



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

ELEKTRICKY POHÁNĚNÝ KOMPRESOR PRO PŘEPLŇOVÁNÍ VOZIDLA KATEGORIE FORMULE STUDENT

ELECTRONIC SUPERCHARGER FOR FORMULA STUDENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Patrik Matoušek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Janoušek, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Bc. Patrik Matoušek**
Studijní program: Automobilní a dopravní inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Michal Janoušek, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Elektricky poháněný kompresor pro přeplňování vozidla kategorie Formule Student

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá problematikou aplikace elektricky poháněného kompresoru pro monopost formule student. V prostředí GT–Suite bude upraven stávající model motoru tak, aby byl plněn pomocí elektricky poháněného kompresoru. Zadání má výpočetně ověřit zda je výhodné použití elektronicky poháněného kompresoru v prostředí formule student z hlediska zlepšení výkonnosti monopostu.

Cíle diplomové práce:

- úprava modelu GT–Suite dle požadavku zadání
- stanovení požadovaného příkonu elektronického kompresoru při jednotlivých závodních disciplínách
- volba velikosti baterie potřebné pro pohon kompresoru s ohledem na výkon vozu v soutěži
- porovnání výkonnosti monopostu s elektricky poháněným kompresorem a v současné době používaným turbodmychadlem ve vztahu k času na kolo v disciplíně Autocross

Seznam doporučené literatury:

HIERETH, H. a PRENNINGER, P. Charging the internal combustion engine. New York: Springer, c2007. ISBN 321133033X.

BAINES, N. Fundamentals of turbocharging. White River Junction, Vt: Concepts NREC, 2005. ISBN 9780933283145.

WATSON, N. a M. S. JANOTA. Turbocharging the internal combustion engine. Repr. London: Macmillan, 1982. ISBN 0333242904.

MACEK, J., KLIMENT, V. Spalovací turbíny, turbodmychadla a ventilátory : Přepřínování spalovacích motorů. 4. vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006, c1988. 206 s. ISBN: 80-01-03529-8 (brož.).

HEYWOOD, J. B. Internal combustion engine fundamentals. Second edition. New York: McGraw-Hill Education, 2018. ISBN 978-1260116106.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cieľom tejto diplomovej práce je overiť aplikáciu elektrického kompresoru v monoposte kategórie Formula Student. Práca sa zaoberá tvorbou modelu spaľovacieho motora v prostredí GT-Power. Výsledné hodnoty z tohto experimentu sú neskôr aplikované pri návrhu energetického úložiska pre elektromotor kompresoru. Vo finálnej časti sú potom porovnané monoposty s konvenčným turbodúchadlom a elektrickým kompresorom v závodnej disciplíne Autocross v lap time simulácii.

KLÍČOVÉ SLOVÁ

Spaľovací motor, Turbodúchadlo, Kompresor, E-Kompresor, Formula Student, Battery pack, Lap-Time, Simulácia, Analýza

ABSTRACT

The main goal of this diploma thesis is to verify the application of the Electric compressor in the Formula Student monopost category. Diploma thesis is focused on the computational model and analysis of the combustion engine in the GT-POWER software. Outputs from this calculation are used for the design of the main parameters of battery pack. In the final part of the thesis, the monoposts with ordinary turbocharger and with the electric compressor are compared in the lap time simulation in the Autocross discipline.

KEYWORDS

Internal Combustion Engine, Turbocharger, Compressor, E-Compressor, Formula Student, Battery pack, Lap-Time, Simulation, Analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

MATOUŠEK, P. *Elektricky poháněný kompresor pro přepřívání vozidla kategorie Formula Student*. Brno, 2022. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 66 s. Vedoucí diplomové práce Michal Janoušek.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Michala Janouška, Ph.D. a s použitím informačných zdrojov uvedených v zozname.

V Brne dňa 1. mája 2022

.....

Patrik Matoušek

POĎAKOVANIE

Chcel by som poďakovať najmä svojim rodičom, rodine a príbuzným za sústavnú podporu počas štúdia. Taktiež Ing. Michalovi Janouškovi, Ph.D. za konzultácie a odborné rady pri tvorbe záverečnej práce.

Obsah

Úvod	10
1 Preplňovanie spalovacích motorov	11
1.1 História a súčasnosť preplňovania	11
1.2 Metódy preplňovania	13
1.2.1 Dynamické preplňovanie	13
1.2.2 Mechanické kompresory	14
1.2.3 Konvenčné turbodúchadlá	16
1.3 Termodynamika preplňovania	19
2 Použitie preplňovania v kontexte súťaže Formula Student	21
2.1 Motor monopostu Dragon – Prirodzené sanie	22
2.2 Motor monopostu Dragon – Preplňovanie konvenčným turbodúchadlom	23
2.2.1 Matching turbodúchadla a motoru	24
3 Garrett 48V Electric Compressor	28
3.1 Princíp fungovania „e-compressoru“	28
3.2 Pozícia a umiestnenie v sacom trakte	29
4 Výpočtová časť	31
4.1 Termodynamika modelu	31
4.1.1 Výpočtový model – Konvenčné turbodúchadlo	32
4.1.2 Výpočtový model – E-Compressor	35
4.2 Energetika	42
4.2.1 Výpočet spotreby energie – Konvenčné turbodúchadlo	43
4.2.2 Výpočet spotreby energie – Elektrický kompresor	45
4.2.3 Návrh „Battery Packu“	47
4.3 LapTime simulácia a reálne časy	52
4.3.1 ChassisSim	54
4.3.2 Race-Studio Analysis	58
Záver	63
Zoznam použitých skratiek a symbolov	66

ÚVOD

Preplňovanie spaľovacích motorov je niečo, čo ich sprevádza takmer od ich počiatkov. Od leteckých motorov sa postupne dostalo až k osobným automobilom, spočiatku za účelom dosiahnutia maximálneho špičkového výkonu, avšak postupne s dobou najmä za účelom zvyšovania efektivity týchto piestových strojov.

Práca sa v prvej časti zaoberá spomínaným vývojom preplňovania spaľovacích motorov, aké výhody prináša a taktiež jeho stručný prierez históriou až po súčasne používané riešenia v osobných automobiloch. Hlavnou témou práce je výpočtové osadenie elektrického kompresoru do monopostu triedy Formula Student. V teoretickej časti sa práca zaoberá aj podstatou samotného preplňovania. Vychádza pri tom zo všeobecných poznatkov.

V teoretickej časti sa práca venuje aj princípu samotného elektronického kompresoru, ktorý má byť náhradou za konvenčné turbodúchadlo. Porovnáva ho s osvedčenými konvenčnými riešeniami, predstavuje jeho základnú konštrukciu a možnosti osadenia v automobiloch. Obdobne práca opisuje aktuálne používaný motor v monoposte Dragon, za účelom predstavenia aktuálneho konštrukčného riešenia a ako zdroj informácií pre výmenu za elektronický kompresor, ktorou sa práca zaoberá vo výpočtovej časti.

Výpočtová časť predstavuje úpravu výpočtového modelu spaľovacieho motora Dragon, ktorý je za účelom porovnania vytvorený v dvoch variantách – s konvenčným turbodúchadlom a elektronickým kompresorom. Výkonové charakteristiky získané z tohto experimentu sa aplikujú neskôr v ďalších fázach práce. Ďalším z cieľov práce je návrh potrebného energetického úložiska, za týmto účelom bude vytvorený výpočtový model v prostredí GT-Power tak, aby sme získali potrebné vstupné údaje pre návrh samotného *battery packu*. V neposlednom rade je potrebné teoreticky vypočítané hodnoty preniesť do praktického využitia. Preto budú vyššie spomínané výkonové charakteristiky použité ako vstupné hodnoty pre softvér ChassisSim, za pomoci ktorého budú vypočítané finálne časy na kolo na konkrétnej závodnej trati. Táto simulácia ponúkne priame porovnanie oboch monopostov, jednak s konvenčným turbodúchadlom a aj s elektronickým kompresorom.

1 PREPLŇOVANIE SPAĽOVACÍCH MOTOROV

Hlavným cieľom preplňovania spaľovacích motorov je navyšovanie efektivity procesu, pri dodržaní stanoveného zdvihového objemu alebo bez potreby zvyšovania otáčok motora [1]. Odhliadnuc od výkonových charakteristík motora, tento trend je v dnešnej dobe stanovený predovšetkým emisími požiadavkami na spaľovacie motory.

Princíp znižovania emisií je úzko spätý s takzvaným „downsizingom“, a teda znižovaním zdvihového objemu motora a jeho pracovných otáčok, pričom cieľom je navyšovať za týchto podmienok plniaci tlak a tým znižovaťmernú efektívnu spotrebu paliva za cieľom redukcie škodlivých látok vzniknutých v procese spaľovania [1].

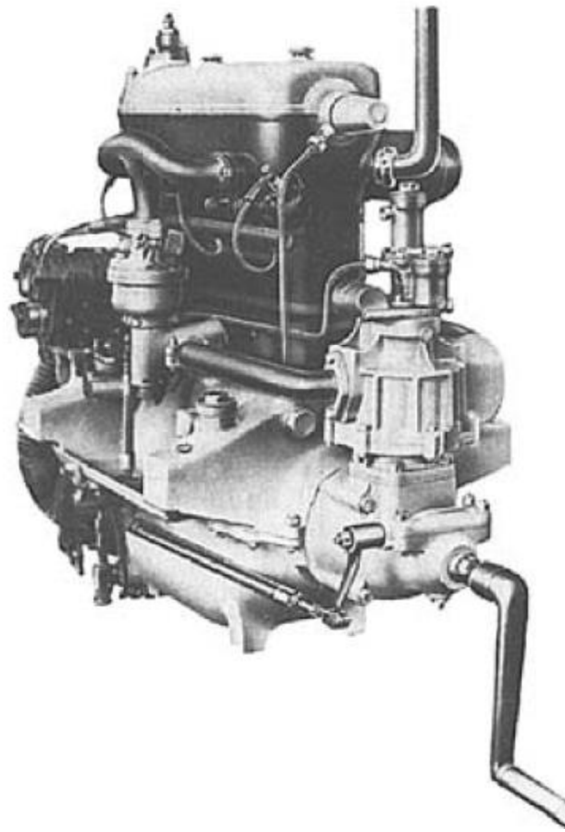
1.1 HISTÓRIA A SÚČASNOSŤ PREPLŇOVANIA

V súčasnosti sa pre pohon osobných automobilov a nákladných áut používajú vo veľkej prevaha práve vysokootáčkové spaľovacie motory. Táto prevaha daného pohonu je daná jednoduchým manažmentom pohonnej jednotky. Hlavnými atribútmi sú energetická hustota použitého paliva, cena, spoľahlivosť a flexibilita v rôznych pracovných podmienkach [2].

V počiatkoch bolo preplňovanie spaľovacieho motora použité pre zaistenie potrebného výkonu vo vysokých nadmorských výškach u leteckých motorov a neskôr na krátkodobý výkon u drahých osobných automobilov. Približne 30 rokov aplikácie bolo potrebných k tomu, aby bol tento krok braný za efektívny z finančného ale aj emisného hľadiska [2].

V leteckej aplikácii počas druhej svetovej vojny boli používané mechanicky poháňané kompresory. Spočiatku tieto motory dosahovali hodnoty stredného efektívneho tlaku do 23bar [2].

Od roku 1920 sa začali objavovať preplňované motory v oblasti automotive, najskôr v závodných aplikáciách, neskôr však aj v luxusných športových vozidlách za cieľom dosiahnutia vysokého krátkodobého výkonu. Vo väčšine prípadov sa jednalo o preplňovanie jedno alebo dvoj-stupňovým Roots kompresorom. Na Obr. 1 Motor Daimler osobného automobilu s kompresorom Roots z roku 1921 [2] môžeme vidieť motor osobného automobilu s výkonom 40/60 koní o objeme 2,6 litra z roku 1921 skonštruovaného výrobcom Daimler [2].

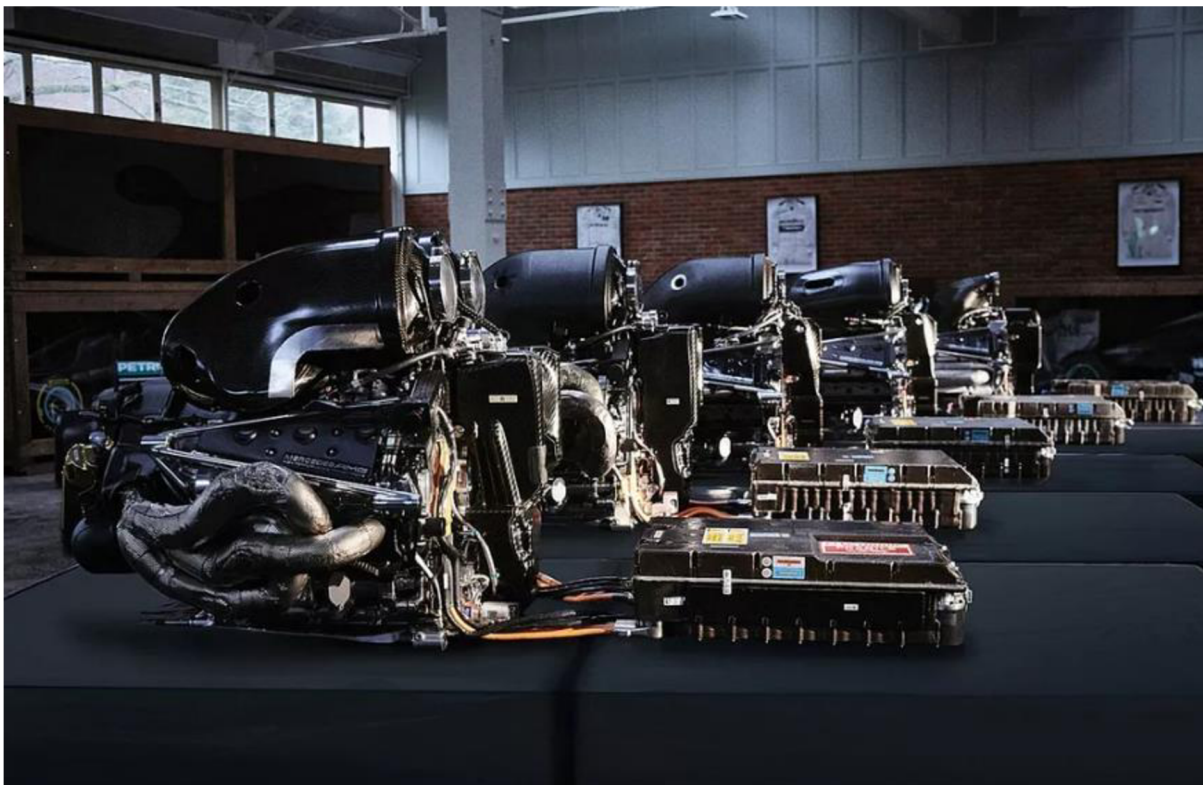


Obr. 1 Motor Daimler osobného automobilu s kompresorom Roots z roku 1 921 [2]

Turbodúchadlá využívajúce k preplňovaniu kinetickú energiu výfukových plynov boli na americký trh privedené okolo roku 1960 [2]. A teda kým mechanické preplňovanie je úzko späté s vynálezom samotných spaľovacích motorov, turbodúchadlá sa do popredia u osobných automobilov dostali až v priebehu posledných 30/40-tich rokov [3].

V roku 1962 nastalo prvé použitie turbodúchadla v osobnom automobile [2]. O približne 15 rokov neskôr v roku 1978 sa do produkcie dostal prvý masovo vyrábaný automobil s dieslovým motorom, ktorý bol preplňovaný turbodúchadlom [3].

V súčasnosti za vrchol preplňovania a efektivity využitia potenciálu môžeme považovať súčasné monoposty F1. Jedná sa o hybridné pohonné jednotky, časť spaľovacieho motora tvorí motor V6 o objeme 1,6 litru, ktorý je preplňovaný E-Turbodúchadlom a v spolupráci s elektrickou časťou pohonnej sústavy produkuje až 1000 koní. Na Obr. 2 môžeme vidieť pohonné jednotky tímu Mercedes AMG od roku 2014 po rok 2018.



Obr. 2 F1 Motory tímu Mercedes AMG F1 v rokoch 2014-2018 [4]

1.2 METÓDY PREPLŇOVANIA

V priebehu histórie bolo aplikovaných niekoľko konštrukčných riešení za cieľom zvýšenia plniaceho tlaku vzduchu do motora. V nasledujúcich kapitolách sú popísané základné typy a princípy, ktoré sa v dnešnej dobe používajú k preplňovaniu spaľovacích motorov.

1.2.1 DYNAMICKÉ PREPLŇOVANIE

Princíp dynamického preplňovania sa uplatňuje v použití sacieho potrubia s variabilnou dĺžkou. Je možné dosiahnuť potrebnej hodnoty točivého momentu v takmer celej otáčkovej charakteristike spaľovacieho motora. Sacie potrubie disponuje variabilnými členmi, ktoré sa prepínajú na základe vstupov ako sú napr. pracovné otáčky, zaťaženie alebo uhol natočenia škrtiacej klapky.

Dynamické preplňovanie je jedným z najjednoduchších princípov. Hlavnou doménou je využitie dynamiky nasávaného vzduchu.

Podľa konštrukcie sa dá rozdeliť do dvoch základných typov:

- a) pulzné – využitie tlakových kmitov,
- b) rezonančné preplňovanie.

PULZNÉ PREPLŇOVANIE

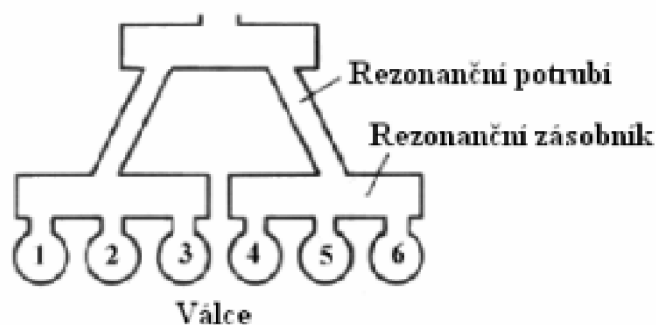
Princíp pulzného preplňovania je v podstate rovnaký ako pri rezonančnom, hlavným rozdielom je aplikácia danej konštrukcie. Pulzné preplňovanie sa vo väčšine prípadov využíva pri 4-valcových motoroch so systémom variabilnej dĺžky sacích kanálov.

Princíp spočíva v ladení dĺžok rezonančného potrubia. Dĺžka je nastavená tak, aby sa frekvencia kmitov, ktorá je budená nasávaním motora rovnala vlastnej frekvencii vzduchového stĺpca v potrubí.

Týmto spôsobom je možné výkon motora zdvihnúť o 10 až 35 %, pričom tento princíp preplňovania je vhodný pre vysokootáčkové motory [5].

REZONANČNÉ PREPLŇOVANIE

Primárne využitie má u 6 a 12-valcových motorov. Valce sú rozdelené do dvoch skupín, pričom sú prepojené potrubiami s rezonančnou komorou. Schéma rezonančnej sústavy 6-valcového motora je vyobrazená na Obr. 3 [5].



Obr. 3 Schéma rezonančného preplňovania u šesťvalcového motora [6]

1.2.2 MECHANICKÉ KOMPRESORY

Mechanický kompresor je dúchadlo, ktoré používa k svojmu pohonu kľukový hriadeľ motora, za pomoci remeňa alebo ozubeného prevodu.

Táto skutočnosť poukazuje na fakt, že oproti turbodúchadlu kompresor pre svoj pohon odoberá určitý výkon zo samostatného spalovacieho motora. Pri rovnakom plniacom tlaku sa teda na samotné kolesá dostane menší výkon. Ďalšou nevýhodou oproti konvenčnému turbodúchadlu je napríklad zvýšená hlučnosť počas prevádzky, ktorá vzniká pri vzájomnom zábere niektorých mechanickým častí.

Hlavnou výhodou môže byť reakcia na stlačenie plynového pedálu, bez prítomnosti efektu zvaného „turbodiera“. Motor sa teda principiálne správa ako atmosférický s väčším objemom a výkonom [7].

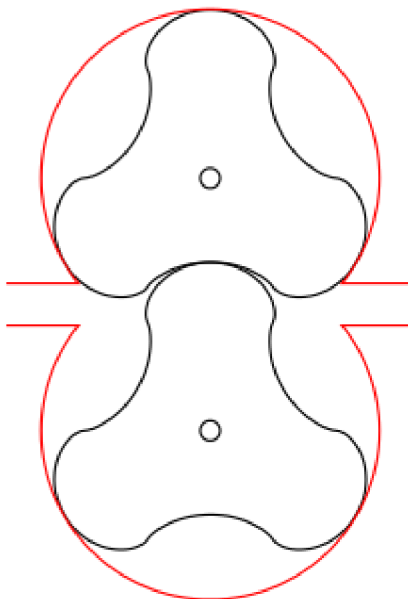
V automobiloch sa môžeme najčastejšie stretnúť s dvoma konštrukčnými usporiadaniami mechanického kompresoru:

- a) Rootsove dúchadlo,
- b) Lysholmovo dúchadlo.

ROOTSOVE DÚCHADLO

Pri tomto type mechanického dúchadla nedochádza k internému stlačovaniu nasávaného vzduchu, vzduch je stlačený až za výstupom kompresoru v sacom potrubí motora.

Otáčky rotorov sú vo väčšine prípadov dvojnásobné oproti otáčkam motora, synchronizácia rotorov je uskutočnená pomocou ozubených kolies. Dúchadlo je taktiež samomazacie a teda nepotrebuje spoločný olejový obeh s motorom [8]. Schému Rootsovho dúchadla môžeme vidieť na Obr. 4.



Obr. 4 Schéma Rootsovho dúchadla [9]

LYSHOLMOVÉ DÚCHADLO

Tento typ dúchadla principiálne vychádza z dúchadla typu Roots. Hlavným rozdielom je, že dochádza k internému stlačovaniu nasávaného vzduchu. Ku kompresii dochádza vďaka dvom rotorom, ktoré sa otáčajú voči sebe a sú poháňané kľukovým hriadeľom pomocou napr. remeňa.

Výhodou tohto riešenia je vysoká vnútorná kompresia, teda dosiahnutie veľkých tlakových pomerov, vďaka čomu narastá účinnosť, ktorá sa v nízkych otáčkach pohybuje v oblasti 85 %. So zvyšujúcimi otáčkami klesá v dôsledku mechanickej účinnosti [8].

Schéma a princíp fungovania je vyobrazený na Obr.5.



Obr. 5 Schéma a princíp fungovania Lysholmovho dúchadla [8]

1.2.3 KONVENČNÉ TURBODÚCHADLÁ

Princíp fungovania turbodúchadla spočíva podobne ako u kompresoru v točivom pohybe rotačných častí. Hlavným rozdielom je zdroj energie pre vytváranie spomínaného pohybu rotorových častí. Kým kompresor je mechanicky previazaný s mechanickou časťou motora – kľukovým hriadeľom, turbodúchadlo využíva efektívnejší zdroj energie – kinetickú a tepelnú energiu, ktorá je obsiahnutá vo výfukových plynch a ktorá by bez použitia turbodúchadla nenašla svoje využitie v procese preplňovania motora.

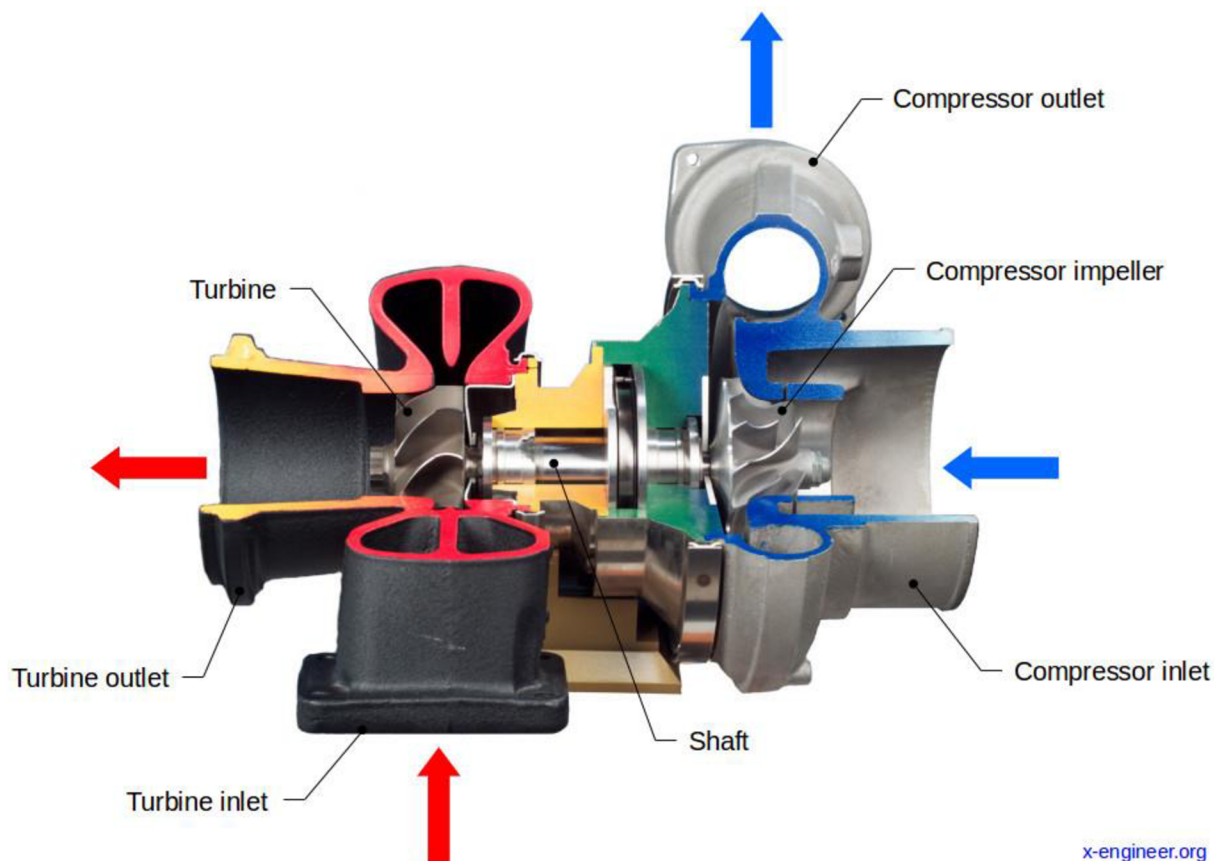
Týmto spôsobom turbodúchadlo zlepšuje energetickú bilanciu motora a taktiež navyšuje termickú účinnosť, ktorá vedie k zníženiu spotreby paliva.

Ako už bolo vyššie v práci spomínané, turbodúchadlo je osadené za účelom zlepšovania momentovej charakteristiky a jazdných vlastností. V súčasnosti je však využívané najmä za účelom zvyšovania efektivity práce samotného spaľovacieho motora, čo má za následok tvorbu nižšej emisnej stopy celého vozidla.

Konvenčné turbodúchadlo môžeme rozdeliť do troch základných častí:

- a) Kompresorová časť – Kompresorová skriňa,
- b) Turbínová časť – Turbínová skriňa,
- c) Centrálna skriňa – Centrálny „housing“.

Vyobrazenie zostavy turbodúchadla môžeme vidieť na Obr. 6.



Obr. 6 Zostava turbodúchadla – rez [10]
 Červená časť – Turbínová
 Modrá časť – Kompresorová
 Žltozelená časť – Centrálny housing/ložisková skriňa

KOMPRESOROVÁ SKRIŇA A KOMPRESOR

Kompresorová skriňa a kompresor, inak povedané sacia časť turbodúchadla, slúži k nasávaniu a následnému stláčaniu nasávaného vzduchu.

Ako materiál je väčšinou použitý hliník a jeho zliatiny, ako pri samotnom housingu tak aj v prípade kompresorového koliečka.

TURBÍNOVÁ SKRIŇA A TURBÍNA

Turbínová skriňa má za úlohu zachytávať výfukové plyny zo spaľovacieho procesu a čo najefektívnejšie ich presmerovať na turbínové koliečko tak, aby bol využitý čo najväčší potenciál tepelnej a kinetickej energie výfukových plynov.

Vzhľadom na vysoké pracovné teploty daného uzlu, až 900 °C, je ako materiál používaná liatina pre turbínový housing a na výrobu turbínového koliečka sa používa napr. materiál Inconel. Nutno podotknúť, že v prípade zážihových motorov teploty presahujú aj 1 000 °C.

CENTRÁLNY HOUSING A JEHO ČASTI

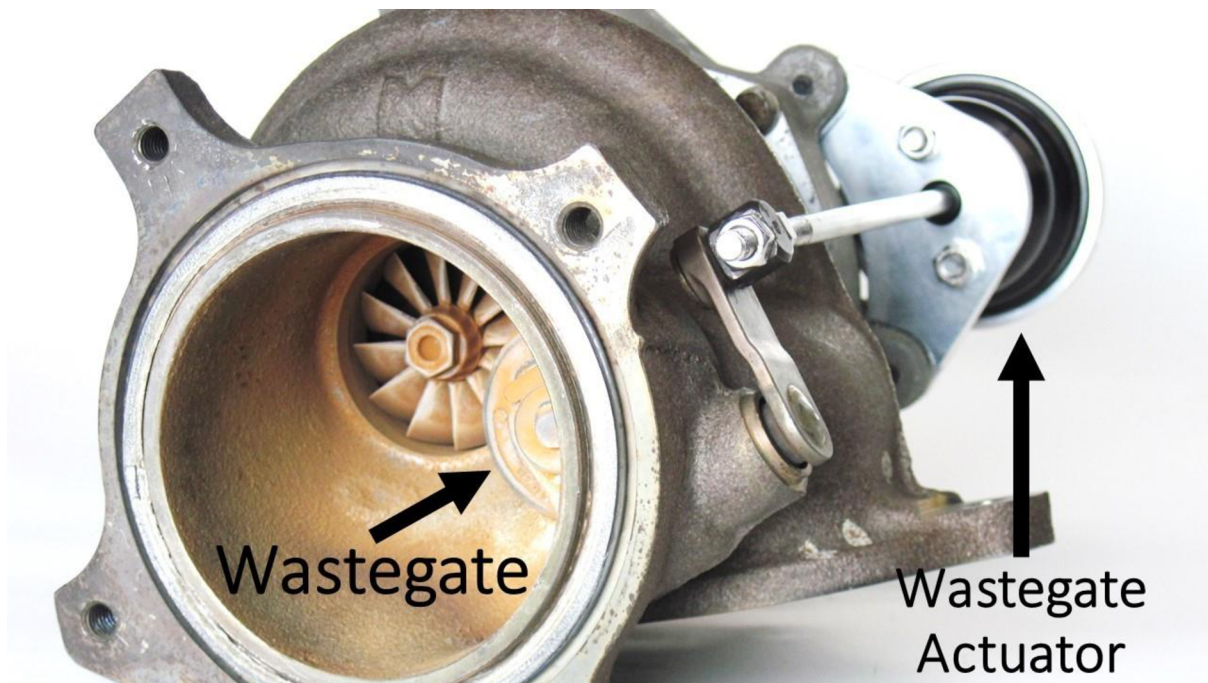
K prepojeniu vyššie spomínaných skriň a koliečok sa používa tzv. centrálny housing, resp. ložisková skriňa. V nej je uložený hriadeľ, ktorý spája turbínové a kompresorové koliečko. Ten je osadený v guľôčkových alebo klzných ložiskách podľa potreby. Do samotného

housingu sú vyvrtané/vyfrézované drážky, ktoré zabezpečujú ako mazanie ložísk, tak aj chladenie samotného uloženia.

REGULÁCIA PLNIAČEHO TLAKU

Prvým a najzákladnejším spôsobom regulácie plniaceho tlaku je škrtiaca klapka. Tá obmedzuje množstvo vzduchu, ktoré sa následne dostáva do spaľovacieho priestoru. Tento typ regulácie je však skôr spätý s reguláciou samotnej pohonnej jednotky ako takej, členy popisujúce reguláciu turbodúchadla sú popísané v odsekoch nižšie.

Druhým najpoužívanejším regulovaním plniaceho tlaku je obtokový ventil – Wastegate. Ten pri vyšších otáčkach motora smeruje výfukové plyny mimo turbínu, čo má za následok nižšie otáčky celej zostavy spolu s kompresorovým koliečkom. V dôsledku toho sme nepriamo schopní regulovať plniaci tlak na požadovanú hodnotu. Týmto spôsobom vieme rovnako dosiahnuť maximálne otáčky turbodúchadla už pri nižších otáčkach motora. V súčasnosti sa môžeme stretnúť aj s prípadmi, kedy je ako akčný člen používaný elektronický aktuátor, ktorý na základe vstupov z jednotlivých snímačov a požadovaných hodnôt plniaceho tlaku reguluje otváranie a zatváranie samotného ventilu Wastegate. Taktiež stráži limitnú hodnotu otáčok turbodúchadla. Používaný je externe, a teda mimo turbínového stupňa. Týmto spôsobom sme schopní pracovať s rôznymi stratégiami preplňovania. Jeho výhodami sú možnosť nezávislého ovládania vzhľadom na plniaci tlak, presnejšie riadenie bez oscilácií a taktiež spätná väzba údajov o polohe aktuátora. Konvenčnú reguláciu pomocou obtokového kanálu Wastegate môžeme vidieť na Obr. 7.



Obr. 7 Obtokový kanál Wastegate [11]

V poslednej dobe je často používaným riešením regulácie plniaceho tlaku technológia variabilnej geometrie lopatiek. Princíp fungovania je založený na možnosti natáčania statorových lopatiek, ktoré usmerňujú výfukové plyny na turbínové koliečko.

Toto má za následok efektívnejšie využitie kinetickej energie výfukových plynov vo väčšom rozsahu pracovných otáčok. Zmenšováním a zväčšováním prierezu, ktorým prúdia výfukové plyny, vieme regulovať a usmerňovať tlak pôsobiaci na lopatky turbínového koliečka.

1.3 TERMODYNAMIKA PREPLŇOVANIA

Všeobecne platí, že produkovaný výkon motoru závisí na tom, koľko paliva sa spáli v jednotlivých valcoch pri spaľovacom procese.

V motore s prirodzeným saním je zmes paliva a vzduchu nasávaná v dôsledku pohybu piestu vo valci smerom nadol. Stechiometrický pomer je pre benzín 14,7 : 1 a tento údaj reprezentuje ideálny pomer zmesi vzduchu a paliva vo valci. Pokiaľ sa nám do spaľovacieho procesu podarí dostať viac vzduchu, tak to za cieľom dodržania stochiometrického pomeru znamená aj viac paliva, a teda generovaný vyšší výkon zo spaľovacieho procesu.

Pre správne nastavený proces v spaľovacom priestore je nutné zväžiť hneď niekoľko parametrov, akými sú napr. tvar spaľovacieho priestoru a teplota v ňom, tlak pred zážihom paliva, kompresný pomer. Pri zlej konfigurácii vyššie uvedeného môžu ako nežiadúci jav vznikáť samozápaly a v motore sa začne proces detonačného horenia. Správne nastavenie týchto parametrov taktiež závisí od použitého paliva v spaľovacom procese, napr. etanol ako palivo má menšie sklony k detonačnému horeniu než samotný benzín [8].

Základné parametre pre výkon spaľovacieho motoru sú [12]:

- a) Energia dodaná palivom do spaľovacieho procesu,
- b) Účinnosť premeny energie na mechanickú prácu.

Do závislosti nám dáva tieto dve veličiny rovnica pre užitočný výkon motora [8,12]:

$$P_e = Q_p \cdot \eta_e = H_u \cdot m_p \cdot \eta_e \quad (1)$$

Energiu dodanú do procesu palivom vieme taktiež zapísať súčinom spodnej výhrevnosti paliva (H_u) a hmotnosti privedeného paliva (m_p).

Ako je už spomenuté vyššie, pre dodržanie potrebného stochiometrického pomeru je pre spálenie určitého množstva paliva potrebná odpovedajúca hmotnosť vzduchu, ktorú popisuje rovnica nižšie [8,12]:

$$m_p = \frac{m_s}{\lambda \cdot L_t} = V_z \cdot \frac{n_m}{60 \cdot i} \cdot \rho_s \cdot n_{pl} \cdot \frac{\varepsilon + (\alpha - 1)}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{1}{\lambda \cdot L_t} \quad (2)$$

Do rovnice (2) zároveň vstupujú nasledujúce veličiny: hmotnosť zmesi v pracovnom valci (m_s), súčiniteľ prebytku vzduchu (λ) a uhol natočenia kľukového hriadeľa (L_t). Tento tvar rovnice môžeme potom ďalej rozviesť za použitia ďalších veličín, a to v poradí a menovite: zdvihový objem (V_z) motora, počet otáčok motora v jednom pracovnom obehu (n_m), hustota vzduchu v saní (ρ_s), plniaca účinnosť (n_{pl}), kompresný pomer (ε), súčiniteľ prepláchnutia spaľovacieho priestoru (α).

Dosadením rovnice (2) do rovnice (1) dostávame nižšie uvedenú závislosť [8,12]:

$$P_e = V_z \cdot \frac{n_m}{60 \cdot t} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{H_u}{L_t} \cdot \frac{\rho_s \cdot n_{pl} \cdot \eta_e}{\lambda} \quad (3)$$

Za dodržania rovnakých rozmerov motora a jeho otáčok teda vychádza, že ovplyvňovať výkon budú primárne členy v poslednom zlomku rovnice (3). Menovite sú to hustota vzduchu, plniaca a užitočná účinnosť a Lambda – súčiniteľ prebytku vzduchu.

Cieľom preplňovania je teda zvyšovanie hustoty a hmotnosti plniaceho vzduchu, jednou z možností je zvyšovanie statického tlaku, čo zaručí turbodúchadlo, alebo znižovanie teploty vzduchu, čo je vykonané medzichladičom stlačeného vzduchu [8]. Treba však podotknúť, že aj po prechode vzduchu cez medzichladič sa teploty pohybujú nad teplotami okolitej atmosféry, čo je spôsobené práve jeho stlačovaním.

Za týmto cieľom sa do sacieho traktu spaľovacích motorov pridáva turbodúchadlo/mechanický alebo elektrický kompresor.

2 POUŽITIE PREPLŇOVANIA V KONTEXTE SÚŤAŽE FORMULA STUDENT

Vhodné použitie turbodúchadla je v súťaži Formula Student do veľkej miery usmernené publikovanými pravidlami [13].

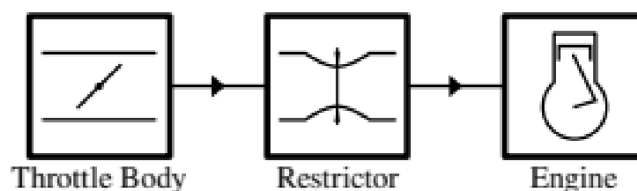
Súťaže sa môžu zúčastňovať tímy s motormi s prirodzeným saním, ale aj preplňované motory za dodržania určitých podmienok stanovených súťažou.

V súťaži môžu byť použité len 4-taktné piestové motory s objemom nepresahujúcim hodnotu 710 cm^3 za cyklus.

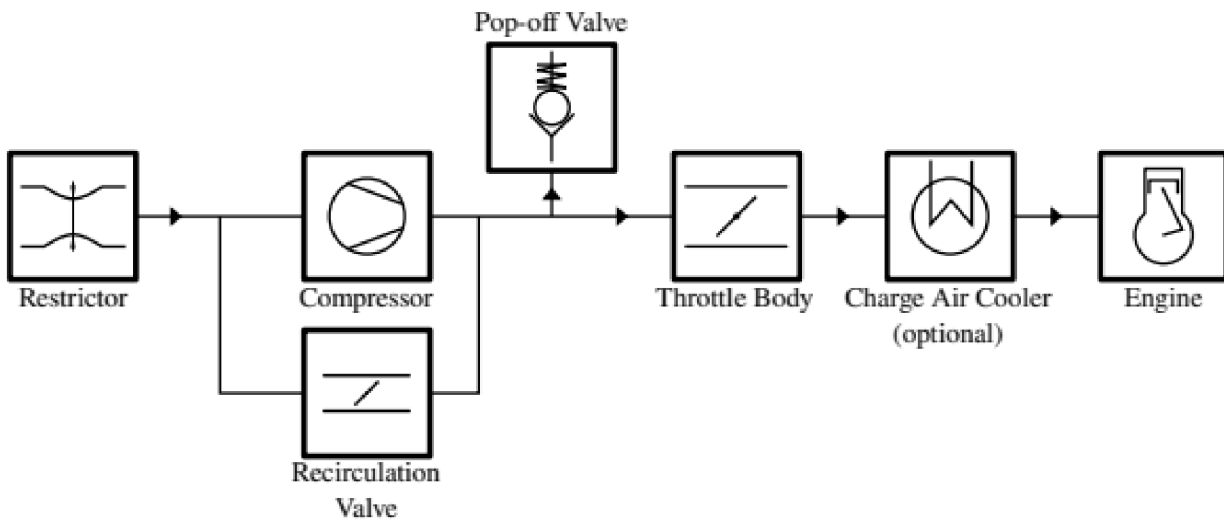
Ako už bolo spomenuté vyššie, efektívnou cestou ako regulovať výkon motora je umožnené množstvo vzduchu vstupujúce do spaľovacieho priestoru. S ohľadom na túto fyzikálnu skutočnosť musia mať jednotlivé tímy sací trakt motora doplnený o restriktor s priemerom 19 alebo 20 mm podľa typu použitého paliva. Práve z tohto dôvodu je preplňovanie výhodným krokom v rámci využitia potenciálu motora, kedy rozširujeme oblasť pracovných otáčok, v ktorých je využitý maximálny tok vzduchu restriktorom. Tohto stavu dosahujú atmosférické motory len v úzkom spektre otáčok.

Použitie medzichladiču stlačeného vzduchu je povolené za predpokladu, že k odberu tepla zo sústavy bude použitý len okolitý vzduch.

Je dané, že celý objem nasávaného vzduchu musí pred vstupom do spaľovacieho priestoru prejsť práve restriktorom. Schématické vyobrazenie požiadavku na osadenie restriktora pre motory s prirodzeným saním a pre motory s preplňovaním sú vyobrazené na Obr. 8 a Obr. 9.



Obr. 8 Konfigurácia sania pre motor s prirodzeným saním [13]



Obr. 9 Konfigurácia sania pre motor s kompresorom [13]

Zaujímavými preplňovanými motormi v rámci súťaže Formula Student disponovali tímy ako napr. Joaneum Racing Graz a KA Racing, ktoré vo vzájomnej spolupráci s firmou Mercedes AMG vyvinuli dvojvalcový preplňovaný motor o výkone až 69 kW, ktorý disponoval objemom 596 ccm. Tím Monash z Austrálie využíva koncepciu jednovalcového motoru preplňovaného turbodúchadlom Garrett. Motor má objem 450 ccm a dosahuje výkonu 54 kW. Je nutné podotknúť, že táto pohonná jednotka je približne o 20 kg ľahšia ako vyššie spomínaný motor vyvinutý v spolupráci s AMG [3].

2.1 MOTOR MONOPOSTU DRAGON – PRIRODZENÉ SANIE

Hlavné faktory pre voľbu spaľovacieho motoru pre súťaž Formula Student boli popísané v kapitole vyššie.

Tím TU Brno Racing používa od piatej generácie monopostu jednovalcový motor s označením Husqvarna FE 501.

Oproti štvorvalcovým motorom prináša spomínaný typ výhodu hlavne v oblasti zástavby a samotnej hmotnosti pohonnej jednotky. Súčasne voľba motoru bola ovplyvnená aj predchodcom spomínanej pohonnej jednotky, ktorou bol motor Husaberg FE 570, ktorý sa vyznačuje podobnou konštrukciou a zhodnosťou niektorých náhradných dielov. Nevýhodou motoru zostáva nízky efektívny výkon, ktorého navýšenie však bolo dosiahnuté použitím turbodúchadla. Takto upravená pohonná jednotka je popísaná v kapitole nižšie [3].

Na Obr. 10 môžeme vidieť fotku motoru Husqvarna FE 501 a v Tab. 1 popis jeho základných parametrov.



Obr. 10 Motor Husqvarna FE 501 [14]

Tab. 1 Základné parametre motora Husqvarna FE 501 [3]

Husqvarna FE 501	
Zdvihový objem	510 ccm
Počet valcov	1
Plnenie	Prirodzené sanie
Hmotnosť	32 kg
Výkon	38kW

2.2 MOTOR MONOPOSTU DRAGON – PREPLŇOVANIE KONVENČNÝM TURBODÚCHADLOM

Pre udržanie spomínanej nízkej hmotnosti pohonnej jednotky a dobrých zástavbových rozmerov, ale aj za cieľom navýšenia výkonu bol motor Husqvarna FE 501 osadený turbodúchadlom od firmy Garrett Advancing Motion.

Niektoré časti motora si teda v dôsledku navýšenia výkonu museli prejsť úpravou, poprípade obmenou. Turbodúchadlo k svojej správnej prevádzke navyše potrebuje prívod oleja k ložiskovej, resp. centrálnej skrini a taktiež prívod chladiacej kvapaliny. K prívodu

chladiacej kvapaliny bol využitý chladiaci okruh motora, pričom úpravou si prešiel rotor vodnej pumpy a došlo k jeho rozšíreniu, čo malo za dôsledok nárast prietoku chladiacej kvapaliny.

Navýšenie točivého momentu so sebou prinieslo aj potrebu výmeny spojky, ktorá bola nahradená typom z predošle používaného motoru Husaberg FE 570 a taktiež boli posilnené prítlačné pružiny spojky.

Ako bolo spomínané vyššie v práci tak limitnou hodnotou pre plniaci tlak je hodnota kompresného pomeru. Ten bol za účelom vyhnutia sa detonačnému spaľovaniu upravený z pôvodných 11,8 : 1 na hodnotu 9,5 : 1, táto zmena predstavovala rozdiel približne 40 barov na hodnote spaľovacieho tlaku. Špičkový tlak vo valci však stále zostal približne o 30 % vyšší než v pôvodnej nepreplňovanej verzii motora. Zníženie kompresného pomeru je realizované kratšou ojnicou práve z motoru Husaberg FE 570.

Motor musel prejsť úpravami taktiež po softvérovej stránke a k tomuto účelu bola zvolená riadiaca jednotka Liferacing F88 v kombinácii s indukčným zapáľovaním a dvojicou palivových vstrekovačov od firmy Bosch [3].

2.2.1 MATCHING TURBODÚCHADLA A MOTORU

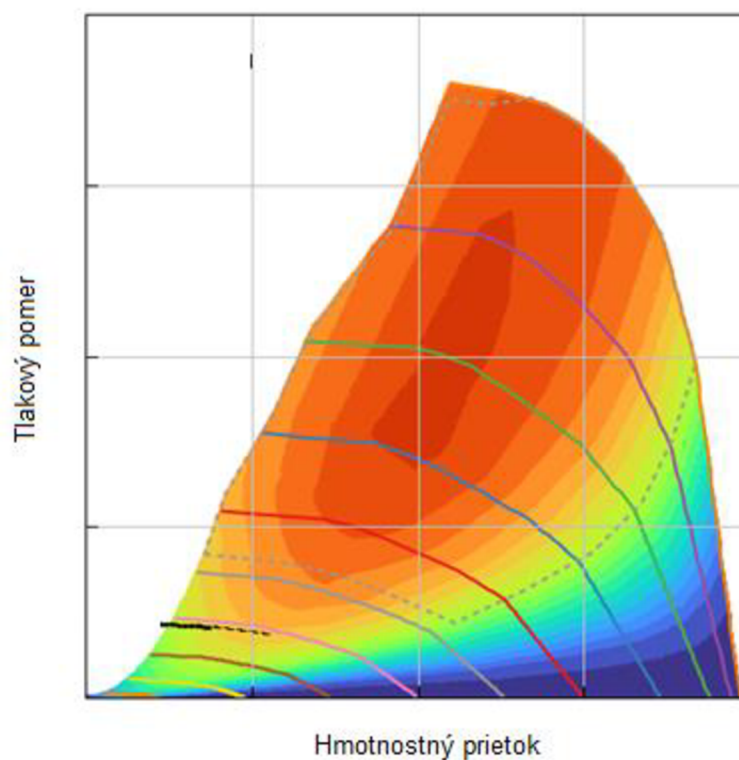
Hlavným princípom osadenia motoru turbodúchadlom je zjednotenie pracovných oblastí ako motora tak aj turbodúchadla. V procese voľby správnych častí turbodúchadla sa musí dbať na potrebné výkonnostné hodnoty ale aj dynamické vlastnosti motora.

Voľba kompresorovej časti spočívala vo výbere spomedzi troch vhodných kandidátov na základe výpočtu návrhového pracovného bodu kompresoru. Tento bod by mal ležať v blízkosti maximálnej hodnoty účinnosti kompresoru s dostatočnou vzdialenosťou od medze pumpovania „surge line“ [3]. Pri návrhu *matchingu* kompresoru a motora je potreba taktiež dbať na dostatočnú vzdialenosť od hranice „choke line“.

„Surge limit“ je oblasť, kedy má motor nízke požiadavky na množstvo nasávaného vzduchu, to v konečnom dôsledku znamená, že objemový prietok je malý v porovnaní s plniacim tlakom. S narastajúcim tlakom sa však požiadavka na prietok vzduchu stále nemení, takto je to až do momentu kedy sa prúd vzduchu odtrhne od lopatky kompresoru a unikne do oblasti pred kompresor. Tento jav je sprevádzaný vznikom tlakových vln a nežiadúceho zvukového efektu.

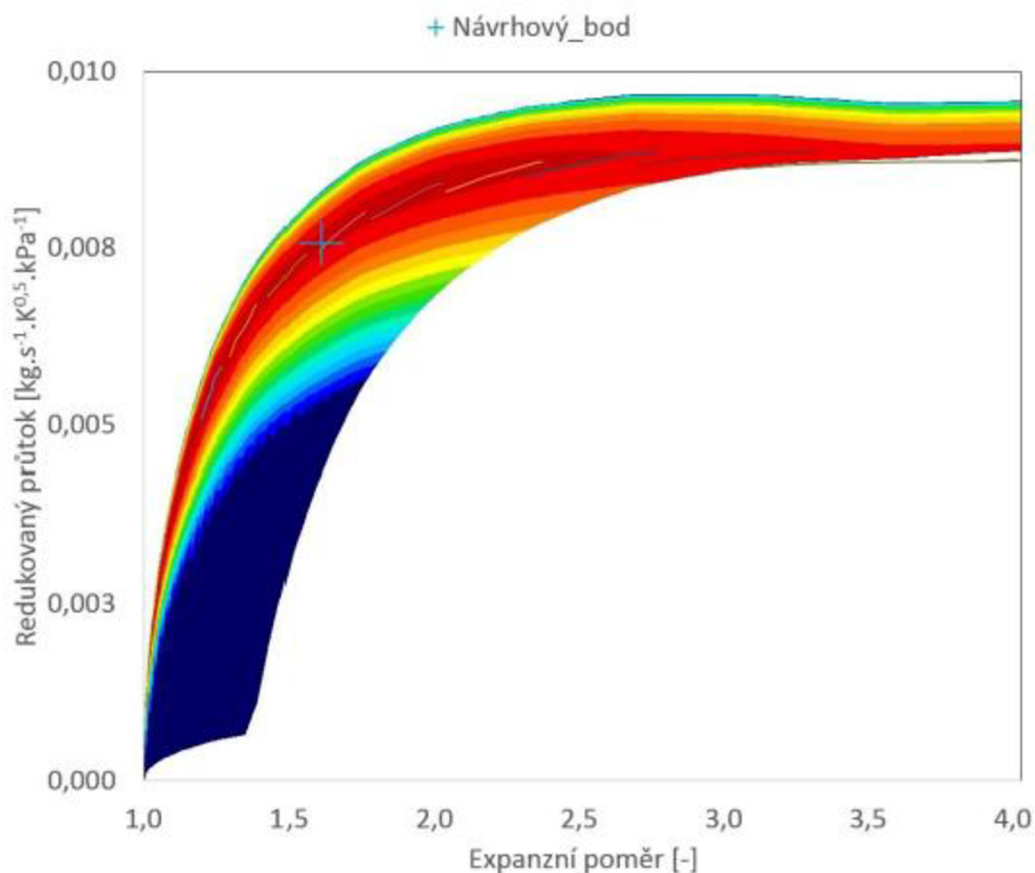
„Choke limit“ je opačný prípad oproti deju opisovaného vyššie. Nastáva práve v situácii kedy má motor veľké požiadavky na množstvo nasávaného vzduchu až do momentu, kedy nasávaný vzduch dosiahne v danom bode rýchlosti zvuku. V tomto prípade už potom nie je možné navýšiť objemový prietok vzduchu a vo výsledku to znamená, že vzduch ďalej prúdi voľne, ale veľmi vysokou rýchlosťou.

Na základe tohto bol zvolený kompresor s označením C41, ktorého kompresorovú mapu môžeme vidieť na Obr. 11., ktorý je exportovaný zo softvéru GT-Power, ktorý bol použitý v experimentálnej časti tejto diplomovej práce. Základné jednotky a hodnoty jednotlivých osí neboli vyobrazené na základe dohody s firmou Garrett Advancing Motion.



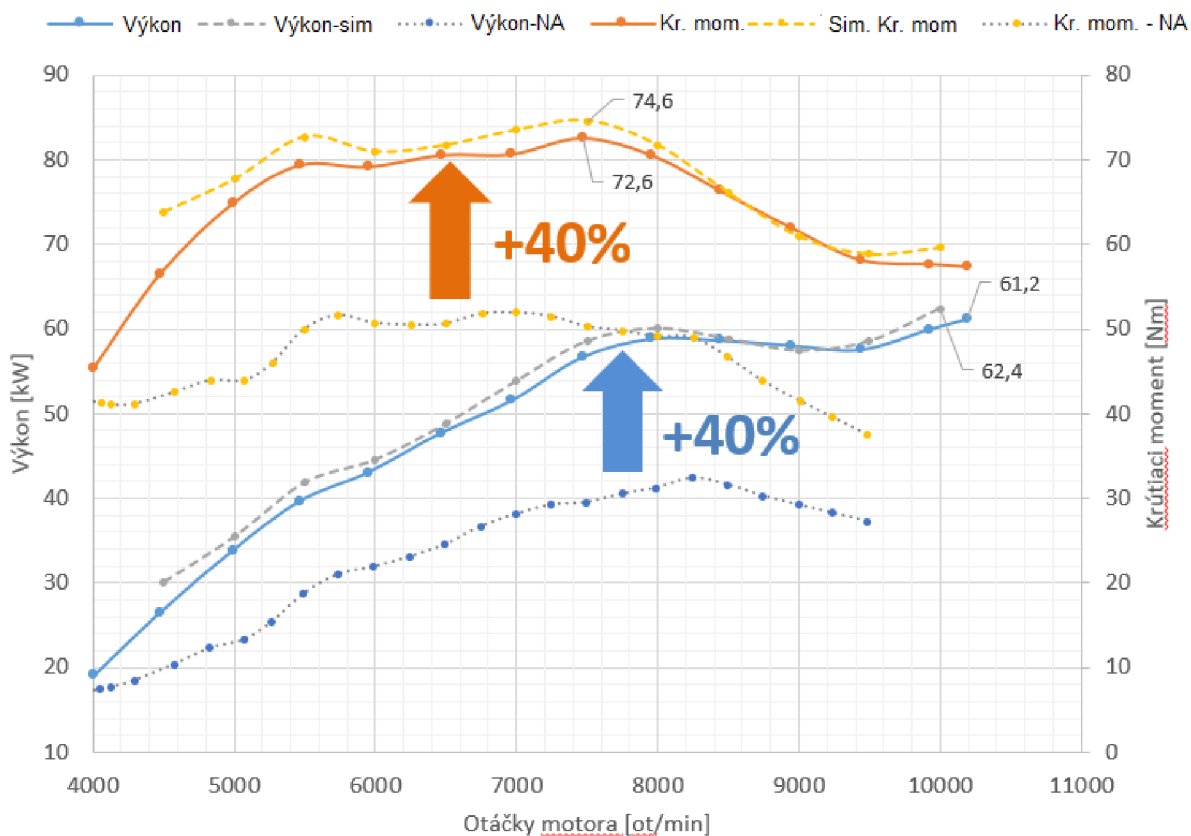
Obr. 11 Kompressorová mapa modelu C41

Voľba turbíny prebehla z možností štyroch dostupných kandidátov, pričom výpočet vychádzal z rovnováhy výkonu, ktorý odoberal kompresor a ktorý naopak získava svojou činnosťou turbína. Zvolená bola turbína s označením NGT13 a jej turbínovú mapu s označeným návrhovým pracovným bodom môžeme vidieť na Obr. 12 [3]. Obrázok je prevzatý z diplomovej práce Adama Vondráka, ktorá sa priamo zaoberá spomínaným preplňovaním motoru monopostu Dragon z dielne tímu TU Brno Racing.



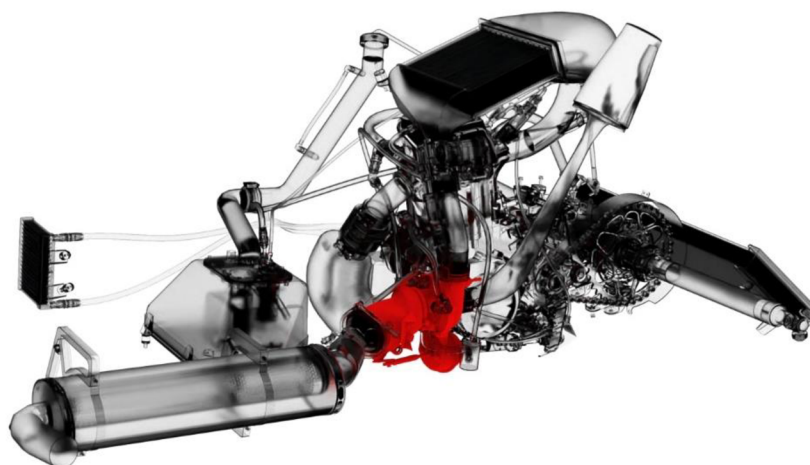
Obr. 12 Turbinová mapa s návrhovým pracovným bodom – NGT13[3]

Pre porovnanie vonkajšej výkonovej charakteristiky poslúži graf na Obr. 13, kde môžeme vidieť priebeh výkonnostných a momentových kriviek motoru s turbodúchadlom aj bez neho. Zároveň sú do grafu vynesené krivky teoretických hodnôt týchto veličín. Na základe grafov môžeme pozorovať až 40 percentný nárast ako u krútiaceho momentu, tak aj u výkone. Zároveň korelujú reálne hodnoty výkonnostných charakteristík s tými odsimulovanými.



Obr. 13 Vonkajšia otáčková charakteristika motora monopostu Dragon – Porovnanie motora s prirodzeným sánim a turbodúchadlom [15]

Celý motor s turbodúchadlom bol následne uložený v trubkovom ráme. Komplikácia nastala pri návrhu monopostu Dragon X, kedy musel byť motor s turbodúchadlom uložený do celokarbónového monokoku tak, aby spĺňal pevnostné aj tepelné požiadavky uloženia. Na Obr. 14 môžeme vidieť finálne uloženie pohonnej jednotky v monoposte Dragon X.

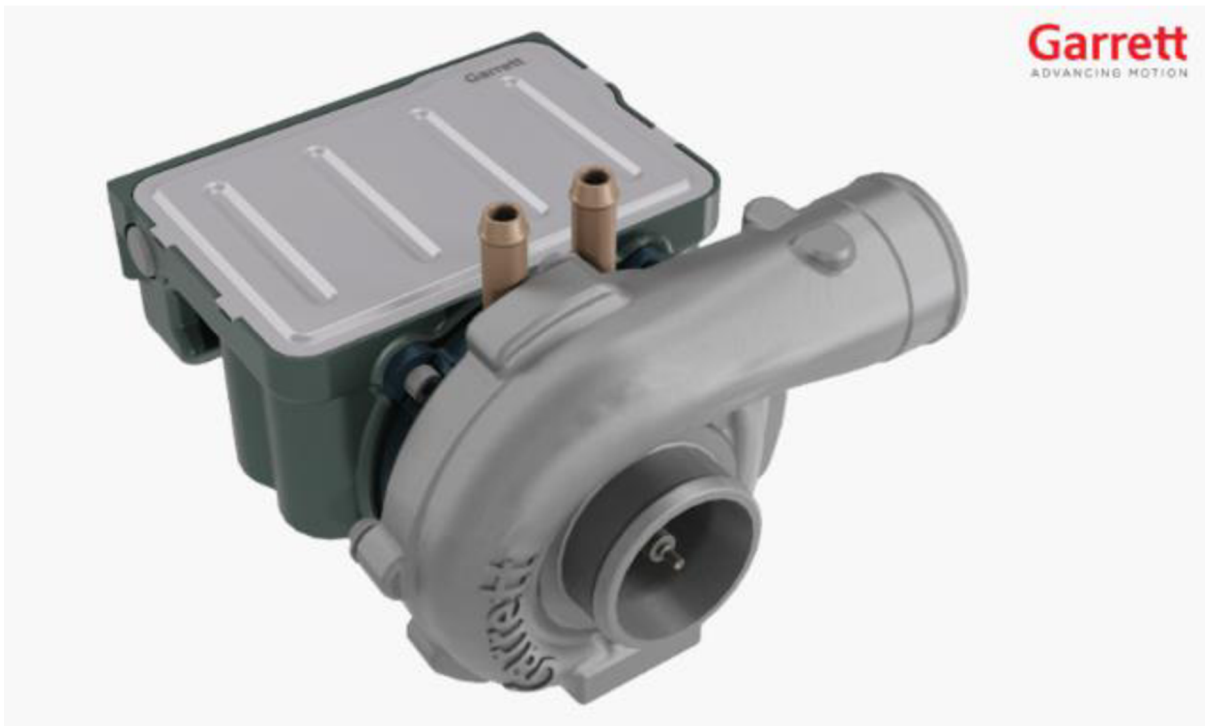


Obr. 14 Uloženie pohonnej jednotky – Dragon X [15]

3 GARRETT 48V ELECTRIC COMPRESSOR

Elektrický kompresor spája výhody oboch vyššie spomínaných metód preplňovania, tzn. schopnosť eliminácie turbodiery tak ako pri mechanickom kompresore, ktorý je priamo naviazaný na kľukový hriadeľ spaľovacieho motora, tak aj druhú vlastnosť prevzatú z konvenčného turbodúchadla, kedy neodoberá výkon motora. Toto je však len v prípade, že energiu pre elektrický kompresor berieme z externého zdroja.

Firma Garrett Advancing Motion uvádza, že elektrický kompresor novej generácie výrazne zlepšuje tranzientnú odozvu a vytvára plochšiu krivku krútiaceho momentu pri nízkych otáčkach. Toto umožňuje pokročilé stratégie spaľovania, ktoré sú potrebné pre plnenie nových emisných noriem [16]. Aerodynamika kompresoru a návrh elektroniky napomáhajú prekonať kompromis medzi výkonom a účinnosťou. Táto inovácia priamo napomáha znižovať emisie a spotrebu paliva v spaľovacom procese. Navyše kompaktný dizajn umožňuje flexibilitu pri osádzaní elektrického kompresoru do pohonnej jednotky. Samotný „e-compressor“ môžeme vidieť na Obr. 15 [16].



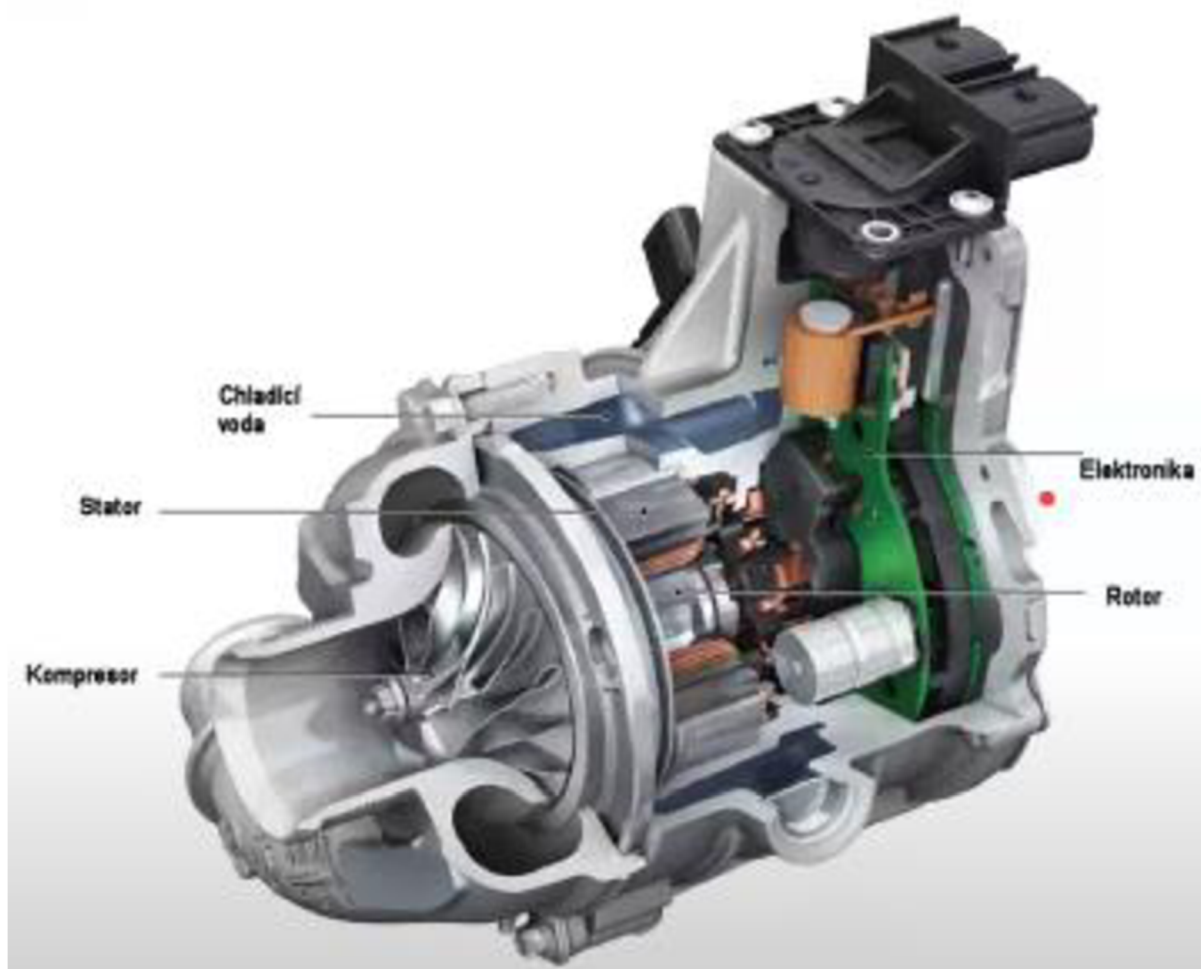
Obr. 15 Garrett E-compressor [16]

3.1 PRINCÍP FUNGOVANIA „E-COMPRESSORU“

Jedná sa o elektricky poháňaný radiálny kompresor s výkonovou a výpočetnou elektronikou. Ako už bolo spomenuté vyššie, tento typ kompresoru neodoberá motoru také množstvo výkonu ako samotný mechanický kompresor, kedy za použitia externého zdroja je samostatnou jednotkou v procese preplňovania. Za použitia bez externého zdroja je potrebné odoberať určité množstvo energie pre fungovanie elektrického kompresoru. Vzorové hodnoty množstva energie spotrebovanej elektrickým kompresorom sú uvedené vo výpočtovej časti práce. Možnosť využitia elektrického kompresoru je v celej škále typov spaľovacích motorov. Je možné ho aplikovať na zážihové ale aj vznetové motory, kedy spomínané turbodúchadlo

s variabilnou geometriou lopatiek sa najviac využíva pri motoroch vznetrových. V súčasnosti sa však riešenie VGT začína presadzovať aj u motorov zážihových, kedy sa podarilo vyriešiť problém s vysokou teplotou spalín. „E-compressor“ môže byť zároveň využitý v kombinácii s konvenčným turbodúchadlom ako doplnkový člen v nízkych otáčkach motora. Princiálny rez E-compressorom môžeme vidieť na Obr. 16 [17].

Cieľovými požiadavkami na dizajn e-compressoru sú vysoká akcelerácia rotačného člena, ktorá sa udáva v hodnote zvanej T90, čo popisuje schopnosť kompresora zmeniť svoje otáčky z určitej rýchlosti na nový pracovný bod na hodnotu minimálne 90 % z požadovanej hodnoty. Ďalšími požiadavkami na dizajn sú vysoká aerodynamická kapacita a celková účinnosť, ďalej kompaktná veľkosť a nízke finančné náklady jednotlivých komponentov [18].

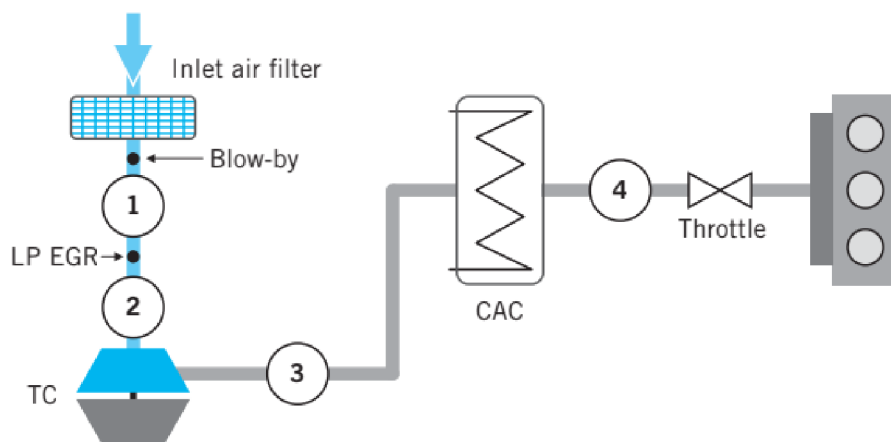


Obr. 16 Princiálny rez elektrického kompresora [17]

3.2 POZÍCIA A UMIESTNENIE V SACOM TRAKTE

Správna voľba pozície e-compressoru v sacom trakte motora môže byť kľúčová pri dosahovaní požadovaných vlastností a odozvy. V podstate však môže byť umiestnený v ktoromkoľvek bode traktu. V prípade kombinácie s konvenčným turbodúchadlom je vhodné mať vyriešený obtokový „by-pass“ ventil okolo e-compressoru tak, aby sme eliminovali tlakové straty, ktoré by vznikali pri činnosti spaľovacieho motora v bodoch, kde e-compressor nevykonáva prácu.

Na Obr. 17 môžeme vidieť zjednodušenú schému sacieho traktu, pričom jednotlivé pozície 1-4 poukazujú na možnosti osadenia e-compressoru v bežnom automobile, ktorý je osadený už konvenčným turbodúchadlom. Každá z pozícií je zapísaná do tabuľky v Obr. 17, ktorá zároveň poukazuje na výhody a nevýhody umiestnenia e-compressoru v danom bode. Hodnotenými veličinami sú prechodové správanie sa motora, priemerná účinnosť kompresoru, lepšia možnosť redukovania emisií a škodlivých látok ako napr. pevných častíc, riziko zlyhania mechanizmu/vznik korózie a termomechanické namáhanie. Navyše umiestnenie e-compressoru v bodoch 3-4 môže byť pozitívne ovplyvnené tým, že kompresorové mapy môžu pracovať v menšom rozsahu, čo má za dôsledok vyššiu efektívnosť [18].



Characteristic	Position			
	4	3	2	1
Transient behaviour of combustion engine	++	+	0	0
Average compressor efficiency	++	+	-	0
Enabler for emission reduction	++	+	0	-
Risk of fouling / corrosion / formation of lacquer	0	-	+	++
Thermomechanical stress	0	-	+	++

① Possible positions of the electric supercharger in the airflow path

Obr. 17 Výhody a nevýhody daného umiestnenia e-compressoru v sacom trakte [18]

4 VÝPOČTOVÁ ČASŤ

Samotná výpočtová časť tejto diplomovej práce má za cieľ overiť možnosť náhrady konvenčného turbodúchadla v monoposte typu Formula Student za e-compressor od firmy Garrett Advancing Motion. Pri výpočtovej časti bol braný zreteľ na vyššie popisované skutočnosti v teoretickej časti práce.

Ciele, ktorých má byť dosiahnuté sú jednak dodržanie teoretických výkonnostných charakteristík preplňovaného motoru Husqvarna FE 501, správne odladenie systému spaľovacieho motoru s osadením e-compressoru, ale aj dodržanie limitných pravidiel stanovených súťažou tak, aby bol monopost z hľadiska pohonnej jednotky správne navrhnutý. Práca sa teda zaoberá jednak termodynamikou daného uzlu, ale aj výpočtom a parametrizáciou *battery packu*, ktorý slúži ako sklad energie pre pohon e-compressoru. Pre uskladnenie energie boli taktiež predpísané pravidlá, v ktorých medziach je nutné sa pohybovať. V neposlednom rade práca prenáša teoretické hodnoty do konkrétnej aplikácie monopostu na závodnej trati a pomocou softvéru ChassisSim simuluje rozdiel času na kolo oproti motoru s konvenčným turbodúchadlom.

4.1 TERMODYNAMIKA MODELU

Existuje mnoho softvérových riešičov, ktoré sú schopné výpočtov a simulácií v oblasti prestupu tepla, prúdenia tekutín a mechanického prenosu energie v rámci procesov prebiehajúcich v spaľovacom motore (Ansys Mechanical, Adams, Fluent a ďalšie FEM a CFD nástroje). Výhodou menovaných softvérov je presnosť jednotlivých výsledkov výpočtov, zameraných na konkrétne deje napr. v spaľovacom priestore. Nevýhodou ostáva ťažko prepojitelná sústava aktívnych prvkov modelu od tepelného manažmentu ústrojenstva cez prúdenie tekutín až po mechanický prenos energie.

Z tohto dôvodu vznikol dopyt po jednodimenzionálnom riešiči, ktorý by bol schopný prepojiť jednotlivé komponenty do súvislej zostavy s vysokou modularitou a nižšou detailnosťou jednotlivých výsledkov. Postupne tak v oblasti spaľovacích motorov vznikol softvér GT-Suite, ktorý je schopný riešiť procesy spaľovacieho motora. Je založený na jednorozmernom riešení dynamiky tekutín v sacích a výfukových častiach a zároveň na bezrozmernom riešení spaľovania a horenia zmesi vo valci, ktoré rieši za pomoci substitučných funkcií vývinu tepla s modelom prestupu tepla do stien pracovného prostredia [3].

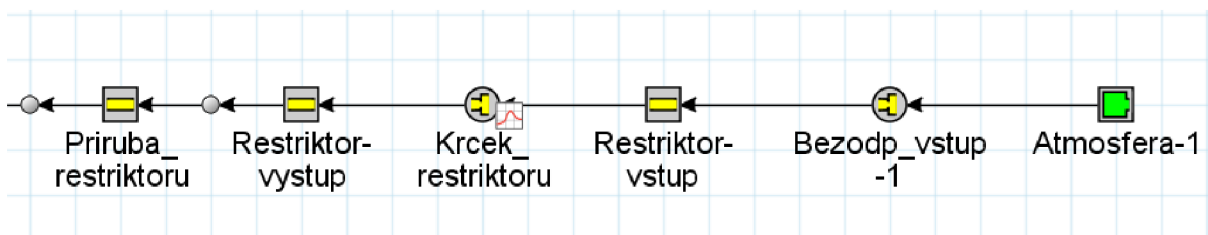
GT-Power je sub-aplikáciou balíku GT-Suite. Jedná sa o štandardnú simuláciu výkonu motora, ktorá je používaná u všetkých popredných výrobcov automobilov. Využíva sa na predikovanie hlavných výkonových charakteristík spaľovacieho motora, ako sú napr. výkon, krútiaci moment, hmotnostný prietok vzduchu, objemová účinnosť a spotreba paliva. Rovnako je však schopný simulovať *matching* turbodúchadla/e-compressoru ku konkrétnemu typu motora. Práve z vyššie vymenovaných dôvodov bol tento softvér zvolený za hlavný výpočtový program pre túto diplomovú prácu.

Základom modelovania spaľovacieho motora v tomto type riešiču je výmena náplne valca, práca vykonaná v samotnom valci a prenos energie a sily kľukového mechanizmu. Základnými veličinami udávajúcimi charakteristiku jednotlivých komponentov je v tomto type softvéru prierez, dĺžka a napojenia za sebou idúcich členov s odlišnou geometriou [3].

4.1.1 VÝPOČTOVÝ MODEL – KONVENČNÉ TURBODÚCHADLO

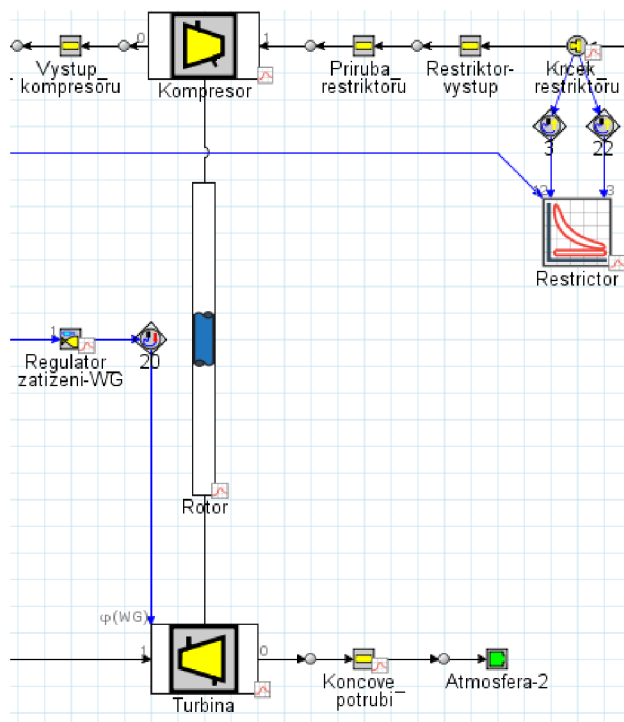
Samotný výpočtový model v prostredí GT-Power vychádza už z vytvoreného modelu Ing. Adamom Vondrákom, pričom tento model bol používaný pre odsimulovanie osadenia turbodúchadla do nepreplňovaného motora Husqvarna FE 501. Potrebné mechanické aj softvérové úpravy motora pre tento typ aplikácie turbodúchadla sú popísané v práci vyššie.

Nasleduje popis niektorých kľúčových častí modelu. Ako už bolo vyššie v práci spomínané, hlavným výkonovým obmedzením v súťaži Formula Student je restriktor, ktorý v prípade monopostu Dragon predstavuje vložku kruhového prierezu o priemere 19 mm, na základe použitého paliva, ktorým je E85. Restriktor a jeho model je preto základom pre dosiahnutie vierohodných výsledkov simulácie. Model restriktora je z dôvodu prudkej zmeny prierezu riešený pomocou náhradnej schémy. Finálny model restriktora môžeme vidieť na Obr. 18 [3].



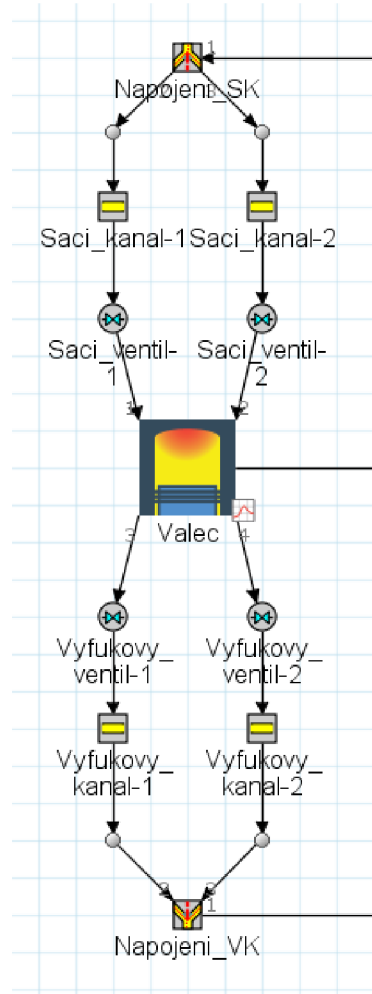
Obr. 18 Schéma modelu restriktora

Pre túto prácu je kľúčovým prvkom samotné konvenčné turbodúchadlo, ktoré v reále tvorí kompresorová a turbínová časť, ktoré sú spojené spoločným hriadeľom. Tento princíp je dodržaný aj v samotnom modeli v programe GT-Power. Charakteristikou jednotlivých členov sú pracovné mapy, ktoré sú popísané v práci vyššie a kombinujú 4 charakteristické veličiny akými sú účinnosť, hmotnostný prietok, tlakový pomer a otáčky rotora. Výpočet vychádza z rovnováhy príkonu, ktorý kompresor odoberá a energie, ktorá je dodávaná turbínou. Pre reguláciu turbínového stupňa, a teda plniaceho tlaku, bol zvolený postup kde je obtokový ventil nahradený clonou regulovaného priemeru [3]. Na Obr. 19 môžeme vidieť model konvenčného turbodúchadla v prostredí GT-Power.



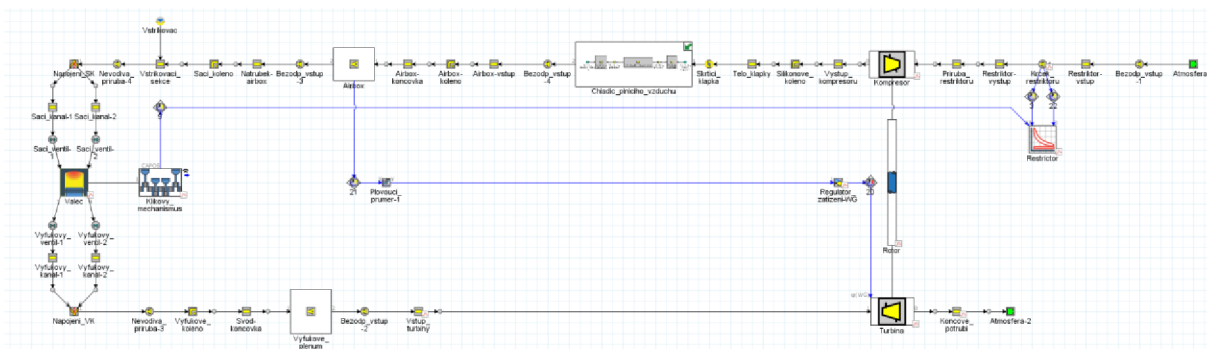
Obr. 19 Model turbodúchadla – GT-Power

Model valcovej jednotky simuluje procesy dejúce sa v spaľovacom priestore. Okrem objemu vzduchu závisiaceho na aktuálnej polohe kľukového hriadeľa simuluje aj priebeh spaľovania a systému prestupu tepla do stien valca resp. pracovného priestoru. Pre modelovanie procesu spaľovania je najpoužívanejším riešičom Vibeho model. Modelu je ďalej priradený riešič súčiniteľa prestupu tepla založený na modeloch Woschni/Hohenberg [3]. Boli vymenované podstatné časti procesu práce spaľovacieho motora pre aplikáciu elektronického kompresora. Podrobná analýza ostatných členov súvisiacich s prácou spaľovacieho motora je popísaná v práci Ing. Adama Vondráka. Na Obr. 20 potom môžeme vidieť sústavu modelu valca spolu so sacími a výfukovými kanálmi so sacími a výfukovými ventilmi.



Obr. 20 Model valca a sacieho/vyfukového traktu

Na Obr. 21 môžeme vidieť model preplňovaného spaľovacieho motoru Husqvarna FE501 v aplikácii v monoposte Dragon s konvenčným turbodúchadlom.

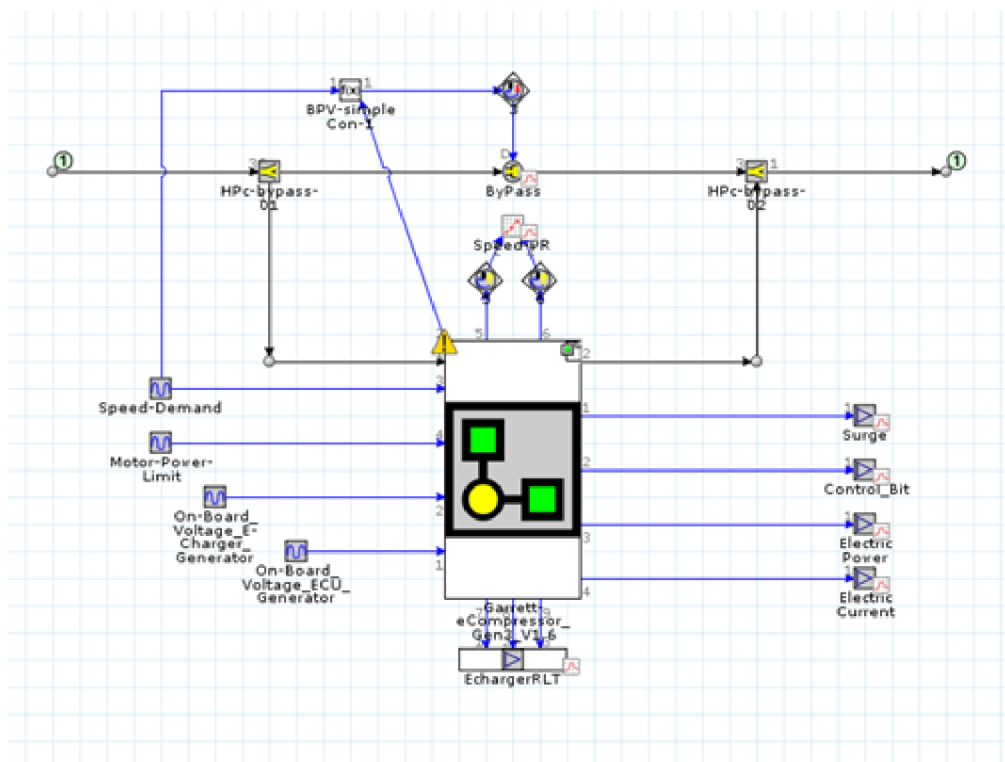


Obr. 21 Model celého motoru s konvenčným turbodúchadlom

4.1.2 VÝPOČTOVÝ MODEL – E-COMPRESSOR

Ako už bolo spomínané vyššie v práci, základom modelovania spaľovacieho motoru s E-compressorom bol práve model motoru na Obr. 21. V prvom rade bolo potrebné pochopiť funkciu jednotlivých častí modelu tak, aby mohol byť následne upravený pre aplikáciu elektrického kompresoru, viz kap. 4.1.1.

Z modelu bola odstránená celá turbínová aj kompresorová časť, spolu s reguláciou obtokového ventilu. Samostatný model e-compressoru bol dodaný spoločnosťou Garrett Advancing Motion. Obrázok modelu môžeme vidieť na Obr. 22. Vyššie spomínané základné prvky konvenčného modelu ostali nezmenené.

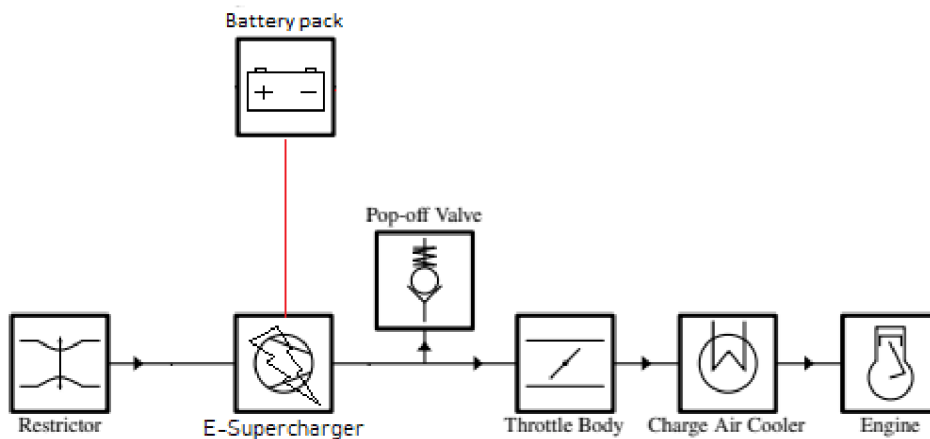


Obr. 22 Model E – kompresoru – Garrett Advancing Motion

Ako môžeme vidieť, model obsahuje komplexné riadiace ale aj výstupné prvky, ktoré zaručujú jeho funkčnosť vo výpočtovej simulácii. Medzi potrebné vstupné veličiny patria napr. požiadavka na konkrétnu maximálnu hodnotu otáčok, limitný výkon kompresoru, ale aj napätie generátora elektrickej energie, ktorým je v tomto prípade spomínaný *battery pack*, ktorého návrhom sa práca ďalej zaoberá.

Samotný model elektrického kompresoru je vybavený aj obtokovým „by-pass“ ventilom, ktorý sa v bežnej praxi využíva pri výskyte elektrického kompresoru a konvenčného turbodúchadla v jednej zostave sacieho traktu. Pre účely výpočtovej analýzy nie je potrebné tento člen uvažovať a tak bol z modelu odstránený.

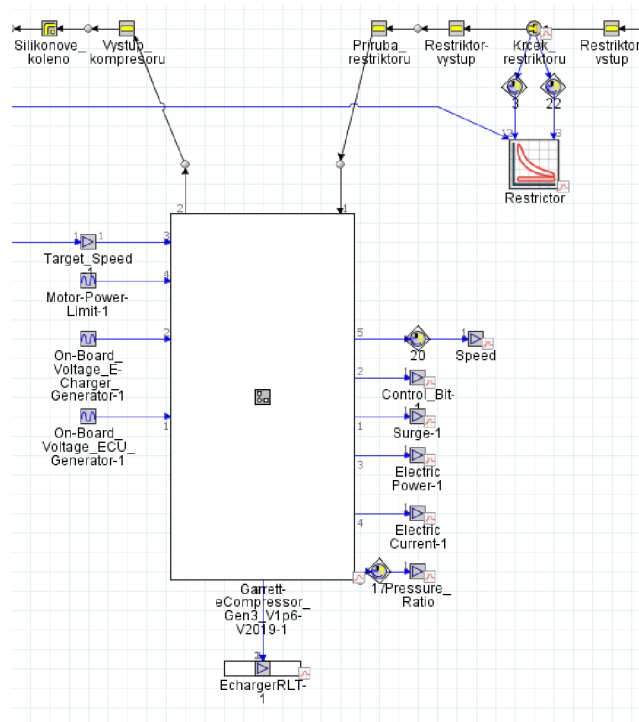
Aplikácia elektrického kompresoru bola zrealizovaná tak, ako je vyobrazené na principiálnej schéme na Obr. 23, tak aby boli dodržané pravidlá súťaže, a teda podmienka prechodu celého objemu nasávaného vzduchu ostala zachovaná.



Obr. 23 Schéma aplikácie E-kompresoru – monopost Dragon

Schéma poukazuje na umiestnenie e-kompresoru do prostredia medzi restriktor a škrtiacu klapku, čím nahrádza pôvodnú oblasť konvenčného turbodúchadla, kedy na základe Obr. 17 vieme konštatovať, že táto pozícia je prínosná z hľadiska oblastí tranzitného správania sa motora a celkovej efektivity kompresora. Toto je považované za prínos, pričom jedným z hlavných bodov motivácie je zlepšiť odozvu na plynový pedál pre neprofesionálnych pilotov monopostu oproti konvenčnému turbodúchadlu, ktoré produkovalo veľkú „turbodieru“. Ďalej nasávaný vzduch putuje cez medzichladič stlačeného vzduchu priamo do spaľovacieho priestoru motora.

Reálnu aplikáciu elektrického kompresoru do modelu v prostredí GT-Power môžeme vidieť na Obr. 24.

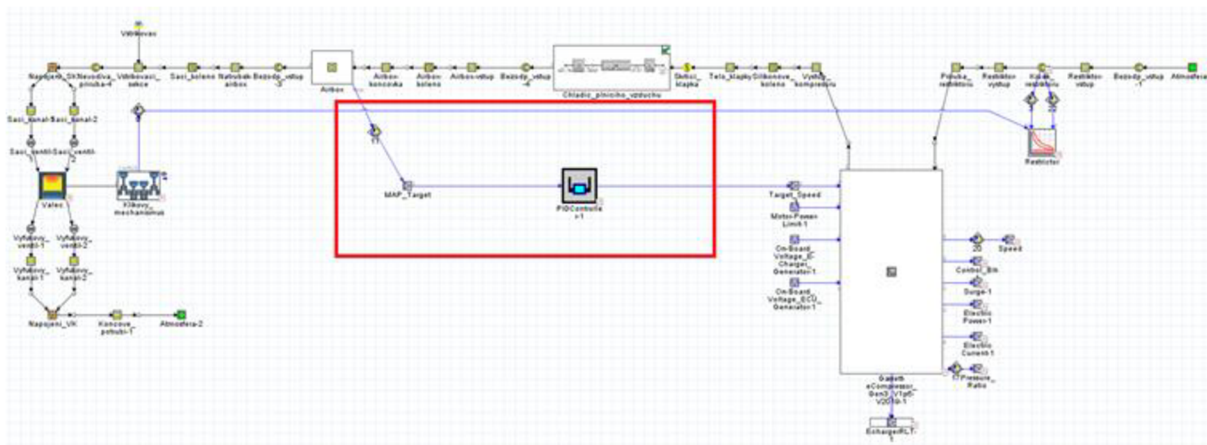


Obr. 24 Osadenie E-kompresoru do sacieho traktu motora – Detail

Vyššie spomínané vstupné veličiny boli nastavené na nasledujúce hodnoty doporučené výrobcom:

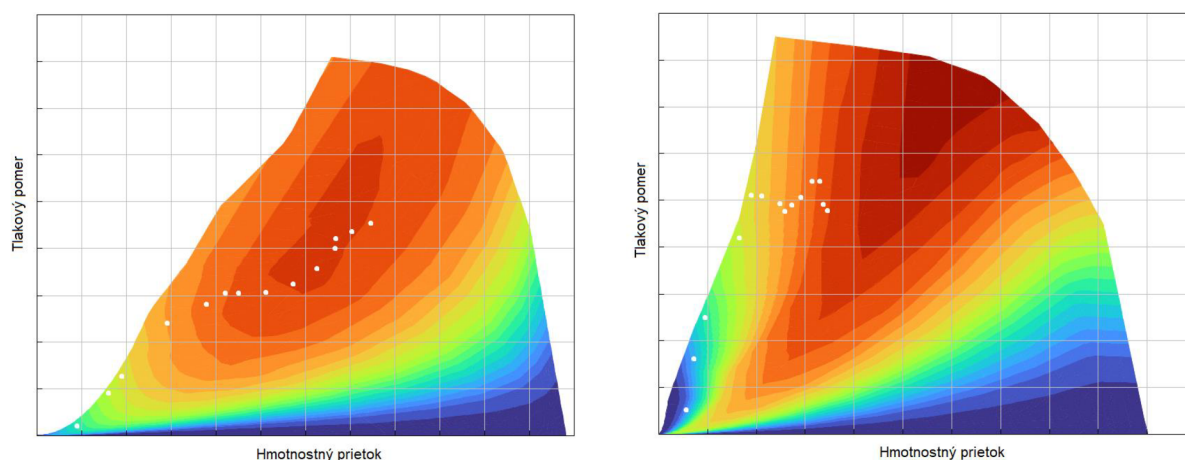
- Maximálna rýchlosť rotora – 90 000 ot/min,
- Maximálny okamžitý príkon elektromotora – 9 kW,
- Maximálne generované napätie *battery packom* – 48 V.

Pre simuláciu pripravený kompletný model motora s osadeným e-compressorom môžeme vidieť na Obr. 25.



Obr. 25 Kompletný model motora s E-compressorom – regulácia MAP

Charakteristiku kompresorového koliečka v elektrickom kompresore popisuje kompresorová mapa. Tá obsahuje úplnú definíciu rotora v určitých bodoch simulácie. Je definovaná štyrmi vyššie spomínanými veličinami. V Obr. 26 môžeme taktiež vidieť porovnanie pracovných bodov v kompresorových mapách pri simulácii. Je zrejmé, že kompresorové koliečko *E-Compressoru* nie je v ideálnej konfigurácii pre aplikáciu v monoposte Dragon. Je navrhnuté pre dosiahnutie vyšších tlakových pomerov a hmotnostných prietokov tak, aby sa pracovné body pohybovali v poliach najvyššej účinnosti. Jednotky a hodnoty jednotlivých osí nie sú vyobrazené na základe dohody s firmou Garrett Advancing Motion.



Obr. 26 Kompresorové mapy a ich pracovné body
Vľavo – Konvenčné turbodúchadlo
Vpravo – Elektrický kompresor

REGULÁCIA PLNIAČEHO TLAKU

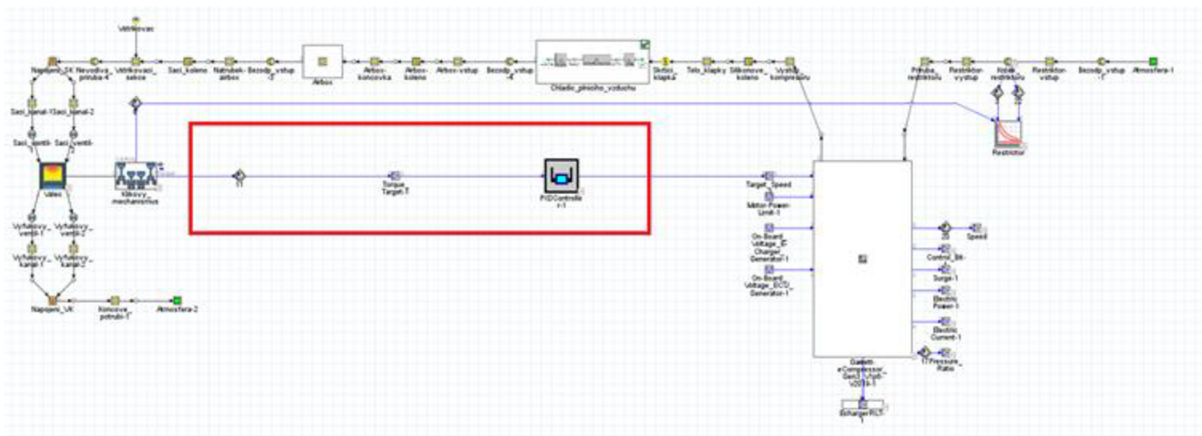
Ako bolo vyššie spomínané, reguláciu plniaceho tlaku u konvenčného turbodúchadla zabezpečoval obtokový „wastegate“ ventil. Ten bol pre potreby osadenia elektrického kompresoru z modelu odstránený.

Pre reguláciu plniaceho tlaku sa ako akčný člen používajú riadiace otáčky. Z tohto dôvodu boli použité dve stratégie ako regulovať otáčky elektrického kompresoru na požadovaný plniaci tlak.

Jednou z nich je regulácia na požadovaný točivý moment, ktorý bol odčítaný z výsledkov pôvodného konvenčného spaľovacieho motora a neskôr určený ako cieľová hodnota pre plniace tlaky v jednotlivých prípadoch výpočtu. K regulovaniu na požadovanú hodnotu bol využitý PID regulátor.

Hlavnou úlohou PID regulátora je dosiahnuť a udržiavať požadovanú cieľovú hodnotu, ovládaním akčnej veličiny v čo najkratšom čase. Tento typ konfigurácie kontroly sa nazýva regulácia s uzavretou slučkou, pretože signály tvoria slučku medzi akčným členom a cieľovou hodnotou. PID kontrolér sa vyznačuje vysokou flexibilitou, avšak jeho naladenie vyžaduje určitú dávku znalosti.

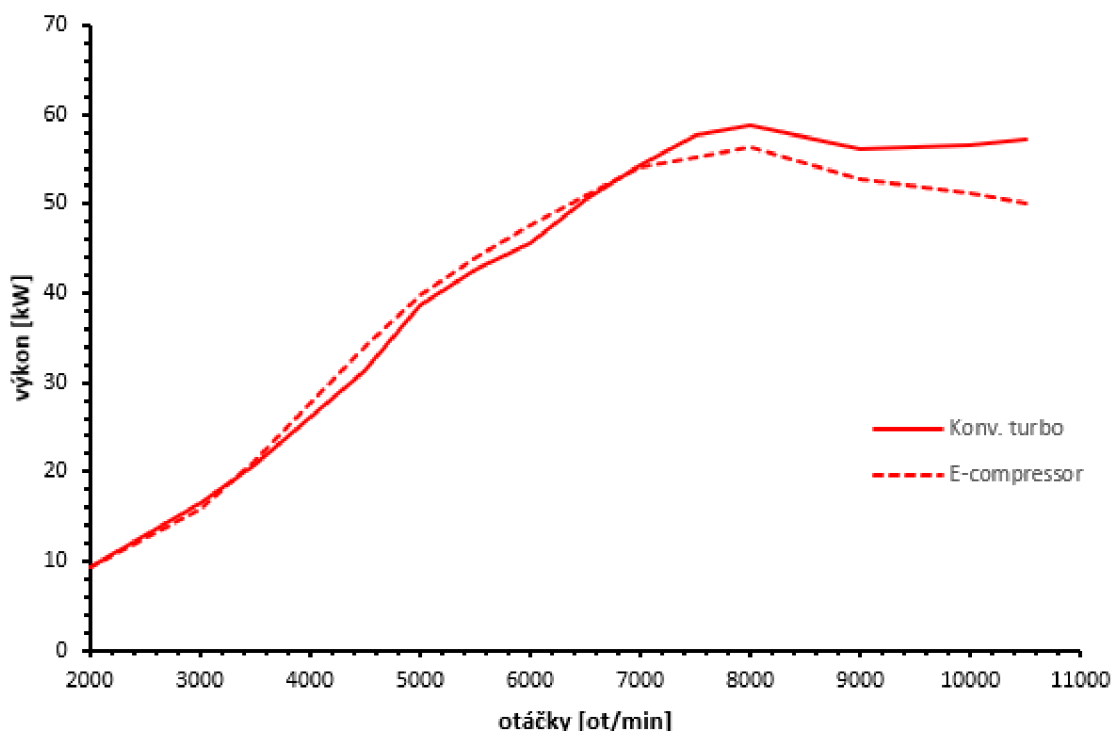
Výslednú podobu motora s osadením elektrického kompresoru a s riadením pre požadovaný krútiaci moment môžeme vidieť na Obr. 27.



Obr. 27 Riadenie otáčok kompresoru na požadovaný krútiaci moment motora

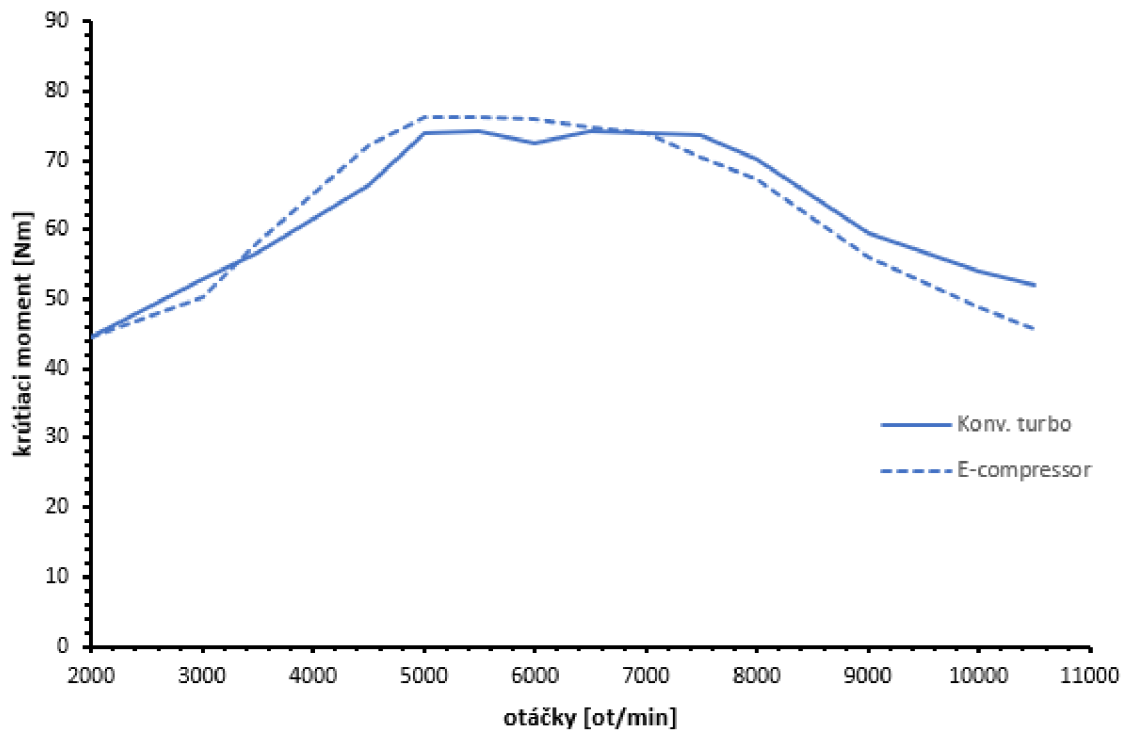
Druhou z využitých možností regulácie plniaceho tlaku bola stratégia dosiahnutia cieľového tlaku v saní. Tento typ je lepší v rámci praktického využitia vzhľadom na to, že tlak v saní je veličina logovaná riadiacou jednotkou a teda aj v praxi by boli otáčky e-kompresoru riadené primárne týmto spôsobom. V neposlednom rade tomu tak bolo aj u riadenia motora s konvenčným turbodúchadlom. Hodnoty tlaku v saní boli pre výpočet teda prevzaté opäť z predošlého modelu. Ako regulátor bol opäť použitý PID kontrolér. Túto konfiguráciu riadenia môžeme vidieť na Obr. 25.

Model s reguláciou MAP bol použitý aj na porovnanie výkonnostných charakteristík motorov, ako s konvenčným turbodúchadlom, tak aj s osadením elektrického kompresoru. Prvou porovnávanou veličinou bol samotný výkon motora. Toto porovnanie výkonov môžeme vidieť na Obr. 28.

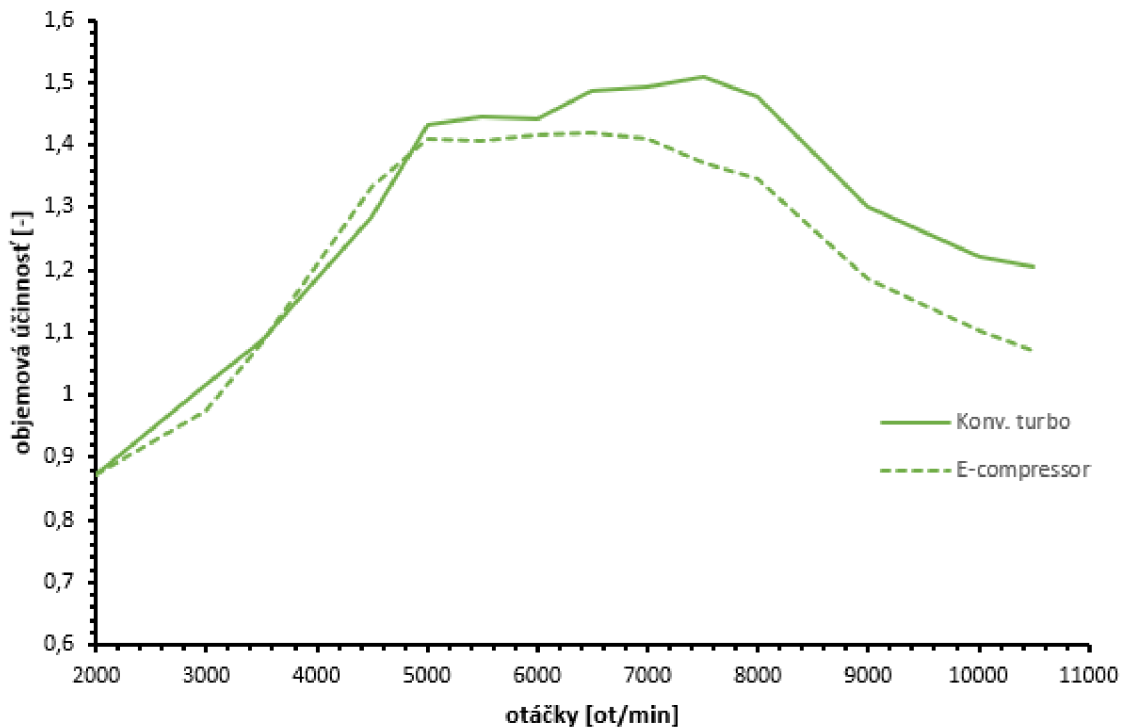


Obr. 28 Porovnanie výkonu motorov

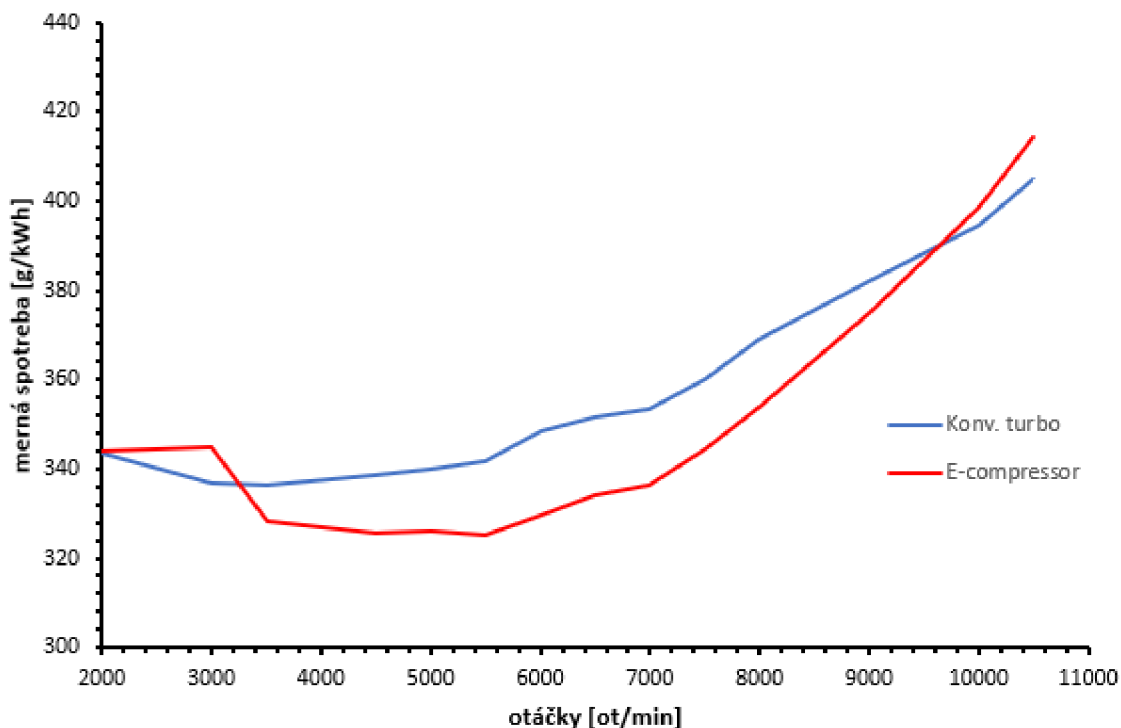
Ako môžeme vidieť na Obr. 28, motor s elektrickým kompresorom je výkonom schopný konkurovať motoru s konvenčným turbodúchadlom. Dosiachnutie vyššieho výkonu v prvej polovici otáčkového spektra je dosiahnuté vďaka odstráneniu spätného tlaku vo výfukovom potrubí pri aplikácii elektronického kompresoru. Prepad výkonu oproti konvenčnému turbodúchadlu nastáva vo vyšších otáčkach, kedy je elektrický kompresor obmedzený návrhovým výkonom elektromotoru. Lepšie využitie výkonu elektromotoru môže byť dosiahnuté návrhom kompresorového koliečka s mapou vyhovujúcou tomuto spaľovaciemu motoru. Na Obr. 29 môžeme ďalej vidieť porovnanie momentovej charakteristiky oboch motorov a na Obr. 30 porovnanie plniacich účinností. Na Obr. 31 môžeme vidieť porovnanie spotreby paliva.



Obr. 29 Porovnanie momentovej charakteristiky motorov



Obr. 30 Porovnanie objemovej účinnosti motorov



Obr. 31 Porovnanie spotreby paliva

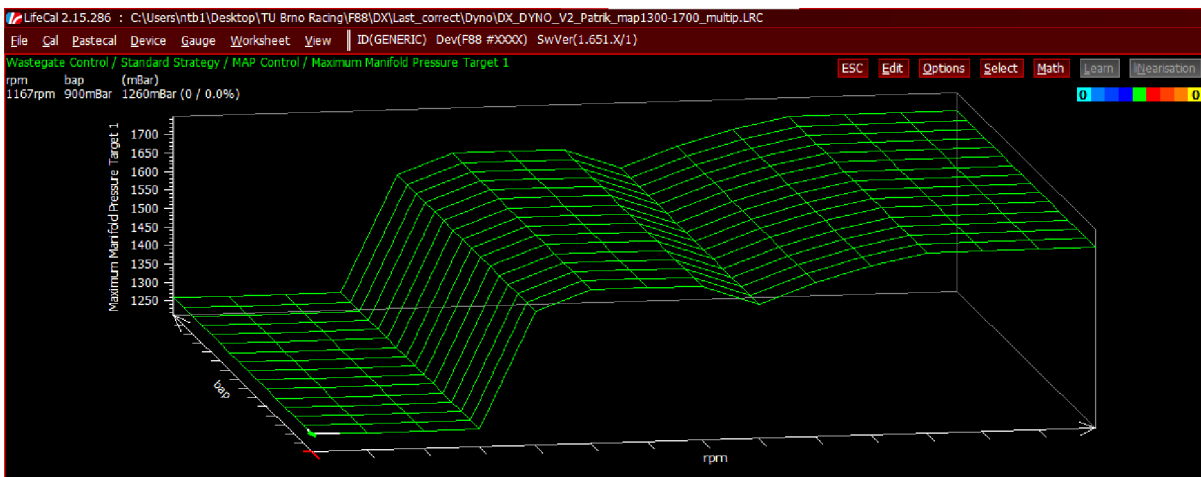
Na základe vyššie uvedených obrázkov je možné vidieť, že motory z hľadiska výkonových parametrov dosahujú najväčšej rozdielnosti vo vyšších otáčkach. Momentová krivka má hladší priebeh, čo je opäť prínosom pre pilotov súťaže Formula Student. Plniaca účinnosť elektrického kompresora je vo vyšších otáčkach nižšia, čo má za následok nižší výkon a krútiaci moment vo vyššie položených otáčkach spaľovacieho motora. Pokles plniacej účinnosti u spaľovacieho motora pri 6 000 ot./min je daný tým, že pri konštrukcii bola stanovená limitná hodnota spaľovacieho tlaku na 100 bar. Rovnako motor s elektrickým kompresorom neprekročí túto hodnotu. Dopad rozdielnosti výkonnostných charakteristík je vypracovaný v práci nižšie na základe porovnania času na kolo monopostov s oboma verziami spaľovacieho motora. Na Obr. 31 môžeme vidieť nižšiu spotrebu paliva v prípade motora s osadeným elektrickým kompresorom v priebehu veľkej časti otáčkovej charakteristiky. Tento fakt môže byť podstatný z pohľadu bodovania súťaže, kedy je hodnotená aj spotreba paliva v priebehu závodu Endurance.

Podstatným poznatkom je správnosť nastavenia výpočtového modelu, pričom sme boli schopní dosiahnuť požadovaných hodnôt motora pomocou riadenia PID kontrolérom.

4.2 ENERGETIKA

Táto kapitola diplomovej práce sa zaoberá porovnaním energetickej spotreby oboch typov kompresorov, ako toho použitého v konvenčnom turbodúchadle tak aj toho, ktorý je použitý v elektrickom kompresore. Pre simuláciu tranzitných dejov bol opäť použitý výpočtový softvér GT-Power, pomocou ktorého sme boli schopní napočítať jednotlivé energetické bilancie oboch rotačných členov v rôznych záťažových podmienkach. Ako vstupné dáta poslúžili reálne podmienky a namerané hodnoty počas jazd s monopostom Dragon v závodoch Formula Student. Konkrétne sa jedná o súťažné disciplíny Autocross a Endurance.

Autocross je jednou z dynamických súťažných disciplín, kde má každý z dvojice pilotov len jednu možnosť zajazdiť na predom stanovenej trati najrýchlejší čas. Technika a pohonná jednotka monopostu je v tejto disciplíne vyhnaná do maxima, čo v praxi pre monopost Dragon znamená maximálny plniaci tlak v konfigurácii *High Boost*, kedy hodnota plniaceho tlaku v saní dosahuje hodnoty až 1,6 bar. Nastavenie stratégie *high-boost* v riadiacej jednotke monopostu LifeRacing F88 môžeme vidieť na Obr. 32.



Obr. 32 High-Boost stratégia - Wastegate control

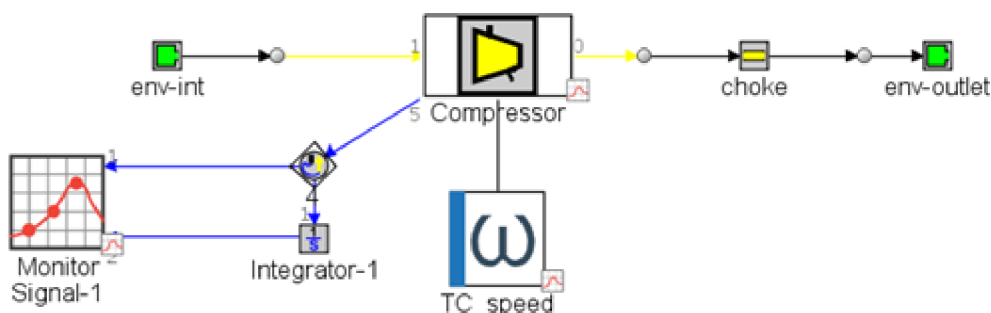
Disciplína Autocross zároveň slúži ako kvalifikácia do hlavnej časti dynamických disciplín, ktorou je disciplína Endurance. Endurance je vytrvalostný závod, v ktorého polovici sa vodiči monopostu medzi sebou vystriedajú. Z hľadiska výdrže pohonnej jednotky a spotreby paliva sa v tomto type závodu s monopostom Dragon jazdí *low-boost* stratégia, pri ktorej je dosahovaný tlak v saní približne 1,3 bar. Dáta boli nazerané počas závodu FS Germany.

Z vyššie vymenovaných disciplín boli prevzaté reálne dáta, ktoré poslúžili ako vstupné hodnoty pre výpočtový model v softvéri GT-Power, pomocou ktorého boli stanovené jednotlivé príkony kompresorových častí.

4.2.1 VÝPOČET SPOTREBY ENERGIE – KONVENČNÉ TURBODÚCHADLO

V praxi sa pre stanovenie jednotlivých pracovných hodnôt turbodúchadla využíva prietoková testovacia stola tzv. „Gas-stand“. Testovanie turbodúchadla je časovo a zdrojovo náročný proces. Turbodúchadlo je testované v zvolenom počte pracovných bodov pre rozdielne otáčky turbodúchadla, pričom hodnoty teplôt sa musia správať stacionárne v prípade, že sa pri meraní vytvára práve mapa turbodúchadla. Cieľom metódy merania turbodúchadla na *Gas-stande* je nájsť kontrolnú stratégiu, ktorá bude časovo efektívna a preniesie turbodúchadlo z jedného pracovného bodu do druhého [19]. *Gas-stand* je schopný simulovať správanie sa turba v rôznych pracovných režimoch a podmienkach, za sledovania jeho vitálnych veličín, ale aj korelácie s jeho predpokladanými výkonovými hodnotami.

Na tomto princípe je založený aj výpočet spotreby energie konvenčnej kompresorovej časti motora Dragon. Pre potreby simulácie bol v prostredí GT-Power vytvorený výpočtový model virtuálneho *Gas-Standu*. Kompletný model virtuálneho *Gas-Standu* konvenčnej časti môžeme vidieť na Obr. 33.



Obr. 33 Virtuálny Gas-Stand – Konvenčná kompresorová časť

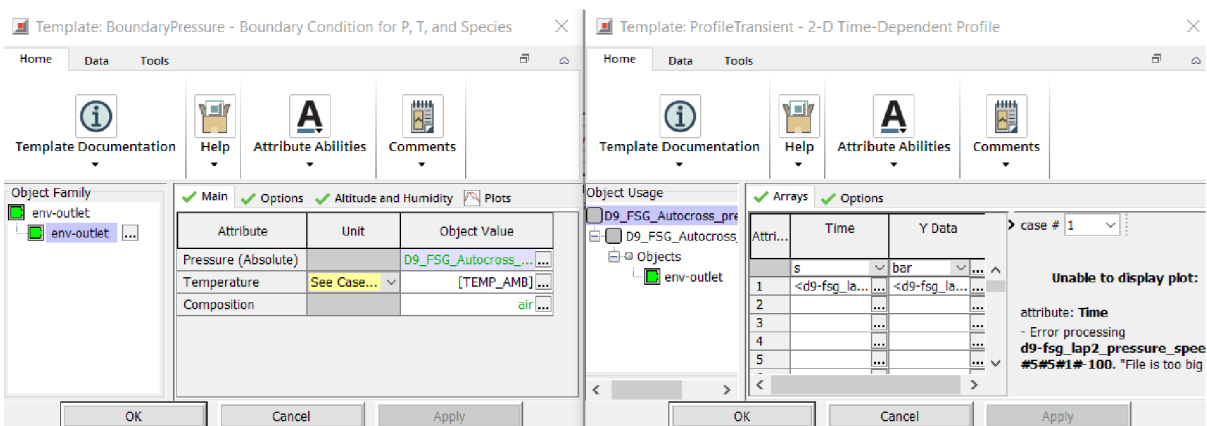
Z reálnych dát boli prevzaté veličiny ako otáčky turbodúchadla a tlakový pomer. Tie boli pomocou softvéru Life-View vyexportované do príslušného excelovského súboru, kde si dáta prešli úpravami. Hlavnou úpravou bol prepočet tzv. „Boost pressure“ ktorý, bol vytvorený ako matematický kanál v prostredí Lifeview, na tlakový pomer tak, aby sme ho mohli v správnom tvare importovať do modelu. Vyobrazenie zozbieraných dát v prostredí softvéru Lifeview môžeme vidieť na Obr. 34.



Obr. 34 Vzor vyexportovaných reálnych dát – „Boost“

Následne sa dáta spracovali v Excelovskom súbore, ktorý bol potom importovaný do prostredia GT-Power a slúžil ako predloha vstupných dát pre samotný výpočet.

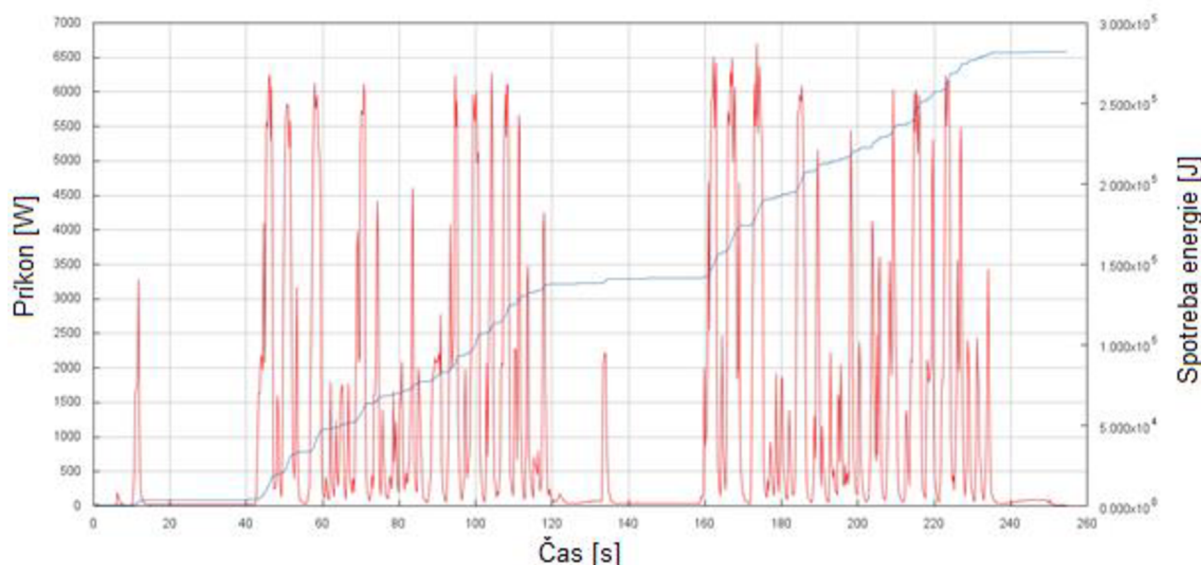
Pomocou člena „env-int“ boli simulované reálne podmienky okolia ako je teplota, tlak a samotné médium, ktorým je v tomto prípade vzduch. Model člena kompresoru bol definovaný kompresorovou mapou, s ktorou pracuje konvenčné turbodúchadlo. Na výstupe z neho bolo umelo vytvorené škrtanie pre stabilizáciu prietoku, ktoré ústi do predlohy vonkajšieho prostredia. Pomocou tejto predlohy bol simulovaný samotný tlakový pomer na výstupe z kompresoru. Definíciu okrajovej podmienky pomocou importovaných dát môžeme vidieť na Obr. 35.



Obr. 35 Vzor importovaných dát – GT-Power Virtual Gas-Stand

Člen „TC_Speed“ umožňuje reguláciu otáčok samotného rotoru v čase, do tohto členu boli opäť naimportované jednotlivé hodnoty z reálnych dát.

V závere sme schopní pomocou predlohy „Monitor Signal“ sledovať priebeh výpočtu okamžitej spotreby energie kompresoru za daných importovaných okrajových podmienok. Pomocou „Integratoru“, ktorý krivku integruje v čase, na konci výpočtu dostávame finálnu hodnotu spotreby energie v priebehu disciplíny Autocross alebo Endurance pre konvenčnú kompresorovú časť. Tento princíp simulácie je vyobrazený na Obr. 36.

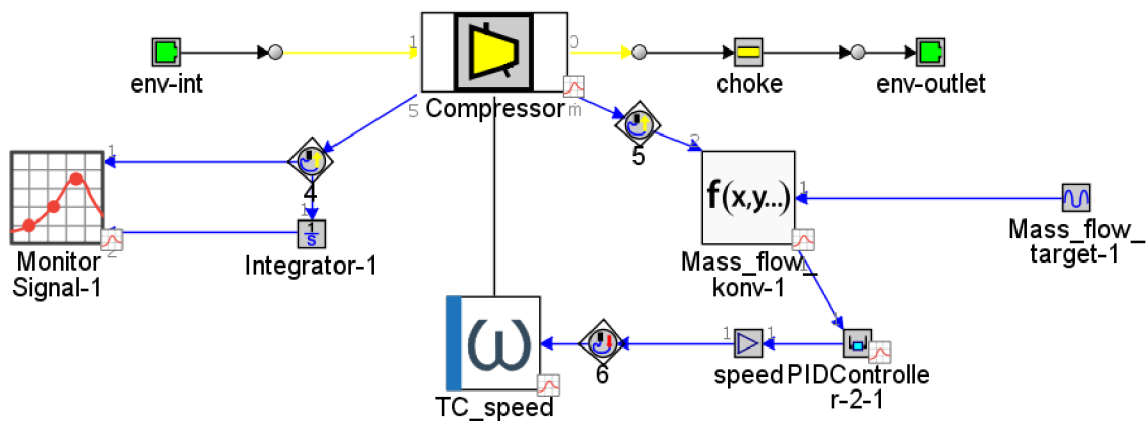


Obr. 36 Vykreslenie výpočtu spotreby energie

4.2.2 VÝPOČET SPOTREBY ENERGIE – ELEKTRICKÝ KOMPRESOR

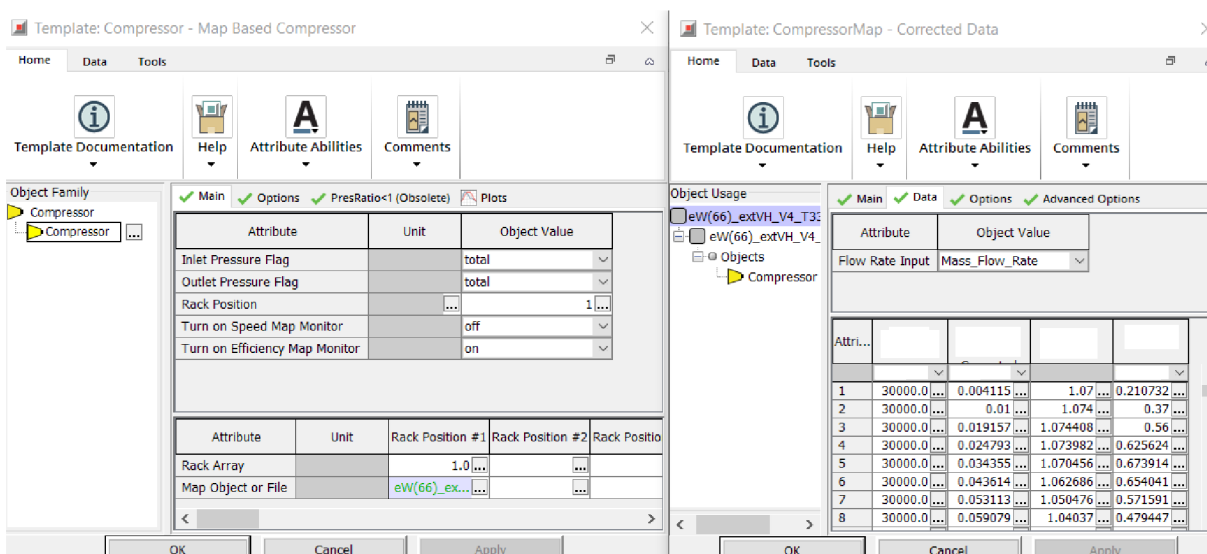
Pre výpočet spotreby energie v jednotlivých súťažných disciplínach u elektrického kompresoru bol použitý virtuálny *gas-stand* model pracujúci na rovnakom princípe ako u konvenčnej kompresorovej časti. Treba však konštatovať, že *gas-stand* je stroj pracujúci v reále aj s turbínovou časťou turbodúchadla, pre potreby výpočtu však bola odstránená.

Hlavným problémom bola nemožnosť definovať okrajovú podmienku otáčok kompresoru, tak ako tomu bolo u konvenčného modelu. Ako už bolo vyššie spomenuté, obmedzenie otáčok bolo na základe výrobcu stanovené na hodnotu 90 000 ot/min. To v praxi znamenalo nájsť iný spôsob regulácie kompresorového stupňa počas simulácie spotreby energie. Vzhľadom na veličiny, ktoré popisuje kompresorová mapa – hmotnostný prietok, otáčky, tlakový pomer a efektívnosť, ostala teda jediná možnosť ako dosiahnuť požadovaných stavov kompresoru v priebehu výpočtu. Regulovanou veličinou ostali otáčky kompresoru pri stanovenom plniacom tlaku, ktorého dosahoval kompresor v reálnych podmienkach, otáčky však boli regulované tak, aby dosahovali prietoku zhodného s konvenčným kompresorom. Toto usporiadanie modelu môžeme vidieť na Obr. 37.



Obr. 37 Virtuálny Gas-Stand – Elektrický kompresor

Popis základných komponentov, akými sú napr. vonkajšie prostredie, škrtenie alebo kompresor ostáva rovnaký. Kompresorovú mapu však bolo potrebné definovať nanovo, podľa vyššie spomínanej voľby kompresoru na základe vhodnosti pre aplikáciu do monopostu Dragon. Proces definovania kompresorovej mapy môžeme vidieť na Obr. 38. Tá bola naimportovaná z poskytnutého súboru.



Obr. 38 Definícia kompresorovej mapy – E-compressor

Pribudla však predloha Math Equation a vyššie popisovaný PID kontrolér pre riadenie otáčok, práve na základe Math Equation, do ktorej vstupujú hodnoty hmotnostného prietoku kompresorom a požadovaného cieľového hmotnostného prietoku. Tieto dve veličiny sú v tejto predlohe dané do pomeru, ktorý slúži ako vstupná hodnota pre PID kontrolér, ktorý na základe výsledku tejto rovnice zhodnotí, kde sa oproti „targetu“ nachádza.

Komplikovanou časťou nastavenia výpočtu bol PID kontrolér samotný. Nastavenie jeho zložiek a limitov bolo iteračným procesom. Pri nastavovaní bol sledovaný priebeh správania sa PID regulátoru a následná úprava jeho zložiek a limitov tak, aby bol schopný v čase správne regulovať otáčky kompresoru a my sme tak získali potrebnú vypočítanú spotrebu energie. Proces ladenia PID kontroléru bol konzultovaný s Ing. Adamom Vondrákom z firmy

Garrett Advancing Motion, za účelom správneho a efektívneho nastavenia s cieľom dosiahnutia korektných výsledkov. Samotný proces výpočtu a odčítania finálnej spotreby energie bol rovnaký ako u konvenčného typu kompresorovej časti.

Celkovo boli vypočítané štyri hodnoty spotreby energie pri dvoch rôznych závodných disciplínach popisovaných vyššie v práci. Porovnanie výsledkov spotreby energie medzi konvenčnou časťou kompresoru a elektrickým kompresorom môžeme vidieť v Tab. 2.

Tab. 2 Porovnanie spotreby energií kompresorových častí

	Konvenčné turbodúchadlo	E-Compressor
Endurance	353,82 [Wh]	262,98 [Wh]
Autocross	78,34 [Wh]	66,17 [Wh]

Na základe tabuľky vieme zhodnotiť spotrebu energií ako konvenčnej kompresorovej časti, tak aj elektrického kompresoru. Vidíme, že spotreba u e-compressoru je v oboch prípadoch nižšia. To znamená, že stroj pracuje efektívnejšie než jeho konvenčné riešenie. Zvýšenie efektivity je dosiahnuté napr. zlepšením aerodynamiky. Kompresorové koliečko použité u e-compressoru je spojené s novodobými technológiami návrhu a výrobnými procesmi, pričom konvenčné turbodúchadlo je staršieho dátumu výroby. Rovnako sú však hodnoty spotreby energie podobné, tento fakt, môžeme považovať ako správnosť postupu pri simulácii a nadobudnuté výsledky vieme využiť v ďalšej kapitole, ktorou je návrh „Battery packu“.

4.2.3 NÁVRH „BATTERY PACKU“

Battery pack sa dá voľne preložiť ako batériová jednotka, ktorá je využívaná pre uskladnenie energie do momentu potreby jej využitia. Skladá sa zo setov prevažne rovnakých typov baterkových článkov. Jednotlivé články sú navzájom prepojené buď sériovo alebo paralelne za účelom dosiahnutia požadovaných veličín akými sú napr. napätie, kapacita alebo energetická hustota. V súčasnosti sú jedným z hlavných predmetov pri návrhu elektromobilov. V týchto prípadoch sa jedná o viaccyklové *battery packs*, ktoré je možné opakovane vybíjať a dobíjať. V takýchto prípadoch bývajú vybavené aj senzormi, ktoré snímajú ich vitálne parametre a hospodária s nimi tak, aby nedošlo k ich zničeniu.

V týchto prípadoch sú batériové sety vybavené regulátormi, ktoré na základne vstupných údajov zo senzorov regulujú napr. napätie na jednotlivých článkoch tak, aby nepresiahli svoju maximálnu povolenú hodnotu, ale aj aby neklesli pod minimálnu, čo by mohlo mať za následok úplné zničenie článku. Pomocou regulátora dokážeme dosiahnuť aj vyváženú mediu medzi jednotlivými článkami tak, že presúvajú uskladnenú energiu zo „silnejších“ do „slabších“ článkov, čo v konečnom dôsledku znamená dlhšiu životnosť a vyvážený výkon.

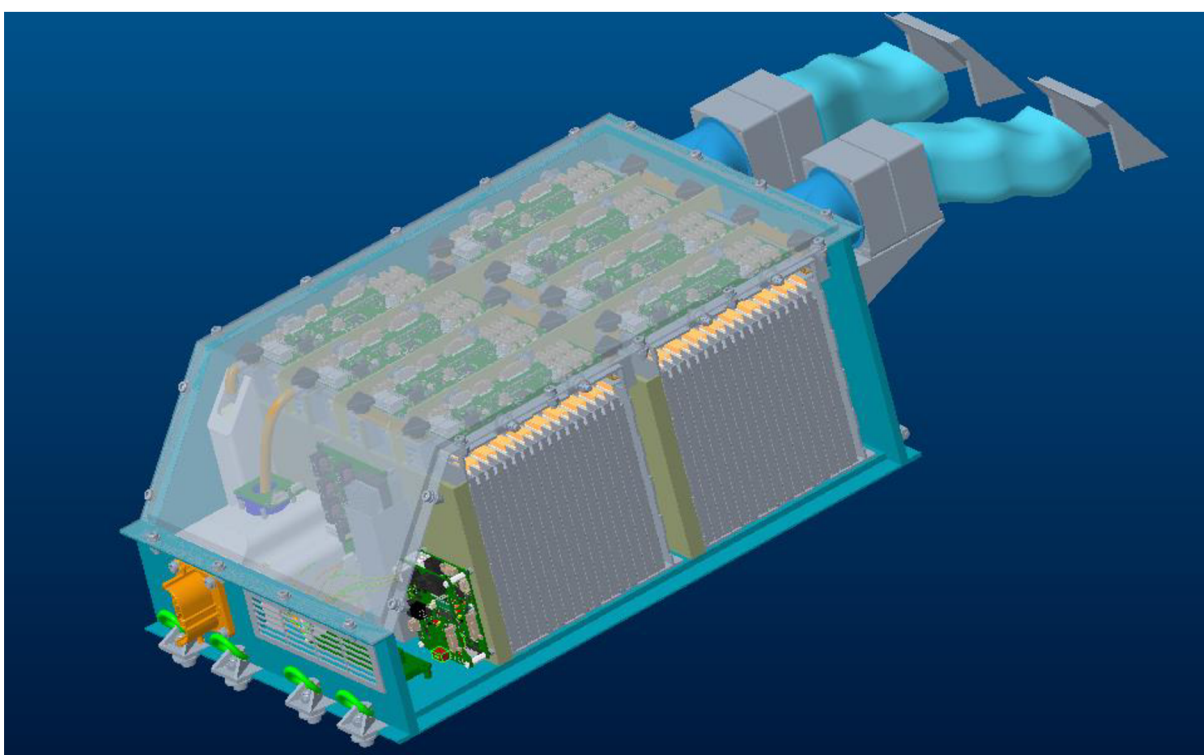
Vzhľadom k tomu, že v *battery packu* prebieha elektrochemická reakcia, ktorá generuje požadovanú energiu, tak v tomto procese vzniká teplo. Preto musia mať v konkrétnej aplikácii

battery pack správne nadimenzované chladenie k tomu, aby bol výkon extrahovaný z batérie optimálny a nie obmedzený nesprávnymi pracovnými podmienkami.

Medzi hlavné výhody *battery packu* ako zdroja energie patrí napr. možnosť ich fyzicky využiť v rôznych typoch aplikácie, vrátane použitia toho istého medzi rôznymi strojmi. To napomáha aj zvýšeniu pracovného času stroja, kedy sa môže vybitý zdroj napojiť k nabíjačke a byť nahradený identickým. Ďalšou výhodou môže byť flexibilita a konfigurovateľnosť, kedy vieme už pri návrhu *battery pack* dizajnovať tak, aby mal požadované rozmery a tvar.

Medzi nevýhody patrí, že *battery pack* samotný je potenciálnym nebezpečenstvom z elektrického a chemického hľadiska.

Na Obr. 39 môžeme vidieť *battery pack* monopostu Dragon E2.



Obr. 39 Battery pack – Dragon e2

Výpočetný návrh *battery packu* pre elektrický kompresor prebehol na princípe určenia správneho typu článku, ktorý bol správne spojený paralelne/do série tak, aby akumuloval potrebnú energiu pre činnosť kompresoru.

Taktiež bolo potrebné dodržať pravidlá stanovené súťažou. Pohon elektrického kompresoru spadá do kategórie *low voltage*, ktorý definuje maximálne napätie na 60 V pri jednosmernom prúde. V tejto aplikácii bola hodnota napätia nastavená na 48 V, pričom bolo potrebné dodržať aj pravidlo určujúce maximálnu hmotnosť *battery packu* na 3 000 g.

LI-ION MOLICEL P42A

Prvým kandidátom na tvorbu battery packu bol článok s označením: Molicel INR21700-P42A 4 000 mAh – 45 A button top. Jedná sa o článok od firmy Molicel s Li-ion chémiou. Je to lítium-iónová batéria, ktorá je znovu-nabíjateľná. Batériový článok je vyobrazený na Obr. 40 spolu s jeho charakteristikou.



Capacity: 4000mAh
Rated Voltage 3.6V - 3.7V
Charging cycle termination voltage 4.20V ± 0.05V
max discharge current: 45A
Do not discharge deeper than 2.5V
Plus pool: Flat top
Chemistry: Li-ion
Protection circuit: Without
Diameter: 21.2mm
Height: 71.7mm
Weight: 72g

Obr. 40 Litium-Iónový článok Molicel – P42A [20]

Požadované dosiahnuté napätie *battery packu* je 48 V, pričom napätie, ktoré sme schopní dostať z jedného článku je 3,7 V. Na základe jednoduchého prepočtu vieme určiť, že na dosiahnutie tohto napätia *battery packu* je nutné napojiť 13 týchto článkov sériovo. Hmotnosť jedného článku je 66,5 g, čo predstavuje finálnu hmotnosť jednej série o 13-tich článkoch – 864,5 g. Vzhľadom na pravidlá určené súťažou, kedy *battery pack* musí vážiť nie viac ako 3 000 g, maximálna prípustná hodnota bola určená na 2 500 g, s rezervou 500 g na obal *battery packu*.

Ďalším krokom bol výpočet potrebnej kapacity *battery packu*, ten sa odvíjal už od predom stanovenej maximálnej hmotnosti. Kapacita *battery packu* sa zvyšuje paralelným spájaním sériovo zapojených článkov. Aby sme dodržali nastavený váhový limit, bolo jednoduchých prepočtom určené, že sme schopní použiť maximálne 3 sety 13-tich sériovo zapojených článkov pre dosiahnutie potrebnej kapacity. Táto konfigurácia predstavovala finálnu váhu 2 593,5 g.

Celková kapacita *battery packu* je vypočítaná v rovnici (4).

$$C = s_1 \cdot U_1 \cdot p \cdot c_1 = 13 \cdot 3,7 \cdot 3 \cdot 4 = 577,2 \text{ Wh} = 12 \text{ Ah} \quad (4)$$

Z tohto výpočtu môžeme usúdiť, že kapacita *battery packu* bude dostatočná aj pre závod Endurance s elektrickým kompresorom. Ďalším návrhovým parametrom, ktorý bolo treba overiť je hodnota špičkového výkonu, ktorú môžeme z *battery packu* odobrať. Vzhľadom na maximálny výkon motora elektrického kompresoru, ktorý je 9 kW, nesmie byť táto hodnota nižšia. Výpočet špičkového výkonu, ktorý sme z *battery packu* schopní odobrať je vypočítaný v rovnici (5).

$$P_{max} = s_1 \cdot U_1 \cdot I_{max} \cdot p = 13 \cdot 3,7 \cdot 45 \cdot 3 = 6493,5 \text{ W} = 6,5 \text{ kW} \quad (5)$$

Na základe výpočtu v rovnici (5) vieme usúdiť, že špičkový výkon *battery packu* zostavený z týchto batériových článkov nie je dostatočný. Z tohto dôvodu bolo potrebné vybrať iný batériový článok, ktorý by splnil jednak váhové ale aj výkonnostné požadované parametre.

Tabuľku s finálnou konfiguráciou *battery packu* za použitia týchto článkov môžeme vidieť v **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**

Tab. 3 Battery pack – MOLICEL

Li-Ion MOLICEL P42A	
Konfigurácia	13s3p – 48 V
Hmotnosť	2593,5 g
Kapacita	12 Ah
Špičkový výkon	6,9494 kW

TURNIGY 2200MAH 1S 40C LIPO PACK

Ďalšou z uvažovaných možností batériového článku je článok od firmy Turnigy. Jedná sa o iný typ, než bol spomenutý v prvom výpočte. Nie je to totiž článok kruhového prierezu a jedná sa o lítium-polymerovú chémiu. Jedná sa o pomerne nový typ akumulátoru, ktorý má široké využitie. Vychádza z Lítium-Iónových batérii, ale zlepšuje ich vlastnosti. Jeho výroba je technologicky a energeticky náročná, čo sa odráža aj na jeho finálnom nacenení. Na Obr. 41 môžeme vidieť zvolený akumulátor aj s jeho charakteristikami.



Specs:
 Minimum Capacity: 2200mAh
 Configuration: 1S / 3.7v / 1Cell
 Constant Discharge: 40C
 Cell Weight: 56g
 Cell Size: 97 x 34 x 9mm

Obr. 41 Článok od Firmy Turnigy [21]

Výpočet pre tento typ batériového článku prebehol rovnakým spôsobom ako u predošlého. Hlavnými parametrami bolo dodržanie hmotnostného limitu, získanie potrebného napätia, kapacity a špičkového výkonu, ktorý je možné z *battery packu* čerpať.

Do série je potrebné zapojiť 13 článkov na dosiahnutie napätia 48 V. Hmotnosť jedného článku je 56 g a teda hmotnosť jednej série je 728 g. Do limitnej hodnoty hmotnosti 2 500 g sme schopní aplikovať tri takto paralelne zapojené série, čo predstavuje *battery pack* o celkovej hmotnosti 2 184 g. To znamená výrazné ušetrenie hmotnosti voči prvej voľbe akumulátora.

V tejto konfigurácii dostaneme *battery pack* o kapacite 6,4 Ah, čo je opäť dostačujúce aj pre nasadenie elektrického kompresora v disciplíne Endurance s dostatočnou rezervou. Poslednou dôležitou informáciou je špičkový výkon, ktorý sme schopný odobrať z akumulátora, ako už bolo vyššie spomínané táto hodnota nesmie byť nižšia ako 9 kW. Vypočítaná hodnota je však 12 698,4 W a *battery pack* teda poskytuje dostatočný výkon aj v tejto oblasti s dostatočnou rezervou tak, aby nedošlo k jeho poškodeniu.

Finálnu konfiguráciu *battery packu* za použitia týchto článkov môžeme vidieť v **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

Tab. 4 *Battery pack* – Turnigy

TURNIGY 2200MAH 1S 40C LIPO PACK	
Konfigurácia	13s3p – 48 V
Hmotnosť	2184 g
Kapacita	6,4 Ah
Špičkový výkon	12,698 kW

SONY VTC6 18650

Poslednou overenou a ekonomicky výhodnou možnosťou sú články, ktoré boli použité pri stavbe *battery packu* monopostu Dragon e1. Z ekonomického hľadiska by šlo o výhodnú variantu, vďaka už nakúpenému množstvu článkov z predošlej závodnej sezóny. Tento typ článku s jeho charakteristikou môžeme vidieť na Obr. 42.



Obr. 42 Sony VTC6 – Dragon e1 [22]

Článok je najľahším z vyššie uvedených, čo predstavuje možnosť paralelného zapojenia až 4 setov. Jeden set predstavuje aj v tomto prípade na základe výpočtu 13 sériovo zapojených článkov, pričom dosiahnutá hmotnosť je len 2 324 g, ktorá stále predstavuje hmotnostnú rezervu pre návrh obalu *battery packu*. V tejto konfigurácii by sme boli schopní dosiahnuť kapacity energetického úložiska až o hodnote 12 Ah. Limitujúcim by však opäť ostal špičkový výkon, ktorý by sme z *battery packu* mohli odobrať. Ten predstavuje hodnotu 5 772 W, čo pri odbere elektromotora o výkone 9 000 W nie je dostačujúce.

Tab. 5 Battery pack - Sony

SONY VTC6 18650	
Konfigurácia	13s3p – 48 V
Hmotnosť	2324 g
Kapacita	12 Ah
Špičkový výkon	5,772 kW

Na základe vyššie spomínaného teda môžeme konštatovať, že vhodnou voľbou článku je produkt od Turnigy, ktorý je strednou cestou z hľadiska hmotnosti, ale ako jediný z uvedených článkov spĺňa všetky potrebné výkonové vlastnosti pre kompozíciu *battery packu*. Článok od Turnigy je taktiež vhodnejší kvôli svojmu tvaru a zástavbovým rozmerom, preto je braný zreteľ na tento fakt už pri samotnom výpočte.

4.3 LAPTIME SIMULÁCIA A REÁLNE ČASY

Lap Time simulácia je samostatným odvetvím dynamiky vozidiel, často využívaná v motor športe, pričom umožňuje zmeny na závodnom aute aplikovať v teoretickom prostredí bez potreby fyzicky navštíviť trať.

S rozvojom počítačových simulácií ako FEA, CFD atď., ktoré umožňujú veľmi presné predpovede na základe matematických modelov, bolo dosiahnuté v rôznych odvetviach inžinierstva veľkého pokroku. Samostatne urýchľujú celý proces návrhu a taktiež poskytujú komplexnejší pohľad na danú problematiku. Tento princíp sa časom preniesol aj do dynamiky

vozidiel, prešla dlhá doba od chvíle kedy bola objavená potrebná matematika k popisu tejto problematiky. Ďalším logickým krokom v automobilovom inžinierstve bolo navrhnuť reprezentatívny virtuálny výpočtový model, so zámerom urýchliť návrhový proces. V priebehu rokov sa presnosť týchto výpočtov rapídne zlepšovala, vrátane „multi-body“ softvérov, ktoré umožňujú prepojenie jednotlivých súčastí tak, aby mohol byť simulovaný relatívny pohyb každej z nich. V súčasnosti tak už vieme simulovať aj nelineárne správajúce sa komponenty akými sú napr. pneumatiky vozidla a aplikovať ich ako celok v analytickom výpočte.

V dnešnej dobe je dynamika vozidiel jedným z najdôležitejších elementov vývoja vozidiel, ako u bežných osobných automobilov tak aj v motor športových aplikáciách. Samotná lap-time simulácia umožňuje analytický prístup k optimálnemu nastaveniu auta, kde ku generovaným virtuálnym dátam je možné pristúpiť rovnako ako k dátam, ktoré sú vytvorené fyzickými senzormi umiestnenými na aute.

Existujú dve hlavné cesty ako sa dá k Lap-Time simulácii pristupovať. Prvou z nich je overenie samotného dizajnu automobilu, či už po stránke aerodynamiky, zavesenia kolies alebo rôznych konfigurácií pohonnej jednotky. Tento prístup vie byť veľmi užitočný už pri návrhovej časti vozidla, kedy vieme analyticky overiť výkonnostné parametre použitých súčastí a ich priamy dopad v čase na jedno rýchle kolo.

Druhý prístup nachádza svoje využitie už pri postavenom automobile, pričom jeho virtuálny model je správne nastavený tak, aby koreloval s reálnymi dátami na určitej trati. Potom vieme model využiť k optimalizácii nastavenia napr. podvozkovej časti tak, aby vyhovovala jazdnému štýlu pilota, resp. správne nastaviť automobil na rôzne časti súťažného víkend, akými sú kvalifikácia a samotný závod, pričom v týchto prípadoch sa autá nastavujú mierne odlišne, samozrejme záleží od pravidiel daných súťažou [23].

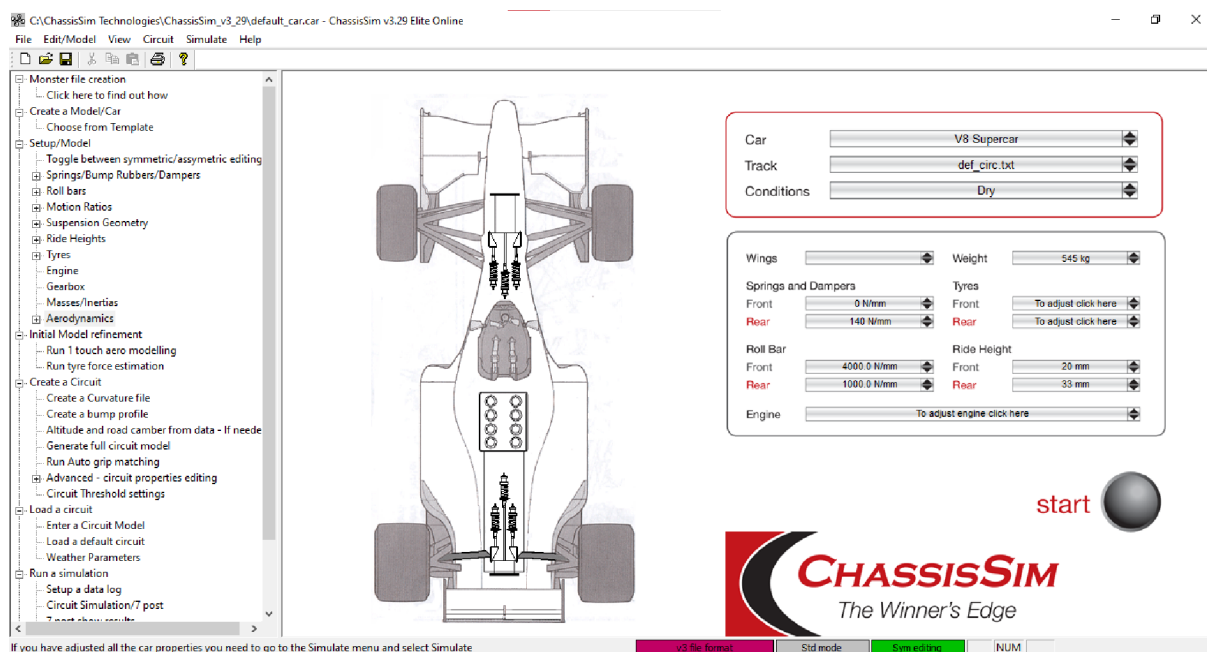
Pre účely osadenia e-compressoru a porovnania času na kolo v disciplíne autocross s monopostom osadeným konvenčným turbodúchadlom bola použitá kombinácia oboch prístupov. V prvom rade bol vytvorený funkčný model monopostu Dragon tak, aby koreloval s reálnymi dátami a teda sa približoval skutočným časom na kolo, pričom pohonná jednotka a jej parametre boli spočiatku definované za použitia konvenčného turbodúchadla. So správne nastaveným virtuálnym modelom auta bolo možné osadiť do pohonnej jednotky elektrický kompresor s naimportovanými dátami, ktoré boli vypočítané v prostredí GT-Power.

Pre účely výpočtu bol použitý softvér ChassisSim.

4.3.1 CHASSISSIM

ChassisSim bol vyvinutý v 90-tych rokoch minulého storočia a od tohto momentu neustále vyvíjaný ako nástroj pre Lap-time simulácie. Vďaka svojmu multi-body dynamickému modelu, môže byť použitý pri rôznych typoch závodných automobilov v rôznych kategóriách, ako napr. Formula 3 a Formula 2, Formula E, prototypy LMP1, Nascar, DTM alebo dokonca pre účely svetového šampionátu rally WRC.

ChassisSim je založený na báze pseudostatickej simulácie, ktorá umožňuje vyobrazenie konkrétneho okruhu a jeho následné rozdelenie do jednotlivých segmentov [24]. Jeho základné rozhranie môžeme vidieť na Obr. 43.



Obr. 43 Základné rozhranie – ChassisSim

TVORBA TRATE – FORMULA STUDENT GERMANY

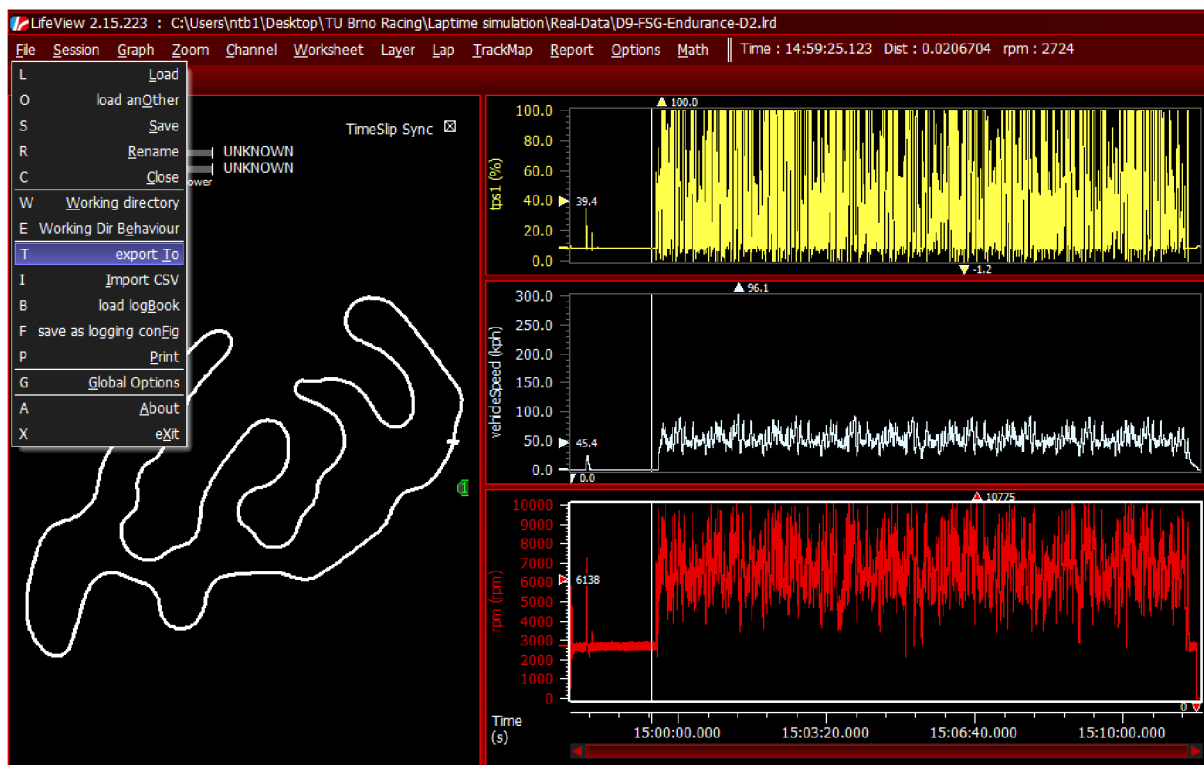
Základom trate je tzv. „Monster file“, ktorý ju definuje a pre jeho tvorbu je potrebné snímať v reálnych dátach niekoľko kanálov, ktoré sú vymenované nižšie.

Potrebné logovacie kanály:

- | | |
|--------------------------------------|----------|
| a) Dĺžka jedného kola | [m] |
| b) Otáčky motoru | [ot/min] |
| c) Priečne preťaženie | [g] |
| d) Pozdĺžne preťaženie | [g] |
| e) Stlačeníu tlmičov všetkých kolies | [mm] |
| f) Natočenie volantu | [deg] |
| g) Pozícia škrtiacej klapky | [%] |
| h) Rýchlosť monopostu | [km/h]. |

Najprv je potrebné vyobrazenie vyššie spomínaných kanálov v prostredí Lifeview v jednom okne. Následne môžeme vyexportovať požadované dáta do súboru vo formáte CSV s určitou frekvenciou snímania, napr. 100 Hz.

Vyexportovaný súbor si vyžaduje následnú úpravu v MS Excel, pričom exportovaný súbor má definované kolo vzhľadom na čas, pre aplikáciu v softvéri ChassisSim je potrebné tieto dáta prepočítať pomocou rýchlosti a času na vzdialenosť. Princiálne vyobrazenie exportu nazbieraných dát môžeme vidieť na Obr. 44.



Obr. 44 Export nazbieraných dát potrebných pre tvorbu trate v ChassisSim

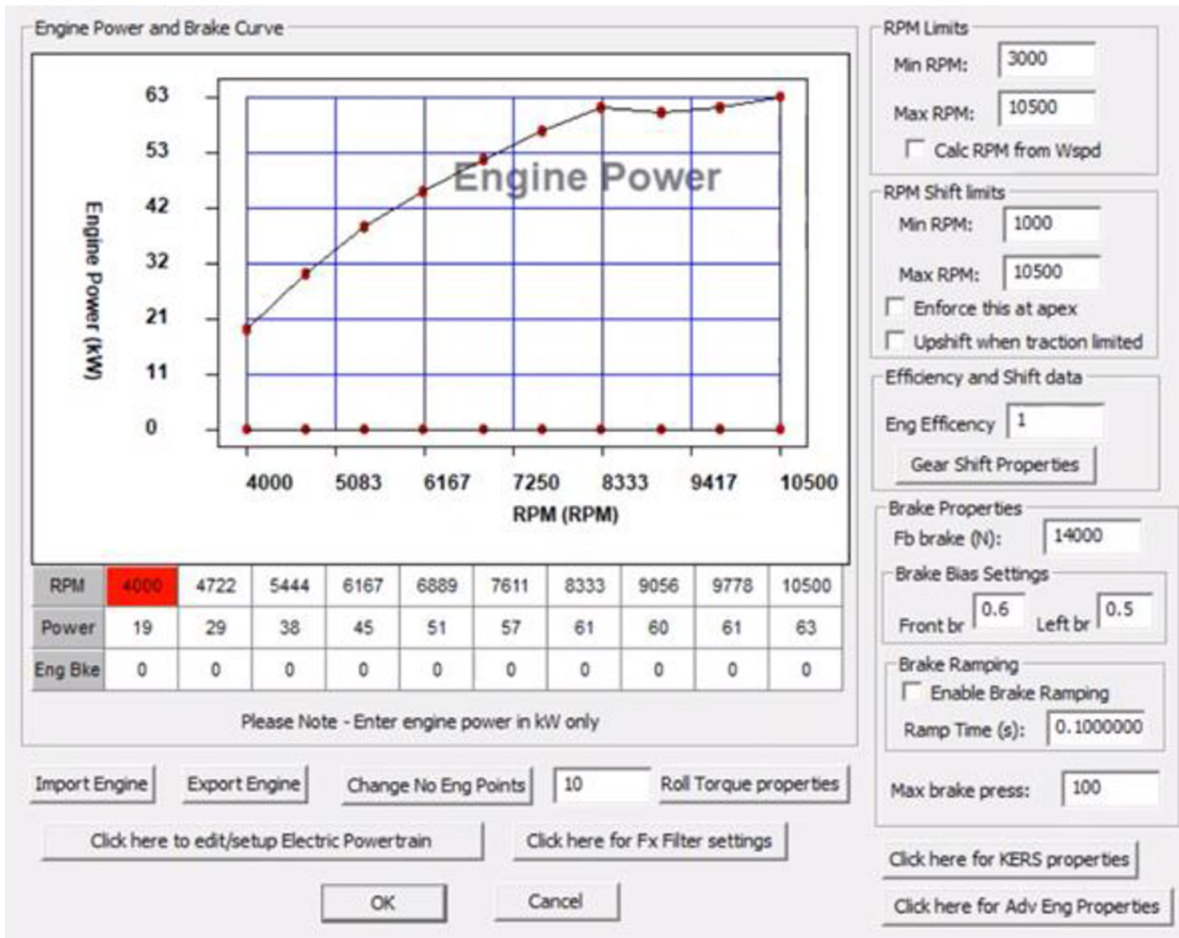
Po jednotlivých úpravách v MS Excel máme súbor pripravený na import do prostredia ChassisSim, kde z „Monster filu“ vytvoríme požadovaný profil trate. Týmto spôsobom bol vytvorený model súťažnej trate Formula Student Germany, ktorá poslúžila k porovnaniu časov na kolo monopostu s konvenčným turbodúchadlom a monopostu s elektrickým kompresorom.

TVORBA AUTA – MONOPOST DRAGON

Softvér ChassisSim slúži na pokročilú simuláciu správania sa vozidla na trati, a teda disponuje množstvom možných nastavení od aerodynamiky, cez charakteristiku podvozku až po pohonnú jednotku a jej špecifikácie. Za účelom tejto diplomovej práce a výpočtu času na kolo bol použitý existujúci model auta, v ktorom bola pohonná jednotka nadefinovaná na základe kombinácie reálnych parametrov a vypočítaných charakteristík motora v prostredí GT-Power.

Parametrami, ktoré je možné definovať v rámci pohonného ústrojenstva sú napr. prevodové pomery v prevodovke, nastavenie diferenciálu, výkonová krivka spaľovacieho motora. Taktiež je možné obmedziť rozsah použiteľných otáčok motora a príkaz na optimálne preradenie pri určitých otáčkach. Nastavenie „Shift delay“ umožňuje nastavenie doby trvania preradenia na vyšší alebo nižší prevodový stupeň pomocou naprogramovania v textovom editore.

Prvým prípadom k nastaveniu bol teda Monopost Dragon s konvenčným turbodúchadlom, v tomto prípade bola prevzatá krivka výkonu motora z výpočtového modelu v softvéri GT-Power a v potrebnom formáte naimportovaná do ChassisSimu. Príklad importu môžeme vidieť na Obr. 45.



Obr. 45 Definovanie výkonnostnej charakteristiky motora v prostredí ChassisSim

Finálne zadefinovanie auta a trate v softvéri ChassisSim môžeme vidieť na Obr. 46.

Car

Track

Conditions

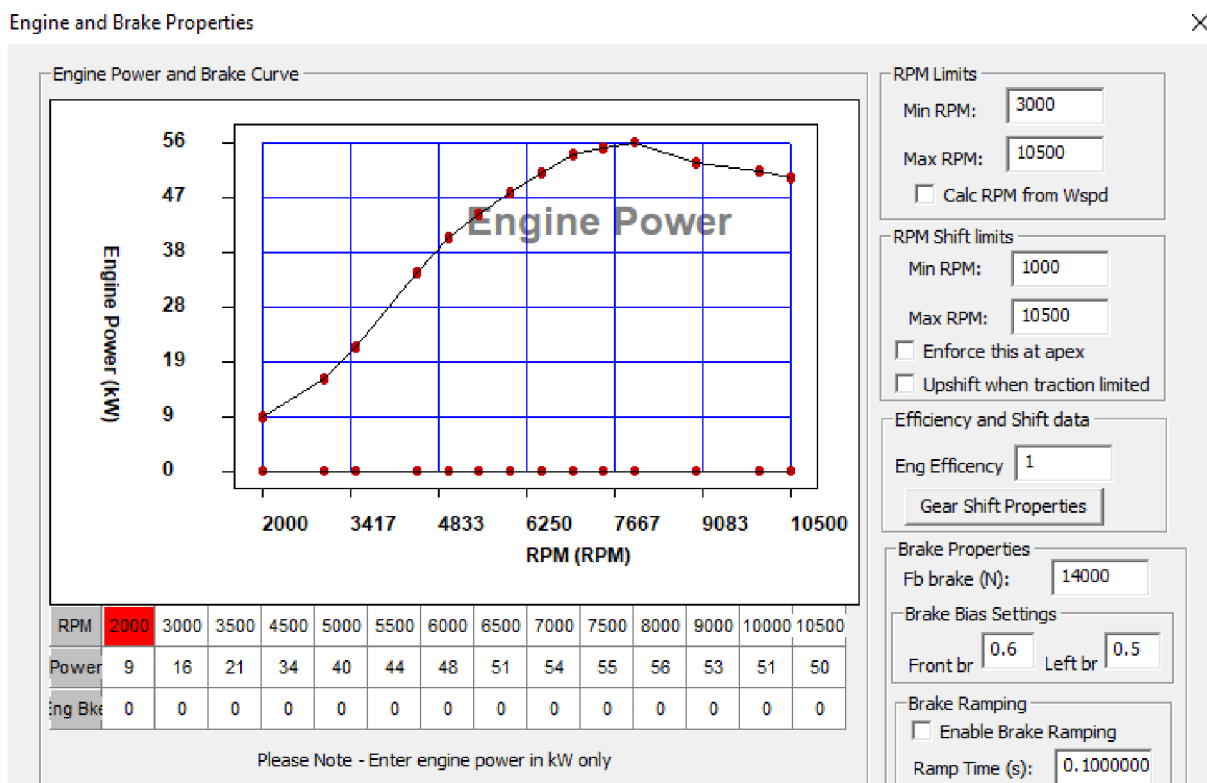
Obr. 46 Finálna voľba trati a verzie monopostu pre výpočet času na kolo

FINÁLNY ČAS NA KOLO

Z Obr. 46 je zrejmé, že bola zvolená verzia monopostu Dragon X na trati Formula Student Germany. Softvér ďalej umožňuje definovať rôzne nastavenie podmienok trate pre simuláciu, v tomto prípade bol zvolený profil trate „sucho“, z dôvodu získania výsledkov, ktoré nebudú skreslené externými vplyvmi.

Pre určenie správneho nastavenia monopostu bolo potrebné vychádzať z reálnych dát a teda aj skutočného času na kolo, ktorý bol monopostom na trati zajazdený. Priemerný čas na kolo bol z reálnych dát stanovený na hodnotu 79,5 s. Odsimulovaný čas na kolo s nastaveniami uvedenými vyššie u monopostu s konvenčným turbodúchadlom predstavoval hodnotu 79,4 s. Vzhľadom na komplexnosť jazdy po závodnej trati v reále s rôznymi typmi externých vplyvov sa vypočítaný čas dostatočne približuje tomu skutočnému a teda vieme konštatovať, že model závodného monopostu je nastavený správne. Zároveň vypočítaný čas na kolo posluží k porovnaniu výsledkov s monopostom osadeným elektrickým kompresorom.

V druhom prípade definície auta v prostredí ChassisSim pre výpočet času na kolo monopostu Dragon X – Elektrický kompresor, boli zmenené len výkonnostné parametre motora, ktoré boli naimportované z prostredia GT-Power. Iné zmeny neboli definované za účelom čo najpresnejšej možnosti porovnania len rozdielu medzi konvenčným turbodúchadlom a elektrickým kompresorom. Definovanie výkonnostných parametrov v prípade monopostu s E-compressorom môžeme vidieť na Obr. 47.



Obr. 47 Definícia spaľovacieho motora s E-Compressorom

Auto bolo potom rovnakým spôsobom zvolené pre výpočet ako tomu bolo v prípade monopostu s konvenčným turbodúchadlom. Trať ostala bez zmeny pre dodržanie rovnakých okrajových podmienok, tzn. trať Formula Student Germany s podmienkami suchej trate. Finálny čas predstavoval hodnotu 79,462 s. Predpokladaný čas predstavoval horšiu hodnotu oproti monopostu s konvenčným turbodúchladom vzhľadom na hodnoty jednotlivých výkonnostných charakteristík, kde spaľovací motor s elektrickým kompresorom vo vyšších otáčkach nedosahoval rovnako vysokých hodnôt. Ako však môžeme vidieť, tak teoretický rozdiel je len 35 stotín sekundy v rámci pohonnej jednotky, kľúčovým parametrom však ostáva odozva na plynový pedál, kde má elektrický kompresor výhodu neexistujúcej turbodiery spôsobenej konvenčným turbodúchadlom, tá nie je v samotnej simulácii uvážená a porovnáva čisto výkonové parametre oboch motorov. V rámci času na kolo teda stále môžeme považovať osadenie elektrického kompresoru ako výhodu. Taktiež treba brať do úvahy nižšiu spotrebu paliva motora s elektrickým kompresorom a teda viac bodov v tejto súťažnej disciplíne. Správanie pohonných jednotiek s rozdielnym plnením je však bližšie popísané v ďalšej kapitole.

4.3.2 RACE-STUDIO ANALYSIS

Race-Studio je aplikácia, ktorá bola navrhnutá a vyvinutá spoločnosťou AIM pre konfiguráciu elektronických zapisovačov, tzv. loggerov a pre analýzu dát za použitia počítača. Tento typ softvéru sa využíva pri „post-ride“ analýzách. Zozbierané dáta sme schopní vykresliť v závislosti na čase alebo polohy vozidla na závodnej trati. Tie sme potom schopní vyhodnocovať za rôznym účelom od kontroly vitálnych funkcií vozidla až po tvorbu ideálneho času na kolo, na základe najlepšie zajazdených jednotlivých sektorov. Aplikácia Race Studio Analysis je kompatibilná s celou radou iných softvérov, ktoré sú v motoršporte bežne používané. Sme teda schopní vyobraziť nie len dáta skutočne nazbierané vozidlom, ale napr. aj tie zo simulácie.

V tejto diplomovej práci bol softvér Race Studio Analysis použitý za účelom kontroly správnosti nastavenia monopostu a možného odhalenia nezrovnalostí s nastavením v prostredí ChassisSim. Rovnako bol použitý aj za účelom porovnania odsimulovaných kôl a nájdenia rozdielov správania sa monopostu s konvenčným turbodúchadlom a elektrickým kompresorom.

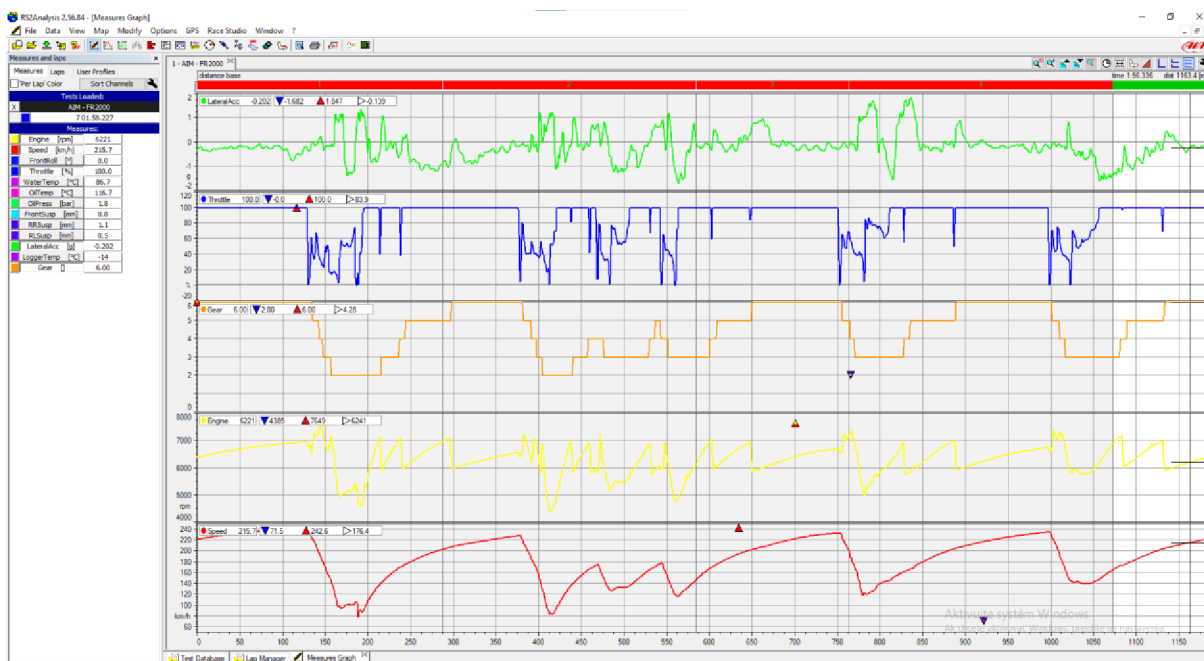
EXPORT A IMPORT DÁT – CHASSISIM X RACE STUDIO ANALYSIS

Zadefinovanie exportu dát z prostredia ChassisSim bolo potrebné vykonať ešte pred samotným spustením simulácie tak, aby softvér vedel aký typ súboru je potrebné exportovať, kam ho uložiť a rovnako je možné pridať si k jednotlivým simuláciám poznámky z daného výpočtu.

Samotné nastavenie sa robí v hlavnej ponuke v záložke „Simulate-Data logging options“. Tabuľku volenia správnych parametrov exportu môžeme vidieť na Obr. 48.

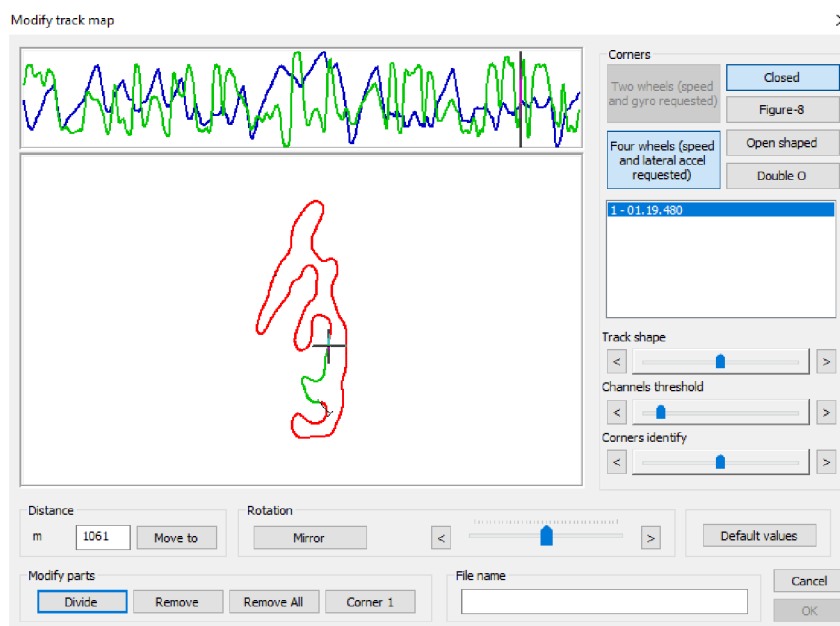
Obr. 48 Definovanie exportu nasimulovaných dát

Princíp exportu bol rovnaký ako pre monopost s konvenčným turbodúchadlom, tak aj pre ten s osadeným elektrickým kompresorom. V prvej kolónke sa nachádza voľba, či samotné dáta chceme zapisovať. Samotný softvér má totiž možnosť optimalizácie dát alebo ich exportu. V druhom okne bolo potrebné zvoliť správny typ súboru označený číslom 11, ktorý hovorí o kompatibilite exportovaných súborov so softvérom výrobcu AIM (Race Studio Analysis). V ďalšom kroku je možné definovať samotný názov konfigurácie auta, trať a prípadnú poznámku pre lepšiu orientáciu už v prostredí Race Studio Analysis. Takto vyexportovaný súbor sme potom schopní analyzovať v spomínanom programe firmy AIM. Softvér ChassisSim ponúka širokú možnosť logovania jednotlivých kanálov, okrem „snímačov“ podvozku monopostu, ktorými sú napríklad stlačenie tlmičov, natočenie volantu, preťaženie atď., sú to aj základné parametre príslušnej pohonnej jednotky, tými sú napr. otáčky motora, poloha škrtiacej klapky, zaradený prevodový stupeň a nakoniec samotná rýchlosť monopostu. Základné rozhranie softvéru Race Studio Analysis môžeme vidieť na Obr. 49.



Obr. 49 Základné rozhranie Race Studio Analysis – Fr2000

Následne boli do tohto prostredia naimportované súbory zo softvéru ChassisSim. Bola prevedená kontrola všetkých logovaných kanálov a ich prítomnosť v danom súbore. Ďalšou z možností je tvorba závodnej trate, ktorú vieme používať ako záchytný bod pri skúmaní konkrétnej situácie na trati. Trať je vykreslená na základe dát získaných zo snímača GPS v reálnych podmienkach alebo je priamo zadefinovaná exportom z virtuálnej LapTime simulácie. V tomto prípade bola mapa vytvorená na základe reálnych dát v LifeView, ktoré boli naimportované do prostredia ChassisSim, následne potrebné informácie k jej vytvoreniu preniesol do prostredia Race Studio Analysis. Na Obr. 50 môžeme vidieť proces tvorby mapy v spomínanom softvéri.

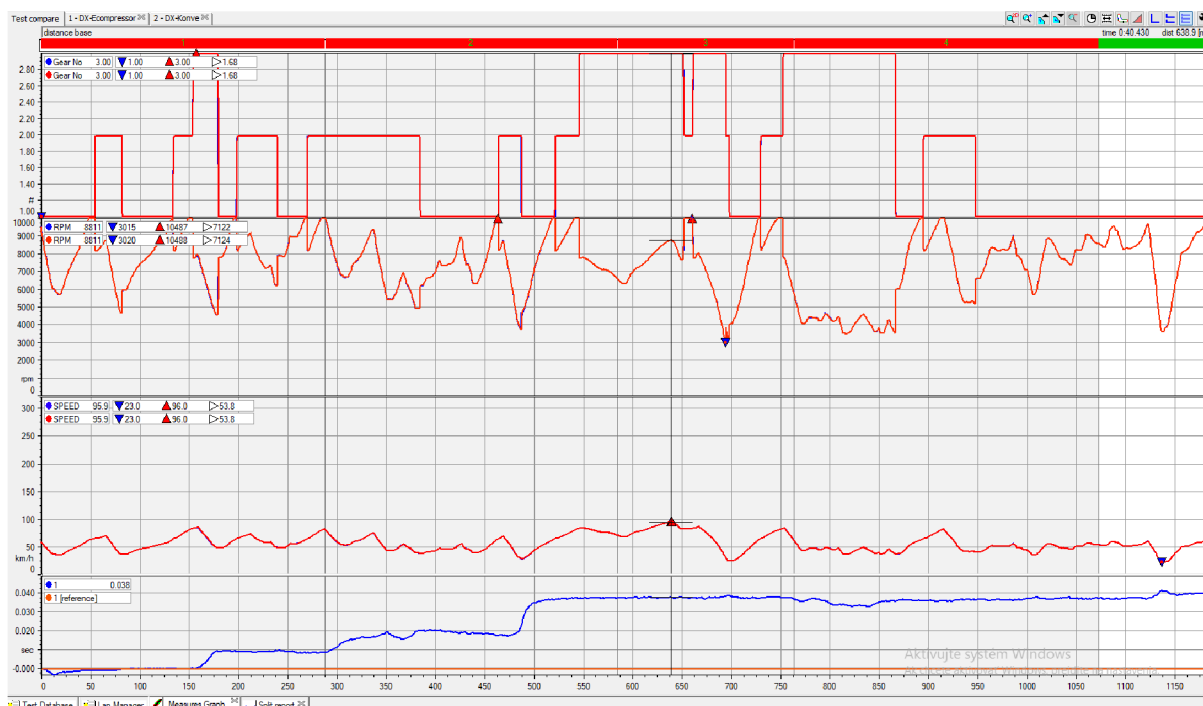


Obr. 50 Proces tvorby mapy - Race Studio Analysis

Mapu vytvorenú na základe importovaných dát je potom možné rozdeliť do jednotlivých sektorov podľa požiadaviek užívateľa tak, aby odpovedali reálnym sektorom trate počas závodného víkendú alebo so zreteľom na detailné skúmanie konkrétnych častí trate. Na Obr. 50 môžeme vidieť priamo súťažnú trať Formula Student Germany, z ktorej vznikli odsimulované časy na kolo jednotlivých monopostov. Predpokladané správanie jednotlivých monopostov je, že jednotlivé logovacie kanály budú takmer identické vzhľadom na finálny rozdiel v časoch na kolo. Taktiež deficit v špičkovom výkone a teda v maximálnej rýchlosti dosiahnutej na trati alebo pri výjazde zo zákrut vzhľadom na technickosť vyššie uvedenej trate by nemal byť pozorovateľný. Pre porovnanie boli vybrané kanály spomenuté nižšie:

- Rýchlosť monopostu [km/h]
- Zaradený prevodový stupeň [-]
- Otáčky motora [ot./min]
- Časová strata – Delta [s].

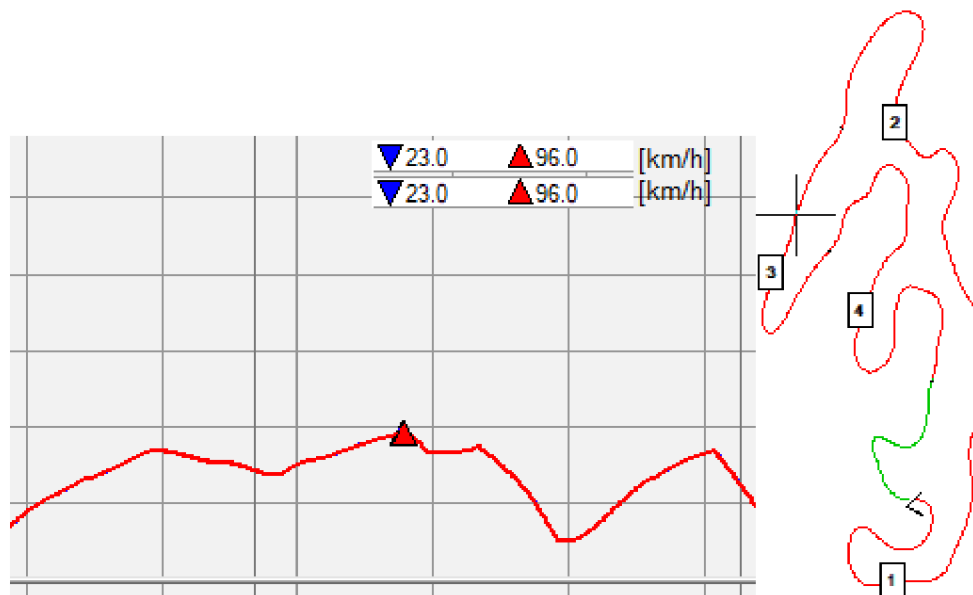
Pomocou vyššie vymenovaných kanálov bolo možné potvrdiť alebo vyvrátiť očakávané výsledky a zároveň skontrolovať nastavenie auta v softvéri ChassisSim – prekročenie maximálnych/minimálnych otáčok motora, radenie prevodových stupňov pri konfigurácii 3-stupňovej prevodovky alebo anomáliu v rýchlosti medzi jednotlivými monopostami. Vyobrazenie analytických dát z oboch monopostov je na Obr. 51.



Obr. 51 Analytické krivky vyobrazených loggovaných kanálov

Na základe jednotlivých kriviek vieme konštatovať niekoľko skutočností. Správanie sa oboch monopostov je podľa predpokladu identické, taktiež nedochádza k žiadnej rýchlostnej anomálii medzi porovnávanými krivkami. Krivky sa v jednotlivých kanáloch/grafoch prekrývajú, čo znamená identické správanie sa na závodnej trati. Otáčky motora sa pohybujú v predom stanovenom rozmedzí, taktiež vidíme správne použitie všetkých troch prevodových stupňov u oboch monopostov. Maximálna dosiahnutá rýchlosť predstavuje hodnotu 96 km/h u oboch monopostov v časti trate vyobrazenej na Obr. 52.

Track map



Obr. 52 "Top speed"

V Obr. 52 môžeme taktiež vidieť vloženú krivku pre vizualizáciu rýchlosti, vidíme, že oba monoposty ju dosiahli v takmer identickom bode. Rovnako sme schopní vidieť spomínanú trať, ktorá je manuálne rozdelená do štyroch sektorov. Maximálna rýchlosť bola dosiahnutá so zaradeným tretím prevodovým stupňom. Otáčky motora s elektrickým kompresorom mali hodnotu 8 790 ot/min a u motora s konvenčným turbodúchadlom to bolo 8 787 ot/min.

Na Obr. 50 potom môžeme vidieť v spodnom grafe časovú „deltu“ medzi jednotlivými monopostami. K najvýraznejšiemu rozdielu prišlo v druhom sektore dráhy, kedy bolo potrebné s monopostom osadeným elektrickým kompresorom preradiť na nižší prevodový stupeň približne o pol metra skôr na ideálny prejazd zákrutou. V dôsledku toho bol monopost s elektrickým kompresorom následne pomalší o približne 0,7 km/h, od tohto momentu bol časový rozdiel približne rovnaký a monoposty prešli cieľovú čiaru s časovým rozdielom spomínaných 0,04 sekundy v prospech monopostu s konvenčným turbodúchadlom.

ZÁVER

Táto diplomová práca sa zaoberala niekoľkými výpočtovými bodmi, ktoré sa týkajú termomechaniky a jej výpočtového modelu pri náhrade konvenčného turbodúchadla elektrickým kompresorom. Na základe tejto analýzy bolo napočítané energetické úložisko tak, aby bol braný zreteľ na pravidlá súťaže, ale aj na výkonové požiadavky spaľovacieho motoru a elektromotoru nekonvenčného kompresoru. V prostredí ChassisSim pre výpočet simulovaného času na kolo bol potom vytvorený model monopostu s oboma typmi plnenia vzduchu, bola skontrolovaná správnosť definovania jednotlivých prvkov pohonného ústrojenstva a následne bol vypočítaný teoretický čas na kolo oboch monopostov. V závere sa práca zaoberá hlbším rozborom daného virtuálneho kola, kontroluje správnosť výpočtu simulácie a hodnotí jednotlivé rozdiely v oboch kolách monopostov.

Začiatok práce je venovaný stručnej teórii histórie preplňovania, pričom plynule nadväzuje na aktuálne metódy plnenia spaľovacích motorov vzduchom s použitím rotačných strojov, ale aj bez nich. Je spomenutý aj trend súčasnej doby a sprísňujúce sa emisné normy pre výrobcov automobilov, resp. spaľovacích motorov. Popísaná je aj stručná termomechanika, ktorá vysvetľuje potrebu a výhody preplňovaných motorov oproti tým s prirodzeným nasávaním. Na to nadväzuje teória týkajúca sa elektrických kompresorov, ktorá zvažuje ich výhody ale aj nevýhody oproti metódam preplňovania spomenutých v predošlých kapitolách. Taktiež bola predstavená ich konštrukcia, princíp fungovania a možnosť ich aplikácie v súčasných automobiloch.

Pri výpočtovej časti práce sme najskôr oboznámení s pohonnou jednotkou monopostu Dragon, jej charakteristikami pri variante prirodzeného sania, ale aj s prípadom, kedy bolo osadené turbodúchadlo. Práca spomína potrebné úpravy vykonané na motore Husqvarna FE 501 vzhľadom na preplňovanie. Hlavným výpočtovým softvérom bolo prostredie GT-Power, v ktorom bol upravený súčasný model motora s konvenčným turbodúchadlom a bol nahradený modelom motora s elektrickým kompresorom. Na základe tohto sme boli schopní vyhotoviť jednotlivé charakteristiky oboch motorov. Na základe výpočtov a jednotlivých pracovných bodov kompresorového koliečka *e-compressoru* vieme konštatovať, že za účelom aplikácie do monopostu Dragon by bola potrebná jeho optimalizácia tak, aby vyhovoval pracovným bodom použitého spaľovacieho motora. Ďalej bol vytvorený model virtuálneho *gas-standu* tak, aby sme boli schopní napočítať príkon oboch kompresorov v jednotlivých závodných disciplínach, pričom ako vstupné hodnoty poslúžili reálne dáta nazbierané na trati Formula Student Germany. Pri výpočte *battery packu*, ktorý bol založený na výsledkoch z virtuálneho *gas-standu*, bolo porovnaných niekoľko batériových článkov od rôznych výrobcov. Ako vhodná voľba sa javia články od firmy Turnigy, ktoré spĺňajú výkonostné požiadavky a *battery pack* zložený z týchto článkov spĺňa limitnú hodnotu hmotnosti stanovenú súťažou.

V poslednej časti práce sme sa zaujímali o praktickú aplikáciu na závodnej trati. V prostredí ChassisSim bola zadefinovaná trať a parametre monopostu tak, aby zodpovedali realite. Jednalo sa o čas zajazdený v rámci jedného rýchleho kola, čím sme simulovali situáciu závodnej jazdy v disciplíne Autocross. Vypočítané časy sa zhodovali s reálnymi, tým bola overená správnosť nastavenia monopostov. Monopost s elektrickým kompresorom zaostal za konvenčným monopostom rádovo o pár stotín sekundy aj s nižšími výkonnostnými parametrami vo vyšších otáčkach motora. Treba zobrať do úvahy aj fakt, že vodičmi v súťaži Formula Student sú neprofesionálni piloti, pre ktorých najväčším benefitom bude práve jazda v monoposte s okamžitou odozvou na stlačenie plynového pedálu.

POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] UŠIAK, Michal. MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK TURBODMYCHADEL. Brno, 2018. Bakalárska práca. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. Adam Vondrák.
- [2] HIERETH, Hermann a Peter PRENNINGER. Charging the Internal Combustion Engine [online]. Wien: SpringerWienNewYork, 2003 [cit. 2022-04-27]. ISBN ISBN 978-3-211-33033-3.
- [3] VONDRÁK, Adam. SPOLUPRÁCE TURBODMYCHADLA A SPLOVACÍHO MOTORU. Brno, 2015. Diplomová práca. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. David Svída, Ph.D.
- [4] Mercedes F1 power units 2014-2018. In: Motorsport.com [online]. 2021, 2021 [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <https://cdn-1.motorsport.com/images/mgl/6AEweEq6/s1200/mercedes-f1-power-units-2014-2-1.webp>
- [5] VOJKŮVKA, František. SACÍ POTRUBÍ S VARIABILNÍ DÉLKOU. Brno, 2008. Bakalárska práca. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. Radim Dundálek, Ph.D.
- [6] Vlk, František. Vozidlové spalovací motory / 1. vydání Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc, 2003. 578 s
- [7] JANCO, Marcel. Preplňovanie motora: Čo je turbodúchadlo a ako funguje mechanický kompresor. [online]. 27.8.2017 [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <https://marceljanco.sk/preplnovanie-motora-co-je-to-turboduchadlo-a-ako-funguje-mechanicky-kompresor/>
- [8] VOJTĚŠEK, Aleš. PŘEPLŇOVÁNÍ SPALOVACÍCH MOTORŮ. Brno, 2012. Bakalárska práca. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce ING. Lubor Zháňal.
- [9] Roots-type supercharger. In: Wikipedia [online]. [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/1b/RootsBlower3LobeAnimation.svg/220px-RootsBlower3LobeAnimation.svg.png>
- [10] How turbocharging works: Turbocharger cutout view. In: X-engineer.org [online]. [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.x-engineer.org%2Fturbocharging%2F&psig=AOvVaw2afxGV9JxHy7Tz2b6zPrOh&ust=1651152116257000&source=images&cd=vfe&ved=0CAwQjRxqFwoTCMC7k5artPcCFQAAAAAdAAAAABAM>
- [11] Elevate Volvo P3 3.0L T6 Turbo Wastegate Actuator | Elevate Cars. In: Elevate Cars [online]. [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: https://www.elevatecars.com/media/catalog/product/cache/1/image/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/s/l/slide14_1.jpg

- [12] MACEK, J., KLIMENT, V. Spalovací turbíny, turbodmychadla a ventilátory : (přepřínování spalovacích motorů), čtvrté vydání, Praha, 2006. ISBN 80-01-03529-8.
- [13] Formula Student Rules 2022 [online]. 2022 [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2022/rules/FS-Rules_2022_v1.0.pdf
- [14] HUSQVARNA MOTORCYCLES. FE 501 2014 [online]. 2014 [cit. 7.12.2014]. Dostupné z WWW: <http://www.husqvarna-motorcycles.com/enduro/fe-501.html>
- [15] Powertrain Design Book - Dragon X. Brno, 2020.
- [16] Electric Compressor Hybrid Vehicles. In: Garrettmotion.com [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.garrettmotion.com/electric-hybrid/48v-electric-compressor/>
- [17] ŠTĚTINA, PH.D., prof. Ing. Josef. Elektrický rychlostní kompresor VTES. In: Termomechanika.online [online]. [cit. 2022-04-28].
- [18] ROTHGANG, Stefan, Michael PACHMANN, Sven NIGRIN a Markus VON SCHEVEN. THE ELECTRIC SUPERCHARGER – CHALLENGE, CONCEPTION AND IMPLEMENTATION. AutoTechReview [online]. 2016, 5 [cit. 2022-04-28].
- [19] JOHANSSON, Max, Kristoffer EKBERG a Lars ERIKSSON. Time Optimal Turbocharger Testing in Gas Stands with a Known Map. ScienceDirect [online]. 2018, 8 [cit. 2022-04-28].
- [20] Molicel INR21700-P42A 4000mAh - 45A button top. NKON [online]. [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://eu.nkon.nl/rechargeable/li-ion/21700-20700-size/molice/inr21700-p42a-4000mah-45a-button-top.html?fbclid=IwAR3TMdyDEayd265FtmfwU2QkNoc6xgttsI2Eus8jXRnDgX-tBC0-bAocco>
- [21] Turnigy 2200mAh 1S 40C Lipo Pack (Single Cell) [online]. [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: https://hobbyking.com/en_us/turnigy-2200mah-1s-40c-lipoly-single-cell-1.html?queryID=cdfcfb839825fe135eea434809030a6b&objectID=60086&indexName=hbk_live_products_analytics&fbclid=IwAR1wb-qyRzxyocCR09CyKKHEEydasTsJMHvf97XyiRJY1f4grxSqRZ_Hv2M&__store=en_us
- [22] BATERIE VTC6 TYP 18650 30A [online]. [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.ecigareta-marion.cz/sony-vtc-6-baterie-18650-30a-3000mah/>
- [23] CAMPBELL-BRENNAN, Jahee. Wavey Dynamics: Vehicle Dynamics: Lap Time Simulation. [online]. In: . [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.waveydynamics.com/post/lap-time-simulation>
- [24] About ChassisSim. ChassiSim [online]. [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.chassissim.com/about/>

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

H_u	[kJ·kg ⁻¹]	Spodná výhrevnosť paliva
I_{max}	[A]	Maximálny elektrický prúd
L_t	[kg·kg ⁻¹]	Uhol natočenia kľukového hriadela
P_e	[kW]	Efektívny výkon motora
P_{max}	[W]	Maximálny možný odber výkonu
Q_p	[kJ·s ⁻¹]	Privedený tepelný tok v palive
U_1	[V]	Nominálne napätie jedného článku
V_z	[m ³]	Zdvihový objem všetkých valcov
c_1	[mAh]	Hodnota kapacity jedného článku
m_p	[kg·s ⁻¹]	Hmotnosť privedeného paliva
m_s	[kg·s ⁻¹]	Hmotnosť zostávajúce v pracovnom valci
n_m	[min ⁻¹]	Otáčky motora
n_{pl}	[-]	Plniaca účinnosť
s_1	[-]	Počet článkov v sérii
η_e	[-]	Užitočná účinnosť motora
ρ_s	[kg·m ⁻³]	Hustota vzduchu v saní motora
C	[Ah]	Celková kapacita battery packu
i	[-]	Počet otáčok motora na jeden pracovný obeh
p	[-]	Maximálny počet paralelne zapojených setov
α	[-]	Súčiniteľ prepláchnutia spaľovacieho priestoru
ε	[-]	Kompresný pomer
λ	[-]	Súčiniteľ prebytku vzduchu