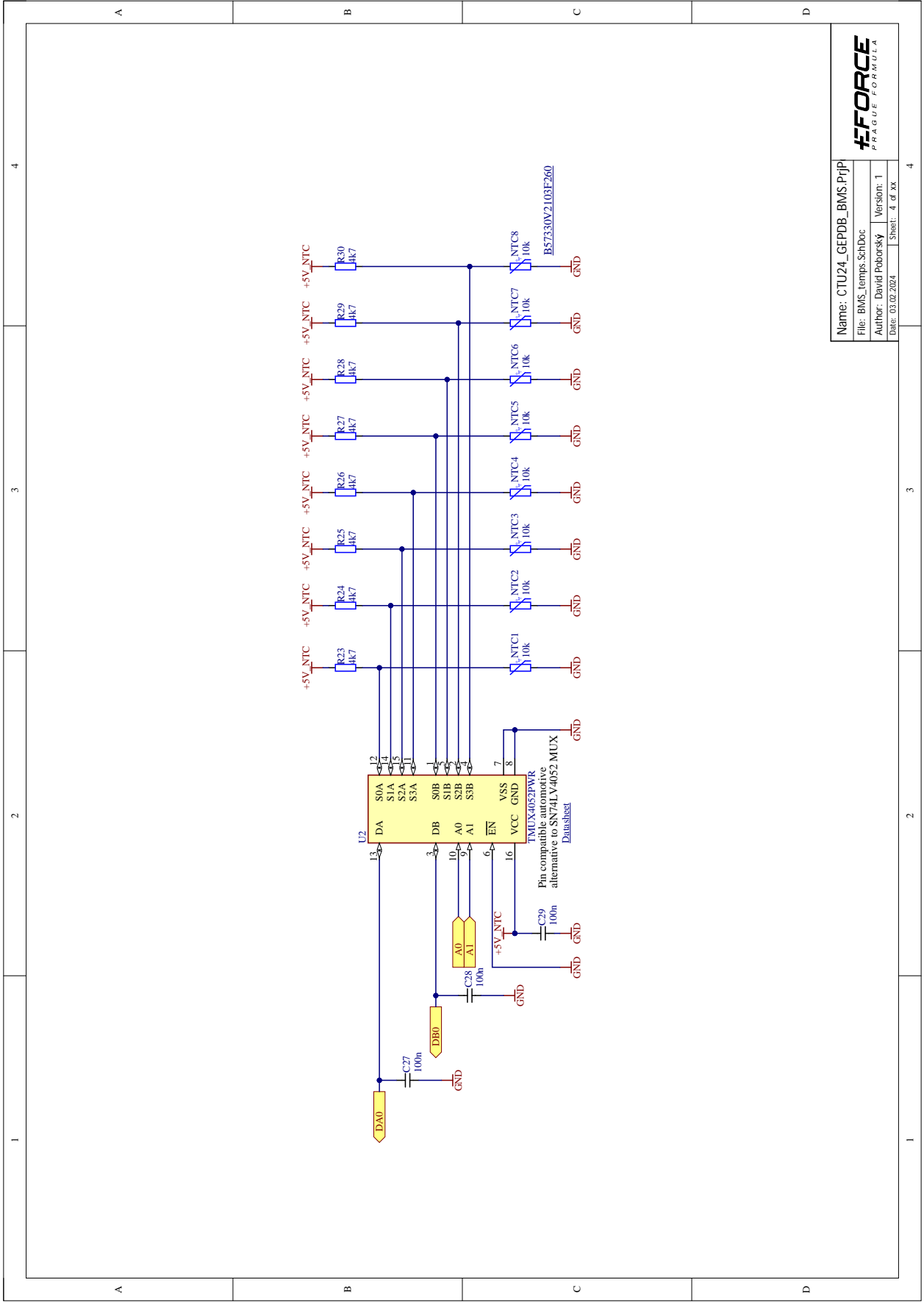
1 2 3 4

A

B

C

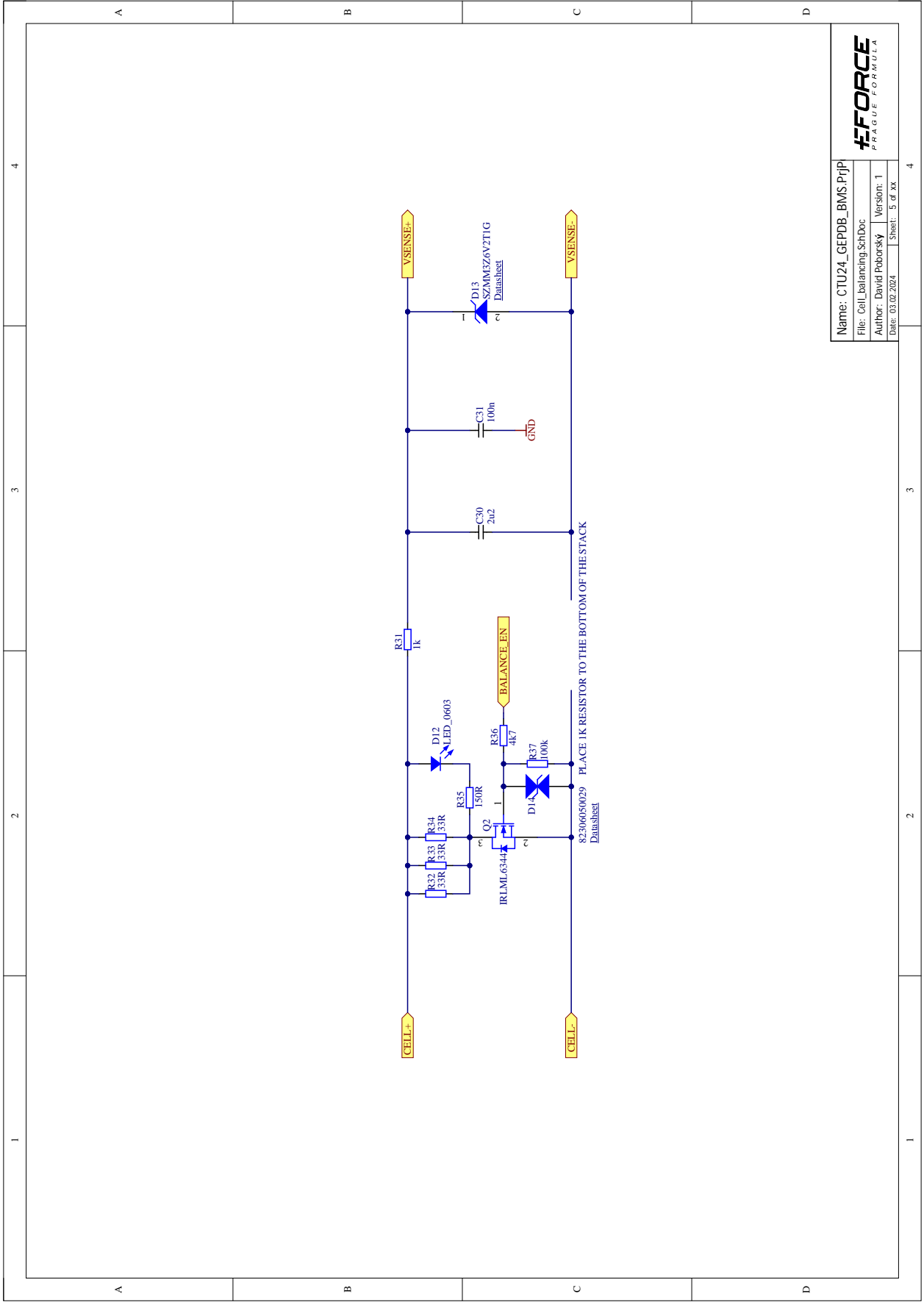
D



Name: CTU24_GEPDB_BMS.PrjP
 File: BMS_temps.SchDoc
 Author: David Poborsky
 Date: 03.02.2024
 Version: 1
 Sheet: 4 of xx



1	2	3	4
A	B	C	D



Name: CTU24_GEPDB_BMS.PrjP	
File: Cell_Balancing_SchDoc	Version: 1
Author: David Poborsky	Sheet: 5 of xx
Date: 03.02.2024	

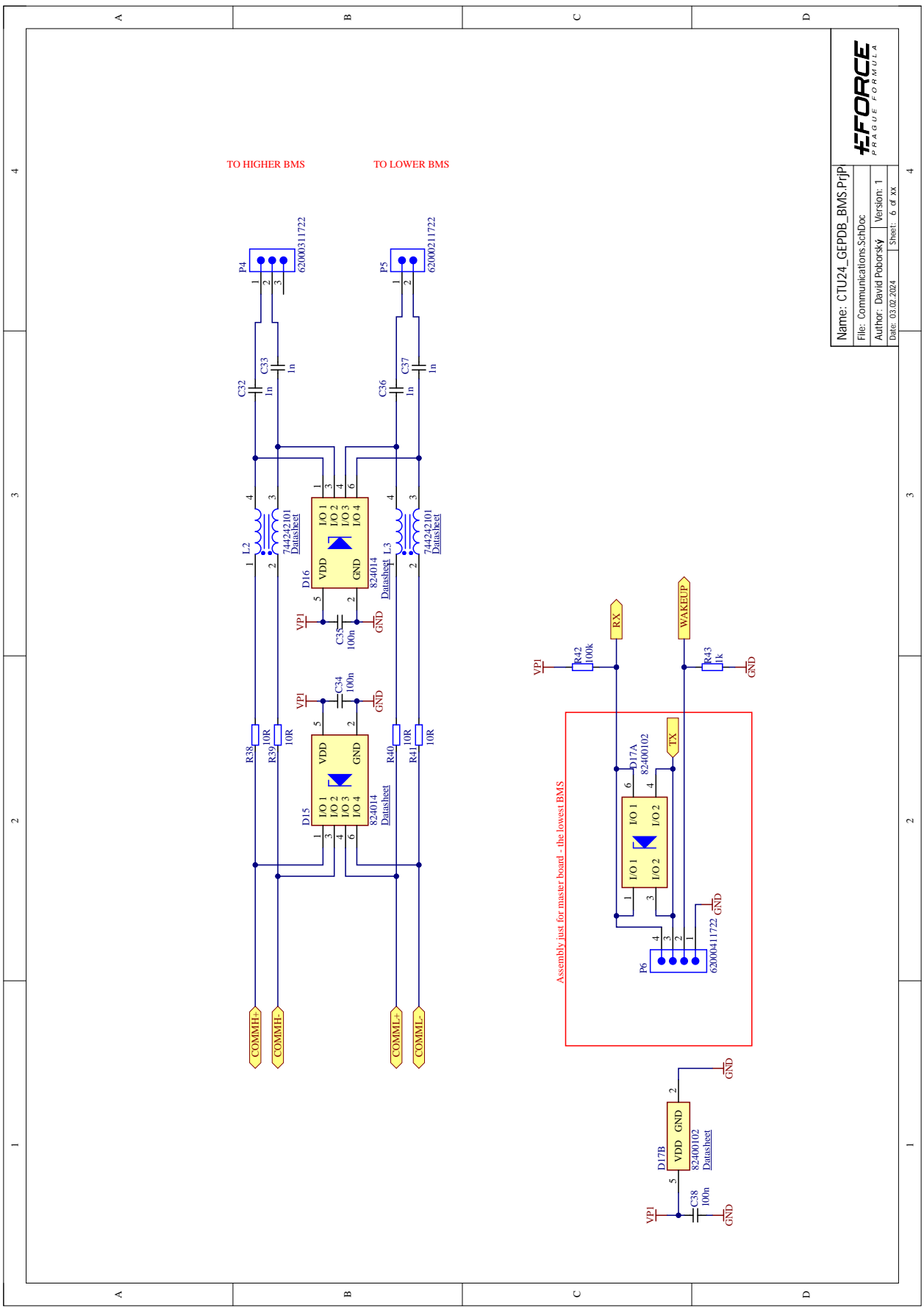


1 2 3 4

A B C D

1 2 3 4

A B C D



TO HIGHER BMS

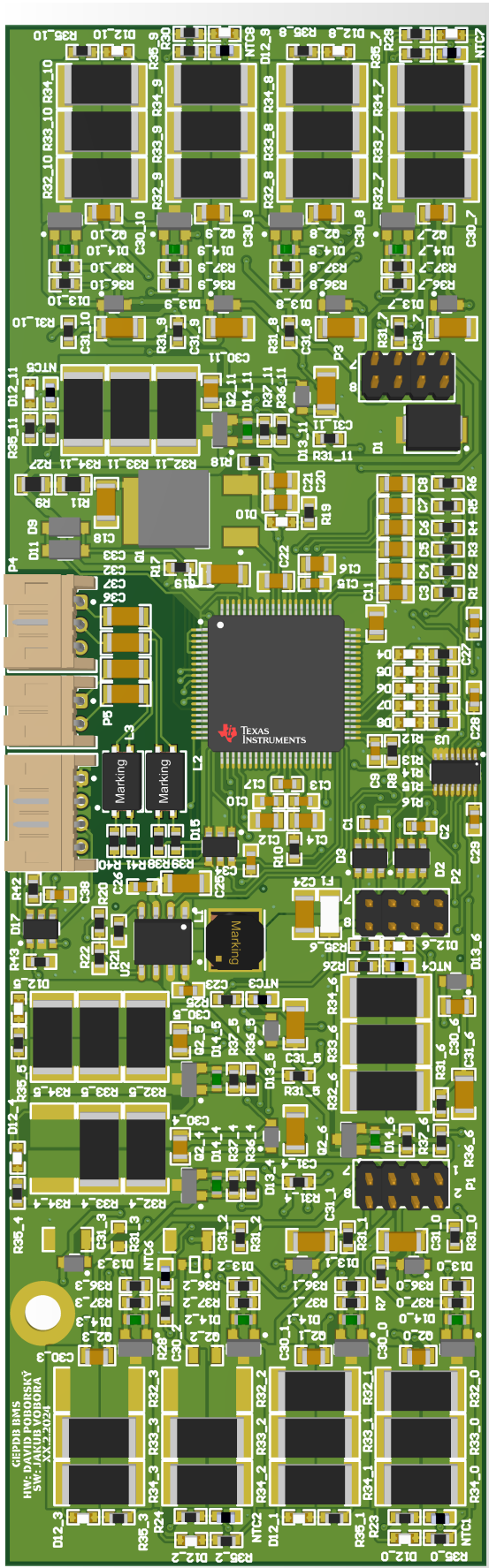
TO LOWER BMS

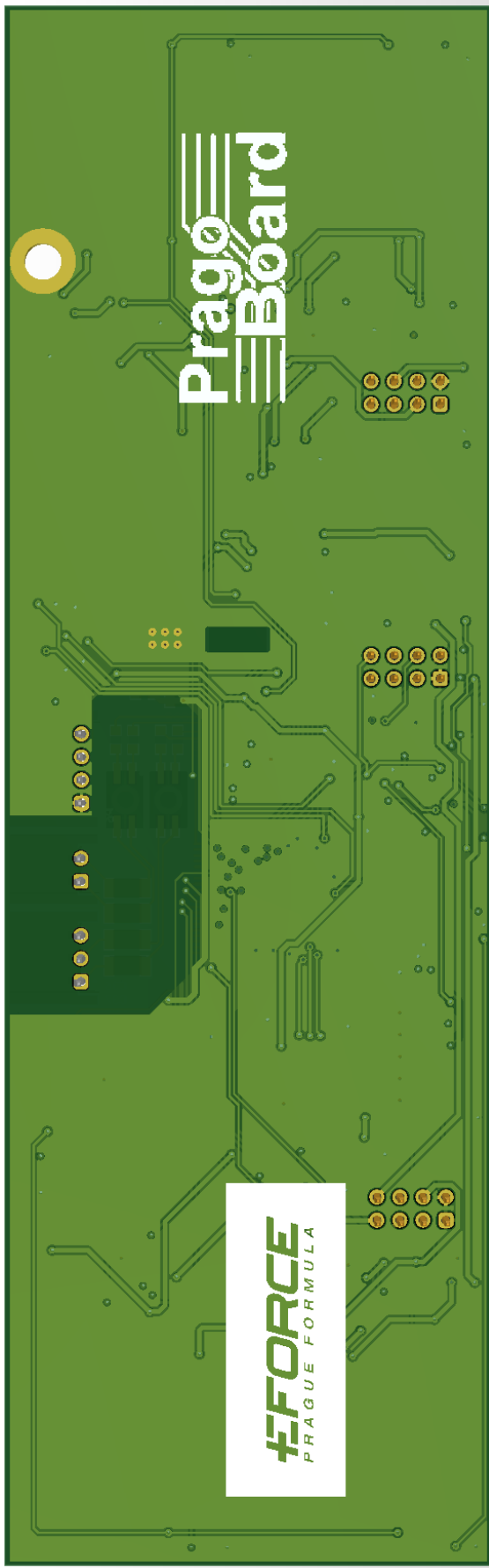
Assembly just for muster board - the lowest BMS

Name: CTU24_GEPDB_BMS.PrjP	
File: Communications.SchDoc	Version: 1
Author: David Poborsky	Sheet: 6 of xx
Date: 03.02.2024	



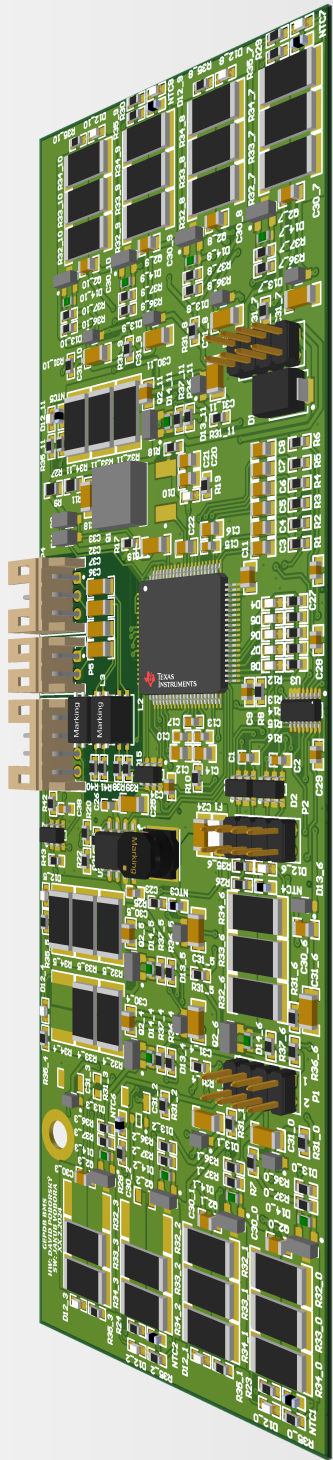
A 4 3 2 1 A B C D





Prago Board

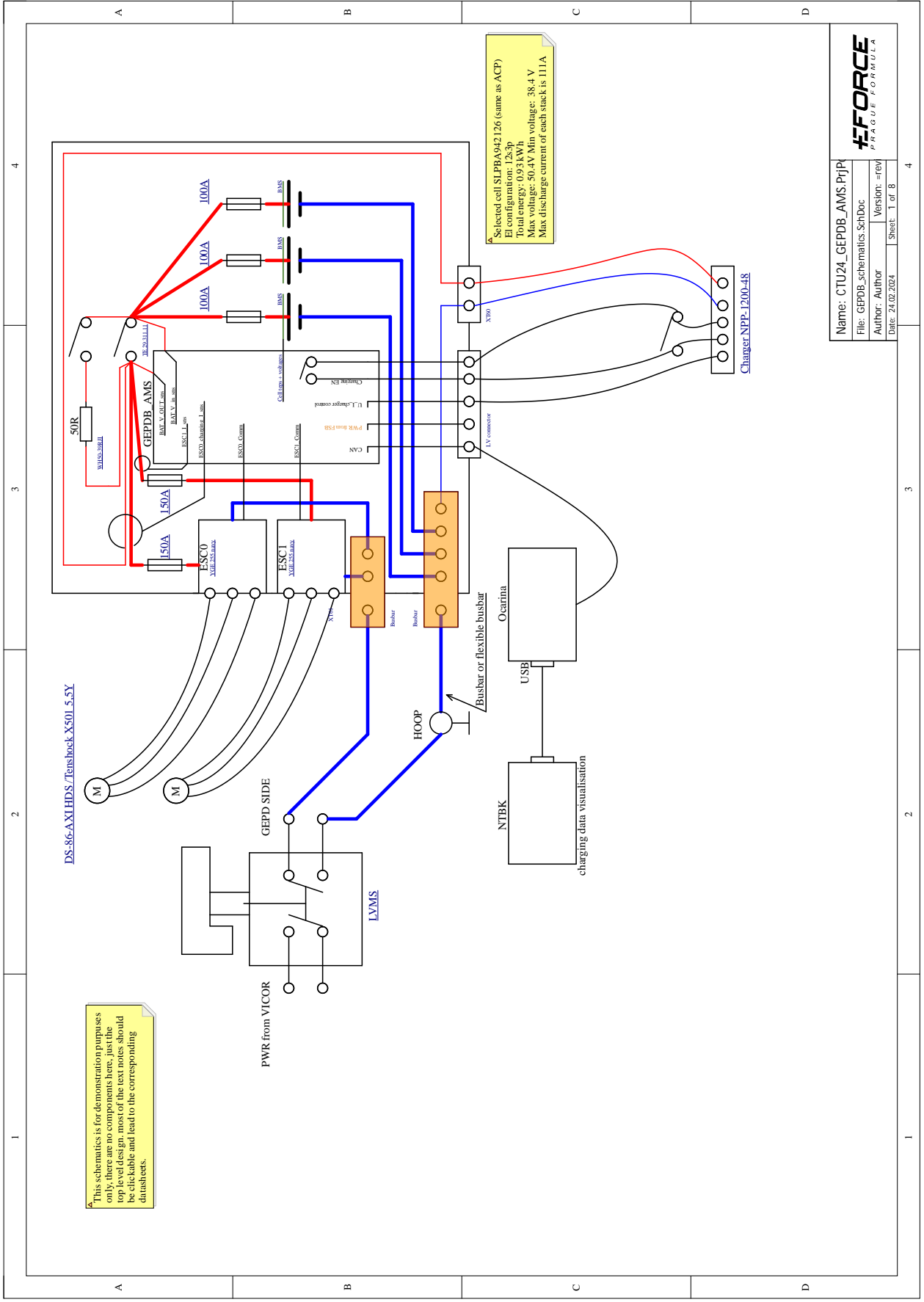
eFORCE
PRAGUE FORMULA





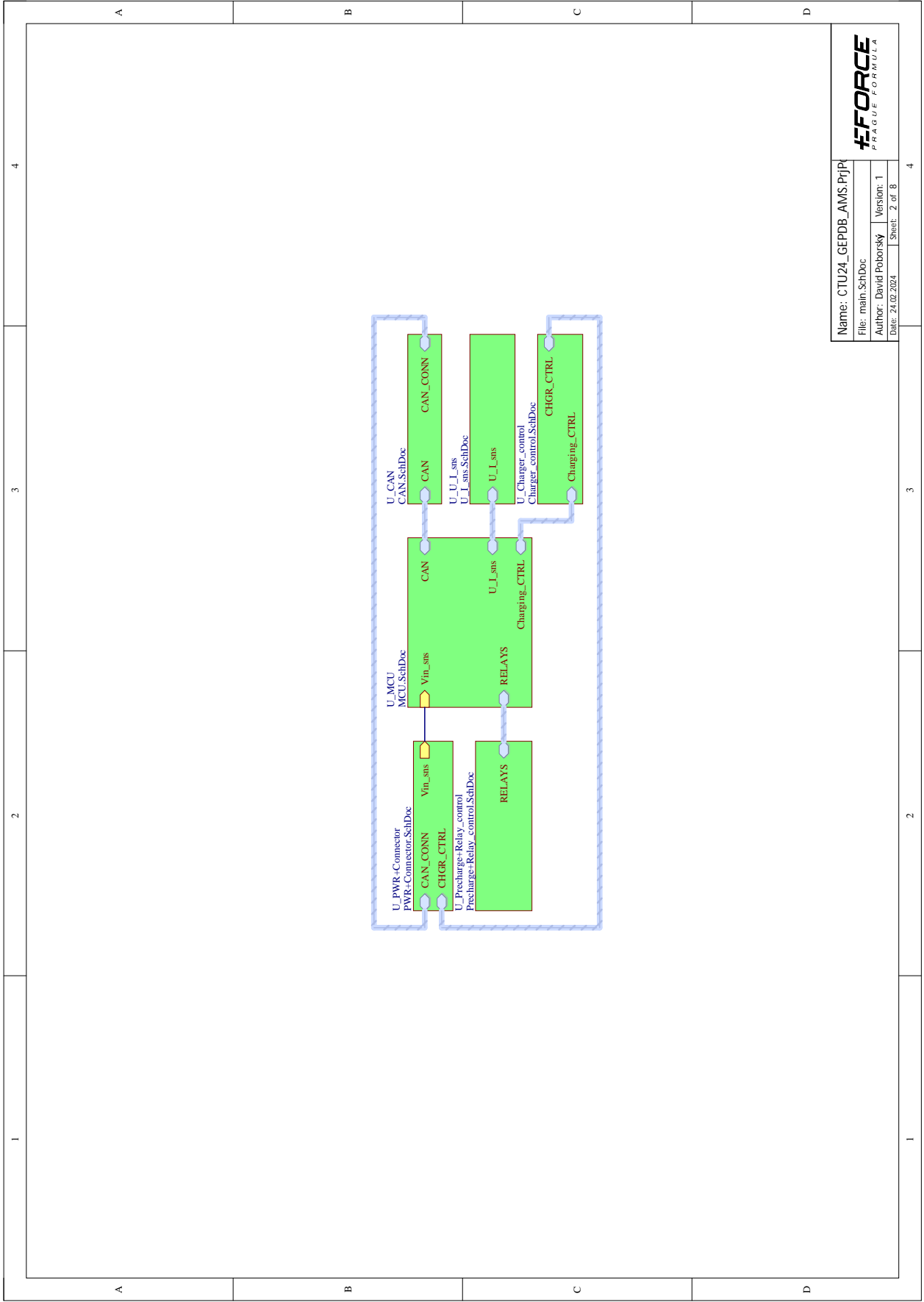
Příloha C

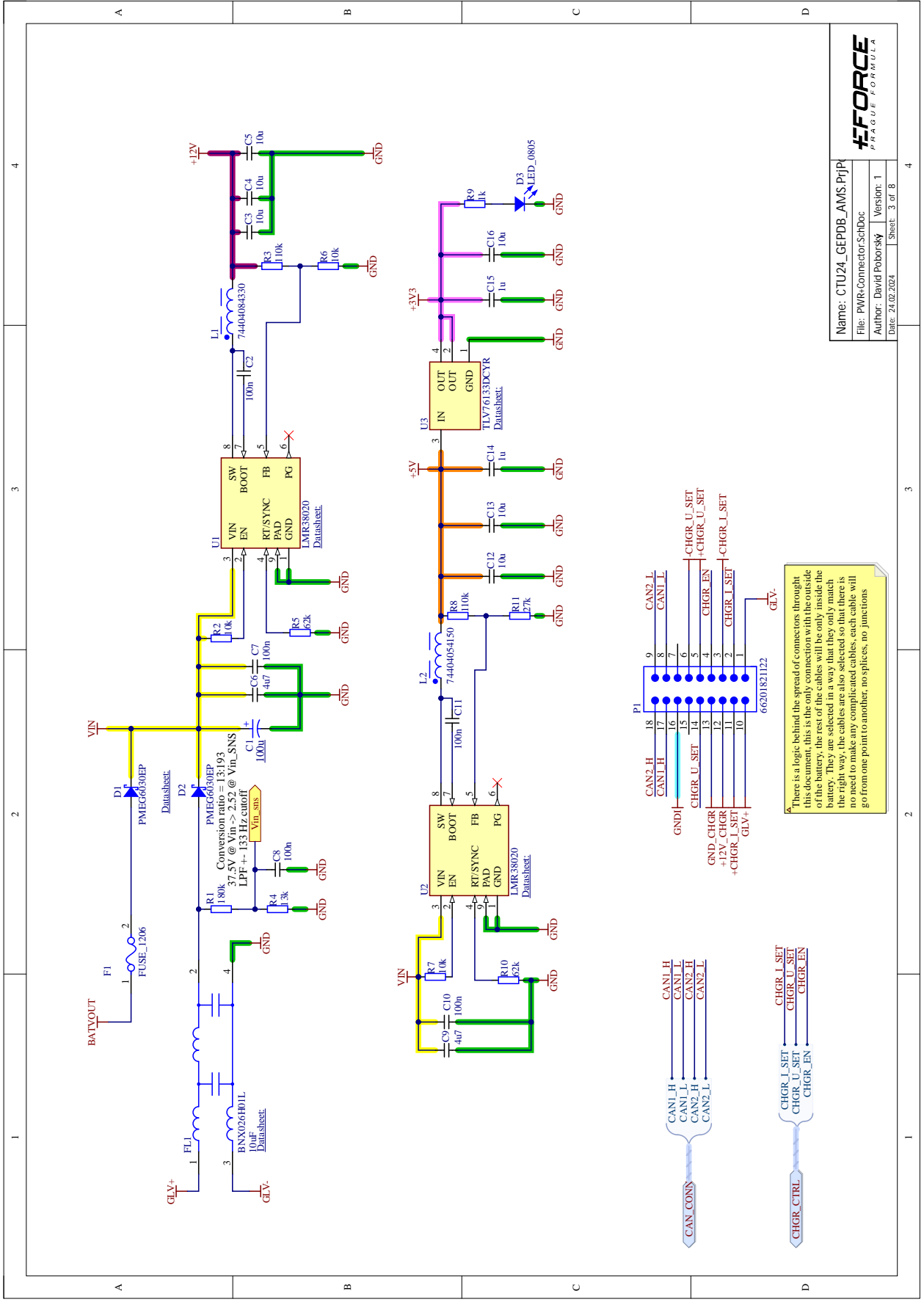
Schéma zapojení a vizualizace hlavní desky AMS



This schematic is for demonstration purposes only, there are no components here, just the top level design. Most of the text notes should be clickable and lead to the corresponding datasheets.

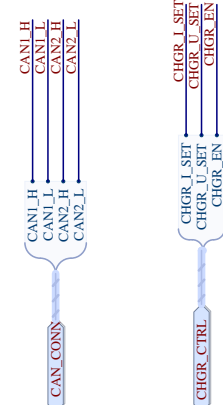
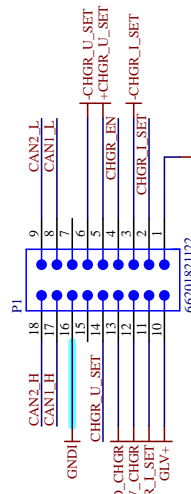
Selected cell: SI PB A942 L26 (same as ACP)
 Cell configuration: 12.3p
 Cell voltage: 0.91kWh
 Max voltage: 50.4V Min voltage: 38.4 V
 Max discharge current of each stack is 111A

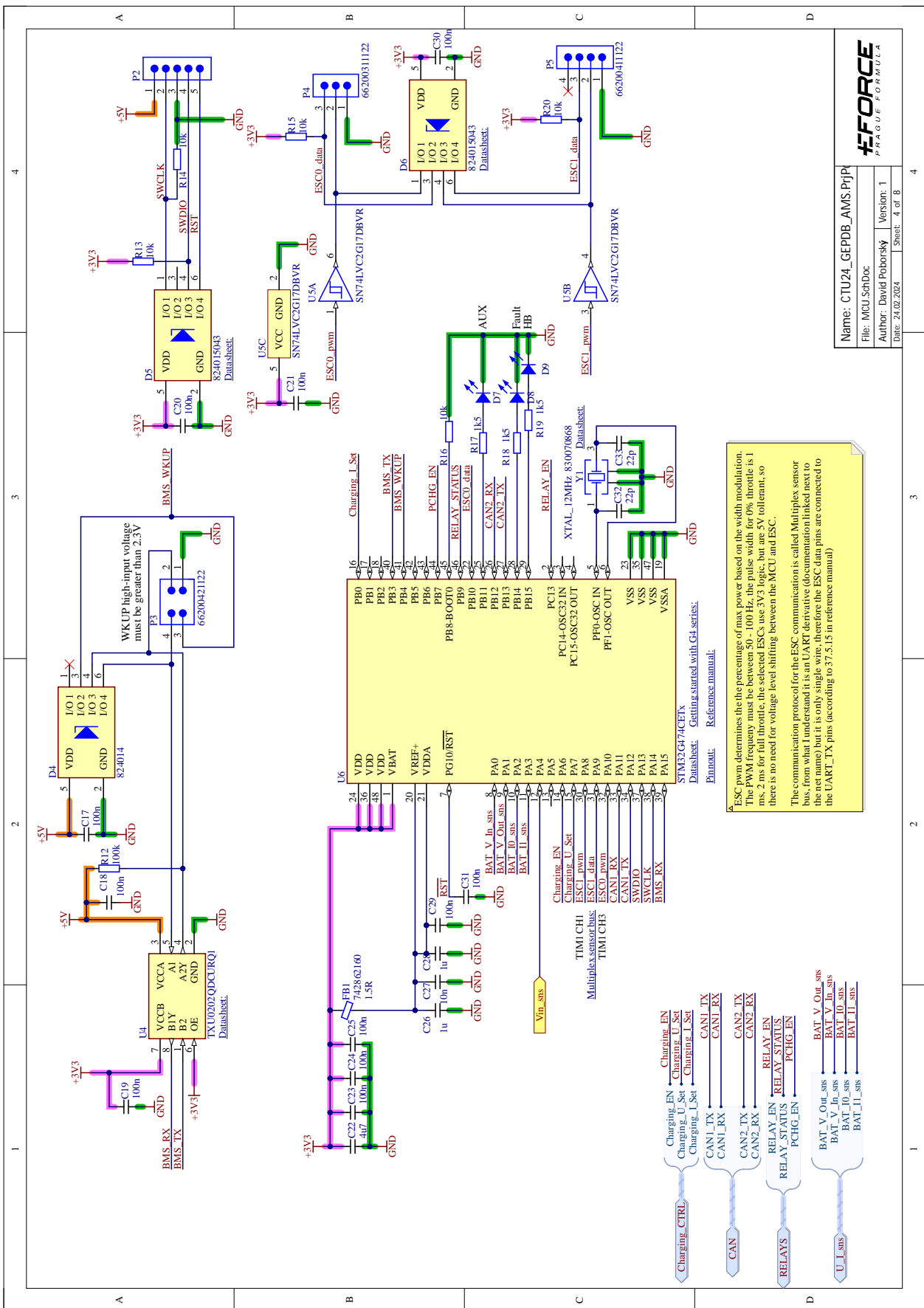




Name: CTU24_GEPDB_AMS.Prj.ppt
 File: PWR-Connector.SchDoc
 Author: David Polorsky | Version: 1
 Date: 24.02.2024 | Sheet: 3 of 8

There is a logic behind the spread of connectors through this document, this is the only connection with the outside of the battery, the rest of the cables will be only inside the battery. They are selected in a way that they only match the right way, the cables are also selected so that there is no need to make any complicated cables, each cable will go from one point to another, no splices, no junctions

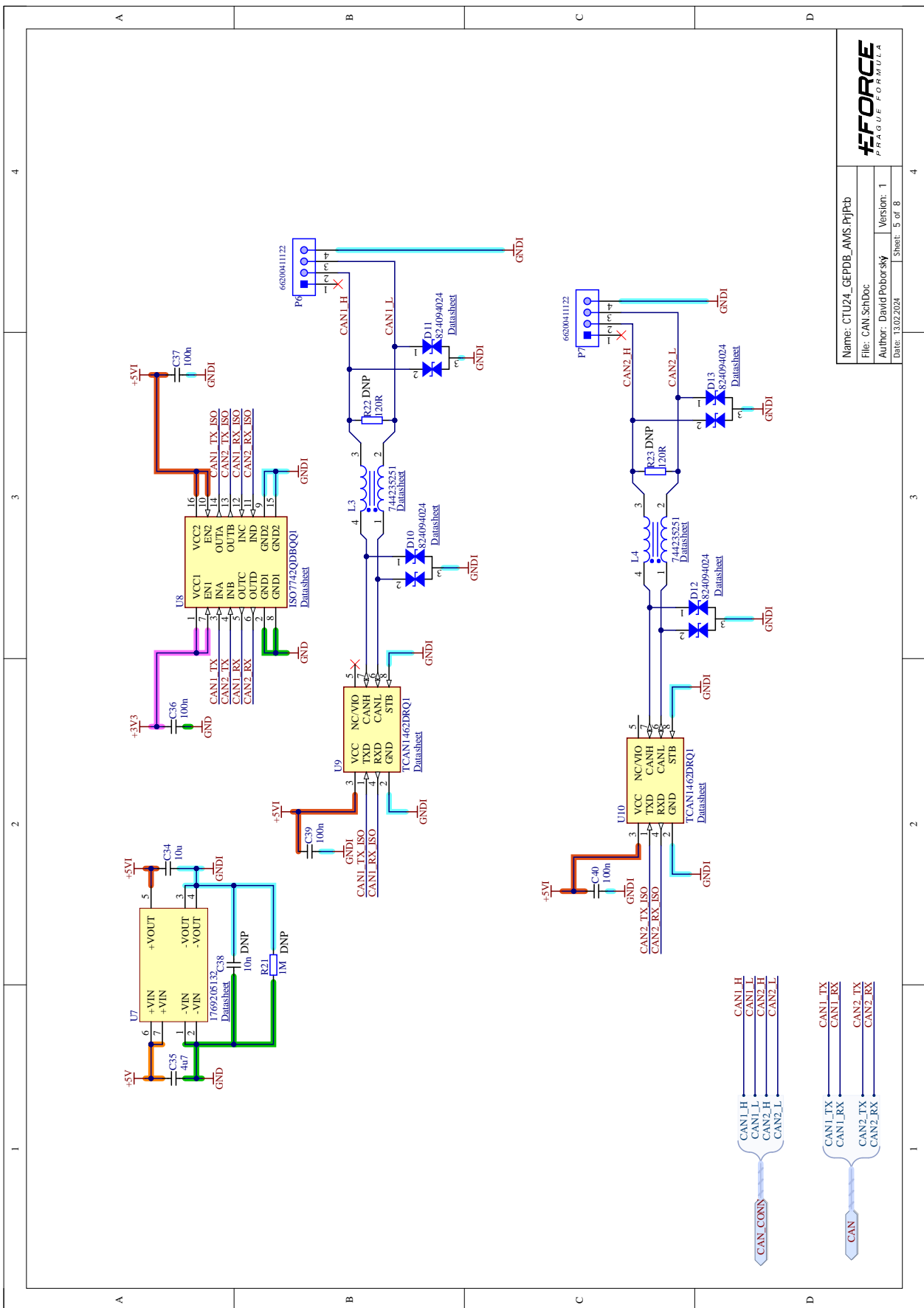




ESC pwm determines the the percentage of max power based on the width modulation. The PWM frequency must be between 50 - 100 Hz, the pulse width for 0% throttle is 1 ms, 2 ms for full throttle, the selected ESCs use 3V3 logic, but are 5V tolerant, so there is no need for voltage level shifting between the MCU and ESC.

The communication protocol for the ESC communication is called Multiplex sensor bus, from what I understand it is an UART derivative (documentation linked next to the net name) but it is only single wire, therefore the ESC data pins are connected to the UART1_TX pins (according to 3.7.5.15 in reference manual)

- Charging_CTRL
 - Charging_En
 - Charging_U_Set
 - Charging_I_Set
- CAN
 - CAN1_TX
 - CAN1_RX
 - CAN2_TX
 - CAN2_RX
- RELAYS
 - RELAY_EN
 - RELAY_STATUS
 - RELAY_STATUS
 - PCHG_EN
- U_I_sns
 - BAT_V_Out_sns
 - BAT_V_In_sns
 - BAT_I0_sns
 - BAT_I1_sns

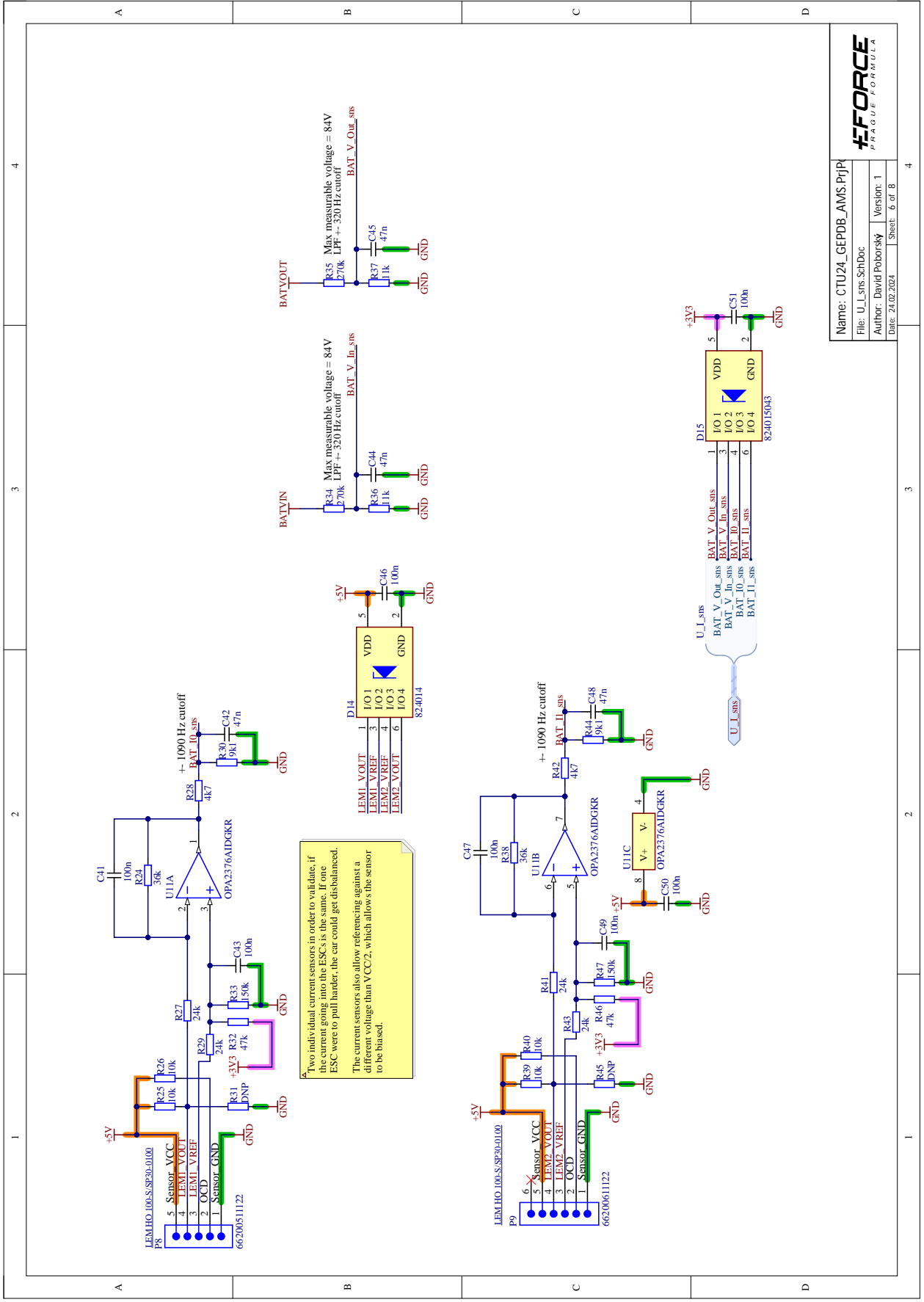


Name: CTU24_GEPDB_AMS_PjJob	
File: CAN_SchDoc	
Author: David Poborsky	Version: 1
Date: 13.02.2024	Sheet: 5 of 8



CAN1_H
CAN1_L
CAN1_RX
CAN2_H
CAN2_L

CAN1_TX
CAN1_RX
CAN2_TX
CAN2_RX

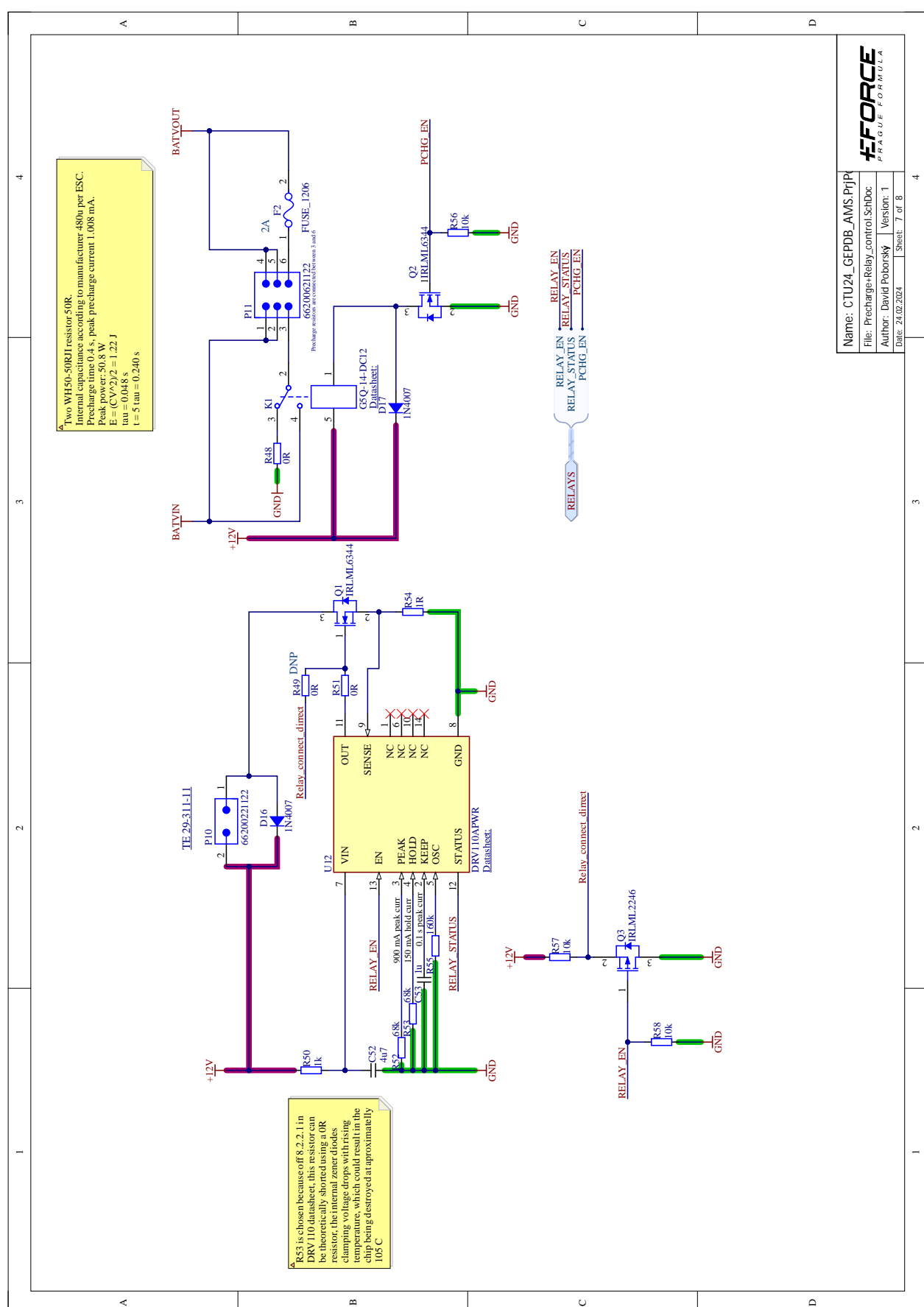


Name: CTU24_GEPDB_AMS.PrjPj
 File: U_I_sns.SchDoc
 Author: David Poborsky
 Version: 1
 Date: 24.02.2024
 Sheet: 6 of 8



1 2 3 4

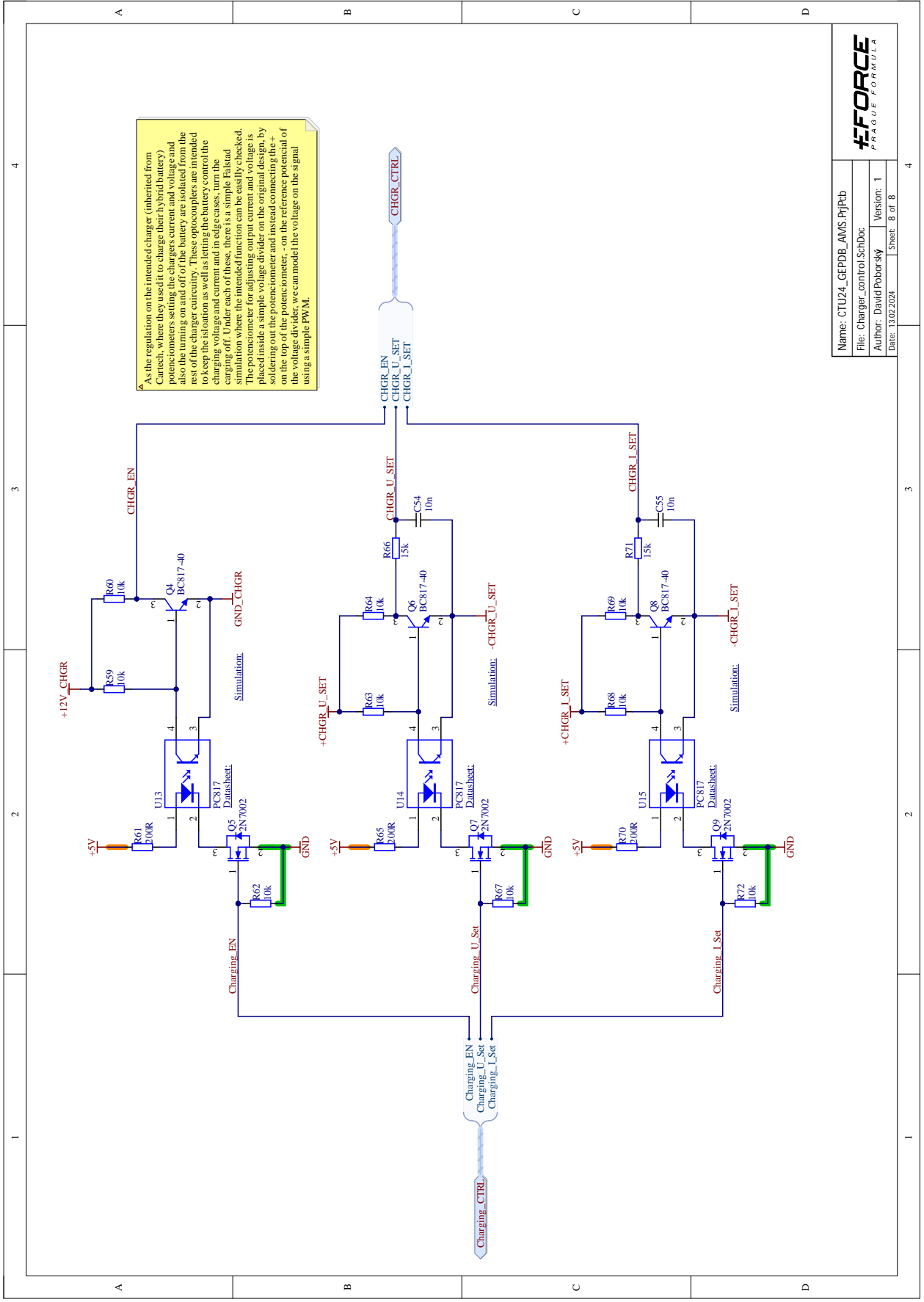
A B C D



Two WH50_50RJ resistor 50R.
 Internal capacitance according to manufacturer 480n per ESC.
 Precharge time 0.4 s, peak precharge current 1.008 mA.
 Peak power: 50.8 W
 $E = (CV^2)/2 = 1.22 \text{ J}$
 $t_{au} = 0.048 \text{ s}$
 $t = 5 \cdot t_{au} = 0.240 \text{ s}$

R53 is chosen because of 8.2.2.1 in DRV110 datasheet, this resistor can be theoretically shorted using a 0R resistor, the internal zener diodes clamping voltage drops with rising temperature, which could result in the chip being destroyed at approximately 105 C

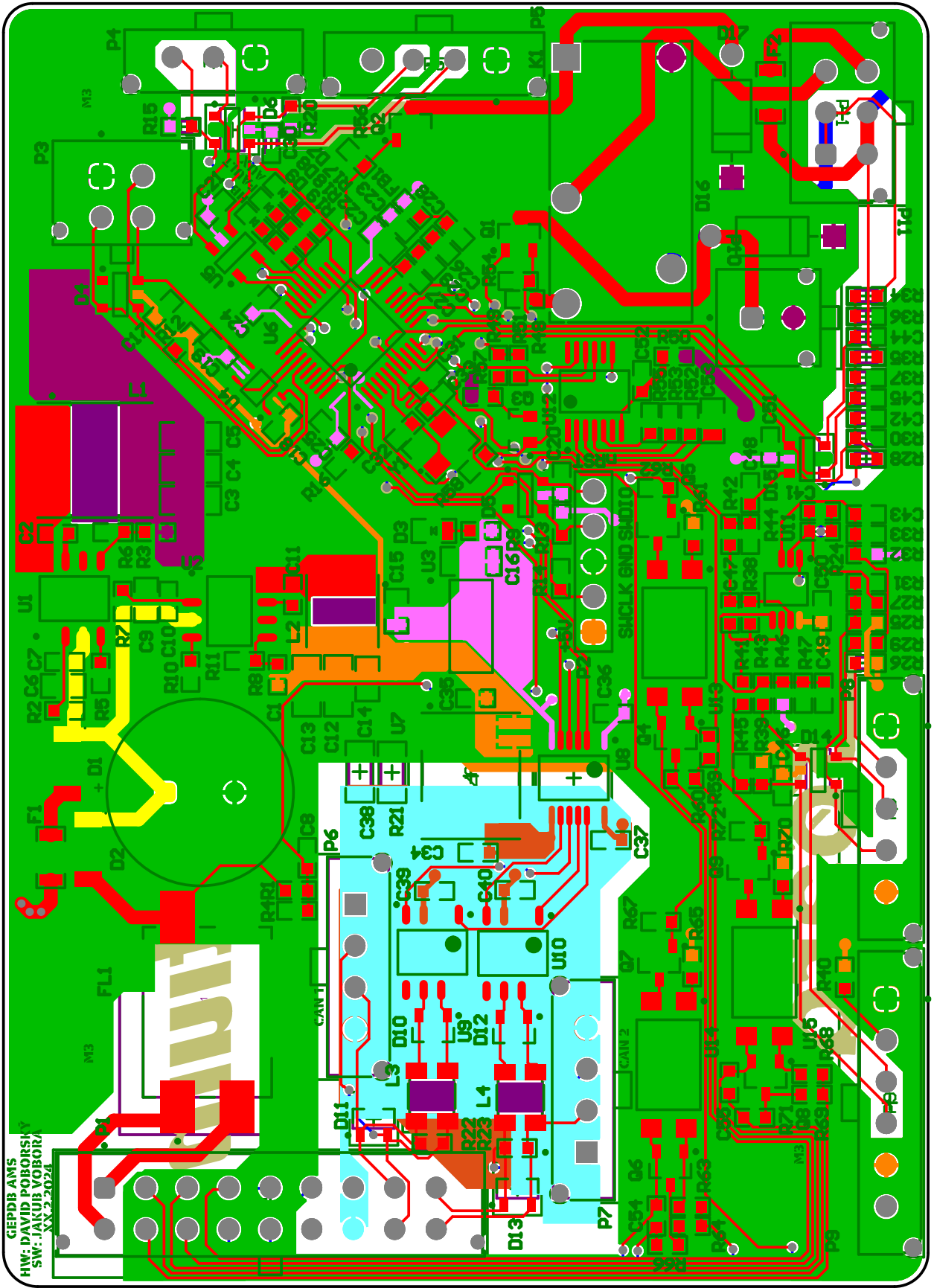


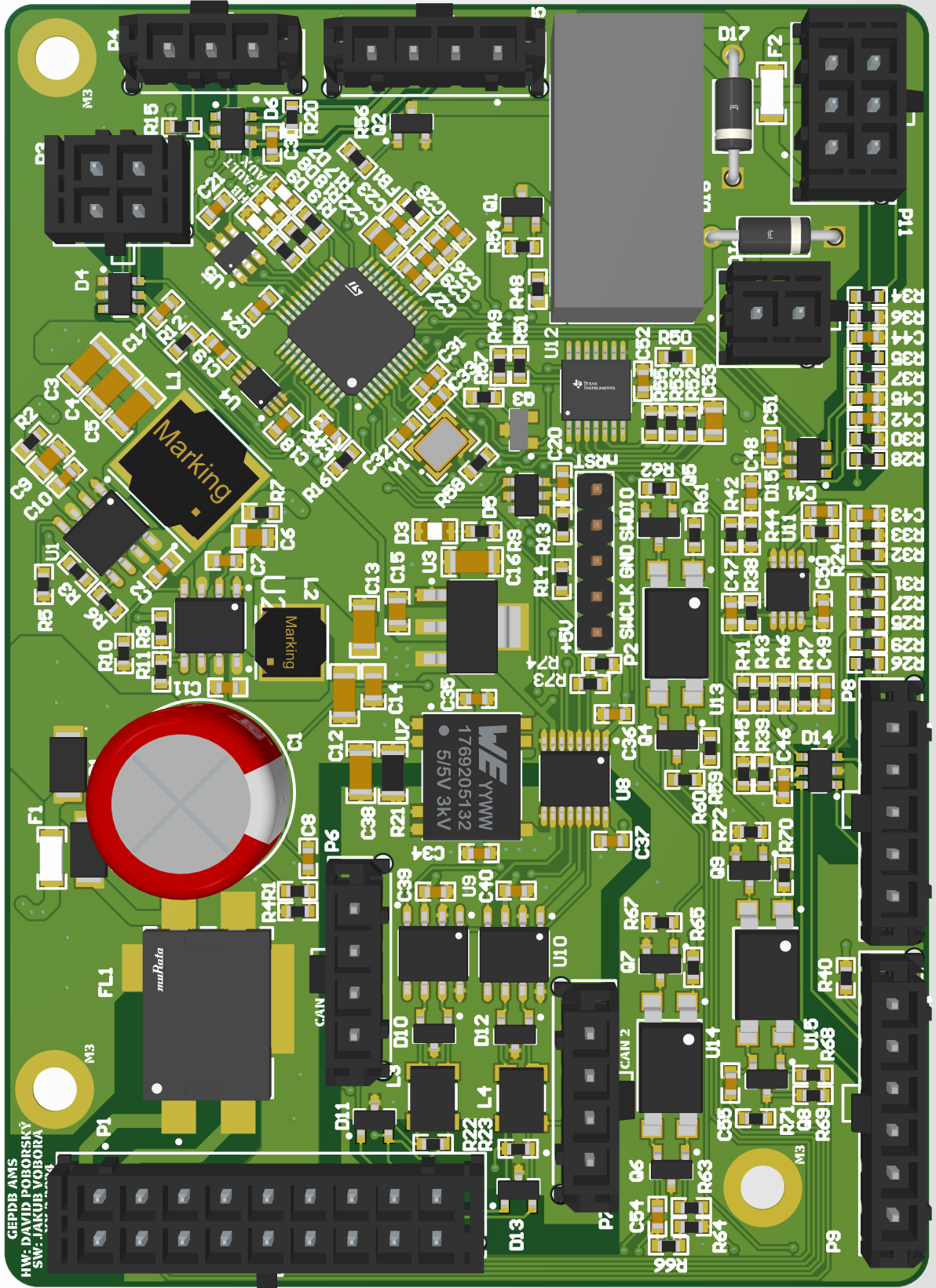


As the regulation on the intended charger (inherited from Cancheh, where they used it to charge their fly-battery) potentiometers setting the charger's current and voltage and the rest of the charger's circuitry. These potentiometers are intended to keep the situation as well as letting the battery control the charging voltage and current and in edge cases, turn the charging off. Under each of these, there is a simple Fastcad simulation where the intended function can be easily checked. The potentiometer for adjusting output current and voltage is placed inside a simple voltage divider on the original design, by soldering out the potentiometer and instead connecting the + on the top of the potentiometer, - on the reference potential of the voltage divider, we can model the voltage on the signal using a simple PWM.



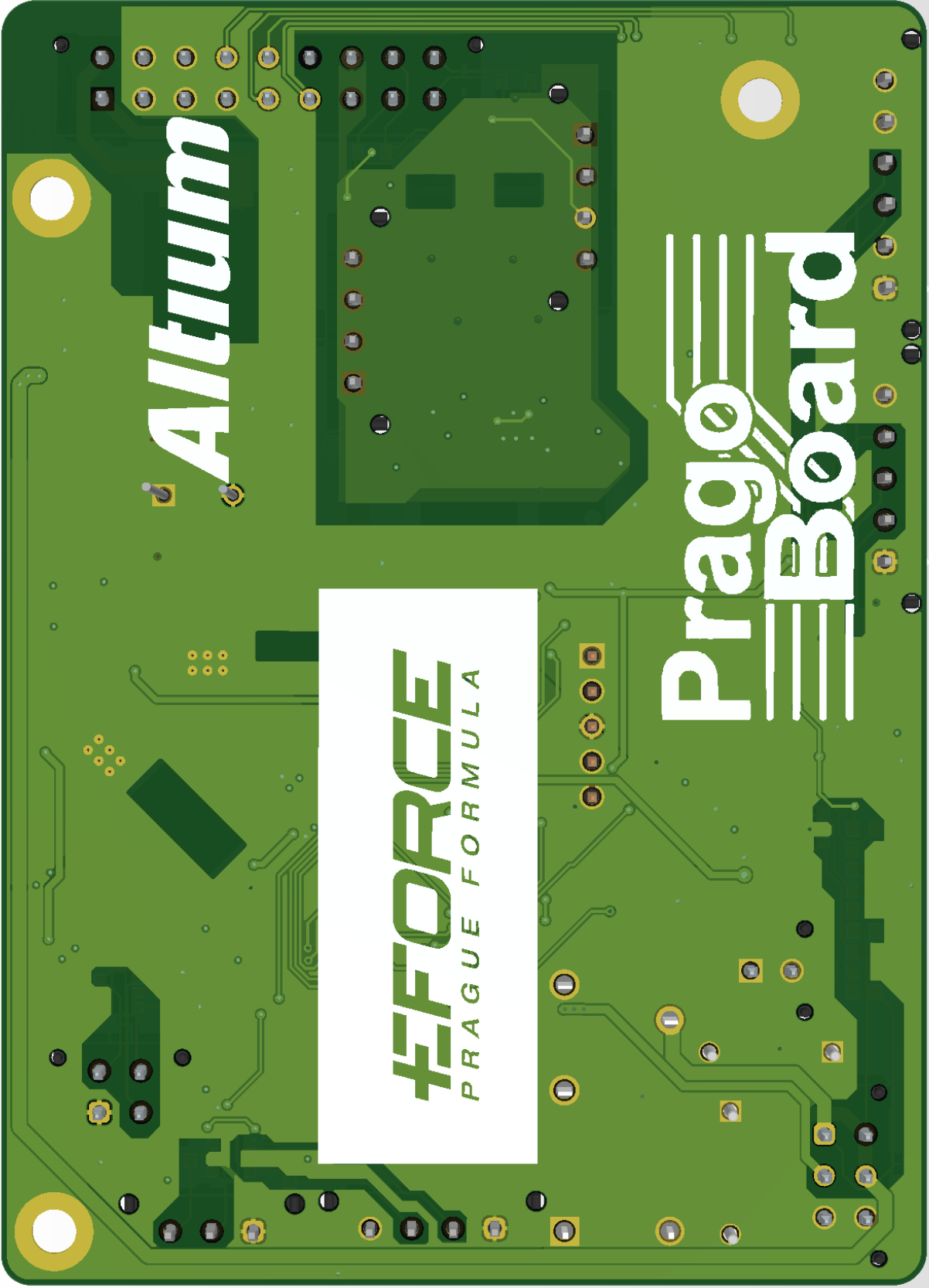
GEPDB-AMS
HW: DAVID POBORSKY
SW: JAKUB VOBOŘA
XX.2.2024





CEPDB AMS
HW: DAVID POBORSKY
SW: JAKUB VOBORA

Component labels on the PCB include:
P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9
U1, U2, U3, U4, U5, U6, U7, U8, U9, U10, U11, U12, U13, U14, U15, U16
R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10, R11, R12, R13, R14, R15, R16, R17, R18, R19, R20, R21, R22, R23, R24, R25, R26, R27, R28, R29, R30, R31, R32, R33, R34, R35, R36, R37, R38, R39, R40, R41, R42, R43, R44, R45, R46, R47, R48, R49, R50, R51, R52, R53, R54, R55, R56
C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C10, C11, C12, C13, C14, C15, C16, C17, C18, C19, C20, C21, C22, C23, C24, C25, C26, C27, C28, C29, C30, C31, C32, C33, C34, C35, C36, C37, C38, C39, C40, C41, C42, C43, C44, C45, C46, C47, C48, C49, C50, C51, C52
D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D11, D12, D13, D14, D15, D16, D17
F1, F2
N1, N2, N3
CAN, CAN 2
+5V, +5U
P2 SNCLK GND S1D10
markings: Marking, Marking
Manufacturer markings: WIMA, YAGEO, TI, TMS320F28388, LM2901, 17699205132 5/5V 3KV



Altium

PragoBoard

tFFORCE
PRAGUE FORMULA

