



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů  
a kolejových vozidel

Automatizovaná optimalizace parametrů  
experimentální pohonné jednotky

Automated optimization of an experimental  
power unit parameters

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
2021

Bc. Vojtěch WINTER

Studijní program: Dopravní a transportní technika  
Studijní obor: Motorová vozidla  
Vedoucí práce: Ing. Jiří Vávra, Ph.D.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Winter Jméno: Vojtěch Osobní číslo: 456784  
Fakulta/ústav: Fakulta strojní  
Zadávající katedra/ústav: Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel  
Studijní program: Dopravní a transportní technika  
Specializace: Motorová vozidla

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Automatizovaná optimalizace parametrů experimentální pohonné jednotky

Název diplomové práce anglicky:

Automated optimization of an experimental power unit parameters

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s dokumentací a funkcemi softwaru AVL Cameo pro optimalizaci parametrů spalovacího motoru na motorovém zkušebním stanovišti. Prozkoumejte a zdokumentujte možnosti provádění off-line a on-line optimalizací parametrů experimentálního zážehového jednoválcového motoru na motorovém brzdovém stanovišti. S využitím dostupných prostředků proveďte návrh integrace optimalizačního systému do stávajícího systému zkušebního stanoviště. Pro vybrané provozní režimy navrhnete experiment a podle možností proveďte zkušební optimalizaci.

Seznam doporučené literatury:

Dokumentace AVL CAMEO, Bosch MS6.1 ECU manuals, ETAS INCA v 7 documentation, Kistler KiBox manuals, AVL Indimodule manuals

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jiří Vávra, Ph.D., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

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

Datum zadání diplomové práce: 29.10.2021 Termín odevzdání diplomové práce: 05.01.2022

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Ing. Jiří Vávra, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Oldřich Vitek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Anotační záznam

Jméno autora: Vojtěch Winter

Název práce: Automatizovaná optimalizace parametrů experimentální pohonné jednotky

Anglický název: Automated optimization of an experimental power unit parameters

Rozsah práce:

94 stran

67 obrázků

6 tabulek

Akademický rok: 2021/2022

Ústav: 12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Studijní program: (NDTT) Dopravní a transportní technika

Vedoucí práce: Ing. Jiří Vávra, Ph.D.

Klíčová slova: automatizace, optimalizace, experimentální motor, pohonná jednotka

Key words: automation, optimization, experimental engine, power unit



## Abstrakt

Tato práce pojednává o zavedení automatizačního systému pro optimalizaci parametrů experimentální spalovací pohonné jednotky. Použití automatizačního systému by mělo směřovat k usnadnění hledání optimálních nastavení akčních členů experimentální pohonné jednotky, kterou představuje jednoválcový zážehový motor. Součástí této práce je také popis optimalizace a vyhodnocení měření na experimentálním motorovém stanovišti. Práce popisuje také složení motorového stanoviště a použití jednotlivých systémů stanoviště.

## Abstract

This thesis discusses introduction of an automation system for optimizing parameters of an experimental combustion power unit. The use of an automation system should aim to facilitating the search of optimal settings of actuators of the experimental power unit, which is a single-cylinder petrol engine. Part of this thesis is also description of optimization and evaluation of measurements at the experimental engine testbed. This thesis also describes the composition of the engine testbed and use of individual testbed systems.



## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: “Automatizovaná optimalizace parametrů experimentální pohonné jednotky” vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitolu této práce.

V Praze dne: 5.1.2022

.....

(podpis autora)



## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Jiřímu Vávrovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a trpělivost při tvorbě této práce. Také bych rád poděkoval panu Ing. Ivanu Bortelovi za spolupráci na zkušebním stanovišti a pomoc při tvorbě komunikačního programu.



## Obsah

Úvod.....	10
1 Cíle diplomové práce .....	11
2 Popis motorového stanoviště.....	12
2.1 Cíle stanoviště.....	15
2.1 Schéma stanoviště.....	15
2.2 AVL EMCON .....	16
2.3 AVL Indi modul a IndiCom .....	17
2.4 NI CompactRIO .....	18
2.5 NI CompactDAQ.....	20
2.6 Řídicí systém pohonné jednotky .....	21
2.6.1 Komunikace a zapojení ECU .....	22
2.6.2 Grafické rozhraní INCA .....	23
3 Optimalizace .....	25
4 Automatizace měření .....	26
4.1 Návrh implementace automatizačního systému .....	26
5 AVL CAMEO 4.....	29
5.1 Design Of Experiments .....	30
5.1.1 Full Factorial Design.....	32
5.1.2 Central Composit Design .....	32
5.1.3 Box-Behnken Design.....	33
5.1.4 D-Optimal Design.....	33
5.1.5 Latin Hypercube Sampling Design .....	34
5.1.6 S-Optimal Design .....	35
5.1.7 Sobol Design .....	35
5.2 DoE Wizard .....	36
5.2.1 Vytvoření lokálního DoE .....	37
5.2.1 Vytvoření globálního DoE .....	39
6 Test .....	41
6.1 Příprava testu .....	41
6.1.1 Operating Points.....	44
6.1.2 Variations.....	45



6.1.3 Actions .....	45
6.1.4 Special Parameters .....	45
6.1.5 Limits.....	46
6.1.6 Response Controllers.....	46
6.1.7 Stabilizations.....	46
6.1.8 Measurements.....	46
6.2 Run Test .....	46
6.3 Test Results.....	47
6.4 Testovací strategie.....	48
6.4.1 DoE List .....	48
6.4.2 DoE Screening.....	48
6.4.2.1 Online DoE Screening .....	49
6.4.2.2 Adaptive Online DoE.....	50
6.4.2.3 Active DoE.....	50
6.4.3 Flex Sweep .....	52
6.5 RTC.....	53
6.5.1 Funkce RTC .....	53
6.5.1.1 Regulátor spalování – ComCon (Combustion Controller) .....	55
6.5.1.2 Regulátor bohatosti směsi – LamCon (Lambda Controller) .....	57
7 Úprava a vyhodnocení naměřených dat .....	59
7.1 Raw Data.....	59
7.1.1 Editace datasetu .....	60
7.2 Modeling.....	61
7.2.1 Models .....	61
7.2.1.1 RNN model.....	63
7.2.1.2 FPM model.....	64
7.2.1.3 Detekování odlehlých bodů modelu .....	64
7.3 Optimization .....	64
7.3.1 Nastavení optimalizace.....	65
7.4 Map Generator .....	66
7.5 Engine Maps .....	66
8 Měření dat pro optimalizaci .....	67





9 Implementace automatizace pomocí AVL CAMEO .....	68
9.1 Nastavení komunikace a systémů .....	69
9.1.1 Komunikace s ETAS INCA.....	70
9.1.2 Komunikace s AVL IndiCom .....	72
9.2 CAMEO SimpleProtocol TCP/IP .....	73
9.2.1 Návrh komunikace.....	74
9.2.2 Nastavení SimpleProtocol TCP/IP v AVL CAMEO .....	75
9.2.3 Příkazy a jejich tvary .....	75
9.2.4 První navázání spojení.....	76
9.2.5 Komunikační záznam .....	78
9.2.6 Funkce WatchDog.....	79
9.2.7 CAMEO SimpleProtocol TCP/IP Shrnutí.....	81
10 Provedení automatizovaného testu .....	82
10.1 Průběh automatizovaného testu.....	82
Závěr .....	84
Návrh dalšího postupu .....	85
Seznam použité literatury .....	86
Seznam obrázků.....	88
Seznam příloh .....	89



## Úvod

Tématem této práce je navrhnout a provést aplikaci automatizačního systému pro optimalizaci experimentálního jednoválcového motoru. Pohonná jednotka, kterou se tato práce zabývá, je výsledkem mnoha bakalářských a diplomových prací a byla vyvinuta ve spolupráci ČVUT v Praze a průmyslového partnera. Tento zážehový spalovací motor byl navržen pro umožnění experimentálního výzkumu a měl by sloužit pro vývoj alternativních spalovacích cyklů za použití kapalných, plyných a směsných paliv, s hlavním zaměřením na snižování emisních parametrů.

Pro bezpečný a efektivní provoz motorové jednotky je zapotřebí nastavit správnou funkci akčních členů a ochranných prvků motoru. Tyto prvky je nutné optimalizovat v celém zátěžovém a otáčkovém spektru motorové jednotky, pro dosažení optimálního spalování a požadovaného chování motoru. Základní hodnoty a kombinace těchto parametrů v závislosti na zatížení a otáčkách motoru je zpočátku možné hledat ručně, ale pro dosažení optimálních výsledků, zvýšení bezpečnosti, zkrácení laboratorního času, či snížení nároků na obsluhu motorového stanoviště je žádoucí využít některý z nabízených automatizačních a optimalizačních softwarů.

Vzhledem k dlouhodobé spolupráci ČVUT s mezinárodním koncernem AVL, který se zaměřuje na automobilový průmysl a nezávislý výzkum, byla pro tento projekt poskytnuta licence na automatizační a optimalizační software AVL CAMEO 4. Tento software by měl být právě vhodným nástrojem pro zakomponování na experimentální motorové stanoviště.



## 1 Cíle diplomové práce

Cílem práce je zjistit a popsat možnosti automatizace optimalizace na motorovém zkušebním stanovišti experimentální pohonné jednotky, pro hledání optimálních nastavení akčních členů motoru v závislosti na pracovních otáčkách motoru a jeho zatížení.

V první části práce bude popsán zkušební motor a stanoviště s dříve implementovanými řídicími a měřicími systémy.

V další části bude uveden popis automatizačního systému AVL CAMEO 4.

Hlavním cílem a výsledkem práce je vytvoření programového rozhraní pro oboustrannou komunikaci automatizačního softwaru zkušebního stanoviště a optimalizačního systému CAMEO. Popisem se bude zabývat kapitola 9.2.

Příklady optimalizací a shrnutí práce spolu s náměty pro další rozšiřování budou uvedeny v závěrečné části diplomové práce.

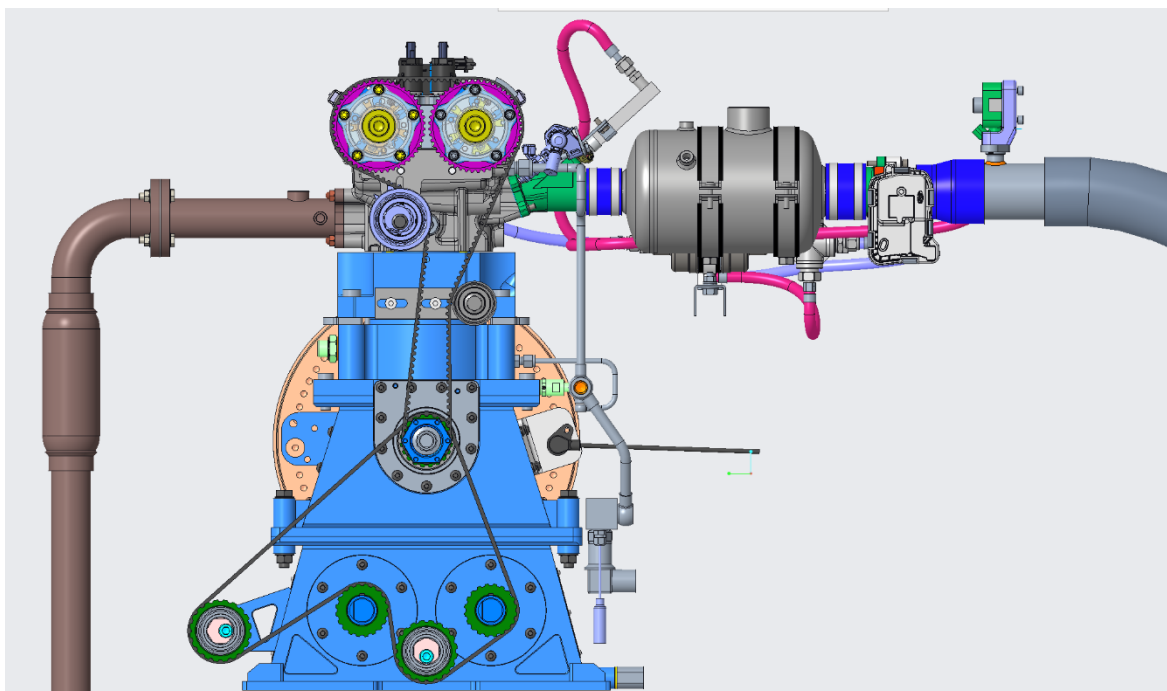


## 2 Popis motorového stanoviště

Motorové stanoviště, kterým se tato práce zabývá se nachází v laboratoři ČVUT ve Vědeckotechnickém parku v Roztokách u Prahy. Na stanovišti se nachází experimentální čtyřdobý jednoválcový zážehový spalovací motor (viz Obr. 1), na jehož stavbě se podílelo mnoho studentů ČVUT v Praze, v rámci svých diplomových a bakalářských prací. Motor je připojen na motorový dynamometr a je osazen potřebným laboratorním vybavením, výhradně od společností AVL a NI (National Instruments). Toto laboratorní vybavení se krom bezpečného chodu celého motorového stanoviště stará také o přívod a měření veškerých médií nutných pro chod motoru. Laboratorní vybavení se stará samozřejmě také o měření a vyhodnocení parametrů potřebných pro zjištění chování a chodu motoru, zejména průběhu spalování. Experimentální stanoviště zahrnuje vybavení pro měření spotřeby paliv a emisních parametrů výfukových plynů.

Jak již bylo zmíněno, jedná se o experimentální motor, uzpůsobený pro spalování kapalných, plyných a směsných paliv. Vychází svou stavbou ze čtyřválcového benzinového zážehového motoru použitého v sériové výrobě osobních automobilů. Je zřejmé, že pro experimentální použití v laboratorních podmínkách, kde je zkoumáno chování daného motoru a reakce na změny nastavení akčních členů motoru, nebo úpravy některých jeho funkčních částí, je velmi výhodné zredukovat počet válců motoru na minimální potřebné množství. V tomto případě se jedná o čtyřválcovou pohonnou jednotku s řadovým uspořádáním válců, která byla zredukována na jednoválcovou motorovou jednotku. Ta bude dostatečně simulovat chování motoru při zkoumání průběhu spalování. Výhod redukování počtu válců pro experimentální účely může být mnoho. V tomto případě se jedná například o snížení výrobních a provozních nákladů, snížení nároků na laboratorní vybavení, snížení nutných prostorů atd. Jednoválcová koncepce je oproti víceválcové koncepci vhodná také z pohledu vzájemného ovlivňování jednotlivých řad válců, jako například pulzacemi v sacím a výfukovém potrubí. [1][2]

Berme prosím na vědomí, že motorová jednotka a její komponenty i měřicí vybavení stanoviště se v průběhu výzkumu upravují a mění dle potřeb, a to s úmyslem pro zvýšení efektivity, přesnosti a robustnosti výzkumného stanoviště. Některé informace a detaily tedy nemusí souhlasit s aktuálním stavem stanoviště.



Obr. 1 – Model experimentální pohonné jednotky

Model jednoválcového motoru si lze prohlédnout na Obr. 1, a to v pohledu ze strany rozvodového mechanismu. Jak si lze všimnout z Obr. 1, konstrukce rozvodového mechanismu motorové jednotky je DOHC (Double Overhead Camshaft) s řemenovým pohonem. To znamená, že ovládání ventilů spalovací komory je zajištěno dvěma vačkovými hřídeli, tedy jednou pro sací stranu a druhou pro stranu výfukovou. Motor disponuje čtyřmi ventily na válec, z nichž jsou dva ventily sací a dva výfukové. Vazbu mezi vačkovými hřídeli a ventily představují hydraulická zdvihátka. Motorová jednotka disponuje nastavitelným časováním otevírání sacích i výfukových ventilů (VVT). Nastavení časování vaček je vzájemně nezávislé a starají se o něj elektromagneticky ovládané hydraulické přestavovače, jeden na každé vačce. Vačková hřídel na sací straně motoru je nastavitelná v rozsahu 50° a vačková hřídel na výfukové straně v rozsahu 40°. [3][4]

Druhý rozvod představuje řemenová vazba mezi klikovou hřídelí a hřídelemi vyvažovacích elementů motoru, které se nacházejí ve spodní části bloku motoru. Základní parametry pohonné jednotky nalezneme v Tab. 1. [5][6]

Tab. 1 – Základní parametry motoru

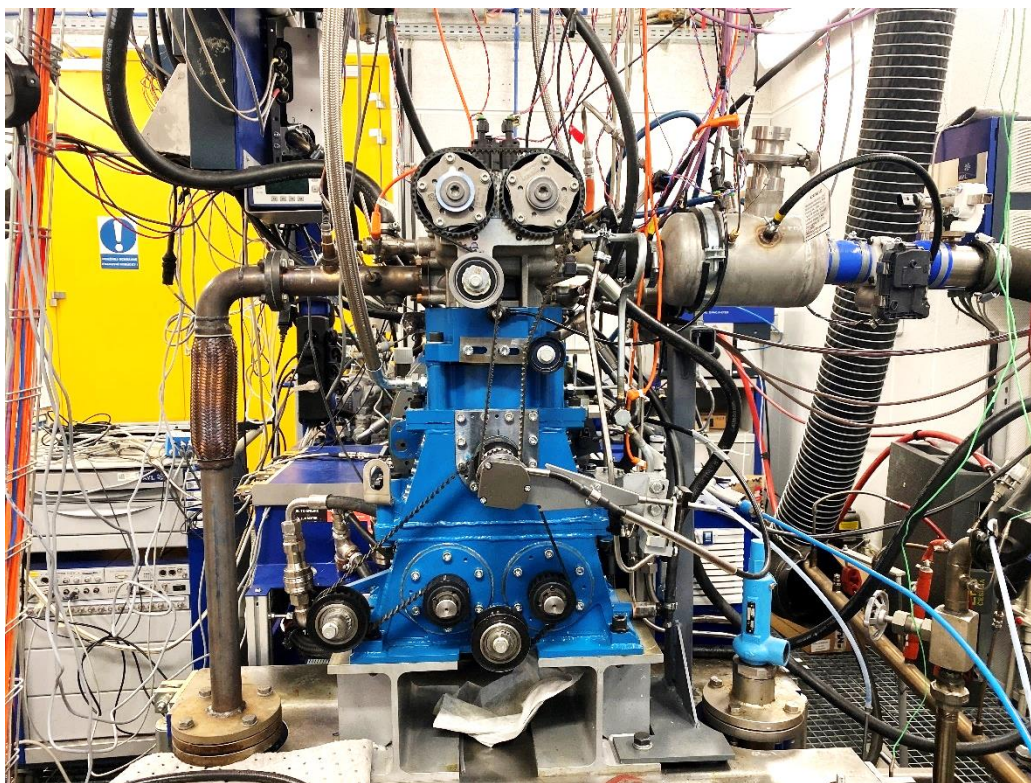
Parametry motoru	
Počet válců	1
Počet ventilů	4
Vrtání [mm]	74,5
Zdvih [mm]	84,9
Kompresní poměr	proměnný



Zdvihový objem motoru je přibližně  $370 \text{ cm}^3$ . Kompresní poměr je nastavitelný pomocí ocelových podložek, které definují mezeru mezi spodním blokem a horním blokem motoru s válcem. O přívod vzduchu do sacího potrubí motoru se stará jednotka AVL 515 Boost Unit, která dokáže zajistit i vzduchové přeplňování. V návaznosti na přeplňování nabízí motorové stanoviště také regulaci tlaku ve výfukovém potrubí pomocí škrticí klapky, například pro simulování přeplňování turbodmychadlem. O regulaci přívodu vzduchu do uklidňovací nádoby sacího potrubí a následně do sacího kanálu, se stará elektronicky ovládaná škrticí klapka. Sací potrubí je vybaveno jedním vstřikovačem pro kapalné palivo a jedním pro palivo plynné. Uklidňovací nádoba disponuje kromě vstupů pro snímače tlaku a teploty také pojistným bezpečnostním přetlakovým elementem ve formě průtržné membrány. [6][7]

Zajímavostí sestavy sacího potrubí je, že některé komponenty byly vyrobeny pomocí aditivní technologie, a to například i příruba dosedající na samotnou hlavu válce. Tato tištěná příruba tedy splňuje požadavky a teplotní odolnost ze strany motoru, chemickou odolnost ze strany palivových směsí, ale také požadavky na tolerance pro uložení palivového vstřikovače. Zároveň je hlava motoru připravena pro aplikaci zapalovací předkomůrky za použití plyných paliv, pro umožnění spalování extrémně chudých palivových směsí. [7]

O mazání a chlazení pohonné jednotky se stará externí kondiční systém AVL 577, pro zajištění kontroly nad teplotami a tlaky příslušných médií. Aktuální snímek pohonné jednotky na měřicím stanovišti můžeme vidět na Obr. 2.



Obr. 2 – Snímek pohonné jednotky na měřicím stanovišti (autor: Vojtěch Winter)

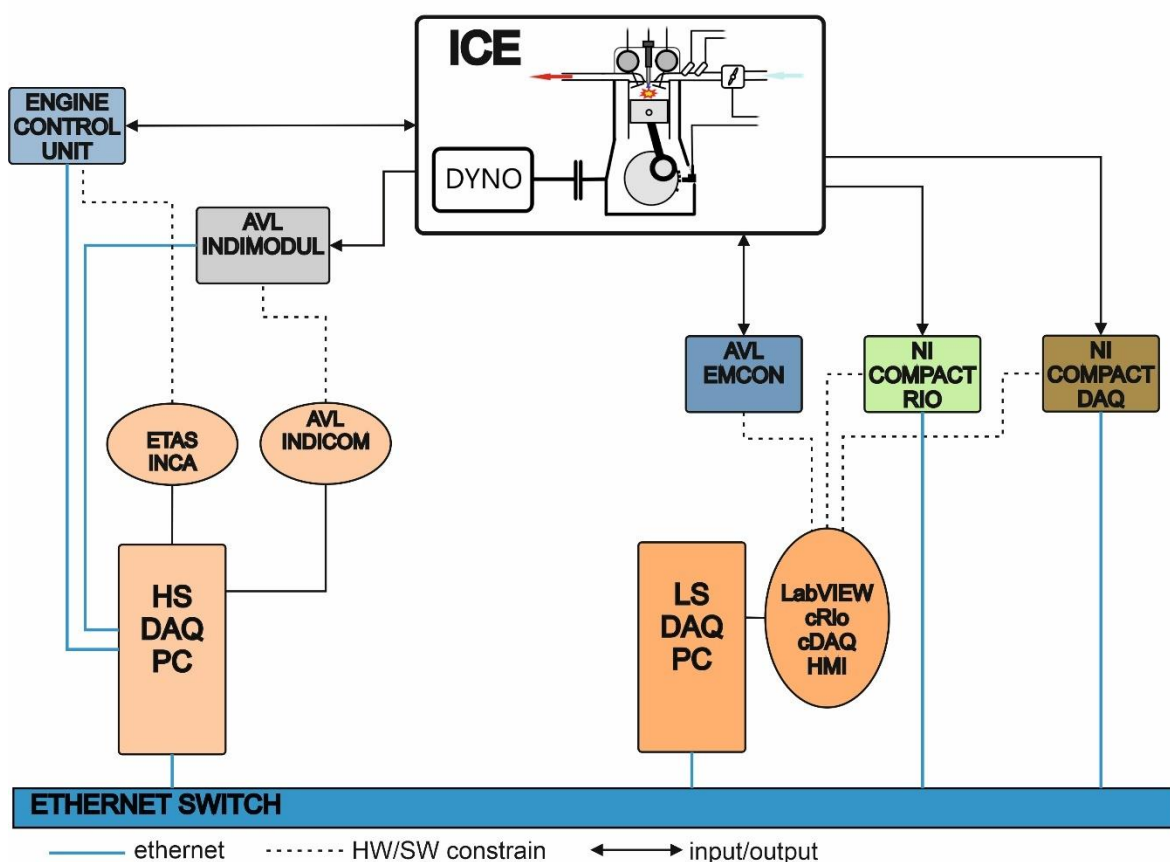


## 2.1 Cíle stanoviště

Jak bylo zmíněno v úvodu, toto motorové stanoviště slouží pro výzkum spalování kapalných a plyných palivových směsí. Samotný motor tedy slouží jako jakýsi nástroj, který umožňuje uskutečnění spalovacího procesu a díky jehož konfigurovatelnosti je možné tento proces optimalizovat, a to v mnoha směrech. Aparatura a vybavení tohoto stanoviště pak slouží jako nástroj pro měření a vyhodnocení celého procesu spalování.

Hlavním cílem tohoto snažení, je najít možnosti alternativních způsobů spalování různých palivových směsí, a to za účelem nalezení efektivnějších způsobů využití dostupných paliv.

## 2.1 Schéma stanoviště



Obr. 3 – Zjednodušené schéma zařízení na měřicím stanovišti (bez automatizačního SW)

Na Obr. 3 můžeme vidět zjednodušenou schématickou reprezentaci uspořádání zařízení na měřicím stanovišti před implementací automatizačního a optimalizačního systému AVL CAMEO 4. V úvahu byly brány pouze zařízení a systémy, které souvisí s problematikou této práce, tedy nejsou zobrazeny ostatní zařízení a systémy, které jsou důležité pro fungování měřicího stanoviště. Detailnější schéma stanoviště se nachází v příloze práce, viz Příloha 2. Hardware, tedy fyzická zařízení stanoviště, představují ve schématu hranaté bloky. Software představují bloky eliptického tvaru. Ve vrchní části schématu můžeme vidět blok



s označením ICE (Internal Combustion Engine), ten představující spalovací motor a jeho vlastní příslušenství. Spalovací motor a příslušenství je osazeno mnoha snímači a akčními členy. O zpracování signálů těchto členů se starají měřicí a řídicí jednotky stanoviště (Engine Control Unit, AVL moduly, NI moduly). Pro ovládání a zpracování grafického rozhraní těchto jednotek se na stanovišti nacházejí dva pultové počítače, a to HS DAQ PC (High Speed Data Acquisition PC) a LS DAQ PC (Low Speed Data Acquisition PC). Na těchto počítačích se nacházejí příslušné programy jednotlivých jednotek a modulů.

## 2.2 AVL EMCON

AVL EMCON je systém pro ovládání a monitorování chodu měřicího stanoviště. Nabízí řízení jak dynamometru, tak některých akčních členů pohonné jednotky. Obsluha stanoviště jej ovládá pomocí řídicího panelu Control Unit BME 400, který se skládá z ovládacích prvků a vlastního displeje. Systém nabízí kontrolu nad otáčkami dynamometru, momentem na dynamometru, či polohou plynového pedálu, respektive polohou škrticí klapky spalovacího motoru. Systém EMCON nabízí několik tzv. kontrolních módů (Control Mode) a hlavně nabízí také možnost vzdáleného ovládání. Tedy při nastavení komunikace mezi systémem EMCON a jiným vhodným systémem (např. AVL CAMEO), jsme schopni řídit měřicí stanoviště vzdáleným systémem, a to právě v daných kontrolních módech.

Kontrolní módy nabízené systémem AVL EMCON:

- Moment/Poloha klapky
- Otáčky/Poloha klapky
- Moment/Otáčky

Hardware	Connection	Hardware	Signal conditioning	Channels	Hardware	Hardware	Hardware	Hardware	
SWITCH Catalyst 2900XL	ethernet	NI CRio 192.168.1.204 192.168.1.205	<b>Module</b>		<b>AVL EMCON</b>	<b>AVL 515</b>	<b>AVL 577</b>	<b>Belimo</b>	
			NI9205	32Ch 16bit_AI(+/-10V)	Act_spped, Act_trq, Act_THR	Tair, pair			
			NI9203	8Ch 16bit_AI(0-20mA)					
			NI9217	4Ch(24bitAI) RTD					
			NI9217	4Ch(24bitAI) RTD					
			NI9425	32 Ch 24V DIinput	Digital channels for Hybrid Interface	OK	OK		
			NI9403 NI9265 NI9363	32Ch TTL DI/DO 4Ch 16bit AO (0-20mA) 4Ch +/-10V AO (+/-10V)	Digital channels for Hybrid Interface RSV1, 2	Reset	Reset	Toilset, Twset	EGPset
			Tairset, pairset						

Obr. 4 – Schématické vyjádření pozice systému AVL EMCON na měřicím stanovišti

Na Obr. 4 je schematicky zobrazeno, kde na měřicím stanovišti se nachází systém AVL EMCON. Vidíme, že zařízení AVL EMCON je napojeno do modulů systému NI CompactRIO, který je dále zapojen pomocí ethernetové sítě přes ethernetový switch Catalyst 2900XL.





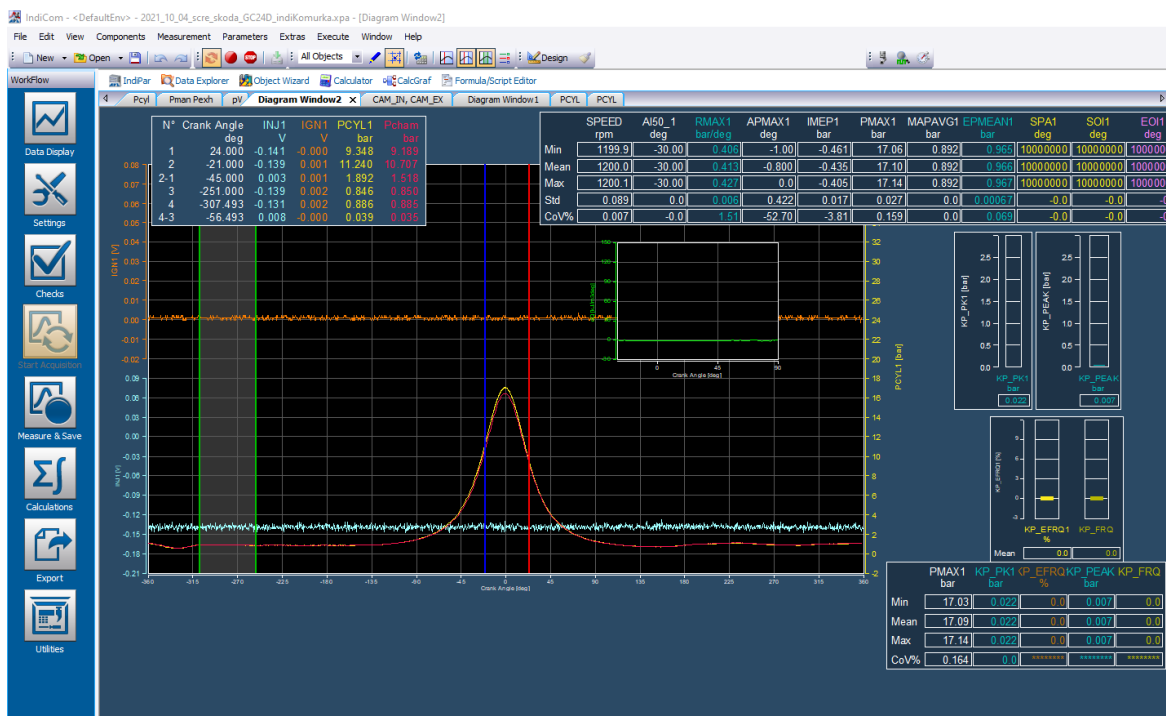
## 2.3 AVL Indimodul a IndiCom

AVL Indimodul Gigabit je kompaktní vysokorychlostní měřicí zařízení, které disponuje osmi analogovými vstupními kanály, pro měření veličin motoru v závislosti na natočení klikové hřídele spalovacího motoru. AVL IndiCom představuje software s grafickým rozhraním pro ovládání modulu Indimodul. AVL Indimodul v kombinaci se softwarem AVL IndiCom tak tvoří robustní akviziční systém, který nabízí vyhodnocení indikovaných veličin motoru v reálném čase. [8]

Hardware	Connection	Hardware	Software	connection	Hardware	Signal conditioning	Channels
SWITCH Catalyst 2900XL	ethernet	HS DAQ PC 192.168.1.100	AVL INDICOM	ethernet	AVL INDIMODUL 192.168.1.210	AVL Micro IFEM 1 - 3	Analog In PcyL, PMAN, PEXH, IGN, INJ
			ETAS INCA	ethernet - XCP:3	Bosch MS6.1 ECU (DHCP)	AVL Crank Angle Calculator	CAN
			NI LabView			Sensors & Actuators	CAN1, 2, 3

Obr. 5 – Schématické vyjádření pozice systému AVL Indimodul a AVL IndiCom na měřicím stanovišti

Na Obr. 5 je schematicky zobrazeno, kde na měřicím stanovišti se nachází systémy AVL Indimodul a AVL IndiCom. Vidíme, že zařízení AVL Indimodul je pomocí ethernetové sítě zapojen přímo do pultového počítače HS DAQ PC, na kterém se nachází software AVL IndiCom. Na Obr. 6 můžeme vidět grafické rozhraní a editovatelnou pracovní plochu softwaru AVL IndiCom.



Obr. 6 – s Grafické rozhraní a pracovní plocha softwaru AVL IndiCom



Na pracovní ploše IndiComu můžeme vidět v reálném čase zobrazení měřených a vypočítávaných parametrů. Zároveň zde vidíme také indikátorový diagram, který v reálném čase zobrazuje průběhy námi zvolených parametrů v závislosti na úhlu natočení klikové hřídele, tedy poloze pístu. V tomto případě například průběh tlaku ve válci, průběh elektrického proudu na palivovém vstřikovači, nebo průběh elektrického proudu na zapalovacím modulu. Software vyhodnocuje průběh hoření a zobrazuje statistiku indikovaných parametrů motoru a určení mezicyklové nerovnoměrnosti chodu. Součástí jsou také rutiny pro identifikaci a kvantifikaci klepání atd. Na základě sledování těchto hodnot také obsluh nastavuje ostatní parametry při provádění optimalizace spalování. Pro vyhodnocení chování motoru se tato data ukládají do databáze současně s daty ostatních měřících zařízení.

Do měřicího zařízení Indimodul jsou zavedeny signály z těchto senzorů:

- Snímač polohy klikové hřídele
- Snímač tlaku ve spalovacím prostoru
- Snímač proudu vstřikovače
- Snímač proudu zapalovacího modulu

Důležité parametry vyhodnocené systémem IndiCom:

- *P<sub>MAX1</sub>*; Maximální tlak ve spalovacím prostoru [*bar*]
- *IMEP1*; Střední efektivní tlak indikovaný [*bar*]
- *AI50\_1*; Úhel klikové hřídele pro spálení 50 % paliva [°]
- *KP\_PK1*; Maximální hodnota tlaku klepání [*bar*]
- *KP\_EFRQ*; Hodnota frekvence klepání [%]

## 2.4 NI CompactRIO

CompactRIO od společnosti National Instruments je zařízení skládající se z kontroléru s procesorem s vlastním operačním systémem Linux Real-Time OS a přídatných modulů. Zařízení obsahuje sloty pro rozšíření volitelnými moduly na zpracování potřebných vstupních a výstupních signálů. [9]

Pro vytvoření programu s grafickým rozhraním k systému NI CompactRIO, byl použit software NI LabVIEW, ve kterém byla vytvořena vlastní pracovní plocha s potřebnými ovládacími a signalizačními prvky. Tento program se nachází na pultovém počítači LS DAQ & Test Cell Automation PC, jak můžeme vidět z Obr. 7. Grafické rozhraní můžeme vidět na Obr. 8.



Hardware	Connection	Hardware	Signal conditioning	Channels	Hardware	Hardware	Hardware	Hardware
SWITCH Catalyst 2900XL	ethernet	NI CRio 192.168.1.204 192.168.1.205	<b>Module</b>		<b>AVL EMCON</b>	<b>AVL 515</b>	<b>AVL 577</b>	<b>Belimo</b>
			NI9205	32Ch 16bit_AI(+/-10V)	Act_spped, Act_trq, Act_THR	Tair, pair		
			NI9203	8Ch 16bit_AI(0-20mA)				
			NI9217	4Ch(24bitAI) RTD				
			NI9217	4Ch(24bitAI) RTD	Digital channels for Hybrid Interface	OK	OK	
			NI9425	32 Ch 24V DInput				
			NI9403	32Ch TTL DI/DO	Digital channels for Hybrid Interface	Reset	Reset	
			NI9265	4Ch 16bit AO (0-20mA)				
NI9363	4Ch +/-10V AO (+/-10V)	RSV1, 2		Toilset, Twset	EGPset			
				Tairset, pairset				

Obr. 7 – Schématické vyjádření pozice systému NI CompactRIO na měřicím stanovišti



Obr. 8 – Grafické rozhraní NI LabVIEW pro systém NI CompactRIO

Program s grafickým rozhraním na ovládání systému NI CompactRIO (Obr. 8), nám nabízí kontrolu nad některými důležitými systémy měřicího stanoviště. Jsou zde například ovládací a signalizační prvky pro řízení externích zařízení starajících se o mazací a chladicí média, které nám dovolují například nastavení teplot pro předehřátí oleje a chladicí kapaliny atd. Program obsahuje také ovládací prvky některých z měřicích zařízení. Důležitým prvkem je také nastavení limitních hodnot vybraných parametrů, jako jsou například tlak a teplota mazacího oleje, chladicí kapaliny atd. V případě překročení limitních hodnot může program systému NI CompactRIO reagovat dle závažnosti například hlášením varování ve formě grafických a zvukových signálů, nebo například okamžitým zastavením celého měřicího stanoviště.



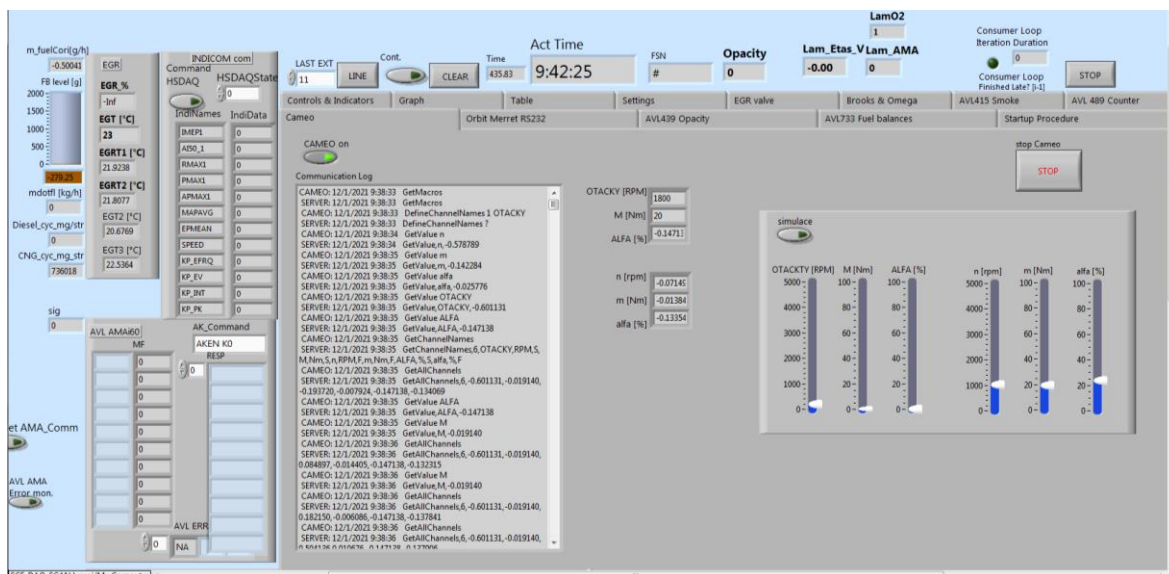
Důležitým prvkem pro automatizaci měřicího stanoviště je nastavená komunikace mezi programem systému NI CompactRIO a systémem AVL EMCON, díky které je možné vzdáleně nastavovat parametry systému AVL EMCON, kterými jsou otáčky dynamometru, moment na dynamometru a poloha škrticí klapky spalovací pohonné jednotky. NI CompactRIO dále komunikuje se systémy NI CompactDAQ, AVL IndiCom a dalšími zařízeními, jak lze vidět ve schématu na Obr. 7.

## 2.5 NI CompactDAQ

CompactDAQ je akviziční zařízení od společnosti National Instruments, skládající se z kontroleru a rozšiřovacích modulů, které se vkládají do šasi samotného přístroje. Tyto moduly slouží pro sběr signálů ze snímačů a měřicích zařízení motorového stanoviště. Toto zařízení je využito pro sběr veškerých měřených dat a jejich časově synchronizované uložení do datové sady. Jak můžeme vidět na schématu na Obr. 9, zařízení NI CompactDAQ využívá ethernetové sítě a pomocí ethernetového switchu je připojeno ke zbytku zařízení měřicího stanoviště. Pro vytvoření programu s grafickým rozhraním k systému NI CompactDAQ, byl použit software NI LabVIEW, ve kterém byla vytvořena vlastní pracovní plocha s potřebnými ovládacími a signalizačními prvky. Tento program se nachází na pultovém počítači LS DAQ & Test Cell Automation PC. Grafické rozhraní programu pro ovládání systému NI CompactDAQ je vidět na Obr. 10. [10]

Hardware	Connection	Hardware	Signal conditioning
SWITCH Catalyst 2900XL	ethernet	NI CDAQ 192.168.1.98	NI9205 (AI)
			NI9401 (DI/DO)
			9862 (CAN1)
			x
			NI9214
			x
			x
			x

Obr. 9 – Schématické vyjádření pozice systému NI CompactDAQ na měřicím stanovišti



Obr. 10 - Grafické rozhraní NI LabVIEW pro systém NI CompactDAQ

## 2.6 Řídicí systém pohonné jednotky

Jedním ze základních prvků řízení motoru je tzv. řídicí jednotka motoru ECU (Engine Control Unit). Jedná se o elektronické zařízení, které je propojené s kontrolními a ovládacími prvky motoru, a je zodpovědné za řízení celé pohonné jednotky. Řídicí jednotka je klíčový prvek, pomocí kterého jsme schopni nastavit, jak se bude pohonná jednotka chovat v závislosti na vstupních a požadovaných parametrech. Nastavení řídicí jednotky je realizováno propojením jednotky s počítačem, na kterém se nachází správný komunikační software. Pomocí tohoto softwaru jsme schopni nastavit jednotlivé ovládací parametry nezbytné pro správné a bezpečné řízení pohonné jednotky. Jsme zde schopni nastavit například jak se budou chovat vstřikovače paliva, škrticí klapka, přestavovače vačkových hřídelí, kdy bude docházet k zapálení směsi atd. Chování těchto prvků je pak závislé na parametrech, které vstupují do řídicí jednotky. Parametry vstupující do řídicí jednotky mohou být požadavky obsluhy motoru, nebo informace o aktuálním stavu motoru. Mezi tyto vstupní parametry patří například aktuální otáčky motoru, úhel natočení klikové hřídele (poloha pístu), poloha plynového pedálu atd.

Pro použití na našem motorovém stanovišti bylo rozhodnuto aplikovat řídicí jednotku BOSCH MOTORSPORT 6.1 (viz Obr. 11). Tato řídicí jednotka byla vybrána, protože umožňuje řízení veškerých akčních členů a čtení všech snímačů, které je pro toto motorové stanoviště potřeba. Zároveň je tato jednotka dostatečně „otevřená“ tzn. umožňuje editaci a potřebných parametrů. Mezi základní funkce patří například ovládání škrticí klapky, řízení vstřikování, řízení zapalování, nastavování přestavování vačkových hřídelí, detekce, kvantifikace a kontrola klepání a mnoho dalšího. Pozice ECU na měřicím stanovišti je zřejmá ze schématu na Obr. 12. [11]



Obr. 11 – Řídicí jednotka BOSCH Motorsport 6.1

### 2.6.1 Komunikace a zapojení ECU

Použitá řídicí jednotka nabízí několik možností komunikačních kanálů, mezi které patří například tyto:

- 2 x Ethernet
- 3 x CAN
- 1 x USB
- 1 x RS232

Na našem stanovišti je řídicí jednotka připojena pomocí ethernetového kanálu do síťové karty v pultovém počítači HS DAQ PC (viz Obr. 12). Na tomto počítači se také nachází nainstalovaný software ETAS INCA 7.0, který slouží jako grafické rozhraní pro práci s ECU.

Hardware	Connection	Hardware	Software	connection	Hardware	Signal conditioning	Channels
SWITCH Catalyst 2900XL	ethernet	HS DAQ PC 192.168.1.100	AVL INDICOM	ethernet	AVL INDIMODUL 192.168.1.210	AVL Micro IFEM 1 - 3	Analog In PcyL, PMAN, PEXH, IGN, INJ
			ETAS INCA	ethernet - XCP:3	Bosch MS6.1 ECU (DHCP)	AVL Crank Angle Calculator	CAN
			NI LabView			Sensors & Actuators	
						CAN Communications	CAN1, 2, 3

Obr. 12 – Schématické vyjádření pozice řídicí jednotky Bosch MS6.1 na měřicím stanovišti



Do řídicí jednotky jsou zavedeny signály z těchto senzorů:

- Snímač polohy klikové hřídele
- Snímač polohy sací vačkové hřídele
- Snímač polohy výfukové vačkové hřídele
- Snímač polohy škrticí klapky sacího potrubí
- Snímač tlaku v sacím potrubí
- Širokopásmová lambda sonda

Řídicí jednotka ovládá tyto akční členy:

- Elektronická škrticí klapka sacího potrubí
- Přestavovač polohy sací vačkové hřídele
- Přestavovač polohy výfukové vačkové hřídele
- Modul zapalovací svíčky
- Vstřikovač na kapalná paliva
- Vstřikovač na plynná paliva

#### 2.6.2 Grafické rozhraní INCA

Pro nastavení řídicí jednotky bylo použito softwarové rozhraní ETAS INCA 7.0 (INCA – Integrated Calibration and Acquisition Systems), což je nástroj pro konfiguraci, kalibraci a řízení ECU. Jeho grafické rozhraní umožňuje zobrazování a nastavování čtených a proměnných parametrů v editovatelných blocích, které je možné libovolně rozdělit do záložek, ideálně podle druhů parametrů (viz Obr. 13). Grafické rozhraní nabízí zobrazování jak číselných hodnot parametrů, tak i grafické zobrazení trojrozměrných map. Pracovní plochu programu neboli „working page“, si uživatel konfiguruje dle vlastních potřeb. Při vytváření projektu je nejprve nutné do ETAS INCA nahrát soubor s databází dostupných kanálů, parametrů a map, které námi použitá řídicí jednotka nabízí. Z těchto dostupných nastavitelných a čtecích parametrů je následně možné vybírat ty, které budou pro konkrétní aplikaci potřeba a řadit je do jednotlivých záložek ve spodní části grafického rozhraní, které si ručně vytvoříme. Můžeme vytvořit například jednu záložku pro parametry týkajících se nastavení parametrů motoru a příslušenství, jako je například počet válců, zdvihový objem, parametry vstřikovačů atd. Další mohou být například záložka pro nastavení bezpečnostního omezovače otáček, nebo záložka s nastavením vstřikování, lambda regulace atd. [12]



Experiment Edit View Variables Measurement Hardware Dataset Components Instrument Window ?

XCP-3-MSEA\_BASE\_1000 WP: MSEA\_BASE\_1000\_data\_27\_CNG\_26 DMI: 73 ECU OFF - No access RP: MSEA\_BASE\_1000\_data\_27\_CNG\_25

Calibration Window [37] CWLVC TRUE CWLOAD p/n system CWMP\_LAM TRUE CWLAMDRILOAD\_RL TRUE CWLAMDAP\_SW TRUE CWLAMDAP no learning, no corr. factor CWLAMP5 7

Combined Editor [75] ULSUH\_RAMP <Curve> [V] x: tluuh\_ramp [sec]

Measure Win. [32] lamnom - [ ] TEMP\_LSU\_OP 650 [°C] TEMP\_LSU\_REF 780 [°C]

Calibration Window [37] ULSUHREF 1.500 [V] ULSUH\_MAX 4.50 [V] ULSUADJ\_MAX 1.60 [V] ULSUH\_MIN 0.20 [V] ULSUADJ\_MIN 1.20 [V] ULSUH\_DEW 1.50 [V]

MP\_RL <Map> [%] x: nmot [rpm] y: ath [%]

x	500	800	1000	1300	1700	2100	2500	3000
0.0	0.0	12.0	7.0	3.0	3.0	1.0	1.0	1.0
1.0	10.0	15.0	12.0	8.0	7.0	7.0	3.0	3.0
1.8	35.0	20.0	18.0	12.0	10.0	8.0	7.0	7.0
3.0	45.0	28.0	23.0	18.0	15.0	15.0	12.0	10.0
5.0	55.0	38.0	28.0	20.0	17.0	17.0	16.0	15.0
7.0	65.0	50.0	35.0	25.0	20.0	20.0	20.0	20.0
10.0	70.0	53.0	45.0	40.0	38.0	34.0	22.0	22.0
15.0	80.0	60.0	60.0	55.0	45.0	40.0	35.0	35.0
20.0	80.0	75.0	70.0	65.0	60.0	55.0	50.0	50.0
30.0	85.0	80.0	75.0	75.0	75.0	70.0	70.0	70.0
45.0	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0	90.0	95.0	95.0
60.0	85.0	85.0	85.0	85.0	92.0	92.0	100.0	100.0
80.0	90.0	90.0	90.0	90.0	95.0	95.0	100.0	100.0
100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Combined Editor [60] RLLCEN <Curve> [%] x: nmot [rpm]

x	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
z	2	2	2	5	5	5	5	5

Basic Engine Data | Injection Calculation | Lambda\_control | Inj\_Maps | Throttle | Ignition | rev\_limit | CAms | Sync | Cut-off | Knock | p\_fuel-prail | RLp

Measurement stopped Max. buffer level: 0%

Obr. 13 – Ukázka grafického rozhraní ETAS INCA 7.0





### 3 Optimalizace

Cílem optimalizace je hledání nastavení vstupních veličin systému pro dosažení optimální hodnoty výstupní funkce. Tedy například nastavení akčních členů motoru pro daný jízdní režim motoru. Hledané nastavení pak bude představovat taková kombinace nastavení všech akčních členů, která v daném jízdním režimu motoru poskytne ideální hodnoty optimalizovaných veličin, tedy například minimální spotřebu paliva, minimální emisní parametry, nebo maximální moment motoru a zároveň nebude překročeno limitních hodnot zvolených parametrů. Optimalizace je prováděna na základě určitého množství bodů, definujících zkoumaný systém. Tyto body jsou zpravidla získány stacionárním měřením potřebných veličin systému a slouží k určení modelů, popisujících chování zkoumaného systému.

Často však hledáme optimum více než jedné funkce, tento proces nazýváme vícenásobná optimalizace (Multiobjective Optimization). Tyto funkce se ovšem mohou navzájem ovlivňovat nežádoucím způsobem. Dobrým příkladem může být maximalizace výkonu a minimalizace emisních složek pohonné jednotky. Z tohoto důvodu není možné identifikovat jediné správné řešení, které současně maximalizuje, nebo minimalizuje všechny cílové funkce. Nakonec se tedy dostaneme do bodu, kdy při snažení se o zdokonalení výsledků jedné funkce budou trpět výsledky jiné funkce. Cílem při řešení vícenásobné optimalizace je najít sadu optimálních řešení zvaných nedominantní řešení, které formalizují kompromis mezi danou množinou vzájemně si odporujících funkcí. Následně je na uživateli, jaký kompromis zvolí. [13]

Oblast optimalizace je pak zpravidla podmíněna nastavenými limitními hodnotami zvolených veličin. Optimální nastavení je tedy hledáno pouze v oblastech, kde není překročeno nastavených limitů.

Optimalizace je značně složitý proces, který je prováděn pomocí softwarů k tomu určeným. Optimalizační softwary slouží k parametrizaci a vyhodnocení optimalizací na základě naměřených dat. Na základě těchto dat generují modely, které předpovídají chování zkoumaných funkcí v závislosti na vstupních proměnných. Způsob, jakým vybíráme měřené body systému, pak ovlivňuje kvalitu modelů a tím celý výsledek optimalizace. Pro výběr měřených bodů se často využívá přístupu tzv. Design of Experiments (DoE), o kterém pojednává kapitola 5.1.



## 4 Automatizace měření

Pro vyhodnocení chování zkoumaného systému je nutné mít naměřená data, na základě kterých bude vyhodnocení provedeno. Zpravidla platí, že čím přesnější vyhodnocení budeme požadovat, tím více dat budeme potřebovat. Samozřejmě zároveň platí, že kvalita vyhodnocení záleží na kvalitě naměřených dat. Při zkoumání chování spalovacího motoru, který sám o sobě představuje poměrně komplexní systém, a při provádění optimalizace jeho chování, to bude znamenat definovat body optimalizace a kombinace proměnných parametrů právě v těchto bodech optimalizace.

Všechny body optimalizace a kombinace parametrů, které budeme chtít měřit a zaznamenat je tedy nutné systému zadat. Nastává zde tudíž hned několik komplikací. Jednou z nich je skutečnost, že těchto zkoumaných kombinací může být velmi mnoho a pokud bychom všechny parametry zadávali ručně, celková doba samotného nastavování bude velká. Zároveň zde nastává problém s tím, že některé parametry je důležité držet v předem daných limitních hodnotách. Tyto hlídané parametry mohou souviset přímo se stabilitou systému a přesažení jejich limitních hodnot by tak mohlo znamenat poškození zkoumaného systému, tedy například mechanických částí spalovacího motoru. Nebo mohou souviset se samotnou podstatou optimalizace, tedy nemělo by smysl hledat optimální řešení v oblastech, ve kterých vybrané parametry přesahují stanovené limity.

Pokud bychom tedy při optimalizaci prováděli nastavování parametrů zkoumaného systému ručně, museli bychom zároveň hlídat vybrané limitní parametry, aby nedošlo k jejich překročení. Zároveň je potřeba si uvědomit, že k překročení limitních hodnot může dojít okamžitě po změně nastavení parametrů systému a překročení limitů některých parametrů může znamenat okamžité poškození systému. A pokud se parametry systému nastavují ručně, je také možné, že dojde k chybnému nastavení některého z parametru, což může vést k okamžitému překročení limitů některých parametrů.

Tato problematika nás tedy přivádí k možnostem implementace nějakého systému, který by některé z těchto kritických nastavení a hlídání parametrů systému prováděl automaticky. Provedli bychom tedy tzv. automatizaci měření a eliminovali bychom lidský faktor. V kombinaci s použitím vhodné strategie testu a vhodného DoE bychom tak dosáhli mnohem efektivnějšího a také bezpečnějšího průběhu měření. Ideálním softwarem pro toto použití je opět CAMEO 4 od společnosti AVL, o kterém se dozvíme více v následujících kapitolách.

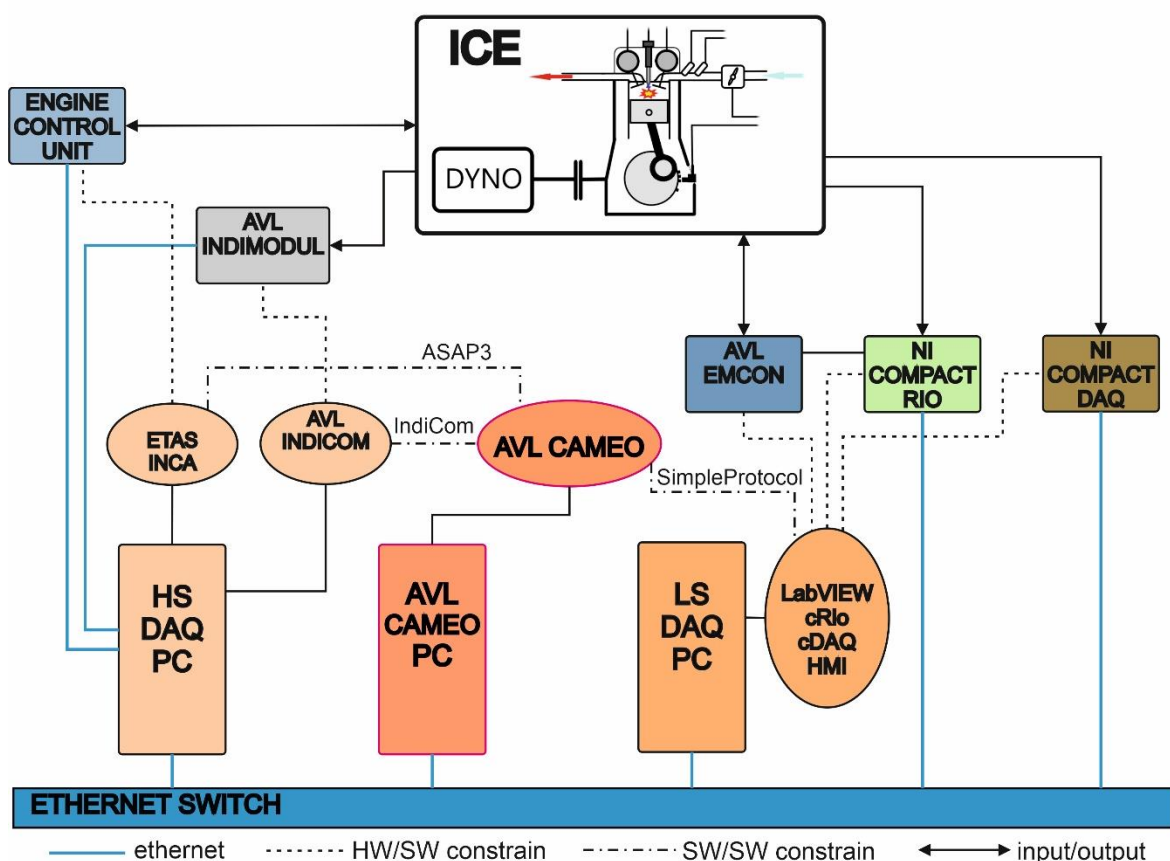
### 4.1 Návrh implementace automatizačního systému

Implementace automatizačního systému bude znamenat, že na měřicím stanovišti přibude software (případně hardware na kterém bude software operovat), který bude oboustranně komunikovat s ostatními systémy měřicího stanoviště. Od některých systémů stanoviště



bude automatizační software pouze vyčítat hodnoty potřebných parametrů a některým bude krom vyčítání také hodnoty daných parametrů posílat. Je tedy nutné tyto systémy vzájemně propojit a zajistit vzájemnou komunikaci, která bude dostatečně robustní a zároveň dostatečně rychlá, aby mohly systémy navzájem dostatečně rychle reagovat a tím zvýšit efektivitu, ale také bezpečnost průběhu testu.

Vybraný automatizační software AVL CAMEO 4 bude muset komunikovat se systémy ECU, AVL Indimodul a AVL EMCON. Pro komunikaci s ECU, respektive softwarem ETAS INCA 7.0, je dostupná komunikace pomocí protokolu ASAP3, využívající síťové připojení TCP/IP. Pro komunikaci s AVL Indimodul, respektive softwarem AVL IndiCom, můžeme využít komunikaci pomocí přednastaveného protokolu IndiCom, která také využívá síťové připojení. Pro komunikaci se systémem AVL EMCON, NI CompactRIO a NI CompactDAQ, respektive softwarem LabVIEW bude potřeba vytvořit vlastní komunikační protokol, využívající TCP/IP připojení.



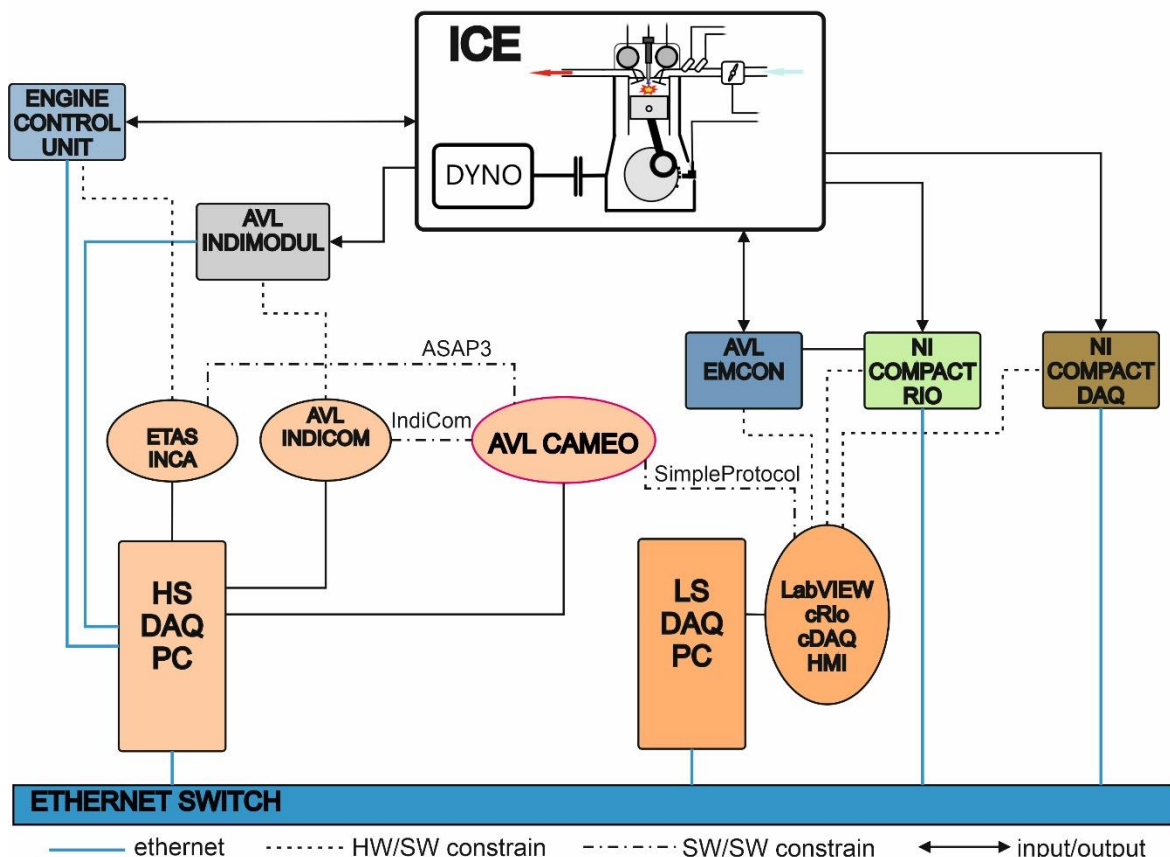
Obr. 14 – Schéma měřicího stanoviště s automatizací na CAMEO PC

Na Obr. 14 můžeme vidět schéma návrhu, který reprezentuje složení měřicího stanoviště s implementací automatizačního systému. Tato varianta spočívá v přidání dalšího pultového počítače, na kterém by byl nainstalován automatizační software AVL CAMEO 4.



Komunikace mezi automatizačním softwarem a zbytkem potřebných systémů by byla realizována pomocí vhodných dostupných komunikačních protokolů, s využitím ethernetové sítě.

Výhodou tohoto provedení je to, že automatizační systém má vlastní počítač a nezatěžuje tak stávající výpočetní kapacitu stanoviště, čímž se zvyšuje robustnost samotného měřicího stanoviště. Nevýhodou tohoto provedení by mohlo představovat celkově komplikovanější zapojení, což by se mohlo projevit v rychlosti komunikací mezi jednotlivými systémy.



Obr. 15 – Schéma měřicího stanoviště s automatizací na HS PC

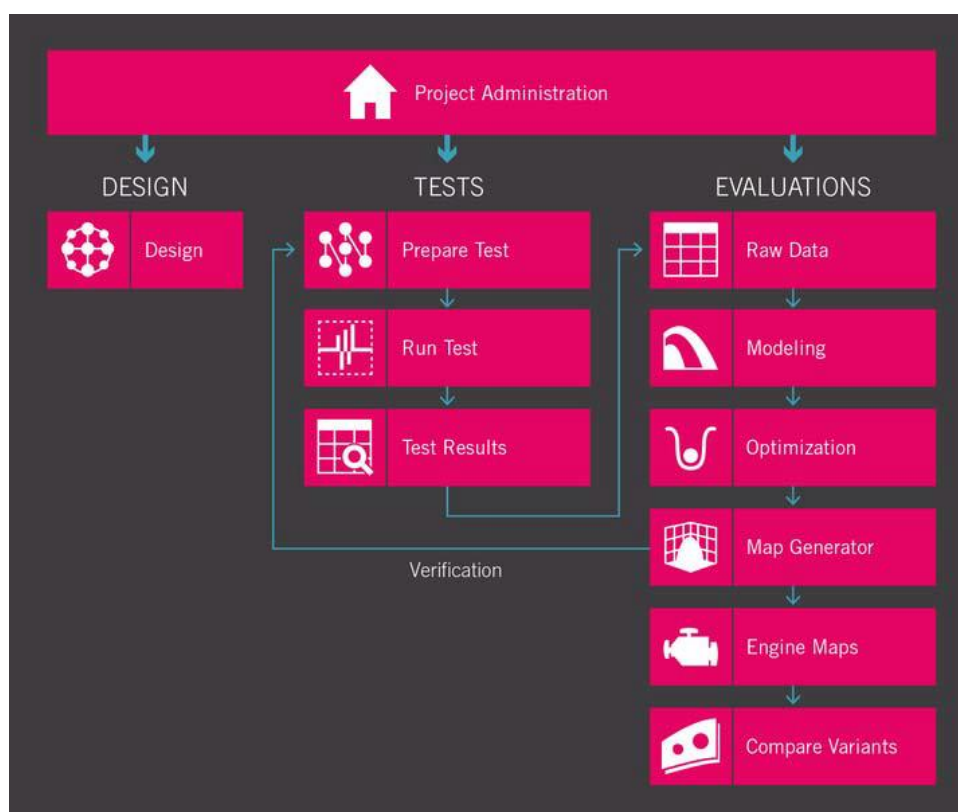
Na Obr. 15 pak můžeme vidět schéma návrhu pro jinou možnost implementace automatizačního systému. Tato varianta využívá pouze stávajících pultových počítačů měřicího stanoviště a automatizační systém AVL CAMEO 4 by pracoval na jednom z nich, konkrétně na počítači HS DAQ PC. Tato varianta nabízí jednodušší propojení a nastavení komunikace, ovšem hrozí, že daný počítač bude příliš zatížen.



## 5 AVL CAMEO 4

CAMEO 4 je software vyvinutý mezinárodním koncernem AVL, který se zaměřuje na automobilový průmysl a nezávislý výzkum. Tento software je jedním z mnoha nástrojů společnosti AVL a je speciálně vytvořen právě za účelem maximalizace efektivity při optimalizaci pohonných jednotek, a to také v kombinaci s dalšími systémy nejen od společnosti AVL. Pomocí tohoto softwaru by mělo být možné, kromě provádění optimalizace na základě již naměřených dat, také řídit a aktivně zasahovat do probíhajícího měření na zkušební pohonné jednotce a tím udělat celý proces mnohem efektivnější, automatizovaný. Aktivní, nebo také „real-time“ optimalizace, však vyžaduje sofistikované zakomponování do stávajícího systému a jeho správnému použití předchází složitý proces implementace. Při procesu optimalizace je využíván přístup „Design of Experiment“, neboli DoE. Přístup DoE je detailněji popsán v kapitole 5.1.

Software AVL CAMEO 4 (Computer Aided Method of Engine Optimization) je produktem mnoha let vývoje a krom vysoké efektivity při správném použití disponuje také přehledným grafickým rozhraním a intuitivním postupem práce. Výsledky optimalizace jsou následně snadno použitelné, protože je možné je jednoduše exportovat v číselných hodnotách, nebo například vytvořit tzv. mapy, které je možné posléze použít v dalších potřebných nástrojích. Struktura softwaru a body pracovního postupu jsou zobrazeny na Obr. 16.



Obr. 16 – AVL CAMEO 4 postup práce



Na Obr. 16 můžeme vidět, že hlavním a společným segmentem je Project Administration. Je to základní menu, které se otevře jako první po spuštění programu AVL CAMEO 4. Toto menu nám nabízí vytváření a administraci projektů, designů, testů, testovacích konfigurací, testovacích sekvencí a vyhodnocení modelů v přehledných strukturách. Dále zde vidíme tři základní pilíře. Prvním z nich je *DESIGN*, který nabízí prostředí pro tvorbu DoE na základě importování naměřených dat. Následuje *TESTS*, ve kterém se připraví průběh celého měření (testu) na motorovém stanovišti. S využitím DoE přístupu se zde připraví operační body, ve kterých se bude měřit, proměnné parametry v operačních bodech, nastaví se přechody mezi těmito body, měřené veličiny, limitní hodnoty měřených veličin a mnohé další důležité funkce. Výsledkem takového měření je tzv. dataset, což je soubor všech naměřených hodnot. Z tohoto datasetu je následně potřeba provést kalibraci, což představuje třetí pilíř – *EVALUATIONS*. Zde dochází k úpravě naměřených dat a výslednému vyhodnocení optimalizace. Výsledky optimalizace se zpětně mohou použít pro vytvoření nového testu a tento proces opakovat.

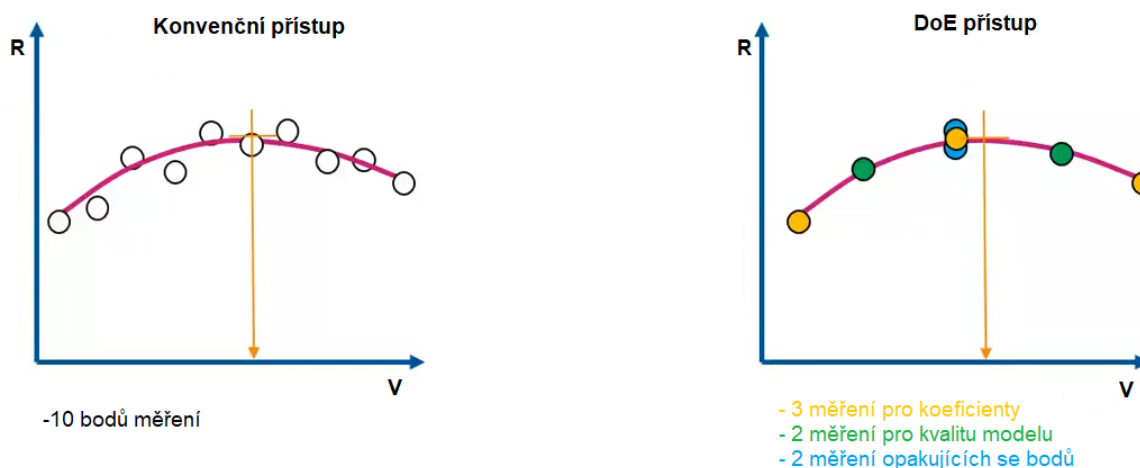
### 5.1 Design Of Experiments

Testování přístupem Design of Experiments (DoE) jsou často používána v průmyslovém odvětví, a to za účelem zvýšení efektivity při kalibraci a optimalizaci nových systémů. Tento systém může představovat například spalovací motor, nebo elektromotor, ovšem přístup DoE se dá použít na jakýkoliv jiný komplexní systém. Pokud chceme optimalizovat zkoumaný systém, musíme provést měření, z jejichž výsledků se budeme snažit určit modely popisující chování tohoto systému. Tedy hledáme závislosti vstupních a výstupních proměnných zkoumaného systému. Tyto závislosti můžeme nazývat modely. Nejprimitivnější způsob hledání těchto modelů by byl postupným měřením co největšího počtu bodů s co největším počtem kombinací proměnných parametrů v celém prostoru systému. Tento postup, známý jako Full-Factorial, by principiálně vedl k určení kvalitních modelů, ovšem počet kombinací roste exponenciálně s rostoucím počtem proměnných parametrů. Například pokud bychom chtěli zjistit trend jednoho zkoumaného parametru a zvolili bychom pro jeho určení 5 kroků, budeme muset provést 5 měření. Pokud však tyto parametry budou dva, budeme muset provést 25 měření, protože budeme zkoumat i jejich kombinace. Pro 5 proměnných parametrů už to představuje 3125 měření. U složitějších systémů by tak tento přístup byl příliš zdlouhavý. [14]

Teoreticky nám však pro určení modelů stačí mnohem méně bodů. Tedy místo toho, abychom celý prostor zkoumaného systému pokryli hustou pravidelnou sítí měřených bodů, použijeme metodu DoE, pomocí které vytvoříme síť s méně body, ovšem s ideálním rozložením. Jinak řečeno, pomocí DoE se snažíme předpovídat výsledné chování výstupních proměnných zkoumaného systému v závislosti na vstupních proměnných. Čím lépe jsme



schopni předpovídat chování systému, tím méně budeme potřebovat bodů pro jeho popsání a tak snížíme časovou náročnost celého procesu testování. V AVL CAMEO tak můžeme využít DoE přístupů ke generování operačních bodů a kombinací proměnných parametrů testů. Porovnání konvenčního a DoE přístupu na jednoduchém případě můžeme vidět na Obr. 17. [14]



Obr. 17 – Porovnání konvenčního přístupu měření s DoE přístupem

Na Obr. 17 můžeme vidět jednoduché porovnání dvou přístupů měření. První způsob, konvenční, představuje naměření deseti bodů. Pokud vytvoříme spojnicí trendů těchto bodů, vznikne nám křivka závislosti výstupní veličiny R na vstupní veličině V. V tomto případě by se jednalo například o křivku polynomické funkce druhého stupně. Z této křivky následně můžeme zjistit její maximum, které představuje naše hledané optimum.

DoE přístup vyplývá z předpokladu, že na popsání této křivky nám stačí pouhé 3 body (oranžové). Další dva body budou změřené pro ověření kvality modelu (zelené) a následně budou změřeny další dva body pro ověření opakovatelnosti měření (modré).

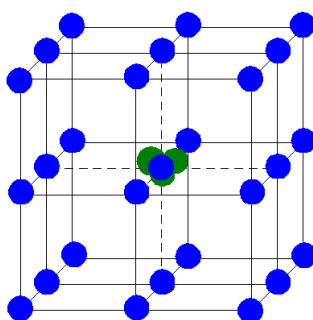
Vidíme tedy, že pro určení stejné hodnoty optima funkce, bylo za potřebí méně bodů a navíc, díky opakujícím se bodům dostáváme také statistickou informaci pro upřesnění intervalu, ve kterém se skutečný model nachází. Pro takovéto použití metody DoE však musíme mít předpoklad chování zkoumaného systému. [14]

Existuje mnoho metod popisů systémů neboli designů, z nichž každý je vhodný na popis jiného systému. Každý z nich má vlastní výhody a nevýhody, ale některé jsou pouze modifikacemi jiných. Níže jsou stručně popsány jednotlivé přístupy používané v AVL CAMEO.



### 5.1.1 Full Factorial Design

Takzvaný Full Factorial design, je základním přístupem, který obsahuje všechny kombinace všech proměnných. Teoreticky se tedy nejedná o DoE, jelikož experiment řešíme na celém poli zkoumaného systému a v pravidelně rozdělených měřených bodech. Tím že obsahuje všechny kombinace všech proměnných, je ze všech přístupů nejkonzervativnější. Jeho použití je však ve většině případů nevhodné, protože počet kombinací roste exponenciálně s proměnnými a tím pádem velmi rychle narůstá celkový čas experimentu. Vhodné použití je například pro prvotní zkoumání neznámého systému, pro nastínění chování systému na začátku projektu. Grafické znázornění přístupu Full Factorial je vidět na Obr. 18. [13]

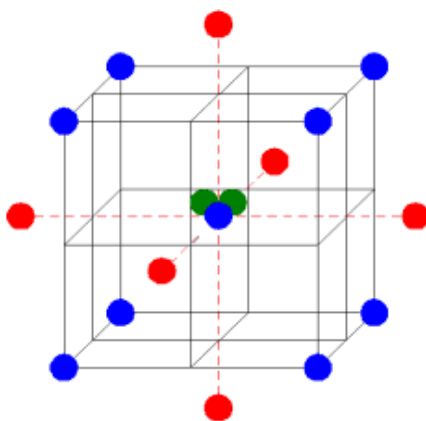


Obr. 18 – Full Factorial Design

### 5.1.2 Central Composit Design

Central Composit design, je používán pro kvadratické modely popisující kvantitativní závislost jedné či více cílových veličin na několika ovlivňujících veličinách. Centrální kompoziční vzor se skládá ze vzoru plného faktoriálu ( $2^n$ ), nebo ze zlomkového faktoriálu ( $2^{n-1}$ ), ke kterému jsou přidány hvězdicové a středové body. Na Obr. 19 je znázorněn centrální kompoziční vzor pro experiment se třemi proměnnými. Modré body jsou body faktoriálu, červené jsou body hvězdice a zelené jsou body centrální, znázorňující možné opakující se body. Centrální kompoziční vzory jsou ortogonální vzory a mají výhodu v tom, že neexistuje žádná závislost mezi odhady pro modelové koeficienty, tudíž se neovlivňují navzájem. Spolehlivost je také vysoká, s ohledem na počet opakujících se bodů měření. Potřebuje symetrický zkoumaný prostor. [13]

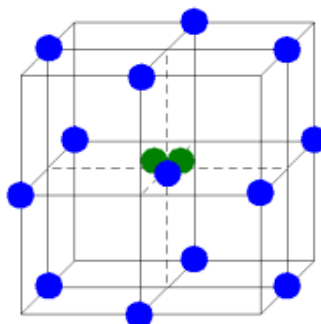




Obr. 19 – Central Composit Design

### 5.1.3 Box-Behnken Design

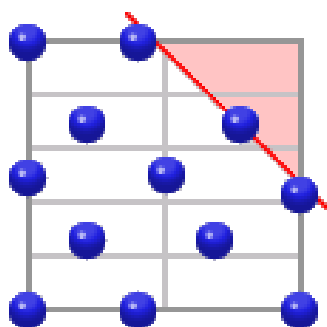
Box-Behnken design vychází z plného faktoriálu. Neobsahuje však rohové a středové body. Je tedy vhodný pro použití v případě, že rohové a středové body prostoru nemohou být měřeny. Grafické znázornění Box-Behnken vzoru je vidět na Obr. 20. Modré body jsou body faktoriálu, zelené jsou středem a znázorňují možné opakující se body měření. [13]



Obr. 20 – Box-Behnken Design

### 5.1.4 D-Optimal Design

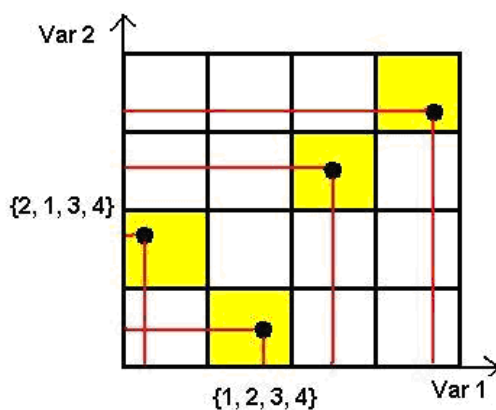
D-Optimal design je generován počítačem a to tak, že se náhodně vybere počet kombinací daných bodů. Body jsou rozprostřeny tak, aby se maximalizoval objem zkoumaného prostoru experimentu a zároveň aby se minimalizovaly interakce mezi jednotlivými body. D-Optimal design je znázorněn na Obr. 21. Červený prostor představuje ohraničení zkoumaného prostoru. Modré body jsou vygenerované zkoumané body. Zkoumaný prostor nemusí být symetrický. [13]



Obr. 21 – D-Optimal Design

### 5.1.5 Latin Hypercube Sampling Design

Latin Hypercube Sampling design je vhodným pro vyplňování prostoru. Vytváří sady  $n$  navrhovaných bodů, které se promítají na  $n$  různých úrovních. Tyto body jsou generovány náhodně, což znamená, že i přechody mezi jednotlivými body jsou náhodné. Každý interval proměnných je rozdělen do pěti úrovní, které mohou být pravidelné i nepravidelné. Aby byly body rozloženy v poli co nejvíce rovnoměrně, algoritmus maximalizuje minimální vzdálenosti mezi těmito body. Na Obr. 22 je znázorněn 2D Latin Hypercube Sampling design se čtyřmi body. Je zde zřejmá sekvence proměnných  $Var\ 1: \{1, 2, 3, 4\}$  a  $Var\ 2: \{2, 1, 3, 4\}$ . Potřebuje symetrický zkoumaný prostor. [13]

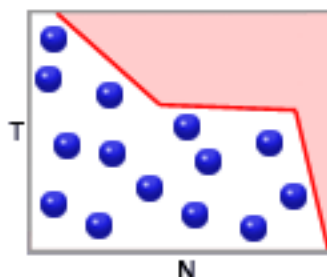


Obr. 22 – Latin Hypercube Sampling Design



### 5.1.6 S-Optimal Design

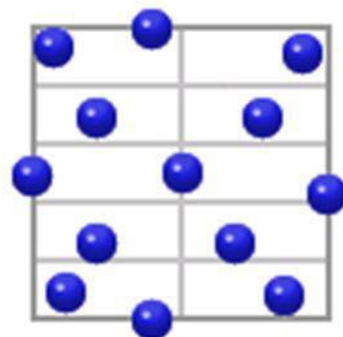
S-Optimal design je dalším typem návrhu vyplňování prostoru, který optimalizuje různá kritéria, s ohledem na vzdálenost mezi designem a sadou kandidátů. Tento typ optimalizace zaručuje, že se návrh rozloží ideálně v návrhovém prostoru a tím by měly být dobře zjistitelné nelinearity systému. Aby byly body rozloženy v poli co nejvíce rovnoměrně, algoritmus maximalizuje minimální vzdálenosti mezi těmito body. Obr. 23 znázorňuje vzor S-Optimal. [13]



Obr. 23 – S-Optimal Design

### 5.1.7 Sobol Design

Sobol design využívá kvazi-náhodný algoritmus, který rovnoměrně distribuuje návrhové body v návrhovém prostoru. Sobol design patří mezi designy pracující s vhodným vyplňováním prostoru. Jeho výhodou je rychlý a jednoduchý výpočet, protože jde o jakýsi „nakloněný“ Full Factorial design. Jeho nevýhodou je, navzdory velkému počtu návrhových bodů, špatné pokrytí okrajů zkoumaného prostoru. Menší designové prostory mají tak obvykle horší výsledky optimalizace. Lepší vyplnění prostoru, pouze s několika designovými body, lze dosáhnout pomocí S-Optimal designu. Grafické znázornění vzoru Sobol je na Obr. 24. [13]



Obr. 24 – Sobol Design



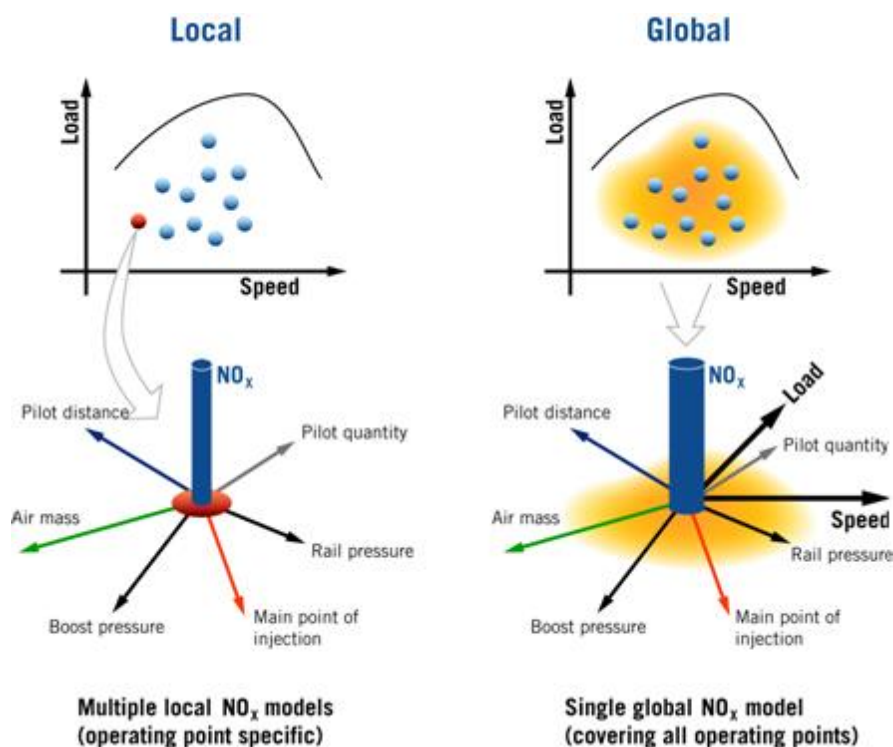
## 5.2 DoE Wizard

Program AVL CAMEO 4 nabízí funkci DoE Wizard, což je editor, který slouží právě k vytváření nových DoE. Tuto funkci lze použít pro vytvoření jak lokálních, tak globálních DoE, kde lokální DoE bude platit pro specifický operační bod a globální DoE pro všechny operační body (viz Obr. 25). Funkce DoE Wizard je dostupná kdykoliv během práce v AVL CAMEO a nabízí nám okamžité vytvoření nového DoE. Nově vytvořený Design of Experiment lze následně uložit do námi vybrané složky a poté ho použít při tvorbě testu. DoE Wizard lze vždy otevřít v AVL CAMEO v hlavní nabídce Extras - DoE Wizard - Create Local Design/Create Global Design. [15]

Funkci DoE Wizard můžeme otevřít také v záložce Operating Points na kartě Prepare Test. Podle toho, v jaké vrstvě testu se budeme aktuálně nacházet, budeme mít na výběr mezi tvorbou lokálního, nebo globálního DoE. Pokud se totiž budeme nacházet v první vrstvě testu, budeme moci vytvořit globální DoE, jelikož budeme muset definovat operační body test. Proměnné se pak automaticky přiřadí z vybraného kontrolního módu (Control Mode), který definuje proměnné tvořící operační body. Pokud se budeme nacházet v nižších vrstvách testu, budeme moci vytvářet pouze lokální DoE.

Ukázky vytvoření jednotlivých designů jsou popsány v následujících kapitolách. DoE Wizard nabízí použití těchto designů:

- Central Composite Design
- Box Behnken Design
- D-Optimal Design
- Latin Hypercube Sampling Design
- S-Optimal Design (Global 2 Step Design)
- Sobol Design
- Full Factorial Design



Obr. 25 – Lokální a globální Design of Experiment

### 5.2.1 Vytvoření lokálního DoE

Na ukázkou vytvoření lokálního DoE byl zvolen typ Central Composite Design (CCD). Poté co zvolíme typ DoE, můžeme definovat vlastní proměnné, nebo je importovat například z jiného systému. Celý postup je zdokumentován na Obr. 26. V případě CCD musíme definovat minimálně dva proměnné parametry, u kterých definujeme jejich rozsah (From, To). V našem případě například parametry CAM\_IN a CAM\_OUT. Počáteční hodnota (Start) je vypočtena jako hodnota průměrná a nemůžeme ji měnit. Dalším krokem je nastavení samotného DoE, které se liší u jednotlivých typů DoE, což vychází z jejich definice. Ukázka parametrů CCD DoE je vidět na obrázku níže. Výsledné body DoE můžeme následně editovat, například přidat vlastní, nebo smazat stávající. Body můžeme vidět graficky zobrazené na záložce Graphics. Poté stačí DoE uložit a následně použít v testu.



**Variations:** + -

	Variation	From	To	Start
1	CAM_IN	-50	0	-25
2	CAM_OUT	0	40	20

**CCI** CCI is a Design with 5 Variation Steps (levels) per Variation. Alpha represents the normalized distance of the factorial (blue) points from the center.

**CCF** CCF is a Design with 3 Variation Steps (levels) per Variation. Alpha represents the normalized distance of the star (red) points from the center and is always 1.

**CCC** CCC is a Design with 5 Variation Steps (levels) per Variation. Alpha represents the normalized distance of the star (red) points from the center and should be greater than 1.

Scale Design to Variation range

Beta  (rotatable design: Beta = 0.707106781186547)

Number of Design Points: 8  
Repetition Points X:  4  
Number of Star as Inclusion:  0  
Number of Star Points per Variation:  3  
Comer Selection:  Full  
Recommended Comer Selection: Full  
 Add Model Verification Points at the end of the Design Points  
Model Verification Points per Variation:  0  
Number of Repetitions for Verification:  0  
Total Number of Points: 12  
Number of Variations: 2

**DoE List** Graphic

**Design Points:** + -

	CAM_IN	CAM_OUT	ModelVerification...
1	-25	20	0
2	0	20	0
3	-25	40	0
4	-25	20	0
5	-42.678	34.142	0
6	-42.678	5.8579	0
7	-25	20	0
8	-7.3223	5.8579	0
9	-50	20	0
10	-25	0	0
11	-7.3223	34.142	0
12	-25	20	0

**DoE List** Graphic

Variations vs. Variations

Variations  
CAM\_IN  
CAM\_OUT

Obr. 26 – Postup vytvoření CCD DoE

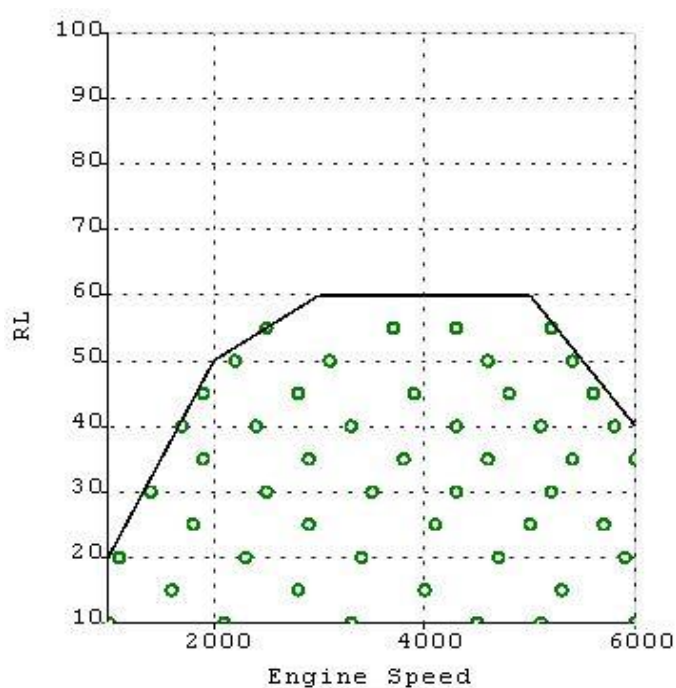


### 5.2.1 Vytvoření globálního DoE

Při tvorbě globálního DoE postupujeme obdobně jako u lokálního DoE. Pro porovnání bude na ukázkou použit Global 2 Step Design, který používá přístup S-Optimal, ovšem rozdělený do dvou kroků. Nejdříve probíhá výpočet operačních bodů a následně výpočet proměnných. Na ukázkou bude použit Global DoE Wizard ze záložky Operating Points na kartě Prepare Test, což znamená, že proměnné budou rovnou vybírány ze seznamu dostupných kanálů. Proměnné tvořící operační body testu jsou automaticky přiřazeny ze zvoleného kontrolního módu (Control Mode) a jsou automaticky přiřazeny do skupiny 1 (Group 1). Dále zde nastavíme rozsahy jednotlivých proměnných a jejich úrovně, které určují hustotu sítě jejich rozložení. Příklad nastavení proměnných parametrů je vidět na Obr. 27. Poté co definujeme proměnné, můžeme definovat pole operačních bodů vytvořením hraničních bodů, viz Obr. 28 a dále definujeme parametry samotného designu. Výsledný DoE pak můžeme vidět na Obr. 29 a Obr. 30.

Variations:		Control Mode: Engine_Speed / RL (01_NRTSII)			
	Variation	From	To	Level	Group
1	Engine_Speed	1000	6000	51	Group 1
2	RL	10	100	19	Group 1
3	CAM_POS	0	50	26	Group 2
4	flexVariation	1	10	10	Group 2

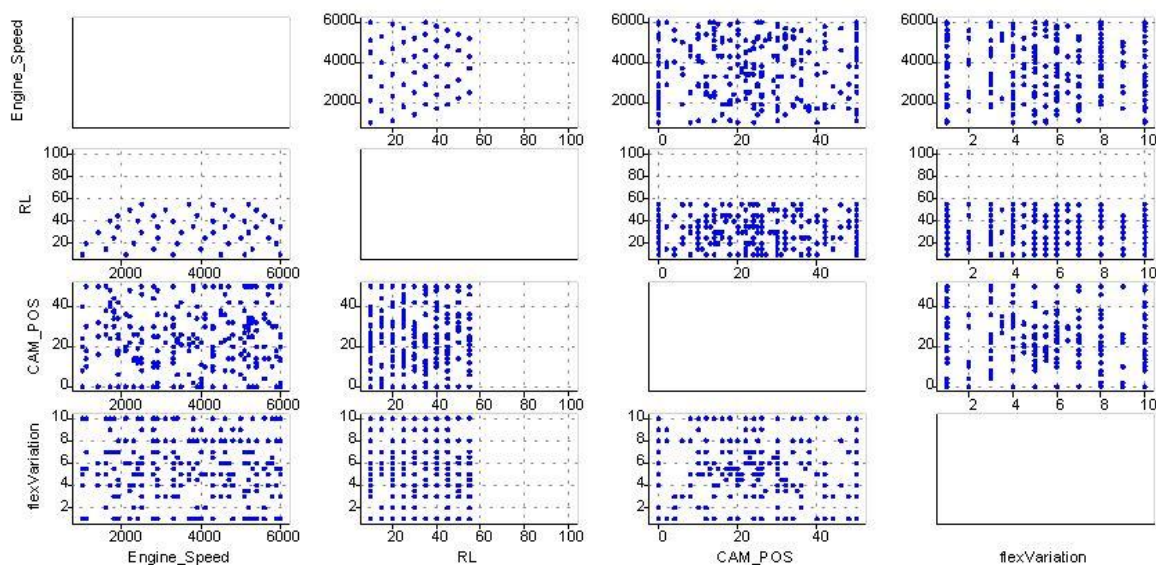
Obr. 27 – Nastavení proměnných při tvorbě globálního DoE, za použití Global 2 Step Design



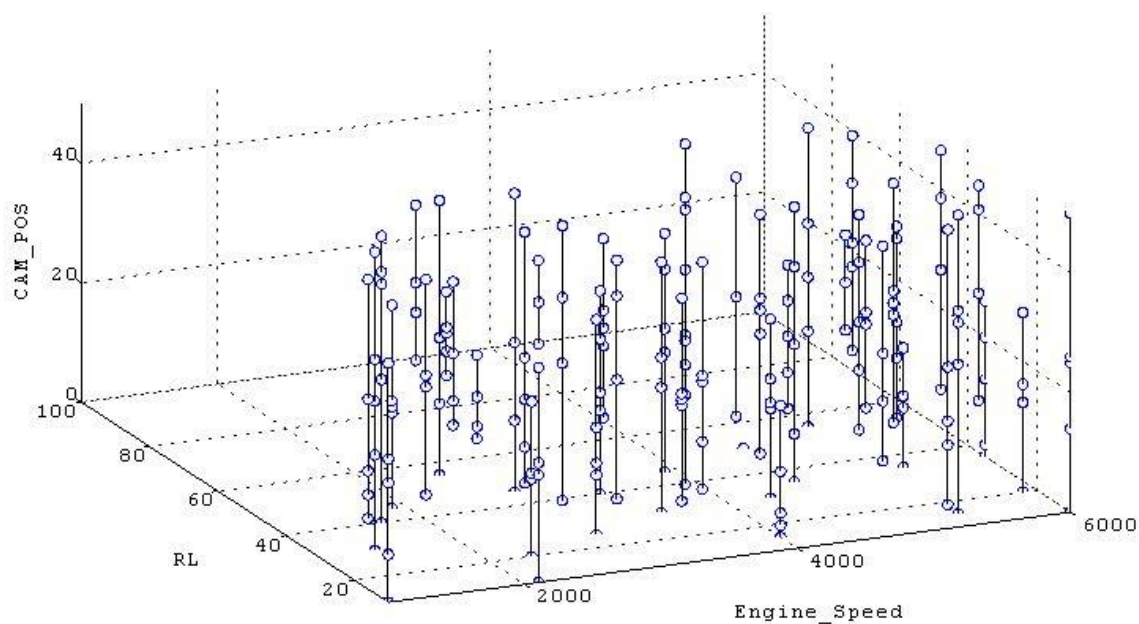
Obr. 28 – Pole operačních bodů za použití Global 2 Step Design



Variations vs. Variations



Obr. 29 – 2D grafické znázornění vygenerovaných proměnných za použití Global 2 Step Design



Obr. 30 – 3D grafické znázornění hodnot proměnné CAM\_POS za použití Global 2 Step Design





## 6 Test

Tato kapitola pojednává o přípravě samotného testu v softwaru AVL CAMEO 4. Tento takzvaný test, by měl umožnit automatizované provedení testovací sekvence, tedy nastavení operačních bodů a proměnných a také automatizované zapisování měřených parametrů. AVL CAMEO by pomocí nastavených komunikačních protokolů mělo ovládat připojené systémy měřicího stanoviště a umožnit tak automatizované řízení motoru, dynamometru a některých měřicích zařízení. Před samotnou přípravou testu musí být připraveny všechny potřebné systémy a jejich komunikace pro provedení testu. Při zakládání nového testu pak přiřadíme testu všechny potřebné systémy, se kterými musí během průběhu testovací sekvence komunikovat. Do těchto systémů může patřit například ASAP3 pro komunikaci s aplikací ETAS INCA pro interakci s řídicí jednotkou motoru, nebo například SimpleProtocol TCP/IP pro komunikaci se systémem na ovládání pohonné jednotky/dynamometru (AVL EMCON). Po připojení k systému můžeme do AVL CAMEO nahrát veškeré kanály, případně kontrolní módy (Control Modes), které daný systém nabízí. S kanály přiřazených systémů pak AVL CAMEO automaticky počítá při vytváření testu. Detailnější popis připojení a přiřazení systému najdeme v závěrečných kapitolách, které pojednávají praktickou část této práce. [13][15]

Typický test probíhá ve dvou vrstvách, ale záleží na konkrétním případě. První vrstva vždy představuje nastavení operačních bodů testu (dáno kontrolním módem). Ve druhé vrstvě jsou pak nastavovány jednotlivé proměnné parametry pro daný operační bod. Poté co je experiment ustálen v operačním bodě, přepne se experiment do druhé vrstvy a jsou nastavovány parametry druhé vrstvy.

Proces testu je rozdělen do těchto částí:

- 1) Project Administration (Administrace projektů)
- 2) Prepare Test (Příprava testu)
- 3) Run Test (Spuštění/průběh testu)
- 4) Test Results (Výsledky testu)

### 6.1 Příprava testu

Založení testu probíhá na kartě Project Administration, v záložce Projects, kde si u našeho projektu založíme nový test. Pro vytvoření nového testu můžeme buď použít některou z poskytnutých, či námi vytvořených šablon, nebo začít s vytvořením zcela nového prázdného testu. Pokud začneme s vytvořením nového prázdného testu, musíme definovat, v jakých vrstvách bude test probíhat, tedy zvolit strategii testu. AVL CAMEO 4



nabízí až ze 4 různých vrstev, v nichž můžeme vybrat jednu z následujících možností testovacích strategií (některé strategie jsou popsány v následujících kapitolách):

1) 1 vrstva:

- DoE List
- Global DoE Screening

2) 2 vrstvy:

- Active DoE
- Adaptive Online DoE
- DoE List 2-Layer
- FlexSweep with DoE List
- Full Factorial
- Online DoE Screening
- We Procedure

3) 3 vrstvy:

- DoE List 3-Layer
- Double Online DoE Screening (DOESCRSCR)
- FlexSweep with Adaptive Online DoE
- FlexSweep with DoE List 2-Layer
- FlexSweep with FullFactorial
- FlexSweep with Online DoE Screening
- Online DoE Screening with FullFactorial
- Operating points with 2 FF Layer
- Operating points with DOE FF Layer
- Operating points with FF DOE Layer

4) 4 vrstvy:

- DoE List 4-Layer
- Online DoE Screening with 2 FF Layer
- Operating points with 3 FF Layer



## 5) Ostatní:

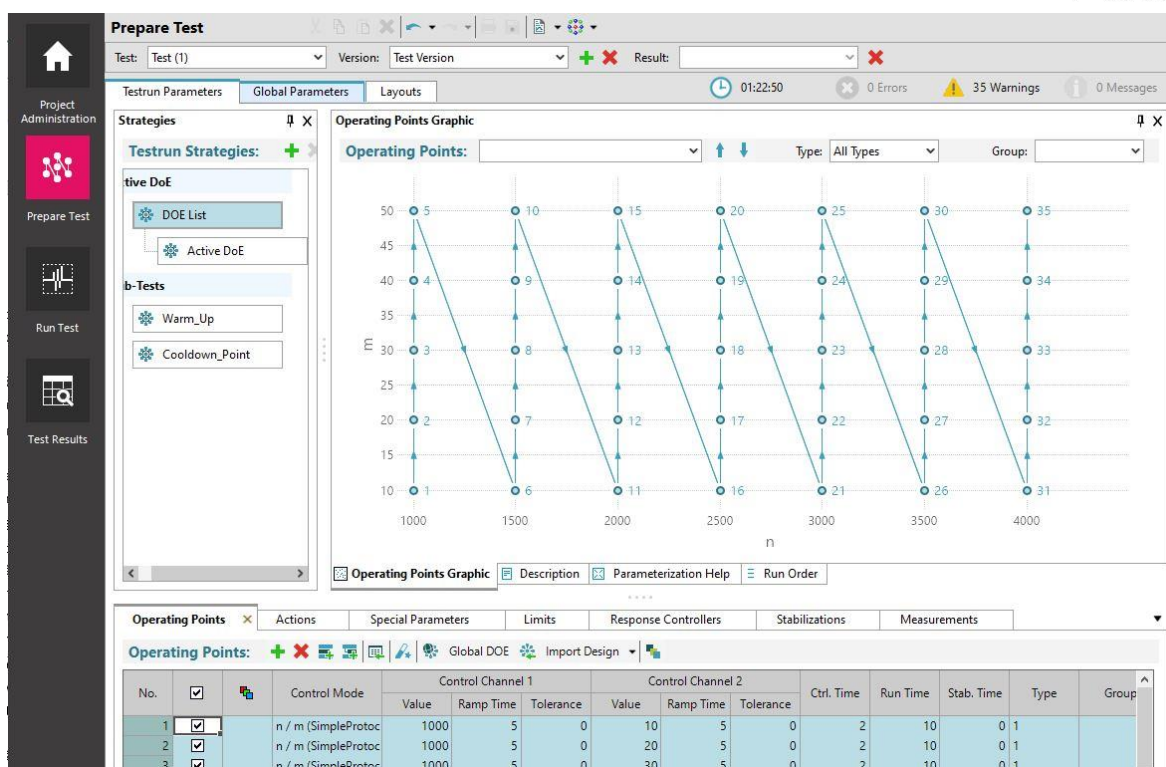
- Real Time Simulation

Poté co zvolíme, kolik vrstev pro náš test potřebujeme a vybereme jednu z nabízených procedur, můžeme testu přiřadit námi vytvořené potřebné systémy a případně konfiguraci testu, pokud nějakou máme k dispozici. Tímto je založení testu u konce a může se pokračovat v přípravě samotného testu, která se odehrává na kartě Prepare Test. Grafické rozhraní pro přípravu testu je ukázáno na Obr. 31.

Na kartě Prepare Test je možné nastavit mnoho parametrů, týkajících se mnoha funkcí, které se navíc liší pro jednotlivé strategie testu. Ne všechny parametry a funkce jsou v následujících kapitolách popsány, pro náповědu k jednotlivým nastavitelným parametrům lze využít záložku Parametrization Help.

V okně Strategies můžeme vidět jednotlivé vrstvy našeho testu, tedy strategii testu a také naše tzv. sub-testy. Sub-testy jsou vrstvy, které nespádají do samotného testu, tedy za normálního měření neprobíhají. Může mezi ně patřit například sekvence pro zahřátí motoru, která bude probíhat před samotným testem, nebo například nastavení motoru, do kterého se přejde v případě překročení některého z definovaných limitů, či po ukončení měření. Sub-testy můžeme libovolně přidávat, a to jak mezi samotných vrstev testu, tak i do jiných sub-testů.

V pravé horní části můžeme vidět okno s grafickým znázorněním operačních bodů, avšak v tomto okně můžeme zobrazit například vlastní popis jednotlivých záložek spodního okna, či například náповědu s popisem jednotlivých nastavitelných parametrů, nacházejících se v záložkách spodního okna. Ve spodním okně pak provádíme nastavení všech důležitých parametrů jednotlivých strategií testů a sub-testů. Nachází se zde například nastavení operačních a variačních bodů, nastavení posloupnosti akcí, limitních parametrů, nebo třeba nastavení měřených kanálů. Vpravo nahoře, vedle ikony hodin, vidíme přibližnou předpokládanou dobu trvání celého testu. Doba testu se může měnit v průběhu testu, v závislosti na jeho vývoji. V případě chybějících, nebo chybně zadaných parametrů AVL CAMEO varuje formou ikon *Errors* a *Warnings*.



Obr. 31 – Grafické rozhraní na kartě Prepare Test

### 6.1.1 Operating Points

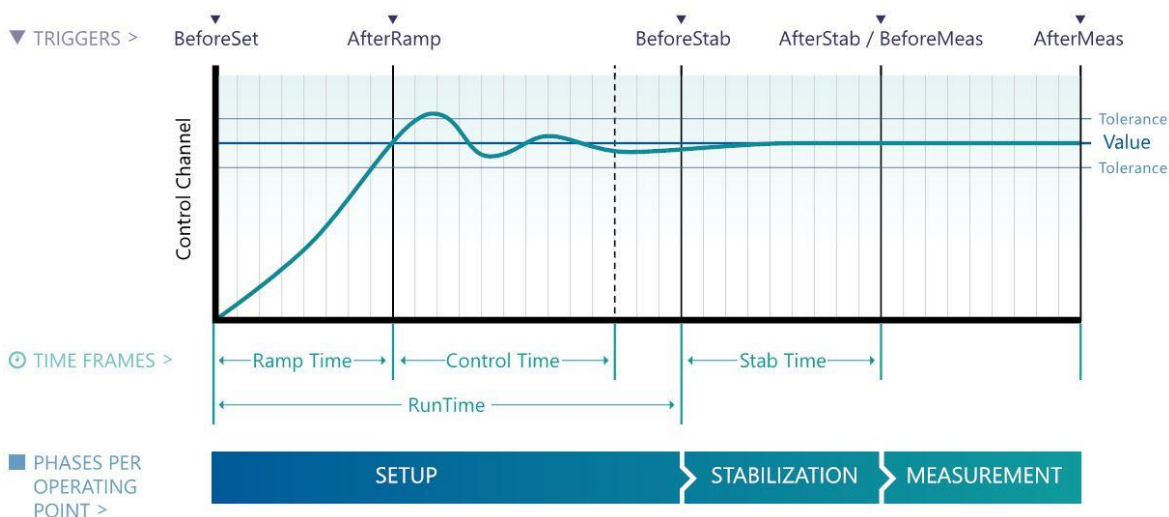
V první vrstvě testu jsou vždy definovány operační body testu, jejich nastavení je na záložce Operating Points. Operační body jsou definovány dvěma proměnnými základními parametry neboli kontrolními kanály (Control Channel 1, Control Channel 2). Tyto dva kontrolní kanály dohromady tvoří tzv. kontrolní mód (Control Mode). V případě testování zážehového spalovacího motoru mohou těmito parametry být například otáčky motoru, moment motoru, relativní zatížení motoru, poloha škrticí klapky atd. Kontrolní módy a jejich kanály je nutné mít předem definovány v příslušném přiřazeném systému. Operační body pak můžeme vytvářet ručním zadáváním jednotlivých hodnot, můžeme je vytvořit použitím funkcí DoE Wizard, nebo Operating Point Wizard, anebo můžeme importovat některý z předem vytvořených designů. Časový průběh kontrolního kanálu je na Obr. 32, kde vidíme, že průběh je oddělen pomocí tzv. Triggers. Ty určují jednotlivé intervaly/fáze v průběhu měření, jako například před nastavením (BeforeSet), po nastavení (AfterRamp), před stabilizací (BeforeStab), atp.

Kromě samotných hodnot kontrolních kanálů operačních bodů definujeme také tyto parametry:

- Ramp Time
- Tolerance
- Control Time



- Run Time
- Stabilization Time
- Type
- Group
- Sub-Test



Obr. 32 – Časový průběh kontrolního kanálu operačního bodu testu

### 6.1.2 Variations

V záložce Variations na kartě Prepare Test můžeme vytvářet a editovat jednotlivé proměnné parametry testu vybraných kanálů. Proměnné parametry, které editujeme, vždy spadají pouze pod označené operační body, případně je následně můžeme kopírovat do vybraných operačních bodů. List kombinací proměnných parametrů můžeme vytvářet ručně, nebo využít funkce DoE Wizard/Variation Wizard, nebo DoE List importovat.

### 6.1.3 Actions

Záložka Actions na kartě Prepare Test nám umožňuje nastavit individuální akce prováděné během testu. Ty je možné nastavit pro jednotlivé operační body zvlášť, nebo pro všechny operační body společně. Volíme zde vybraný kanál, jaká akce se má provést (například nastavení konkrétní hodnoty zvoleného kanálu), v jaké fázi se má provést (BeforeSet, AfterRamp,..).

### 6.1.4 Special Parameters

V záložce Special Parameters na kartě Prepare Test můžeme nastavit speciální parametry, které jsou specifické pro jednotlivé strategie testu.



### 6.1.5 Limits

Záložka Limits na kartě Prepare Test slouží k nastavení limitů vybraných kanálů (např. teplota, tlak,..). Tyto limity můžeme nastavovat ručně, nebo je importovat z dostupných šablon. Limity lze nastavovat pro jednotlivé operační body zvlášť, nebo pro celou oblast operačních bodů společně. Na této záložce můžeme vybrat kanál, u kterého chceme vytvořit limitu, volíme zde limitní hodnotu, ale také kdy a jak se má systém chovat po překročení této limitní hodnoty a mnoho dalšího.

### 6.1.6 Response Controllers

V záložce Response Controllers na kartě Prepare Test můžeme nastavit odezvy vybraných kanálů mezi sebou. Zvolíme zde jeden kontrolní kanál a jeden hlídaný. Vhodným nastavením parametrů jsme pak schopni vytvořit jakýsi regulátor. Tento regulátor, jehož chování může být charakterizováno vybranou a parametrizovanou křivkou, nebo zvolením a parametrizováním charakteristiky PI regulátoru.

Funkce Response Controllers by mohla být také použita jako alternativa RTC kontrolérů (Real-Time-Control), které nabízí AVL CAMEO a které jsou popsány v kapitole 6.5.

### 6.1.7 Stabilizations

Záložka Stabilizations na kartě Prepare Test nám umožní specifikovat kanály, u kterých vyžadujeme kontrolovat ustálení před zapsáním měřených hodnot. Můžeme zde nastavit parametry ustálení jako jsou například tolerance, gradient, deviace, nebo i vlastní kritéria. Určujeme zde také v jaké fázi operačního bodu dojde k začátku kontrolování stabilizace a mnoho dalších parametrů.

### 6.1.8 Measurements

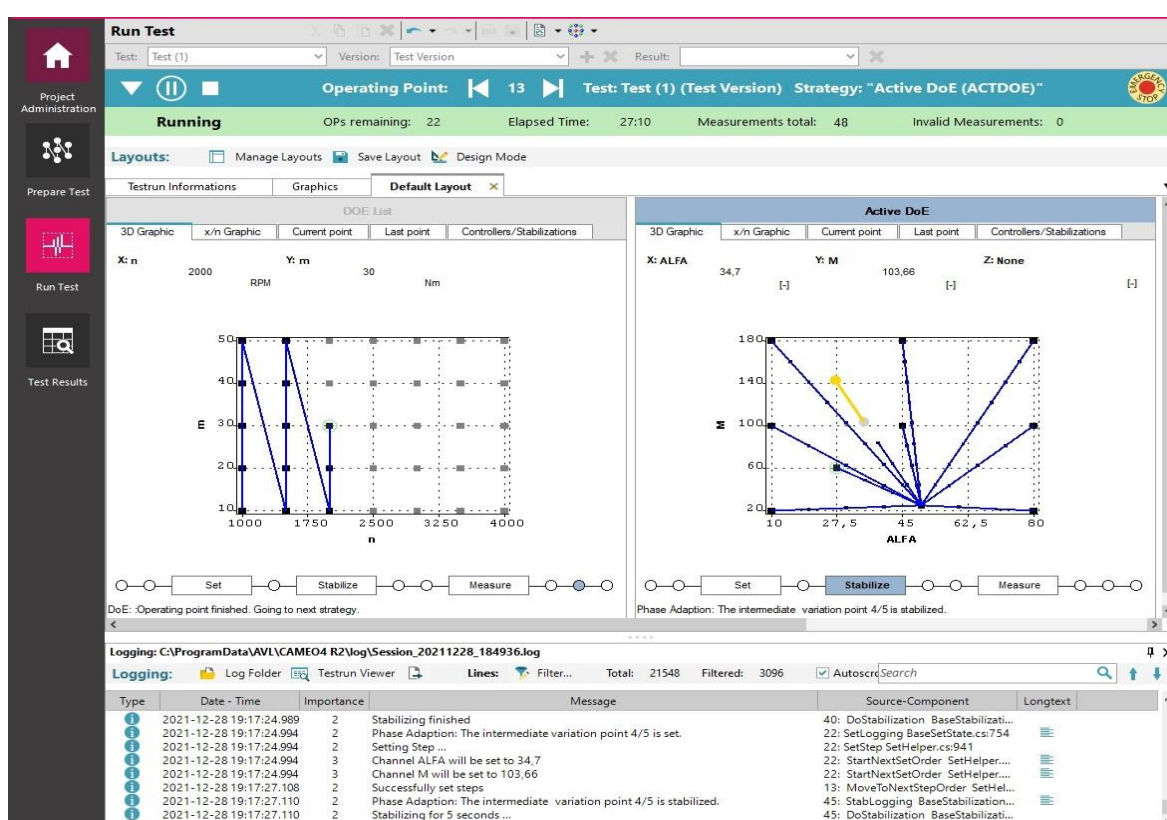
V záložce Measurements na kartě Prepare Test můžeme nastavit kanály, jejichž hodnoty budeme chtít zapisovat v průběhu testu. Kanály můžeme vybírat ručně, nebo importovat z připravené šablony. U jednotlivých kanálů pak musíme definovat několik parametrů. Mezi tyto parametry může patřit například typ (aktuální hodnota, průměrná hodnota,..), délka měření, nebo frekvence záznamu.

## 6.2 Run Test

Na kartě Run Test nalezneme grafické rozhraní pro ovládání a monitorování průběhu testovací sekvence, viz Obr. 33. Ve vrchní části vidíme lištu, která slouží k ovládání testu. Nalezneme zde tlačítka pro inicializaci, spuštění a vypnutí testu. Dále zde najdeme tlačítka pro manuální přepínání mezi operačními body a v pravé části tlačítko pro nouzové vypnutí testu. Nižle nalezneme lištu s informacemi o stavu testu, aktuálním operačním bodě, době trvání testu a počtu měřených bodů. Záložka Testrun Information poskytuje informace o aktuálním stavu testu. V záložce Graphics můžeme graficky zobrazit jednotlivé parametry.



Další záložky (Default Layout) jsou editovatelné pracovní plochy, které můžeme spravovat nástroji lišty Layouts. Můžeme vytvářet nové pracovní plochy, do kterých můžeme přidávat a programovat různé funkční elementy, jako například grafy, tlačítka ukazatele atd. Na Obr. 33 vidíme graficky zobrazená aktuální stavy jednotlivých vrstev (DOE List a Active DoE). Vidíme, v jakém operačním bodě se právě nacházíme a v jakém stavu je aktuálně probíhající strategie druhé vrstvy (Active DoE). Pod grafickým zobrazením stavů jednotlivých strategií vidíme také jednotlivé fáze (Set, Stabilize, Measure) a mezifáze (Enter Strategy, Before Set, Before Stabilize, After Stabilize, Before Measure, After Measure, Next Strategy, Leave Strategy). Aktuální fáze je vždy zvýrazněna modrou barvou. Ve spodní části grafického rozhraní vidíme nastavení záznamu měření a aktuální stav komunikací.



Obr. 33 – Grafické rozhraní na kartě Run Test

### 6.3 Test Results

Karta Test Results představuje poslední krok měření. V této kartě si můžeme prohlédnout všechna naměřená data, tedy dataset. Z tohoto datasetu můžeme automaticky vytvořit tzv. Model Evaluations, což je dalším krokem pro vyhodnocení optimalizace (EVALUATIONS na Obr. 16). Naměřená data také můžeme rovnou exportovat například do textového souboru, nebo tabulky programu MS Excel.



## 6.4 Testovací strategie

V této kapitole jsou stručně popsány vybrané strategie testu, které volíme při vytváření nových testů na kartě Project Administration. Následně tyto strategie můžeme nastavovat na kartě Prepare Test.

### 6.4.1 DoE List

DoE List je základní strategie testování v AVL CAMEO. V průběhu testu tato strategie nastavuje jednotlivé hodnoty proměnných parametrů podle předem nastavené sekvence. DoE List můžeme vytvořit kopírováním z funkce DoE Wizard, nebo použitím funkcí Operating point Wizard a Variation Wizard, které nalezneme v příslušných záložkách na kartě Prepare Test.

Strategii DoE List můžeme použít všech vrstvách testu, ale pouze v první vrstvě můžeme definovat operační body jako proměnné parametry. Proměnné parametry jsou pak nastavovány podle pořadí, které je definováno ve strategii DoE List. [15]

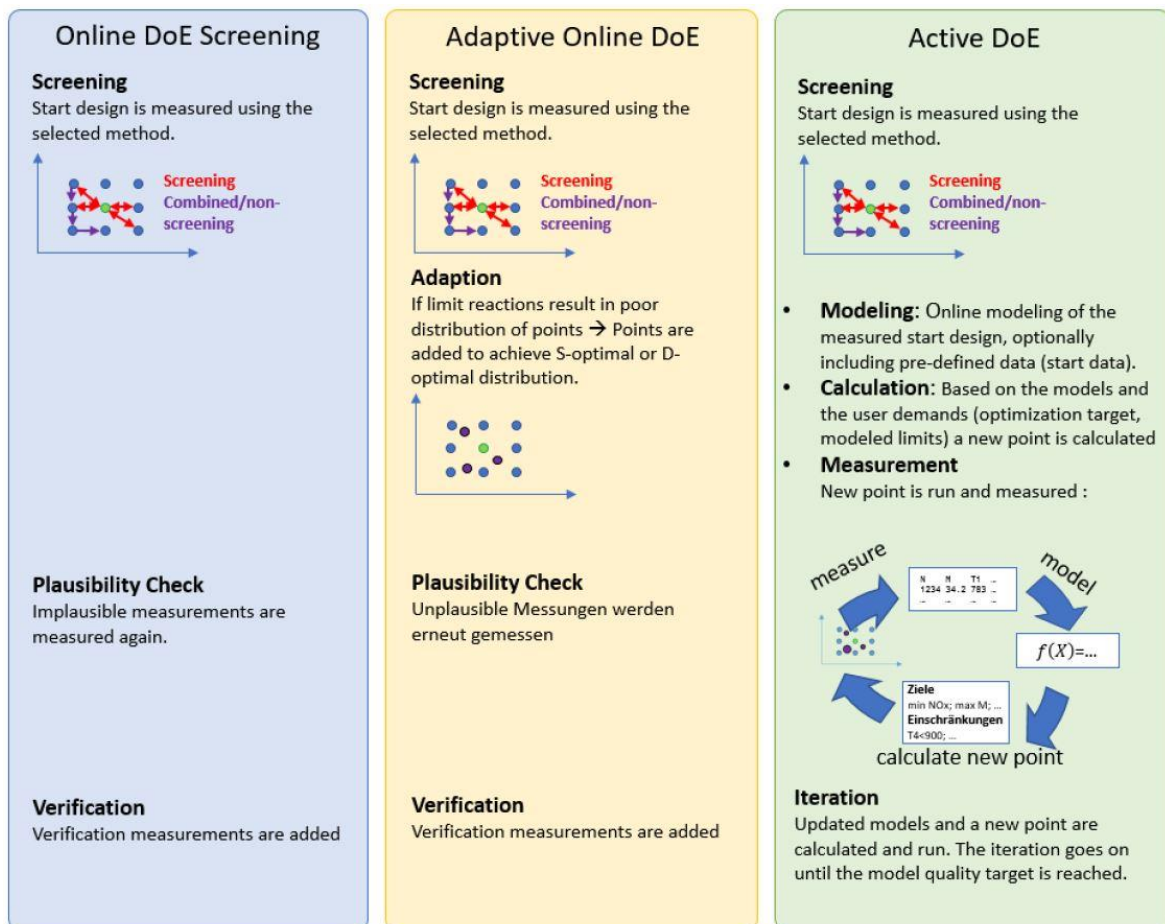
### 6.4.2 DoE Screening

Do kategorie DoE Screening spadá několik strategií, které AVL CAMEO nabízí (viz Obr. 34). Výhodou všech těchto strategií je plánování optimálního designu proměnných parametrů ve vícerozměrných prostorech s nepravidelnými a neznámými hranicemi. K identifikování prostoru experimentu tyto strategie hledají hranice experimentálního prostoru automaticky, v několika krocích. První fází všech těchto designů je tzv. screening, který umožní bezpečné měření. K jednotlivým bodům je přistupováno opatrně po stanovených krocích z počátečního bodu. Pokud by během některého kroku došlo k překročení některého z nastavených limitů, bude systém reagovat přednastaveným způsobem. Tyto metody jsou tedy obzvláště bezpečné při zkoumání neznámých systémů. [14][15]

Mezi DoE Screening strategie patří:

- Online DoE Screening
- Adaptive Online DoE
- Active DoE





Obr. 34 – Strategie využívající metody DoE Screening [15]

#### 6.4.2.1 Online DoE Screening

Strategie Online DoE Screening využívá přístup DoE, ovšem automaticky identifikuje hranice zkoumaného prostoru během měření ve fázi tzv. screeningu. Do zvolených bodů designu se dostává postupně po malých definovaných krocích a pokud se nějakým krokem dostane k hranici nějakého ze stanovených limitů reaguje zvoleným přístupem. Tímto způsobem se vytvářejí hranice zkoumaného systému, ovšem rozložení bodů dle DoE nemění současně se změnou zkoumaného prostoru. Tím může vzniknout měření s nepřilíš ideální distribucí měřených bodů. [14]

Druhou fází je ověření použitelnosti naměřených bodů (Plausibility Phase), ve které se pro každý měřený kanál určí hrubě odlehle hodnoty (Outliers) a určí se přijatelný rozsah pro naměřené hodnoty. Pokud je počet hrubě odlehlých hodnot jednoho kanálu větší než 10 % všech naměřených bodů, všechny odlehlé body tohoto kanálu budou identifikovány jako nesprávné a budou ignorovány. [14][15]



#### 6.4.2.2 Adaptive Online DoE

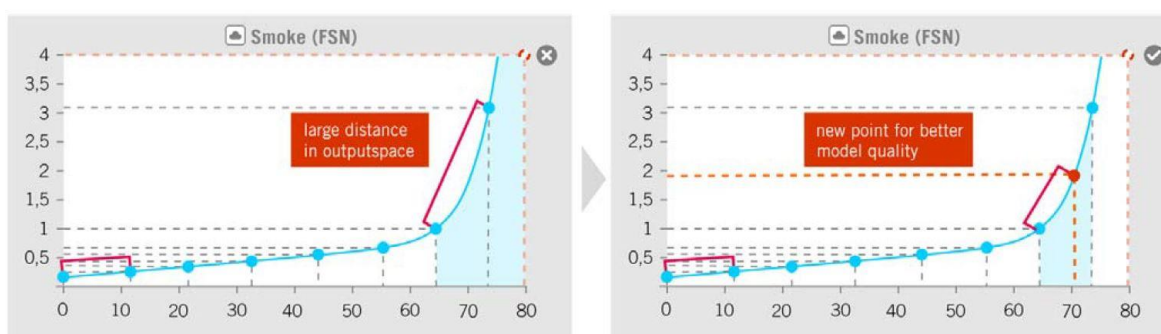
Strategie Adaptive Online DoE funguje obdobně jako Online DoE Screening, ovšem přibývá zde fáze adaptace, tzv. Adaption Phase. Strategie může začít použitím jednoduššího designu a poté přidává další body za použití složitějších designů. Ve fázi Adaption Phase strategie kontroluje kvalitu počátečního použitého designu a rozhoduje, zda může být kvalita vylepšena přidáním dalších bodů měření. Dle potřeby pak může přidat další body, a to za použití D-Optimal designu, nebo S-Optimal designu. Tím pádem by tato strategie měla nově zjištěný tvar měřeného prostoru lépe pokrýt měřenými body.

Následuje opět fáze Plausibility Phase. [14][15]

#### 6.4.2.3 Active DoE

Active DoE je sofistikovaná strategie, která postupnými iteracemi adaptuje design testu během měření. Používá opět metodu screeningu a navíc na základě již naměřených dat, kalkuluje modely online. Tyto modely jsou použity pro adaptování designu testu online, během měření. Měření jsou vždy prováděna v předem stanovených intervalech měření. Testování pokračuje do té doby, dokud není dosaženo požadované kvality modelu. Na základě vytvořeného modelu a požadavcích na optimalizaci provede kalkulaci a vytvoří další bod měření. Výhodou je, že není nutně potřeba předem stanovit přesný počet požadovaných bodů měření, ale je provedeno pouze tolik měření, kolik je potřeba.

Na Obr. 35 je vidět porovnání použití konvenčního DoE (nalevo) a Active DoE (napravo). U konvenčního přístupu je testovací design vytvořen bez jakékoliv informace o chování zkoumaného systému. Tím pádem je možné, že v místech, kde se zkoumaný systém chová nelineárně, je měřeno příliš málo bodů na určení chování zkoumaného systému. To by mohlo vést k nutnosti začít s dalším měřením za použití nového DoE. Výsledkem konvenčního použití DoE může být například to, že měření bylo prováděno v oblastech, které jsou pro vyhodnocení našeho měření posléze zbytečné. [14][15]



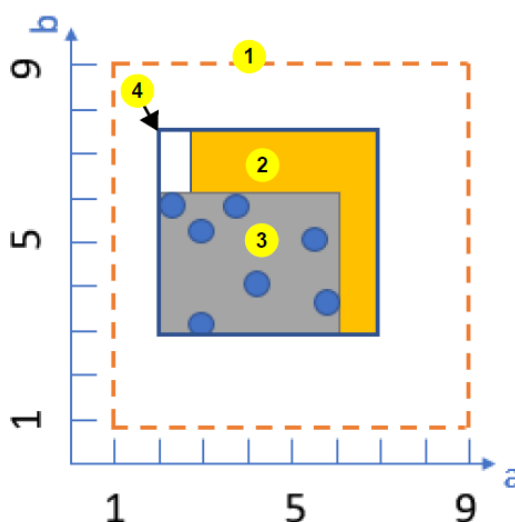
Obr. 35 – Porovnání konvenčního DoE (nalevo) a Active DoE (napravo) [15]



S použitím Active DoE se design během měření automaticky adaptuje a tím pádem je předpokládáno pokrytí měření v relevantních oblastech zkoumaného systému a kvalitní měření nelinearit systému bez nutnosti provádění vícera měření. Modely mohou být kalkulovány lokálně, nebo globálně.

- **Lokální Active DoE:** V každém operačním bodě je kalkulován model, který je platný pouze pro tento operační bod. (Parametry kontrolních módů, například zatížení a otáčky motoru, nejsou vstupními veličinami modelu)
- **Globální Active DoE:** Je vytvářen jeden model, pokrývající všechny operační body (Parametry kontrolních módů jsou vstupními veličinami modelu)

Při návrhu Active DoE jsou zadány tzv. pevné hranice měření (parametr Min a Max) a tzv. měkké hranice měření (parametr From a To). Tyto hranice jsou naznačeny na Obr. 36. Zadáním pevných hranic je definována oblast, ve které je možné hledat nové body. Tyto pevné hranice se po dobu měření nemění v několika iteracích. Měkké hranice pak rozšiřují prostor již naměřených bodů a tím vzniká nová oblast měření. Tento rozsah se může zvětšovat během jednotlivých iterací. Active DoE se snaží nalézt nové body měření v oblasti měření. Oblast měření nesmí překročit pevné hranice. [15]



Obr. 36 – Active DoE hranice měření [15]

- 1. Pevné hranice
- 2. Měkké hranice
- 3. Již naměřené body
- 4. Oblast měření

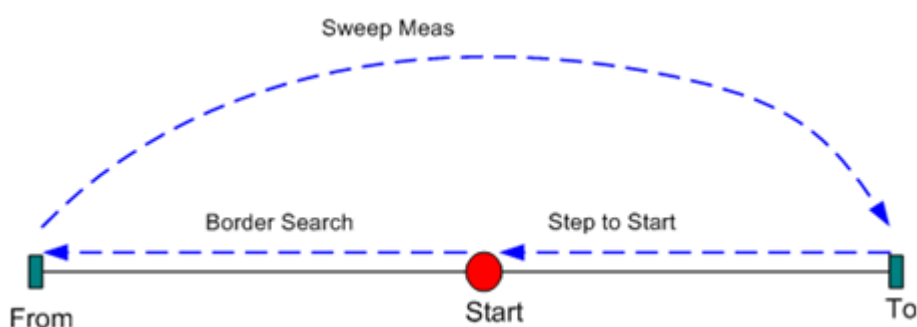


### 6.4.3 Flex Sweep

Flex Sweep je strategie, která je použitelná pro prozkoumání jakéhokoliv flexibilně definovaného proměnného parametru. Při použití s jinými strategiemi je tato vždy prováděna až v poslední vrstvě testu. Výhodou této strategie je nezávislost na konkrétní aplikaci, což dává této strategii flexibilitu. Typické použití této strategie jsou například Spark Sweep, nebo Torque Mapping. Flex Sweep může být použit pouze pro jeden proměnný parametr, který je potřeba nejprve zvolit jako Sweep Channel. Flex Sweep strategie je pak provedena pod řadou předdefinovaných podmínek ustáleného stavu zkoumané pohonné jednotky. [15]

Celá tato strategie se dá rozdělit do tří fází, které jsou vidět na Obr. 37. Těmito fázemi jsou:

- **Hledání hranic (Border search):** Průzkum začíná z hodnoty Start, což bývá hodnota považována za bezpečnou a několika kroky směřuje k hodnotě From. Tyto kroky jsou pouze stabilizovány, ale neměřeny. Cílem je najít maximální hodnotu v tomto směru, která je dána dosažením definovaných limitů (např. klepání motoru při posouvání předstihu zážehu). Pokud k překročení limitů nedojde hranicí je hodnota From.
- **Průzkumné měření (Sweep measurement):** Záznam potřebných informací o tom, jak měřená jednotka reaguje na změnu Flex Sweep parametru. Počíná od hodnoty From po hodnotu To po definovaných krocích. Body mezi těmito hodnotami jsou stabilizovány a měřeny. Kontrola limitů je stále aktivní.
- **Vrácení na start (Return to start):** Hodnota Flex Sweep parametru se musí vrátit na hodnotu Start, aby bylo zajištěno bezpečný začátek dalšího měření. Délku kroků můžeme volit. Kontrola limitů je neaktivní.



Obr. 37 – Fáze strategie Flex Sweep [15]

Strategie Flex Sweep nabízí tři metody, kterými jsou:

- **Standard Sweep:** Provede standardní Flex Sweep, tzn. budou změřeny všechny body průzkumu.



- **Optimum Search:** Je hledáno optimum zvolené funkce (maximum/minimum). Měřené budou pouze body v okolí tohoto optima.
- **Target Search:** Je hledána konkrétní hodnota zvolené funkce. Měřené budou pouze body v okolí této hodnoty.

## 6.5 RTC

RTC (Real-time Controllers), jsou funkce, které AVL CAMEO 4 umožňuje v případě použití rozšíření CAMEO Realtime Extension (RTE) a operačního systému InTime. Tyto aplikace jsou spuštěny během testování a jsou schopny v reálném čase zasahovat do některých nastavení systému. Dodávají tak systému vysokou úroveň stability během měření a zároveň se starají o vyšší bezpečnost pohonné jednotky.

Pro komunikaci se v tomto případě používá zejména rozhraní CAN, ale v některých případech může být dostatečná i pomalejší komunikace, například ethernet. RTC mohou být použity jak pro manuální testování, tak pro automatizované testování, a to standartně na motorových stanovištích s těmito konfiguracemi systémů:

- Testovací systém bez AVL CAMEO™, za použití systému PUMA Open 2 R3, nebo vyšší
- V systému AVL CAMEO 4™, za použití systému PUMA Open 1.3.2, nebo vyšší

Teoreticky by však RTC bylo možné použít i v případě, že máme systém AVL CAMEO 4 a nemáme systém PUMA Open, ale máme vlastní testovací systém na motorovém stanovišti. Toto použití však vyžaduje složitější nastavení komunikací mezi jednotlivými systémy. Více je tato problematika popsán v dalších kapitolách. [16]

### 6.5.1 Funkce RTC

Mezi hlavní funkce RTC patří:

- Kontrola předstihu zážehu
- Kontrola bohatosti palivové směsi ( $\lambda$ )

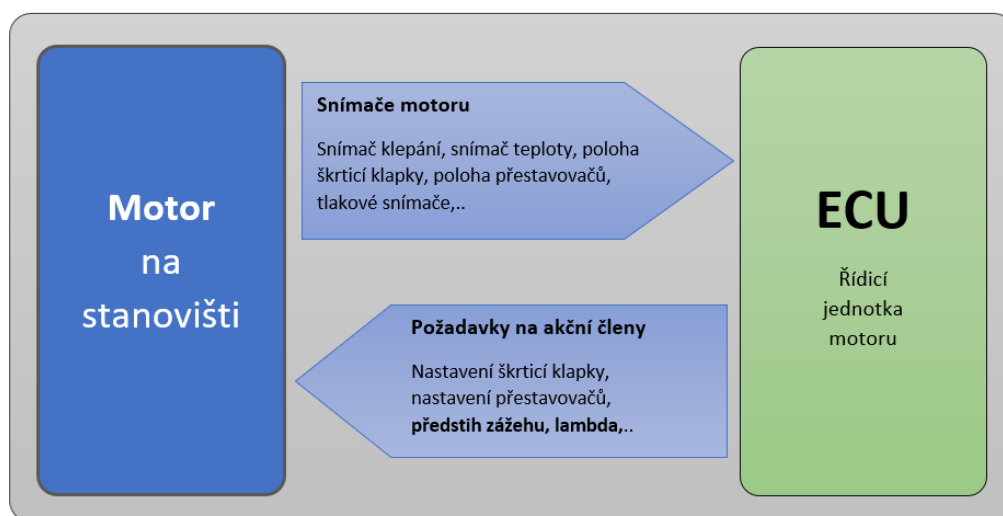
Tyto regulátory nám dovolují mít kontrolu nad parametry spalování, kterými jsou MFB50% (CA50/AI50), intenzita klepání, nebo maximální tlak ve spalovacím prostoru, přičemž je teplota výfukových plynů udržována na přijatelných hodnotách. Tato kontrola může probíhat jak při statickém zátěžovém stavu, tak při přechodových zátěžových stavech motoru.

Oba regulátory mohou pracovat nezávisle na sobě, nicméně některé funkce RTC vyžadují, aby byly oba regulátory aktivní zároveň.

Provádění algoritmů RTC probíhá v real-time prostředí (InTime) na počítači, kde je aktivní systém CAMEO. Vstupy (aktuální hodnoty, požadované hodnoty, vstupy uživatele,..) a výstupy (regulační požadavky,..) regulátorů ComCon a LamCon probíhají přes rozhraní CAN.

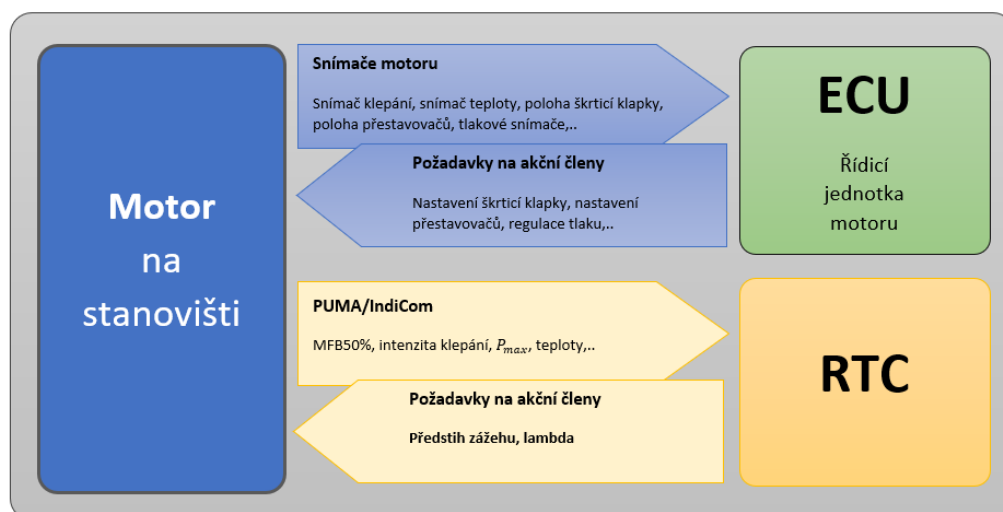


Výstupní signály pro předstih zážehu a regulaci bohatosti směsi jsou posílány do systému řídicí jednotky (např. ETAS INCA) pomocí ASAP3 komunikace, nebo také po rozhraní CAN. [16]



Obr. 38 – Standardní řízení motoru pomocí ECU

Na Obr. 38 je naznačeno, jak probíhá řízení motoru standardně, bez použití RTC, pouze pomocí řídicí jednotky motoru. Při tomto stavu dostávají akční členy signály dle kalibrace řídicí jednotky, která se řídí pomocí vlastních snímačů motoru.



Obr. 39 – Řízení motoru s využitím RTC

Na Obr. 39 je naznačeno, jak by vypadalo řízení motoru s využitím RTC. Předstih zážehu a bohatost palivové směsi už nejsou přímo řízeny pomocí řídicí jednotky motoru, ale jsou



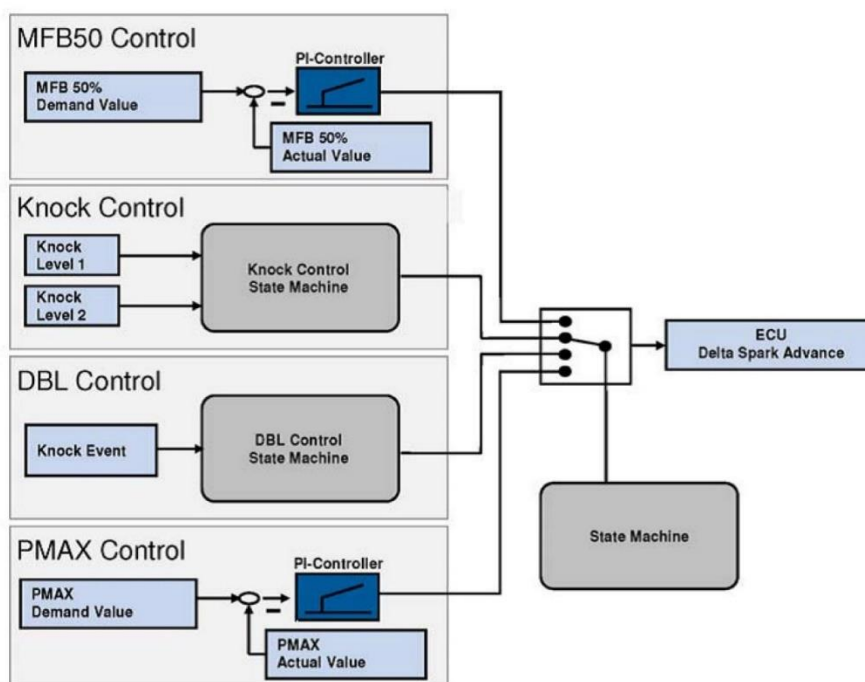
řízeny právě pomocí RTC, které udržuje parametry spalování definované uživatelem. RTC dostává signály pro řízení z testovacího systému (např. PUMA, nebo vlastní) a indikačního systému (např. AVL IndiCom). Tímto je uživateli umožněno bezpečně řídit motor, a to již v počátečních fázích, kdy řídicí jednotka motoru ještě není plně kalibrovaná. AVL RTC se skládá z dvou hlavních regulátorů, kterými jsou regulátor spalování ComCon a regulátor palivové směsi LamCon.

#### 6.5.1.1 Regulátor spalování – ComCon (Combustion Controller)

ComCon se stará o regulaci předstihu zážehu a to tak, aby se dosáhlo požadovaného parametru MFB50% a zároveň se udržela intenzita klepání a maximální tlak ve spalovacím prostoru v přijatelných hodnotách. Standartně se tento regulátor snaží držet hodnotu parametru MFB50% na požadované hodnotě (8° za horní úvratí je požadováno za termodynamické optimum). Předpoklady fungování regulace jsou zobrazeny v Tab. 2. Z tabulky předpokladů vyplývá, že ComCon má na starosti dva úkoly, které se navzájem odporují. Nejvyšší prioritu má však snížení hodnoty klepání a P<sub>MAX</sub>, čehož se dosáhne snížením předstihu zážehu. A nejnižší prioritu má naopak dosažení požadované hodnoty CA50 zvyšováním předstihu zážehu. [16]

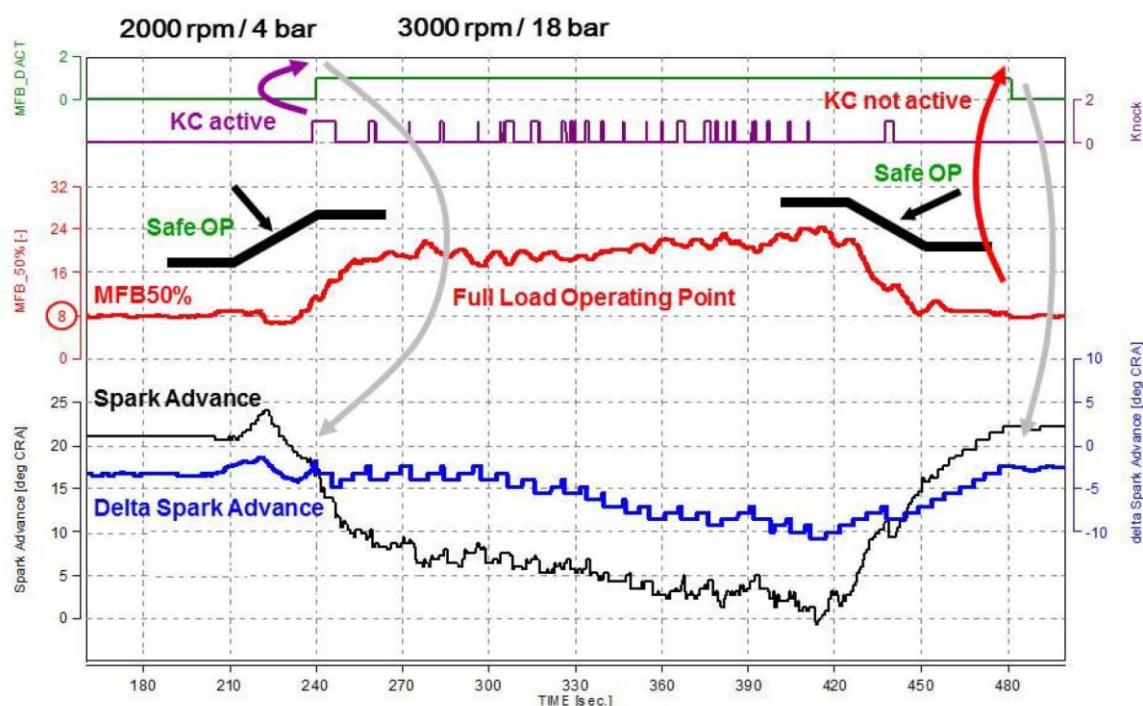
Tab. 2 – Předpoklady regulace ComCon

Předstih zážehu	Reakce
Zvýšení předstihu zážehu	<ul style="list-style-type: none"><li>- Vyšší hodnota klepání</li><li>- Nižší hodnota CA50 (dřívější)</li><li>- Vyšší hodnota P<sub>MAX</sub></li><li>- Nižší teplota výfukových plynů</li></ul>
Snížení předstihu zážehu	<ul style="list-style-type: none"><li>- Nižší hodnota klepání</li><li>- Vyšší hodnota CA50 (pozdější)</li><li>- Nižší hodnota P<sub>MAX</sub></li><li>- Vyšší teplota výfukových plynů</li></ul>



Obr. 40 – Schéma ComCon regulace předstihu zážehu [16]

Schéma ComCon regulace předstihu zážehu můžeme vidět na Obr. 40. Na Obr. 41 je naznačen příklad zásahu ComCon regulace v průběhu testování, ze kterého je patrné, jak ComCon reaguje na výskyt klepání při zvýšení zatížení a otáček motoru, a to snížením předstihu zážehu. To má však za následek zvýšení hodnoty CA50 (MFB50%).



Obr. 41 – Ukázka zásahu ComCon regulace v průběhu testu [16]



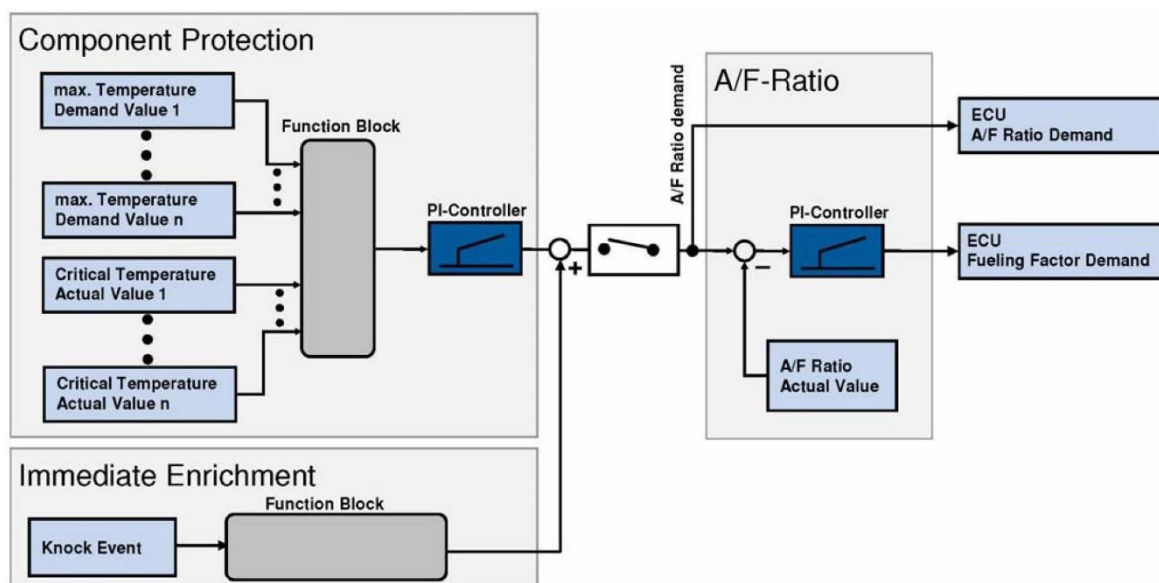


### 6.5.1.2 Regulátor bohatosti směsi – LamCon (Lambda Controller)

LamCon se stará o regulaci množství vstřikovaného paliva a to tak, aby se dosáhlo požadované bohatosti palivové směsi a zároveň se udržela teplota výfukových plynů v přijatelných hodnotách, aby se předešlo poškození komponent pohonné jednotky. Nejdůležitější parametrem pro regulaci teploty výfukových plynů je součinitel přebytku vzduchu  $\lambda$ . Předpoklady fungování LamCon regulace jsou v Tab. 3. LamCon tedy pracuje s dvěma opačnými požadavky. Vyšší prioritu však má snížení teploty výfukových plynů za účelem ochrany pohonné jednotky. Nižší prioritu pak má udržení požadované hodnoty  $\lambda$ . [16]

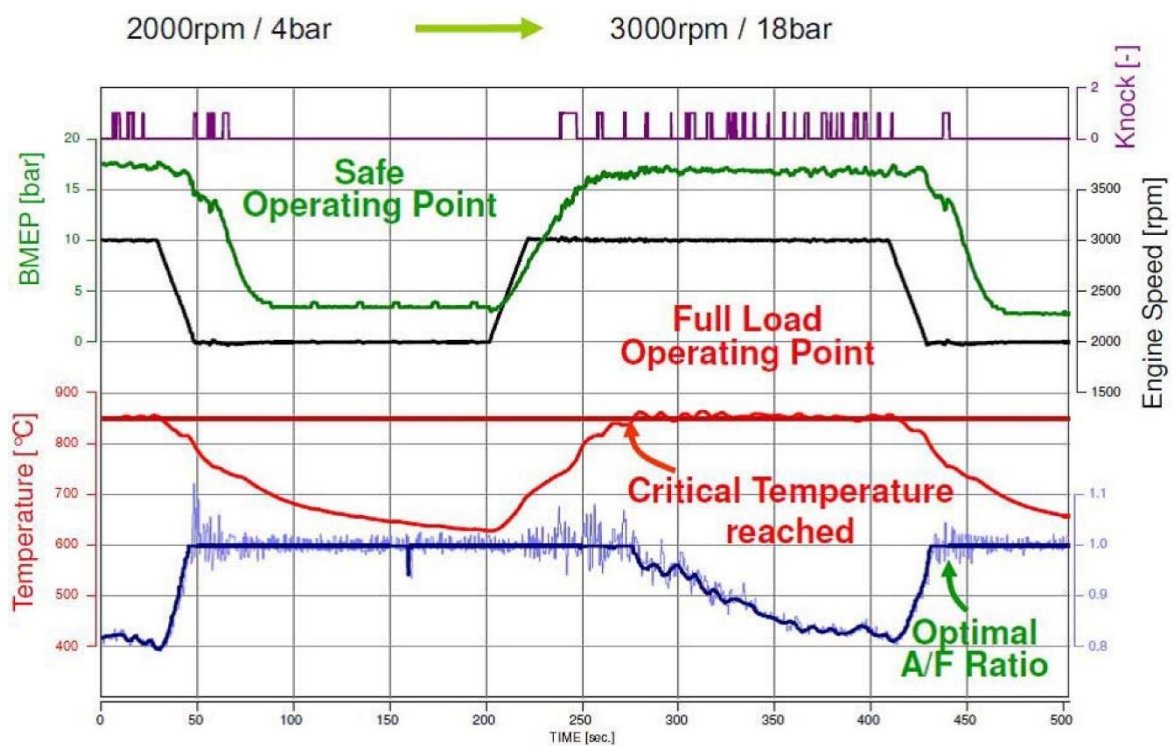
Tab. 3 – Předpoklady regulace LamCon

Součinitel přebytku vzduchu $\lambda$	Reakce
Zvýšení $\lambda$ (ochuzení směsi)	Vyšší teplota
Snížení $\lambda$ (obohacení směsi)	Nižší teplota



Obr. 42 – Schéma LamCon regulace bohatosti palivové směsi [16]

Schéma LamCon regulace předstihu zážehu můžeme vidět na Obr. 42. Na Obr. 43 je naznačen příklad zásahu LamCon regulace v průběhu testování, ze kterého je patrné, jak LamCon reaguje na výskyt klepání a zvýšení teploty výfukových plynů při zvýšení zatížení a otáček motoru.



Obr. 43 – Ukázka zásahu LamCon regulace v průběhu testu [16]



## 7 Úprava a vyhodnocení naměřených dat

Tato kapitola pojednává o postupu při vyhodnocení naměřených dat neboli datasetu. Výsledkem testu je zpravidla soubor, který obsahuje veškeré časově synchronizované hodnoty měřených parametrů, které jsou seřazeny do tabulky. Dataset můžeme získat buď rovnou z AVL CAMEO po ukončení automatizovaného testu, nebo jej můžeme získat vlastním měřením. Pokud je dataset získán vlastním měřením pomocí jiného softwaru než je CAMEO, je nutné tuto tabulku dat upravit dle požadavků CAMEA, následně je možné tento dataset importovat do CAMEA a dále s ním pracovat.

Cílem vyhodnocení těchto naměřených dat je najít optimální hodnoty proměnných veličin s úmyslem minimalizovat, nebo maximalizovat požadované funkce, a to za dodržení stanovených limitních hodnot vybraných parametrů. V našem případě to může být například situace, kdy hledáme ideální kombinace nastavení časování vačkových hřídelí pro dosažení minimální spotřeby paliva, nebo například maximálního výkonu motoru, pro daný zátěžový bod motoru. [13]

Postup práce v AVL CAMEO 4 je rozdělen na následující kroky:

- 1) Raw Data (Hrubá data)
- 2) Modeling (Modelování)
- 3) Optimization (Optimalizace)
- 4) Map Generator (Generátor map)
- 5) Engine Maps (Motorové mapy)
- 6) Compare Variants (Porovnání proměnných)

### 7.1 Raw Data

Karta Raw Data představuje první krok při vyhodnocování naměřených dat. Začíná se importováním naměřených dat. Ty mohou být importována přímo ze systému AVL CAMEO po dokončení testu, v případě, že měření bylo pomocí CAMEA provedeno. Pokud bylo měření provedeno pomocí jiného testovacího systému, je možné je importovat ve formě tabulky, například ve formátu .TXT, .XLS, .XLSX atd. Formát importované tabulky však musí splňovat tvar požadovaný softwarem AVL CAMEO. Během importování dat můžeme selektovat kanály, které budeme potřebovat pro vyhodnocení optimalizace a zbytek neimportovat. Také můžeme rovnou vybrat, které z kanálů budou představovat parametry měřené (Measurement), proměnné (Variation), závislé (Response) atd.



### 7.1.1 Editace datasetu

Poté co importujeme data, můžeme přejít k prvnímu kroku, kterým je úprava naměřených dat. V záložce Data Editor můžeme najít potřebné nástroje pro úpravu datasetu. Z jednotlivých měřených bodů můžeme vytvořit tzv. datové skupiny. Každá datová skupina představuje množinu bodů, která bude v následujícím kroku použita pro vytvoření modelu. Jednotlivé skupiny tedy mohou být definovány například kontrolními kanály, čímž rozdělíme dataset na jednotlivé operační body. Datové skupiny však můžeme rozdělit dle libovolného požadovaného kanálu, nebo nemusíme rozdělovat vůbec. Vždy záleží na konkrétním případě optimalizace. Rozdělení datasetu do datových skupin můžeme provést ručně, nebo využít funkce Detect Groups, která rozdělí dataset dle námi zvolených kanálů a definovaných tolerancí.

Další důležitou funkcí při úpravě datasetu je identifikace a eliminace odlehlých naměřených hodnot, kterou provádíme poté co byly vytvořeny požadované datové skupiny. Za odlehlé hodnoty považujeme takové, které nejsou svou hodnotou relevantní pro optimalizaci, respektive pro vytvoření modelů. Jsou to hodnoty ležící mimo požadovaný rozsah zkoumaných veličin, mohou být způsobeny například chybným měřením, nebo měřením v nežádoucím stavu motoru. Tyto hodnoty jsou nazývány Outliers a pro jejich detekci nabízí CAMEO speciální funkci Detect Outliers. Při detekování odlehlých bodů CAMEO rozeznává dva typy, a to hrubě odlehlé (Gross Outliers) a body podezřelé (Suspected Outliers). U vybrané skupiny vždy vidíme počty odlehlých bodů (viz Obr. 44). Po stisknutí tlačítka Detect Outliers se nám otevře tzv. Outlier Detection Wizard (viz Obr. 45), pomocí něhož můžeme odlehlé hodnoty selektovat a eliminovat.

No.	Measurement	Variation	Variation	Response	Response	Response
58	1	6000	0	40	8,1609	309
59	1	6000	0	40	2,7309	933,55
60	1	6000	0	40	-1,6267	-1592,1
61	2	5500	-50	0	12,056	209,64
62	2	5500	-50	0	11,574	220,18
63	2	5500	-50	0	9,5111	271,49
64	2	5500	-50	0	4,1429	635,1
65	2	5500	-50	0	-0,31734	-7809,2

Obr. 44 – Grafické rozhraní na kartě Raw Data, záložka Data Editor



Obr. 45 – Okno funkce Detect Outliers pro detekování odlehlých bodů

Záložka Graphics na kartě Raw Data nabízí grafické znázornění celého datasetu. Můžeme zde pozorovat všechny hodnoty jednotlivých kanálů, které jsou rozděleny dle datových skupin. Grafické znázornění nám může pomoci lépe porozumět například průběhu měření, či chování systému.

## 7.2 Modeling

Karta Modeling představuje druhou fázi při vyhodnocování naměřených dat. V záložce Models můžeme vytvořit modely zkoumaných veličin, které byli v předchozím kroku označeny jako tzv. Response Channels, v závislosti na vstupních proměnných. Modely jsou vytvářeny pro jednotlivé datové skupiny a kanály zvlášť a jejich kvalita záleží na kvalitě naměřených dat. Čím vyšší pak bude kvalita modelů, tím lepších výsledků optimalizace dosáhneme. Dále zde můžeme tyto modely analyzovat, editovat, kontrolovat jejich kvalitu a statistické parametry a případně modely exportovat.

Záložka Graphics následně umožňuje grafický náhled na jednotlivé kanály a jejich závislosti mezi sebou.

### 7.2.1 Models

Při vytváření modelů v záložce Models můžeme zvolit, zda budeme vytvářet modely pro jednotlivé datové skupiny zvlášť, nebo vytvoření modelů aplikujeme na více skupin



najednou. Zároveň zvolíme, pro které kanály chceme model vytvořit. Volíme také, jaký typ modelu a pro jaký kanál budeme chtít použít. AVL CAMEO 4 nabízí tyto možnosti při výběru typu modelu:

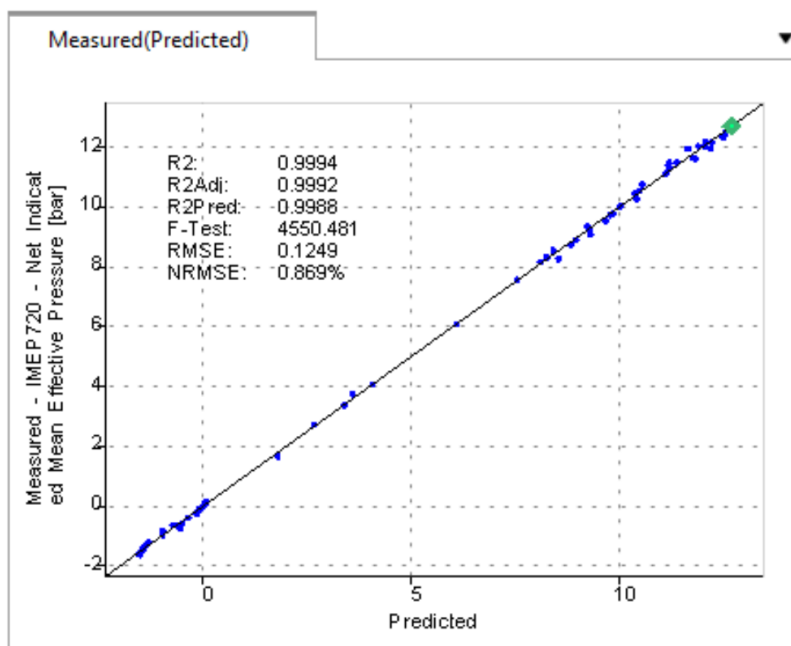
- FPM (FreePolyModel)
- RNN (RobustNeuralNetwork)
- Automatic

Modely FPM a RNN jsou popsány níže. Parametry těchto modelů lze případně upravit v okně Model Properties. Při volbě Automatic jsou vytvořeny různé modely s různými parametry a nakonec je vybrán ten, který nejlépe odpovídá chování dané veličiny (kanálu). Na Obr. 46 je vidět grafické rozhraní pro vytvoření modelů. Po vytvoření modelů je naznačeno barevnými šipkami, jak vytvořený model odpovídá chování zkoumaného kanálu neboli kvalita modelu. Matematické vyjádření kvality modelů je možné sledovat v okně Model Information, nebo v okně Measured(Predicted), kde se nacházejí jednotlivé koeficienty statistického vyhodnocení kvality modelů. Po vytvoření modelů je vidět také porovnání naměřených dat a dat predikovaných dle modelu. Ukázka tohoto porovnání je vidět na Obr. 47, kde jsou také hodnoty koeficientů kvality modelu.

Response Name	Model Type	Positive Only	Model Quality	Goodness of fit	Model significance	
					Average Value	Rep
IMEP720 - Net Indicated Mean Effective Pressure	Automatic (RNN)		↑	↑	↑	
Knock Induction Time Integral	Automatic (RNN)	+	↗	↗	↑	

Legend: ↑ Very Good   ↗ Good   → Medium   ↘ Poor   ○ Overfit   ✕ Not Available

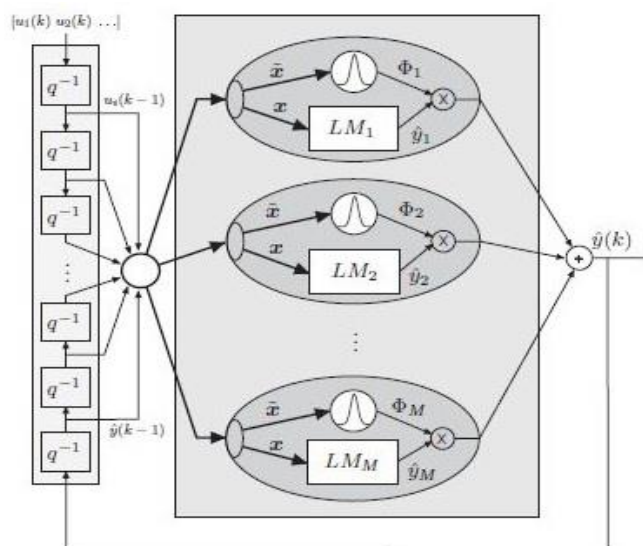
Obr. 46 – Grafické rozhraní pro vytvoření modelů



Obr. 47 – Porovnání naměřených hodnot a predikovaných dle modelu

### 7.2.1.1 RNN model

RNN (Robust-Neural-Network) patří mezi neuro-fuzzy modely, který je vhodný zejména pro odhalování nelineárních závislostí v naměřených datech. Hlavní princip RNN modelu je rozdělení na menší skupiny, které jsou pak jednotlivě modelovány pomocí polynomických funkcí. Z těchto polynomických modelů je následně proveden vážený součet.

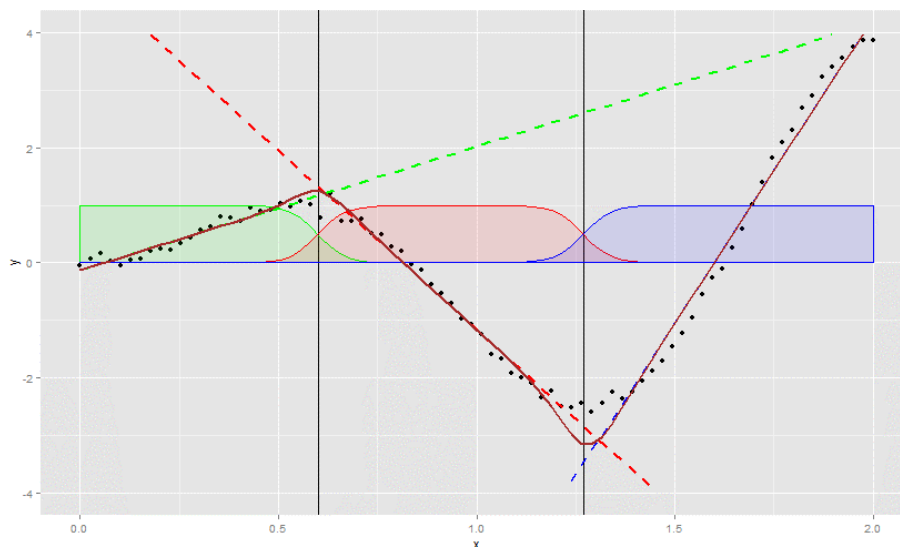


Obr. 48 – Ilustrace neuro-fuzzy modelu [13]

Obr. 48 naznačuje ideu RNN modelu a to, jak se model skládá z několika jednotlivých polynomických modelů. Tyto lokální modely jsou označeny  $LM_1, LM_2, \dots, LM_M$ . Každý



lokální model odpovídá specifické fuzzy oblasti vstupního prostoru a přispívá celkovému modelu svou poměrnou částí. Na Obr. 49 je znázorněno proložení RNN modelem. Lokálními polynomicke modely jsou znázorněny čárkovanými čarami. Podíly jednotlivých lokálních modelů jsou znázorněny barevnými oblastmi (zelená, červená, modrá). [13]



Obr. 49 – Proložení RNN modelem [13]

#### 7.2.1.2 FPM model

FPM (FreePolyModel) patří mezi polynomicke regresní modely, který umožňuje interakce až do pátého řádu mezi vstupními veličinami (proměnnými). Tento model funguje na principu proložení naměřených hodnot polynome, jehož parametry jsou vypočteny pomocí metody nejmenších čtverců. Parametry polynomu jsou určeny tak, aby součet druhých mocnin odchylek mezi naměřenými hodnotami a hodnotami získaného polynomu byl minimální. [13]

#### 7.2.1.3 Detekování odlehlých bodů modelu

Po vytvoření modelů můžeme v okně Outliers analyzovat odlehlé a podezřelé body modelu. Tyto body můžeme deaktivovat a následně vytvořit nový model, který nebere tyto hodnoty v potaz. Tímto se docílí lepší kvality modelu. Postup je obdobný jako v kapitole 7.1.1.

### 7.3 Optimization

Karta Optimization představuje třetí krok při vyhodnocování naměřených dat. V tomto kroku nám AVL CAMEO umožní definovat parametry optimalizace, provést optimalizaci a vyhodnotit výsledky optimalizace. Optimalizace můžeme provádět lokální, tedy pro najít optimální hodnoty proměnných pro každou datovou skupinu, nebo také pro celé jízdní cykly. K hledání optimálních nastavení používá CAMEO právě vytvořených modelů z předchozího kroku. CAMEO uživateli umožňuje optimalizovat více funkcí najednou,





například minimalizování spotřeby paliva, minimalizování emisních složek a zároveň hledat nastavení pro maximální výkon jednotky. Zároveň můžeme volit limitní hodnoty konkrétních kanálů, které nesmí být překročeny při hledání optimálních nastavení proměnných.

Výsledky optimalizace je opět možné prohlédnout v grafickém podání a následně v číselných hodnotách. Následně je samozřejmě možné tyto výsledky exportovat a dále s nimi pracovat.

### 7.3.1 Nastavení optimalizace

V záložce Definition na kartě Optimization můžeme provést nastavení celé optimalizace. Volíme zde cílové funkce pro optimalizace, zadáváme limitní hodnoty zvolených kanálů, volíme typ a algoritmus optimalizace, nebo také definujeme optimalizační body, pro které chceme výsledky. Optimalizace můžeme provádět lokální, nebo pro jízdní cykly. Lokální optimalizace se zabývá pouze specifikovanými optimalizačními body a jejich lokálními podmínkami, limitami. Optimalizaci pro jízdní cykly pak rozdělujeme na stacionární (stationary) a přechodovou (transient), u kterých pak přibudou limity rozložené v celém poli operačních bodů. U přechodové pak navíc limity vztažené na ujetý kilometr. Grafické rozhraní pro definování optimalizace vidíme na Obr. 50.

The screenshot displays the 'Optimization' settings window. At the top, the 'Type' is set to 'Local'. The 'Target Functions' section shows a table with one entry: 'IMEP720 - Net Indicated Mean Effec' with a divisor of 1 and a type of 'Maximize'. The 'Optimization Points' section shows 'Channel X' set to 'ok' and 'Channel Y' set to '<none>'. Below this is a table of optimization points:

Nr.	Data Group	Chan. X Val.	Chan. Y Val.	Design Space [%]	Knock Induction Time Integral
1	Manual Group 1	1000	<none>	100	1
2	Manual Group 1	1500	<none>	100	1
3	Manual Group 1	2000	<none>	100	1
4	Manual Group 1	2500	<none>	100	1
5	Manual Group 1	3000	<none>	100	1
6	Manual Group 1	3500	<none>	100	1

The 'Local Constraints' section shows 'Use Design Space as local constraint' checked. A table below lists constraints:

Channel	Type	Limit
Knock Induction Time Integral	Upper	1

On the right side, the 'Algorithm' is set to 'Automatic'. The 'Flexibility' section has 'Classical Optimization' selected. The 'Optimization settings' section has 'Starting Point' set to 'Best measurement'.

Obr. 50 – Grafické rozhraní pro definování optimalizačního procesu

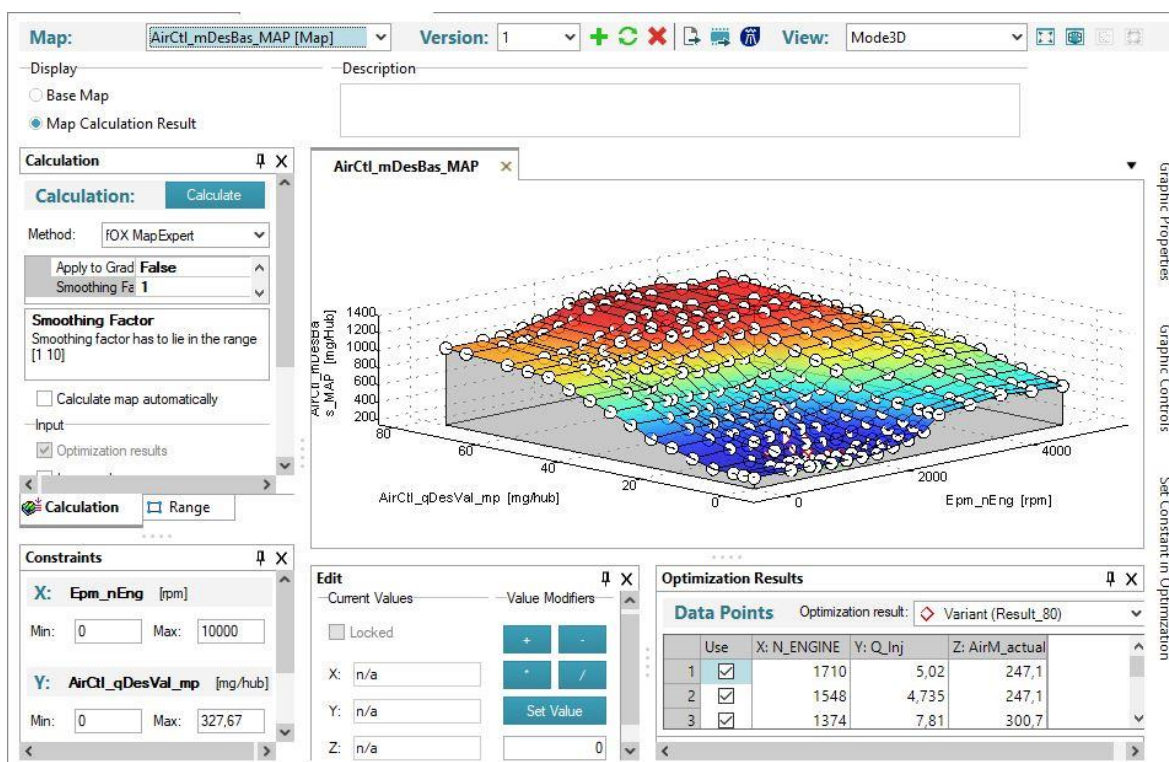
Po provedení optimalizace jsme automaticky přesunuti do záložky Graphics, kde můžeme výsledky optimalizace analyzovat a porovnat pomocí grafických nástrojů. Číselně pak



můžeme výsledky optimalizace vidět v záložce Table Of Results, odkud můžeme výsledky exportovat pro další zpracování.

## 7.4 Map Generator

Po provedení optimalizace můžeme využít nástroje na kartě Map Generator (viz Obr. 51), které slouží pro importování, exportování, kalkulaci a editaci map a křivek (dále jen mapy). V prvním kroku můžeme importovat stávající mapy, například z některého ze systémů, nebo textového souboru. Poté můžeme importovat výsledky optimalizace, na základě kterých budeme kalkulovat nové mapy. Dalším krokem je kalkulace a editace nových map, kde vybraným mapám přiřadíme optimalizované body a po provedení kalkulace se stávající mapy upraví, optimalizují. Nové mapy můžeme následně exportovat zpět do příslušných systémů, textových souborů, nebo do jiných mapových editorů (např. AVL CRETA).



Obr. 51 – Grafické rozhraní pro kalkulaci a editaci map

## 7.5 Engine Maps

Na kartě Engine Maps najdeme nástroje pro porovnání motorových map, které jsou kalkulovány na základě importovaných datasetů. Můžeme sledovat teoretické chování různých výstupních veličin motoru v závislosti na otáčkách motoru a jeho zatížení. Na základě těchto kalkulací můžeme také sledovat teoretické chování motoru při vykonání zvoleného jízdního cyklu.

Karta Compare Variants pak slouží k porovnání různých výsledků provedených optimalizací.



## 8 Měření dat pro optimalizaci

Na zkušebním motorovém stanovišti proběhlo měření prvních dat pro optimalizaci. Tato měření proběhla bez implementace automatizace, tedy o řízení testu se starala obsluha stanoviště. Měření probíhala pro konstantní otáčky motoru  $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ . Zatížení motoru bylo dáno hodnotou indikovaného středního efektivního tlaku *IMEP* a bylo měněno v rozsahu 2 až 13 *bar*. Hodnota *IMEP* byla regulována škrticí klapkou sacího potrubí. Měření probíhalo pro hodnotu součinitele přebytku vzduchu  $\lambda = 1$ , kterou zajišťovala regulace ECU motoru. Hodnota parametru *CA50* byla regulována pomocí úhlu předstihu zážehu. Pro jednotlivé operační body byly nastavovány různé kombinace časování vačkových hřídelí. Časování sací hřídele nastavováno v rozsahu  $-50^\circ$  až  $0^\circ$  a výfukové v rozsahu  $0^\circ$  až  $40^\circ$ .

Cílem optimalizace mělo být minimalizování měrné spotřeby paliva (respektive energie), v závislosti na nastavení časování vačkových hřídelů a úhlu předstihu zážehu. Důležité kanály pro vyhodnocení optimalizace jsou:

- *ISEC* [ $\text{MJ} \cdot \text{kWh}^{-1}$ ]; Měrná spotřeba paliva (energie) [ $\text{MJ} \cdot \text{kWh}^{-1}$ ]
- *AVLHS\_IMEP* [*bar*]; Střední efektivní tlak indikovaný [*bar*]
- *INCA\_a\_camctrl* [*degCR*]; Úhel natočení vačkové hřídele na sací straně [ $^\circ$ ]
- *INCA\_a\_camctrl\_out* [*degCR*]; Úhel natočení vačkové hřídele na výfuk. straně [ $^\circ$ ]
- *INCA\_ign\_act* [*degCR*]; Úhel předstihu zážehu palivové směsi [ $^\circ$ ]

Naměřená hrubá data vybraných kanálů viz Příloha 5.

Po vytvoření modelů bylo zřejmé, že naměřená data bohužel nejsou příliš vhodná pro vyhodnocení optimalizace. Pro vytvoření kvalitních modelů z vytvořených skupin nebyl zaznamenán dostatečný počet bodů jednotlivých datových skupin, nebo volba měřených kombinací nebyla vhodná.

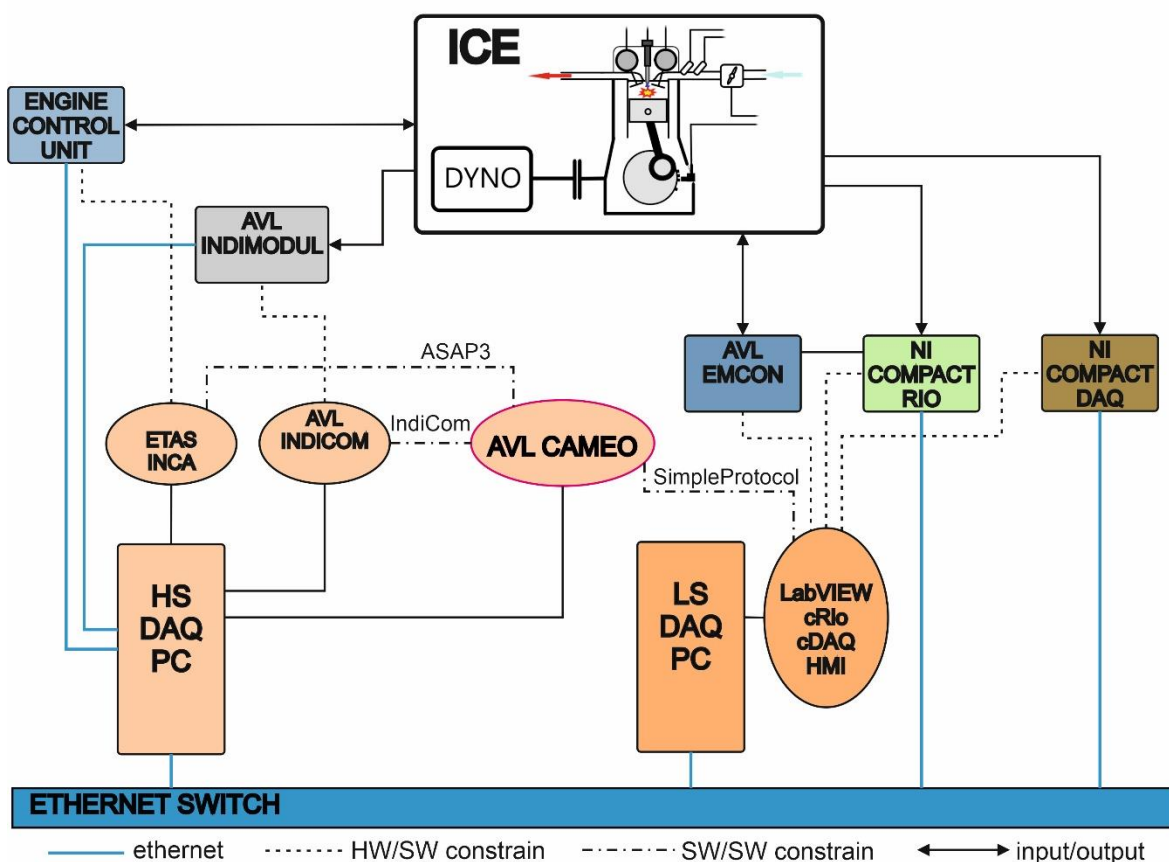
Pokračování v měření nebylo možné z důvodu aktuální nefunkčnosti pohonné jednotky.

Na základě poznatků z tohoto měření bylo rozhodnuto zaměřit se na implementaci automatizačního systému na měřicím stanovišti, pro zajištění efektivnější optimalizace parametrů pohonné jednotky.



## 9 Implementace automatizace pomocí AVL CAMEO

Po vyhodnocení situace na měřicím stanovišti bylo rozhodnuto nainstalovat software AVL CAMEO 4 na jeden ze stávajících počítačů v ovládacím pultu, a to HS DAQ PC. Počítač dedikovaný pouze pro CAMEO sice byl připraven, ale pro usnadnění prvotních pokusů o implementaci byla zvolena druhá varianta. Samotné nastavení komunikačních protokolů pro obě varianty by se však příliš neměnilo a pokud by se námi zvolená varianta jevila jako příliš riskantní, z hlediska možného přetížení počítače, využil by se pro implementaci samostatný počítač, tzv. CAMEO PC. Schéma námi zvolené implementace je na zřetelné na Obr. 52 a Obr. 53.



Obr. 52 – Nové schéma měřicího stanoviště

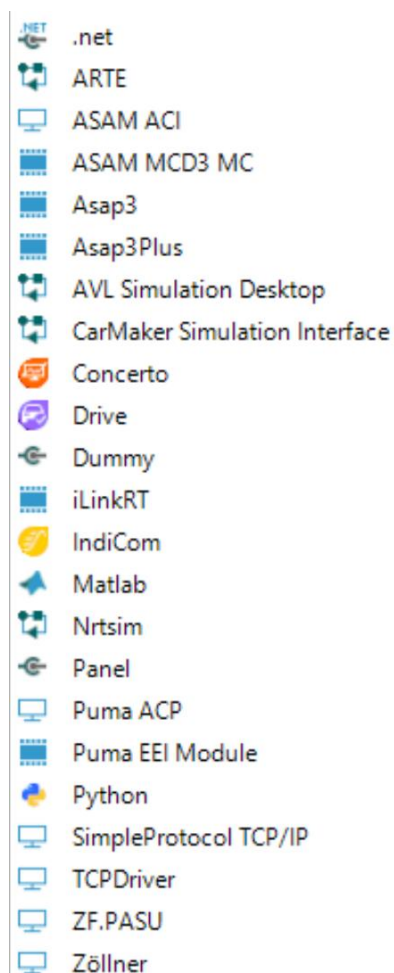
Hardware	Connection	Hardware	Software	connection	Hardware	Signal conditioning	Channels
SWITCH Catalyst 2900XL	ethernet	HS DAQ PC 192.168.1.100	AVL INDICOM	ethernet	AVL INDIMODUL 192.168.1.210	AVL Micro IFEM 1 - 3	Analog In PcyL, PMAN, PEXH, IGN, INJ
			ETAS INCA	ethernet - XCP:3	Bosch MS6.1 ECU (DHCP)	AVL Crank Angle Calculator	CAN
			AVL CAMEO			Sensors & Actuators	
			NI LabView			CAN Communications	CAN1, 2, 3

Obr. 53 – Nové schéma systému AVL CAMEO na měřicím stanovišti



## 9.1 Nastavení komunikace a systémů

Pro nastavení komunikací mezi AVL CAMEO a ostatními systémy slouží v AVL CAMEO záložka Systems na kartě Project Administration. Zde můžeme k našemu projektu přidávat jednotlivé systémy a nastavovat parametry komunikací s danými systémy. AVL CAMEO má v nabídce mnoho podporovaných systémů, jejich seznam najdeme na Obr. 54.

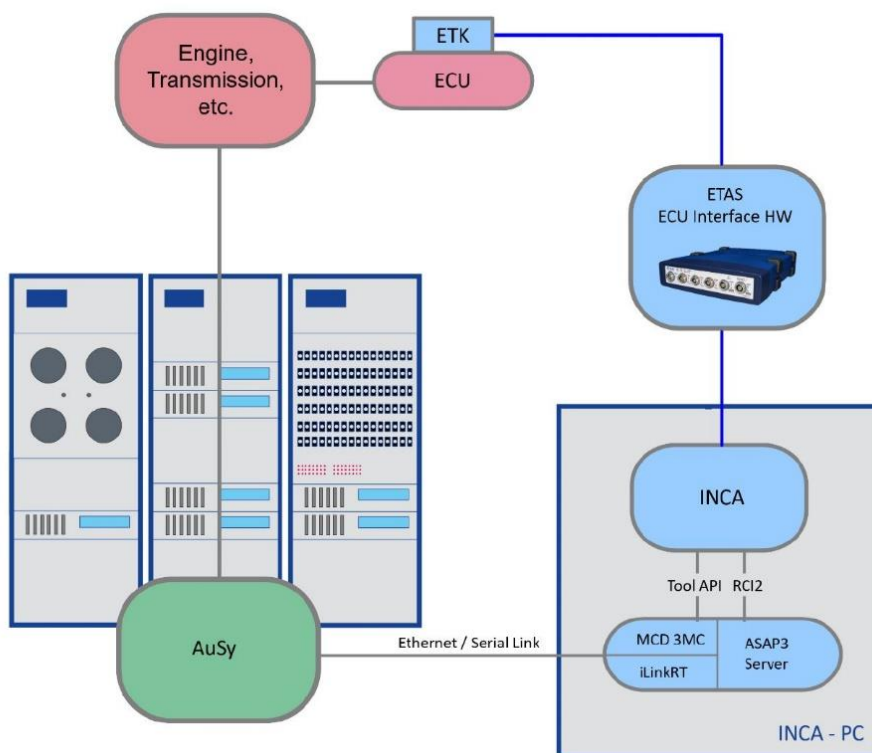


Obr. 54 – Seznam podporovaných systémů AVL CAMEO 4

Na zajištění všech potřebných kanálů pro automatizaci budeme potřebovat, aby AVL CAMEO komunikovalo se systémy ETAS INCA, AVL IndiCom a NI LabVIEW ovládacím programem, kde se nachází grafické rozhraní NI CompactRIO a CompactDAQ. ETAS INCA nabízí komunikaci přes Asap3 protokol, pro komunikaci s AVL IndiCom je od AVL předpřipravena komunikační protokol nazvaný IndiCom a pro komunikaci s ovládacím programem LabVIEW bude potřeba vytvořit vlastní komunikační protokol s využitím protokolu SimpleProtocol TCP/IP.



### 9.1.1 Komunikace s ETAS INCA



Obr. 55 – Schéma komunikace mezi AVL CAMEO a ETAS INCA [18]

Na Obr. 55 je obecně znázorněna komunikace mezi pohonnou jednotkou (Engine), softwarem ETAS INCA a automatizačním systémem (AuSy). V našem případě jsou však ETAS INCA a automatizační systém AVL CAMEO na stejném počítači.

Komunikaci s ETAS INCA je nutné nastavit proto, abychom měli přístup ke vzdálenému ovládní řídicí jednotky motoru (ECU) a ovládní motoru automatizovat. Software ETAS INCA, sloužící pro ovládní řídicí jednotky motoru, nabízí komunikaci pomocí TCP/IP s využitím tzv. Asap3 protokolu. Spočívá v tom, že v programu ETAS INCA se spustí podprogram ASAM ASAP3 Server (ASAP3.exe), který běží na počítači kde je ETAS INCA a pracuje jako server. Na tento server se pak bude připojovat AVL CAMEO, čímž se zajistí vzájemná komunikace těchto dvou systémů. Spuštění programu ASAP3.exe můžeme provést přímo v grafickém rozhraní ETAS INCA, v naší otevřeném INCA experimentu, a to v záložce Components – ASAM-3MC. Po spuštění ASAP3.exe se otevře okno s grafickým rozhraním, ve kterém můžeme provést nastavení komunikace, jako například typ komunikace, IP adresa, port atd. Po navázání komunikace toto rozhraní nabízí okno se záznamem komunikace, tzv. komunikační log. [17][18]

Nastavení parametrů komunikace pak budeme muset provést také v AVL CAMEO. Konkrétně na kartě Project Administration, v záložce v Systems v našem projektu



vytvoříme nový systém. Pro komunikaci s ETAS INCA to bude systém s názvem ASAP3. Po jeho vytvoření se automaticky vytvoří nastavení tohoto systému, kde v záložce Connection Properties můžeme provést nastavení komunikace. Můžeme zde zadat cesty k umístění různých souborů souvisejících s ASAP komunikací. Může se jednat například o Asap2 soubor, který obsahuje informace o datech použité řídicí jednotky, který je ve formátu A2I, nebo cestu k souboru k uložení logovacího záznamu atd. V této záložce tak zvolíme IP adresu zařízení, na kterém je spuštěn ASAP3 server, v našem případě zadáme „localhost“, protože oba softwary jsou spuštěny na stejném počítači. Grafické rozhraní pro nastavení komunikace v AVL CAMEO můžeme vidět na Obr. 56.

No.	Name	Type	Value	Unit	Description	Flags
1	MP_CAMPOSNOM_OUT	Map	Map	°CR	nominals map for position	readable, writeable
2	DIGN_APPL	Scalar	0	°CR	delta ignition angle for ap	readable, writeable
3	MP_CAMPOSNOM_IN	Map	Map	°CR	nominals map for position	readable, writeable
4	MP_IGN	Map	Map	°CR	ignition angle map	readable, writeable
5	ri	Scalar	10.1	%		readable
6	nmot	Scalar	0	rpm		readable
7	ath	Scalar	8.82	%		readable

Obr. 56 – Nastavení ASAP3 komunikace v AVL CAMEO

Poté co je ASAP3 komunikace nastavena na obou koncích, je možné se připojit. Nejprve spustíme ASAP3 server přes ETAS INCA. Jakmile je server aktivní, může se AVL CAMEO připojit. To provedeme stisknutím tlačítka Connect, které se nachází u námi nastaveného systému v záložce Systems na kartě Project Administration, viz Obr. 56. Poté co se AVL CAMEO připojí a naváže se spojení s ASAP3 serverem ETAS INCA, uvidíme v okně ASAM-3MC, že dochází k odesílání a přijímání jednotlivých příkazů. V této fázi můžeme využít tlačítka Import System v AVL CAMEO pro import námi požadovaných kanálů. Požadované kanály vybereme ze seznamu všech dostupných kanálů, který se zobrazí právě po stisknutí tlačítka. Tímto je komunikace nastavena a nyní můžeme tento systém přiřadit našemu testu



v záložce Projects. Poté co systém přiřadíme testu, AVL CAMEO s ním bude počítat a jeho dostupné kanály můžeme použít při přípravě samotného testu.

Potřebné kanály systému ETAS INCA:

- *MP\_IGN*; Mapa předstihu zážehu v závislosti na otáčkách a zatížení motoru [°]
- *DIGN\_APPL*; Posun (delta) předstihu zážehu [°]
- *MP\_CAMPOSNOM\_IN*; Úhel natočení sací vačkové hřídele [°]
- *MP\_CAMPOSNOM\_OUT*; Úhel natočení výfukové vačkové hřídele [°]
- *rl*; Relativní zatížení motoru [%]
- *nmot*; Otáčky motoru [ $\text{min}^{-1}$ ]
- *ath*; Poloha škrticí klapky [%]

### 9.1.2 Komunikace s AVL IndiCom

Další z důležitých komunikací je IndiCom, která slouží k propojení systémů AVL CAMEO a AVL IndiCom. Tento systém budeme pro automatizaci požadovat z toho důvodu, že pro automatizaci nebudeme používat RTC (Real-Time Control) systém, který AVL CAMEO nabízí pro vyhodnocení klepání motoru a regulaci pomocí integrovaných regulátorů, ale pokusíme se tuto problematiku řešit s využitím kanálů systému AVL IndiCom. Pro tento případ AVL vytvořilo protokol, který komunikuje přes TCP/IP. Jeho nastavení je tak poměrně jednoduché. Nejprve však budeme muset zajistit instalaci a spuštění serveru pro komunikaci. Tento server musí být spuštěn na zařízení, kde se nachází systém AVL IndiCom, což je v tomto případě stejný počítač, kde se nachází AVL CAMEO. Pro instalaci a spuštění serveru musíme kamkoliv na tento počítač zkopírovat soubor s názvem AVL.CAMEO.IndiComTCPServer.exe. Tento soubor se nachází v instalační složce AVL CAMEO (C:\Program Files\AVL\Cameo 4 R2\Bin). Zároveň odsud zkopírujeme také soubor s názvem Interop.INDICOMREMOTELib.dll. [17]

Nyní můžeme v AVL CAMEO vytvořit nový systém u našeho projektu, obdobně jako v předchozí kapitole. Opět nastavíme parametry komunikace, jako jsou IP adresa serveru a číslo portu atd., jak lze vidět na Obr. 57.

Poté co máme obě strany komunikace připraveny, můžeme spustit server otevřením souboru AVL.CAMEO.IndiComTCPServer.exe. Server je spuštěn a nyní se k němu může připojit AVL CAMEO stisknutím tlačítka Connect. Opět načteme potřebné kanály pomocí tlačítka Import System. Systém nyní můžeme připojit k námi vybranému testu v záložce Projects.





No.	Name	Type	Value	Unit	Description	Flags
1	AI50_1	Scalar	-30	degCA	Feedback channel: AI50_1	readable
2	IMEP1	Scalar	-0.44987	bar	Feedback channel: IMEP1	readable
3	KP_EFRQ1	Scalar	0	%	Feedback channel: KP_EFI	readable
4	KP_PK1	Scalar	0.022201	bar	Feedback channel: KP_PK	readable
5	PMAX1	Scalar	17.587	bar	Feedback channel: PMAX	readable
6	RMAX1	Scalar	0.424	bar/deg	Feedback channel: RMAX	readable
7	SPEED	Scalar	1045	rpm	Feedback channel: SPEED	readable

Obr. 57 – Nastavení IndiCom komunikace v AVL CAMEO

Potřebné kanály systému AVL IndiCom:

- *PMAX1*; Maximální tlak ve spalovacím prostoru [*bar*]
- *IMEP1*; Střední efektivní tlak indikovaný [*bar*]
- *AI50\_1*; Úhel klikové hřídele při spálení 50 % paliva [°]
- *KP\_PK1*; Maximální hodnota tlaku klepání [*bar*]
- *KP\_EFRQ*; Hodnota frekvence klepání [%]

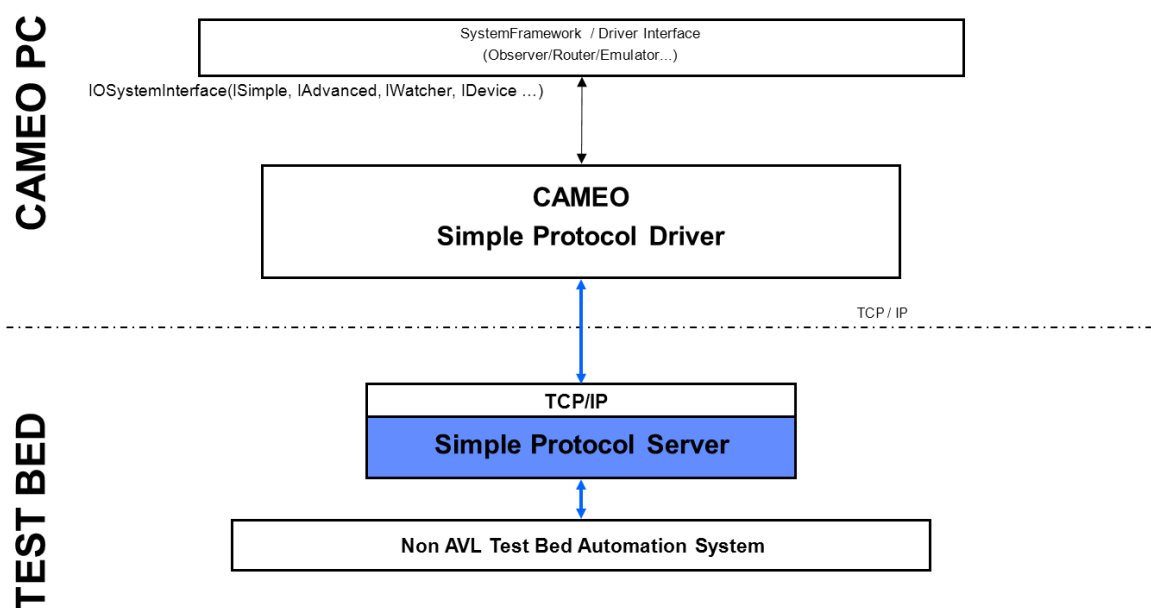
## 9.2 CAMEO SimpleProtocol TCP/IP

Hlavní problematikou bylo zajištění komunikace mezi automatizačním systémem AVL CAMEO a hlavním ovládacím systémem měřicího stanoviště. Jelikož se na pracovním stanovišti nevyužívá testovací systém od AVL (PUMA), je potřeba nastavit komunikaci mezi počítačem se systémem AVL CAMEO a vlastním testovacím systémem, který pracuje na pultovém počítači LS DAQ & Test Cell Automation PC. Tato komunikace by měla zajistit vzdálené ovládání systému AVL EMCON a tím zajistit, aby bylo možné pomocí AVL CAMEO přímo ovládat parametry systému AVL EMCON. Jedná se zejména o nastavení otáček dynamometru, polohy škrticí klapky a momentové zatížení pohonné jednotky. Pro umožnění komunikace bylo nutné vytvořit vlastní SimpleProtocol TCP/IP protokol. Tuto komunikaci může CAMEO využít k výměně informací s jakýmkoliv jiným systémem, který



podporuje TCP/IP. V našem případě bude pro komunikaci sloužit software LabVIEW od National Instruments, ve kterém již je vytvořeno rozhraní pro ovládání vlastního testovacího systému, tedy komunikace mezi počítačem LS DAQ & Test Cell Automation PC a tím pádem se samotným zařízením AVL EMCON.

V následujících kapitolách je naznačen postup vytvoření vlastního kompletního TCP/IP protokolu, který zajišťuje komunikaci mezi automatizačním systémem AVL CAMEO operujícím na pultovém počítači HS DAQ PC a vlastním testovacím systémem v softwaru NI LabVIEW, který operuje na pultovém počítači LS DAQ & Test Cell Automation PC. Schéma této komunikace je vidět na Obr. 58.



Obr. 58 – TCP/IP komunikace mezi AVL CAMEO a testovacím systémem

### 9.2.1 Návrh komunikace

Na Obr. 58 je naznačeno schéma komunikace mezi počítačem, na kterém je spuštěno AVL CAMEO a vlastním testovacím systémem. Ze schématu je zřejmé, že testovací systém bude představovat server, na který se AVL CAMEO připojí jako klient. AVL CAMEO se jako klient připojí na IP adresu serveru (typicky 192.168.0.x), na daném portu (defaultně 4380). Samotná komunikace by pak měla probíhat tak, že po navázání a potvrzení spojení začne AVL CAMEO posílat příkazy serveru, který je přečte a ihned na ně zareaguje odesláním odpovědi zpět klientovi. Všechny zprávy jsou ve formátu typu String a jsou zakončeny konstantami CR (Carriage Return) a LF (Line Feed). Další příkazy se odesílají na server v závislosti na požadavcích klienta, tedy například pokud uživatel AVL CAMEO stiskne tlačítko pro načtení dostupných kanálů, klient odešle příkaz ve tvaru GetChannelNames a server odpoví přesně definovanou odpovědí s informací o dostupných kanálech. Klient



samozřejmě neodesílá pouze přesně definované příkazy, ale jelikož musí řídit testovací systém, odesílá také informace o požadovaných změnách daných kanálů. Tedy například pokud AVL CAMEO požaduje změnu hodnoty některého kanálu, odešle příkaz s informací s názvem kanálu a jeho požadované hodnotě, případně jiné doplňující informace. Tyto proměnné hodnoty musí server rozpoznat a zareagovat na ně změnou v testovacím systému. Zároveň musí klientovi potvrdit, že tuto změnu provedl. Pokud klient od serveru nic nevyžaduje, udržuje se komunikace aktivní pomocí příkazů typu WatchDog, které klienta ujišťují, že server stále naslouchá a reaguje. Více o vybraných příkazech v následujících kapitolách.

### 9.2.2 Nastavení SimpleProtocol TCP/IP v AVL CAMEO

V AVL CAMEO se nejprve musí definovat nový systém SimpleProtocol TCP/IP, kde je nutné nastavit základní parametry připojení. Mezi tyto parametry patří IP adresa serveru a číslo portu, na který se bude AVL CAMEO připojovat. Náhled rozhraní a detaily nastavení systému SimpleProtocol TCP/IP jsou na Obr. 59. Jakmile bude spuštěn server, je možné kliknout na tlačítko Connect a AVL CAMEO se připojí k serveru a začne komunikovat.

Name: TCP/IP\_LSDAQ

Description: Ovládání otáček dynamometru, regulace klapky

Typ: SimpleProtocol TCP/IP

Status: Modified

Created by: Administrator, on 09 March 2021, 09:16

Modified by: Administrator, on 10 May 2021, 09:21

Last Import: -

Connection Properties | System Properties

Communication

Host	192.168.0.2
Port	4380
Cellmate	False

Timing

CommandTimeout	10
ResendTimeout	2

Cellmate  
Set to true if a Cellmate test bench is used

Connect | Import System ... | Import Selected Data

Channels | Devices | Control Modes | Recorders

Channels: + x Search

No.	Name	Type	Value	Unit	Description
-----	------	------	-------	------	-------------

Channel Properties:

Obr. 59 – Nastavení systému SimpleProtocol TCP/IP v AVL CAMEO

### 9.2.3 Příkazy a jejich tvary

AVL CAMEO může serveru posílat dohromady 17 různých příkazů. Všechny příkazy jsou bez mezer a bez čárek a jsou vždy ukončeny konstantami CR a LF. Na každý příkaz musí od serveru přijít odpověď v definovaném tvaru a odpovědi jsou opět ukončeny konstantami



RC a LF. Odpověď vždy začíná ve stejném tvaru jako příkaz, na který je odpověď směřována a po oddělení čárkou doplněna o informace, na které se klient příkazem dotazuje.

Příklady některých příkazů a jejich tvary jsou uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4 – Příkazy a jejich tvary

Příkaz:	Odpověď: „Příkaz“, <Odpověď>	Popisek:
GetChannelNames	#kanálů,NÁZEV,JEDNOTKY,TYP,... Typy jsou: S=setpoint (zapisovací) F=feedback (čtecí) V=calculation (čtecí)	CAMEO použije tento příkaz pro získání informací o dostupných kanálech
GetAllChannels	#kanálů,hodnota1,hodnota2,... hodnotaN	CAMEO žádá o aktuální hodnoty všech dostupných kanálů. Tento příkaz je použit pro monitorování limitních hodnot, průměrování hodnot atd.
RampSetpoint	čas,hodnota,NÁZEV_SETPOINTU	CAMEO použije tento příkaz pro nastavení časové rampy a hodnoty daného kanálu.
WatchDogHeartBeat	číslo-1	CAMEO tímto příkazem kontroluje aktivitu spojení. Každých 5 sekund odešle tento příkaz s náhodným číslem. Server musí ihned odpovědět s daným číslem -1, jinak CAMEO ukončí test.

Mezi další příkazy patří například také GetControlModes a SetControlMode. Pomocí příkazu GetControlMode CAMEO zjistí, jaké jsou k dispozici kontrolní módy. Každý kontrolní mód je definován dvěma kanály čtecími a dvěma kanály zapisovacími. Všechny tyto kanály musí vždy být obsaženy v seznamu dostupných kanálů, tedy v odpovědi na příkaz GetChannelNames. Příkazem SetControlMode je pak nastaven potřebný kontrolní mód.

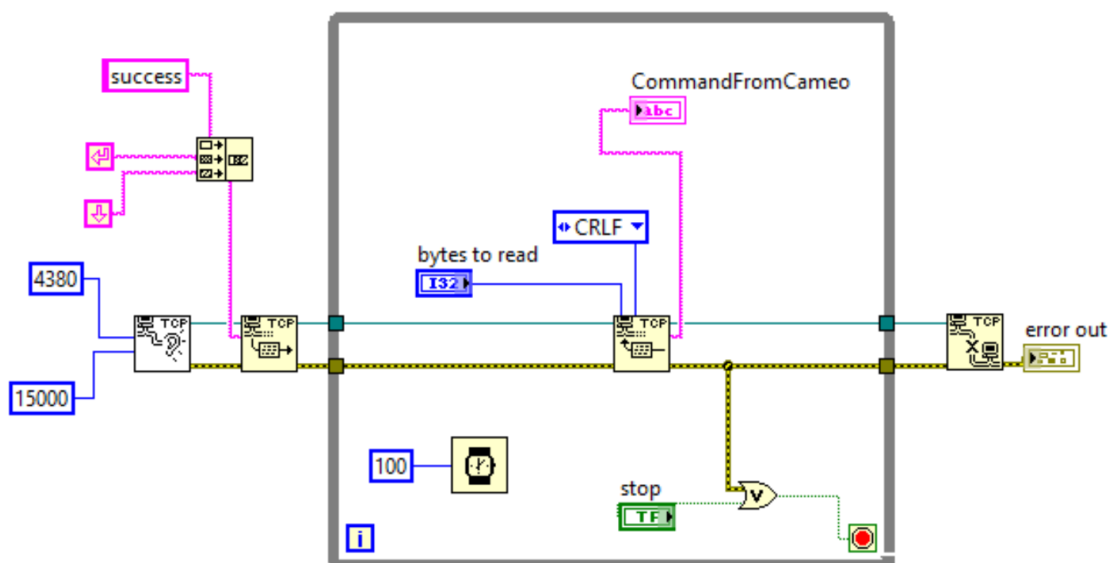
#### 9.2.4 První navázání spojení

Pro prvotní navázání komunikace mezi AVL CAMEO a testovacím systémem, byl v LabVIEW vytvořen jednoduchý TCP/IP protokol, který umožní serveru přečíst a zobrazit příkaz přicházející od AVL CAMEO. Pro potvrzení o úspěšném navázání spojení serveru a klienta, vyžaduje AVL CAMEO zprávu od serveru ve tvaru „success“, opět zakončenou konstantami CR a LF. Po obdržení této zprávy začne AVL CAMEO postupně odesílat příkazy, na které musí server odpovědět v definovaném tvaru.

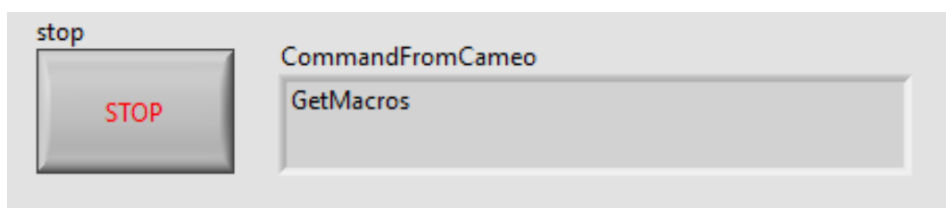
Pro první zkoušku navázání spojení mezi AVL CAMEO a LabVIEW byl vytvořen první blokový diagram (Obr. 60), který představuje server, na který se CAMEO připojí a pošle první příkazy. Ihned po připojení klienta k serveru tato jednoduchá aplikace nejprve odešle



zprávu „success“, která potvrdí klientovi úspěšné navázání spojení se serverem. Následně tato aplikace umožní přečtení příkazů, které přichází od klienta. Tyto příkazy jsou pak ihned zobrazeny v textovém poli v grafickém rozhraní aplikace, viz Obr. 61.



Obr. 60 – První blokový diagram v LabVIEW



Obr. 61 – Náhled první aplikace v LabVIEW

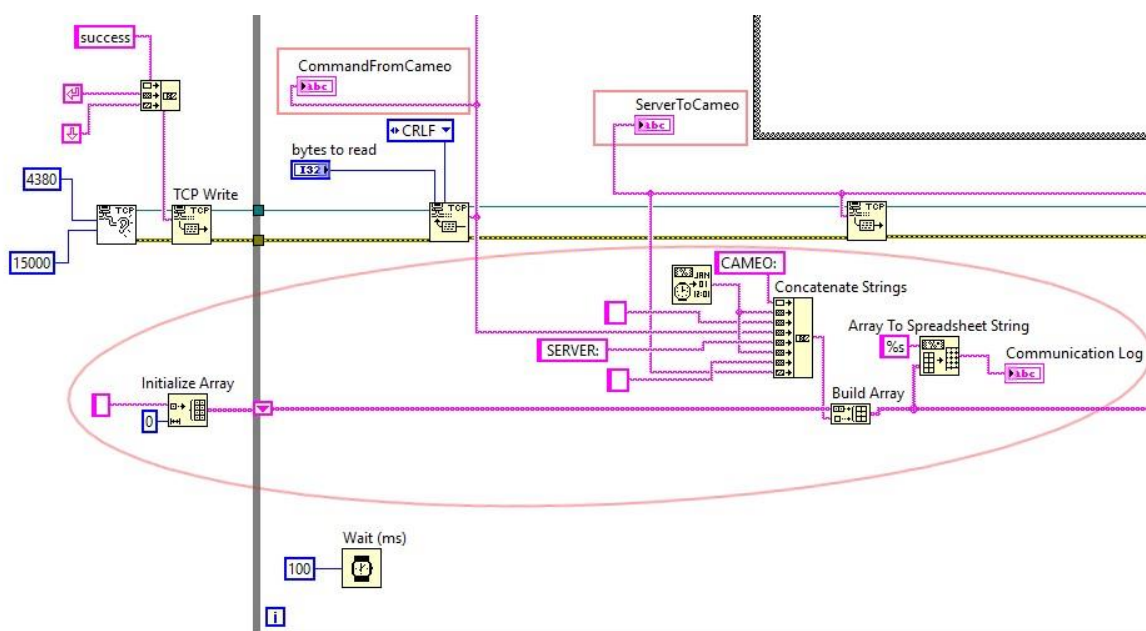
Samotný základ komunikace tvoří funkce z LabVIEW palety TCP/IP. Jedná se o funkce TCP Listen.vi, TCP Write, TCP Read a TCP Close Connection. Funkce TCP Read musí být přepnuta do módu „CRLF“. Hlavní část blokového schématu pro samotnou komunikaci se odehrává ve struktuře While Loop, která zajišťuje, že se v ní obsažené diagramy odehrávají stále dokola, dokud nedojde k jejímu ukončení vlivem chyby v komunikaci, příkazem klienta, nebo stisknutím tlačítka „STOP“. Tento základní blokový diagram vše umožňuje pouze čtení příkazů od klienta. Pro umožnění také odesílání ze serveru klientovi, bylo potřeba přidat funkci TCP Write do struktury While Loop.

K tomuto základu byly následně přidávány další funkce, které zajišťují správné reakce serveru na příkazy klienta a kontrolu nad komunikací. Některé vybrané funkce jsou popsány níže.



## 9.2.5 Komunikační záznam

Při vytváření aplikace pro komunikaci mezi serverem a klientem je vhodné mít přehled o příkazech, které v komunikaci právě probíhají. Snadno se tak zjistí, kde například došlo k chybě, či na který příkaz klienta server neodpověděl ve správném tvaru. Nejdříve bylo vytvořeno pouze textové pole, které zobrazovalo aktuální, respektive poslední příkaz od klienta. Ale protože komunikace mezi serverem a klientem probíhá periodicky, nemáme přehled o příkazech, které již byly provedeny, ani jak na ně server odpověděl. Proto bylo vhodné vytvořit textové pole, ve kterém se budou jednotlivé příkazy a odpovědi komunikace chronologicky ukládat i s datem a časem jejich odeslání. Tento záznam komunikace je možné následně uložit do textového dokumentu. Textové pole se začne přepisovat každým novým spuštěním serveru. Na Obr. 62 je vidět vytvořený diagram a funkce pro záznam komunikace, kde hlavní funkce jsou ohraničeny červeně.



Obr. 62 – Diagram pro záznam komunikace

Pro vytvoření souvislého záznamu komunikace mezi klientem a serverem bylo potřeba seskupit samotný text. Na to byla použita funkce `Concatenate String`, do které byly zavedeny vlákna příkazů a odpovědí (`CommandFromCameo` a `ServerToCameo`), spolu s popisy a údaji o datumu a času. Tyto jednotlivé řádky textu se následně skládají pod sebe pomocí funkce `Build Array` a funkce `Array To Spreadsheet String` je pak uloží jako jednotlivé řádky pod sebe ve formátu typu `String`. Ukázka záznamu komunikace je vidět na Obr. 63.



```
Communication Log
CAMEO: 12/1/2021 9:38:33 GetMacros
SERVER: 12/1/2021 9:38:33 GetMacros
CAMEO: 12/1/2021 9:38:33 DefineChannelNames 1 OTACKY
SERVER: 12/1/2021 9:38:33 DefineChannelNames ?
CAMEO: 12/1/2021 9:38:34 GetValue n
SERVER: 12/1/2021 9:38:34 GetValue,n,-0.578789
CAMEO: 12/1/2021 9:38:35 GetValue m
SERVER: 12/1/2021 9:38:35 GetValue,m,-0.142284
CAMEO: 12/1/2021 9:38:35 GetValue alfa
SERVER: 12/1/2021 9:38:35 GetValue,alfa,-0.025776
CAMEO: 12/1/2021 9:38:35 GetValue OTACKY
SERVER: 12/1/2021 9:38:35 GetValue,OTACKY,-0.601131
CAMEO: 12/1/2021 9:38:35 GetValue ALFA
SERVER: 12/1/2021 9:38:35 GetValue,ALFA,-0.147138
CAMEO: 12/1/2021 9:38:35 GetChannelNames
SERVER: 12/1/2021 9:38:35 GetChannelNames,6,OTACKY,RPM,S,
M,Nm,S,n,RPM,F,m,Nm,F,ALFA,%S,alfa,%F
CAMEO: 12/1/2021 9:38:35 GetAllChannels
SERVER: 12/1/2021 9:38:35 GetAllChannels,6,-0.601131,-0.019140,
-0.193720,-0.007924,-0.147138,-0.134069
CAMEO: 12/1/2021 9:38:35 GetValue ALFA
SERVER: 12/1/2021 9:38:35 GetValue,ALFA,-0.147138
CAMEO: 12/1/2021 9:38:35 GetValue M
SERVER: 12/1/2021 9:38:35 GetValue,M,-0.019140
CAMEO: 12/1/2021 9:38:36 GetAllChannels
SERVER: 12/1/2021 9:38:36 GetAllChannels,6,-0.601131,-0.019140,
0.084897,-0.014405,-0.147138,-0.132315
CAMEO: 12/1/2021 9:38:36 GetValue M
SERVER: 12/1/2021 9:38:36 GetValue,M,-0.019140
CAMEO: 12/1/2021 9:38:36 GetAllChannels
SERVER: 12/1/2021 9:38:36 GetAllChannels,6,-0.601131,-0.019140,
0.182150,-0.006086,-0.147138,-0.137841
CAMEO: 12/1/2021 9:38:36 GetAllChannels
SERVER: 12/1/2021 9:38:36 GetAllChannels,6,-0.601131,-0.019140,
0.504126,0.010676,0.147138,0.137006
```

Obr. 63 – Ukázka záznamu komunikace

### 9.2.6 Funkce WatchDog

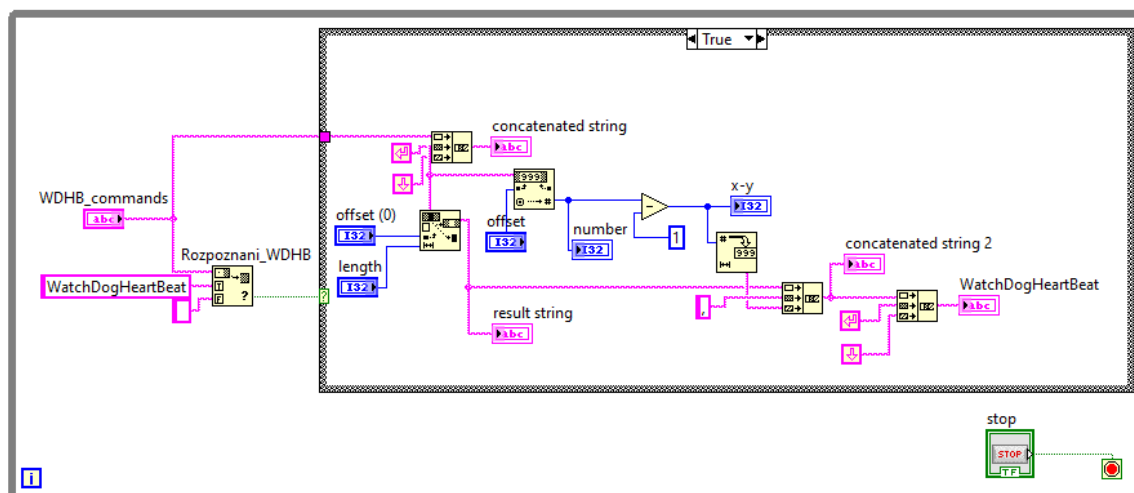
Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, jednou z nutných funkcí komunikace mezi AVL CAMEO a LabVIEW je tzv. funkce WatchDog. Tuto funkci používá CAMEO pro získání informace o tom, zda je komunikace se serverem aktivní, tedy že server aktivně komunikuje a reaguje na klientovi příkazy. Tento příkaz klient odesílá ve chvíli, kdy je připojen k serveru, ale v daný okamžik neodesílá žádný jiný příkaz, pouze čeká. Funkci WatchDog klient nejprve musí aktivovat příkazem WatchDogStart. Pro ukončení pak použije příkaz WatchDogStop. Pokud je funkce aktivní, může klient v průběhu komunikace odesílat příkazy WatchDogHeartBeat, spolu s celým číslem v argumentu, které je z intervalu  $\langle 11,99 \rangle$ . Odpověď serveru pak musí být ve tvaru WatchDogHeartBeat, ovšem s číslem o jedna menším než v přečteném příkazu.



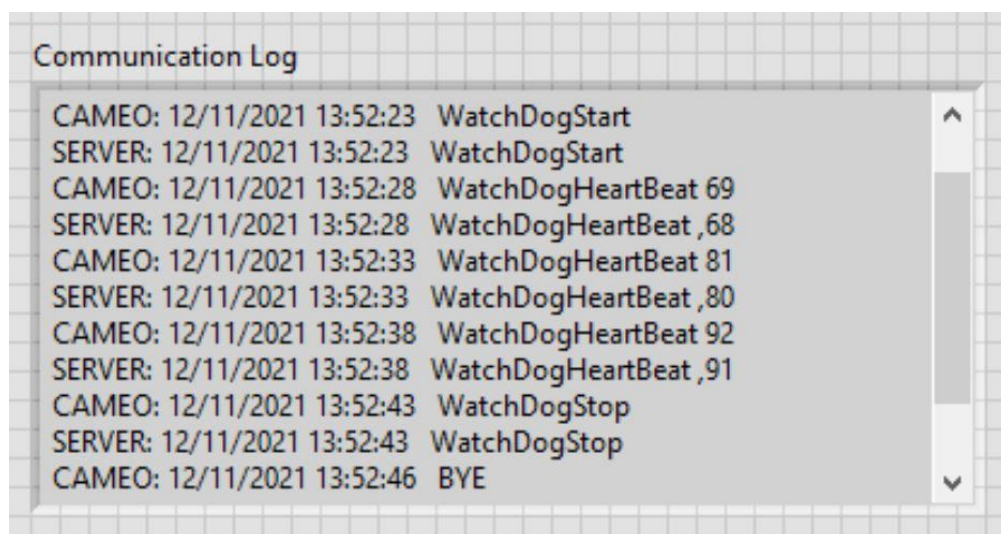
Tedy pokud přijde příkaz ve tvaru „WatchDogHeartBeat 53“, server musí odepsat ve tvaru „WatchDogHeartBeat,52“ (argumenty odpovědi odděleny čárkou).

Server tedy musí rozpoznat, že klient odesílá příkaz WatchDogHeartBeat, a v blokovém diagramu přepnout rozhodovací strukturu Case Structure, ve které se pak odehrává samotná reakce na příkaz WatchDogHeartBeat.

Než byla tato funkce implementována do samotného blokového schématu, byla nejprve vytvořena jako pokusná aplikace zvlášť. Aplikace WatchDogHeartBeat, je vidět na Obr. 64. Na Obr. 65 je vidět záznam průběhu komunikace mezi klientem („CAMEO“) a serverem („SERVER“).



Obr. 64 – Blokový diagram WatchDogHeartBeat



Obr. 65 – Ukázka záznamu komunikace funkce WatchDog

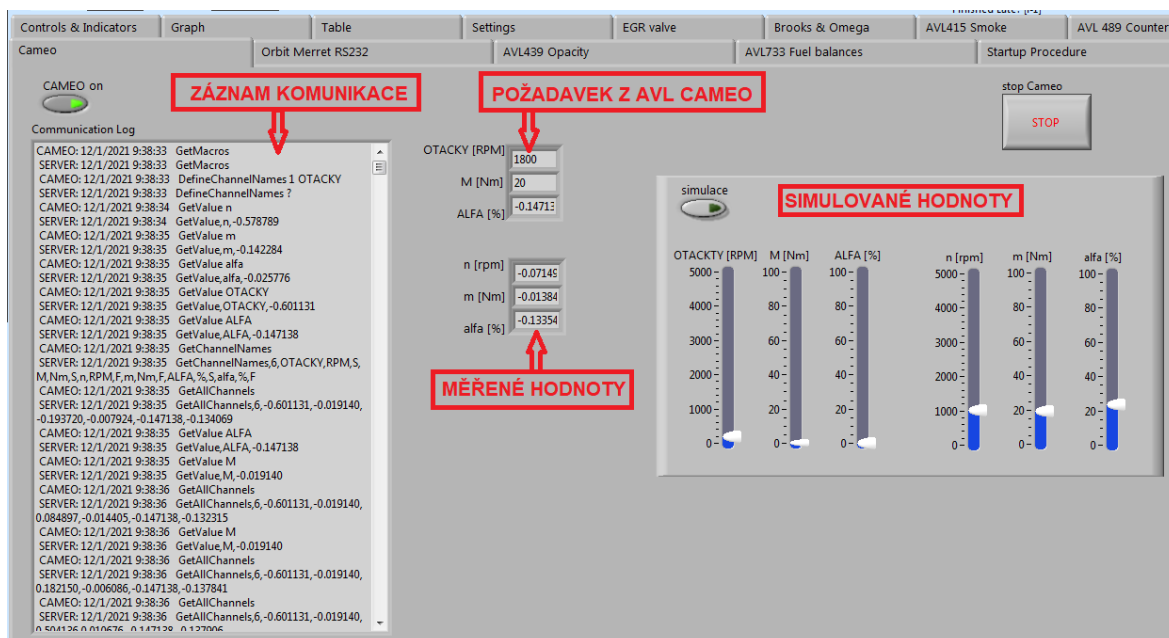




## 9.2.7 CAMEO SimpleProtocol TCP/IP Shrnutí

Předchozí kapitoly popisují pouze některé vybrané funkce, pro názornou ukázkou. Za použití programovacího nástroje NI LabVIEW byl vytvořen funkční komunikační protokol, který umožňuje komunikaci mezi automatizačním systémem AVL CAMEO a jiným systémem, a to za využití TCP/IP komunikace. Tento protokol byl následně implementován do stávajícího ovládacího programu na měřicím stanovišti a jeho ovládací prvky byly vloženy do stávajícího grafického rozhraní (viz Obr. 66). Pro snadné definování dostupných kanálů a kontrolních módů, byly vytvořeny editovatelné textové soubory, ze kterých AVL CAMEO získává potřebné informace systému. Vytvořený program obsahuje navíc ovládací prvky pro simulaci pohonné jednotky, díky kterým je možné nahradit výstupní signály některých kanálů a tím simulovat chod motoru. Těto simulace tak může být využito před skutečnou zkouškou automatizace. Ukázka rozsahu vytvořeného programu je vidět v Příloha 1.

Pro zajištění ideálního průběhu testu je potřeba vyřešit plynulé přechody mezi nastavovanými hodnotami operačních bodů. AVL CAMEO totiž příkazem RampSetpoint odesílá pouze informaci o požadované hodnotě daného kanálu a času, za který se má na tuto hodnotu dostat. Na základě těchto informací a informací o předchozí hodnotě daného kanálu, bude potřeba vytvořit v NI LabVIEW nástroj pro plynulou změnu hodnot kontrolních kanálů. Při velikých rychlých změnách kontrolních kanálů (například otáček), by mohly v soustavě vznikat nežádoucí rázy.



Obr. 66 – Grafické rozhraní pro AVL CAMEO v řídicím systému



## 10 Provedení automatizovaného testu

Poté co byl vytvořen TCP/IP komunikační protokol a byla vyzkoušena funkčnost komunikace, bylo možné provést první zkoušky automatizace. Na zkoušku byl připojen pouze systém SimpleProtocol TCP/IP, ostatní systémy nebyly pro tuto zkoušku potřeba, protože bylo v plánu vyzkoušet pouze nastavení operačních bodů. Pro zkoušku automatizace byl připraven zkušební test s jednou vrstvou, obsahující DoE List. V této vrstvě byly připraveny pouze tři operační body (viz Tab. 5). Kontrolní mód (Control Mode) byl zvolen n/alfa, tedy chceme nastavovat otáčky dynamometru/motoru a polohu škrticí klapky motoru. Kontrolní kanály tedy představují:

- *Act\_Speed\_rpm*; Otáčky dynamometru/motoru [ $min^{-1}$ ]
- *Act\_Thr*; Poloha škrticí klapky [%]

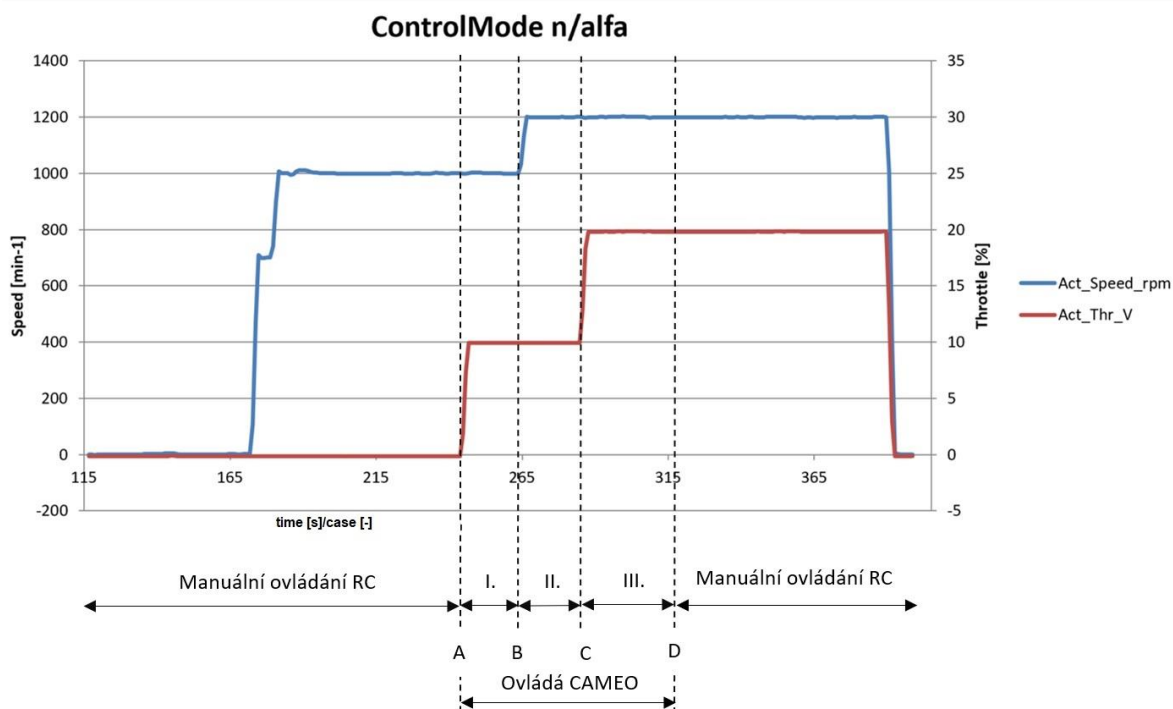
Tab. 5 – Operační body automatizační zkoušky

OP	<i>Act_Speed_rpm</i> [ $min^{-1}$ ]	<i>Act_thr</i> [%]
I.	1000	10
II.	1200	10
III.	1200	20

### 10.1 Průběh automatizovaného testu

Zkoušce samotného testu předcházela obvyklá procedura přípravy pohonné jednotky pro měření. Byly spuštěny veškeré potřebné systémy, chladicí a mazací média byla přehřátá na provozní teplotu. Jednotka byla připravena.

Motor byl roztočen a udržován dynamometrem na počátečních otáčkách  $1000 min^{-1}$  pomocí funkce Remote Control (RC), a to bez zapnutého zapalování a vstřikování paliva (běžel „naprázdno“). Následně bylo v řídicím programu přepnuto do automatického režimu a současně v AVL CAMEO spuštěn připravený test. Během testu bylo spuštěno zapisování měřených kanálů pro následné vyhodnocení. Průběh automaticky řízených kanálů je vidět na Obr. 67. Zkouška automatického testu proběhla úspěšně. Během testu byly nastaveny požadované hodnoty kontrolních kanálů dle nastavených operačních bodů.



Obr. 67 – Průběh automatického testu

- A. Přepnutí do automatického řízení – CAMEO přebírá kontrolu nad kanály pro ovládání otáček a škrticí klapky (plynového pedálu) a ihned přechází na první operační bod (I.).
- B. Přejchod na 2. operační bod (II.)
- C. Přepnutí na 3. operační bod (III.)
- D. Ukončení testu – CAMEO se odpojuje a ponechá posledních hodnoty řízených kanálů. Vypnutí dynamometru a zavření klapky provedeno manuálně.



## Závěr

V počáteční fázi práce proběhlo seznámení s motorovým zkušebním stanovištěm experimentální pohonné jednotky. Proběhlo prozkoumání a vyzkoušení aktuálních možností měření pro provedení optimalizace akčních členů motoru. Dále byly popsány vybrané řídicí a měřicí systémy, které souvisí s návrhem automatizace stanoviště. Jejich schématické uspořádání na zkušebním stanovišti bylo zdokumentováno.

Další část práce byla věnována seznámení se systémem AVL CAMEO 4, jehož použití bylo předpokladem pro uskutečnění automatizace optimalizace na zkušebním stanovišti. Byla prostudována dodaná dokumentace, popisující jednotlivé možnosti, funkce a pracovní postupy tohoto systému, a to od návrhu designu experimentu až po vyhodnocení naměřených dat. Vybrané funkce byly vyzkoušeny. Postup práce, důležité kroky a funkce byly popsány. Dále byly prozkoumány možnosti zakomponování tohoto systému do zkušebního stanoviště a možnosti provedení automatizovaného řízení a měření na zkušebním stanovišti. Byly provedeny návrhy zakomponování automatizačního systému na stávající stanoviště.

V poslední části proběhlo samotné zakomponování automatizačního systému AVL CAMEO 4 na zkušební motorové stanoviště. Byly nastaveny potřebné komunikace automatizačního systému s řídicími a měřicími systémy potřebnými k provedení automatizace. Byla nastavena komunikace s řídicí jednotkou a systémem ETAS INCA pomocí TCP/IP protokolu Asap3 a s měřicím zařízením AVL Indimodul a systémem IndiCom pomocí TCP/IP protokolu IndiCom.

Proběhlo seznámení s funkcemi a s programováním v prostředí softwaru NI LabVIEW, který byl následně využit pro hlavní cíl práce. Tímto cílem bylo vytvoření programového rozhraní pro oboustrannou komunikaci automatizačního systému AVL CAMEO 4 a řídicího systému zkušebního stanoviště. V softwaru NI LabVIEW tak byl vytvořen program obsahující vlastní TCP/IP protokol, umožňující implementaci automatizačního systému na měřicí stanoviště. Samotný program, ani jeho podrobný popis není součástí přílohy této práce, z důvodu ochrany vlastního know-how.

Funkce automatizačního systému byla následně ověřena provedením zkušebního automatizovaného testu, čímž bylo splněno zadání této práce.



## Návrh dalšího postupu

Celkově projekt automatizované optimalizace na tomto stanovišti zdaleka není kompletní. Vytvořené komunikační rozhraní bude potřeba dále rozšířit o několik prvků zajišťujících bezpečný průběh testu. Například se jedná o prvek zajišťující plynulý přechod mezi nastavovanými hodnotami operačních kanálů při automatizovaném testu. Také je potřeba vytvořit prvky (makra) pro automatické přepnutí z manuálního řízení při zapnutí testu v AVL CAMEO. Pro bezpečný chod měření bude nutné správně parametrizovat bezpečnostní prvky testu, které budou bezprostředně reagovat na kritické stavy motoru (například výskyt klepání, teplotní limity atd.). Dále je potřeba zajistit makra, které by zajišťovaly synchronizované zapisování měřených kanálů ze všech systémů ve chvíli, kdy AVL CAMEO pošle příkaz pro zapsání měření. Po splnění potřebných dílčích úkolů a bezpečné vyzkoušení jednotlivých funkcí bude teprve možné připravit samotnou testovací sekvenci a provést automatizované měření a optimalizaci.



## Seznam použité literatury

- [1] SVOBODA, Michal. Konstrukce hlavy zkušebního jednoválce [online]. Praha, 2016. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Fakulta strojní. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/73252>
- [2] SVOBODA, Michal. Úprava hlavy válců pro experimentální motor [online]. Praha, 2014. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Fakulta strojní. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/63379>
- [3] KOLEČKÁŘ, Pavel. Úprava pohonu rozvodu experimentálního jednoválce. Praha, 2014. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Fakulta strojní. Dokument ve formátu PDF.
- [4] KOLEČKÁŘ, Pavel. Návrh pohonu rozvodů pro experimentální jednoválcový motor. [online] Praha, 2016. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Fakulta strojní. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/66550>
- [5] HORČÍČKA, Filip. Úprava vyvážení experimentálního jednoválce. Praha, 2014. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Fakulta strojní. Dokument ve formátu PDF.
- [6] SOUČEK, Jakub. Klikový mechanismu experimentálního motoru [online]. Praha, 2016. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Fakulta strojní. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/68149>
- [7] WINTER, Vojtěch. Sací potrubí pro experimentální zážehový jednoválec [online]. Praha, 2019. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Fakulta strojní. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/84699>
- [8] AVL List GmbH. AVL COMBUSTION Measurement Systems INDIMODUL GIGABIT [online]. Dostupné z: [https://www.avl.com/documents/10138/885893/DataSheet\\_622.pdf](https://www.avl.com/documents/10138/885893/DataSheet_622.pdf)
- [9] National Instruments. USER MANUAL NI cRIO [online]. Dostupné z: <https://www.ni.com/documentation/en/compactrio-controller/latest/manual/manual-overview/>
- [10] National Instruments. USER MANUAL NI cDAQ [online]. Dostupné z: <https://www.ni.com/documentation/en/compactdaq-chassis/latest/manual/manual-overview/>
- [11] BOSCH Engineering GmbH. Engine Control Unit MS 6, version 1.1. 2019. Dokument ve formátu PDF. Dostupné z: [https://www.bosch-motorsport.com/content/downloads/Raceparts/Resources/pdf/Operation%20Manual\\_67410699\\_Engine\\_Control\\_Unit\\_MS\\_6.2.pdf](https://www.bosch-motorsport.com/content/downloads/Raceparts/Resources/pdf/Operation%20Manual_67410699_Engine_Control_Unit_MS_6.2.pdf)
- [12] ETAS GmbH. INCA V7.0 Getting Started. 2010. Dokument ve formátu PDF. Dostupné z: [https://www.etas.com/download-center-files/products\\_INCA\\_Software\\_Products/INCA\\_V7.3\\_Getting\\_Started\\_EN.pdf](https://www.etas.com/download-center-files/products_INCA_Software_Products/INCA_V7.3_Getting_Started_EN.pdf)
- [13] AVL List GmbH. AVL CAMEO 4™ - User's Guide Basics. 2018. Dokument ve formátu PDF.



- [14] KOEGELER, Hans-Michael. Design of Experiments. Online seminář. [18.3.2021]  
Dostupné na: <https://www.youtube.com/watch?v=z6O48ktsjI8>
- [15] AVL List GmbH. AVL CAMEO 4™ - User's Guide Advanced. 2018. Dokument ve formátu PDF.
- [16] AVL List GmbH. AVL CAMEO 4™ - Realtime Controllers. 2018. Dokument ve formátu PDF.
- [17] AVL List GmbH. AVL CAMEO 4™ - Installation and Commissioning. 2018. Dokument ve formátu PDF.
- [18] ETAS GmbH. ASAM ASAP3 Interface User's Guide. 2020. Dokument ve formátu PDF.  
Dostupné z: [https://www.etas.com/download-center-files/products\\_INCA\\_Software\\_Products/INCA\\_IF\\_ASAM-ASAP3\\_EN\\_09-2020.pdf](https://www.etas.com/download-center-files/products_INCA_Software_Products/INCA_IF_ASAM-ASAP3_EN_09-2020.pdf)



## Seznam obrázků

Obr. 1 – Model experimentální pohonné jednotky .....	13
Obr. 2 – Snímek pohonné jednotky na měřicím stanovišti (autor: Vojtěch Winter) .....	14
Obr. 3 – Zjednodušené schéma zařízení na měřicím stanovišti (bez automatizačního SW) .....	15
Obr. 4 – Schématické vyjádření pozice systému AVL EMCON na měřicím stanovišti .....	16
Obr. 5 – Schématické vyjádření pozice systému AVL Indimodul a AVL IndiCom na měřicím stanovišti .	17
Obr. 6 – s Grafické rozhraní a pracovní plocha softwaru AVL IndiCom .....	17
Obr. 7 – Schématické vyjádření pozice systému NI CompactRIO na měřicím stanovišti.....	19
Obr. 8 – Grafické rozhraní NI LabVIEW pro systém NI CompactRIO .....	19
Obr. 9 – Schématické vyjádření pozice systému NI CompactDAQ na měřicím stanovišti.....	20
Obr. 10 - Grafické rozhraní NI LabVIEW pro systém NI CompactDAQ.....	21
Obr. 11 – Řídící jednotka BOSCH Motorsport 6.1.....	22
Obr. 12 – Schématické vyjádření pozice řídicí jednotky Bosch MS6.1 na měřicím stanovišti .....	22
Obr. 13 – Ukázka grafického rozhraní ETAS INCA 7.0.....	24
Obr. 14 – Schéma měřicího stanoviště s automatizací na CAMEO PC.....	27
Obr. 15 – Schéma měřicího stanoviště s automatizací na HS PC.....	28
Obr. 16 – AVL CAMEO 4 postup práce.....	29
Obr. 17 – Porovnání konvenčního přístupu měření s DoE přístupem .....	31
Obr. 18 – Full Factorial Design .....	32
Obr. 19 – Central Composit Design .....	33
Obr. 20 – Box-Behnken Design .....	33
Obr. 21 – D-Optimal Design .....	34
Obr. 22 – Latin Hypercube Sampling Design .....	34
Obr. 23 – S-Optimal Design .....	35
Obr. 24 – Sobol Design .....	35
Obr. 25 – Lokální a globální Design of Experiment.....	37
Obr. 26 – Postup vytvoření CCD DoE .....	38
Obr. 27 – Nastavení proměnných při tvorbě globálního DoE, za použití Global 2 Step Design .....	39
Obr. 28 – Pole operačních bodů za použití Global 2 Step Design.....	39
Obr. 29 – 2D grafické znázornění vygenerovaných proměnných za použití Global 2 Step Design.....	40
Obr. 30 – 3D grafické znázornění hodnot proměnné CAM_POS za použití Global 2 Step Design.....	40
Obr. 31 – Grafické rozhraní na kartě Prepare Test .....	44
Obr. 32 – Časový průběh kontrolního kanálu operačního bodu testu .....	45
Obr. 33 – Grafické rozhraní na kartě Run Test .....	47
Obr. 34 – Strategie využívající metody DoE Screening [15].....	49
Obr. 35 – Porovnání konvenčního DoE (nalevo) a Active DoE (napravo) [15].....	50
Obr. 36 – Active DoE hranice měření [15] .....	51
Obr. 37 – Fáze strategie Flex Sweep [15] .....	52
Obr. 38 – Standartní řízení motoru pomocí ECU .....	54
Obr. 39 – Řízení motoru s využitím RTC .....	54
Obr. 40 – Schéma ComCon regulace předstihu zážehu [16] .....	56
Obr. 41 – Ukázka zásahu ComCon regulace v průběhu testu [16] .....	56
Obr. 42 – Schéma LamCon regulace bohatosti palivové směsi [16].....	57
Obr. 43 – Ukázka zásahu LamCon regulace v průběhu testu [16] .....	58
Obr. 44 – Grafické rozhraní na kartě Raw Data, záložka Data Editor .....	60
Obr. 45 – Okno funkce Detect Outliers pro detekování odlehlých bodů .....	61
Obr. 46 – Grafické rozhraní pro vytvoření modelů.....	62
Obr. 47 – Porovnání naměřených hodnot a predikovaných dle modelu.....	63
Obr. 48 – Ilustrace neuro-fuzzy modelu [13].....	63
Obr. 49 – Proložení RNN modelem [13] .....	64
Obr. 50 – Grafické rozhraní pro definování optimalizačního procesu.....	65
Obr. 51 – Grafické rozhraní pro kalkulaci a editaci map.....	66



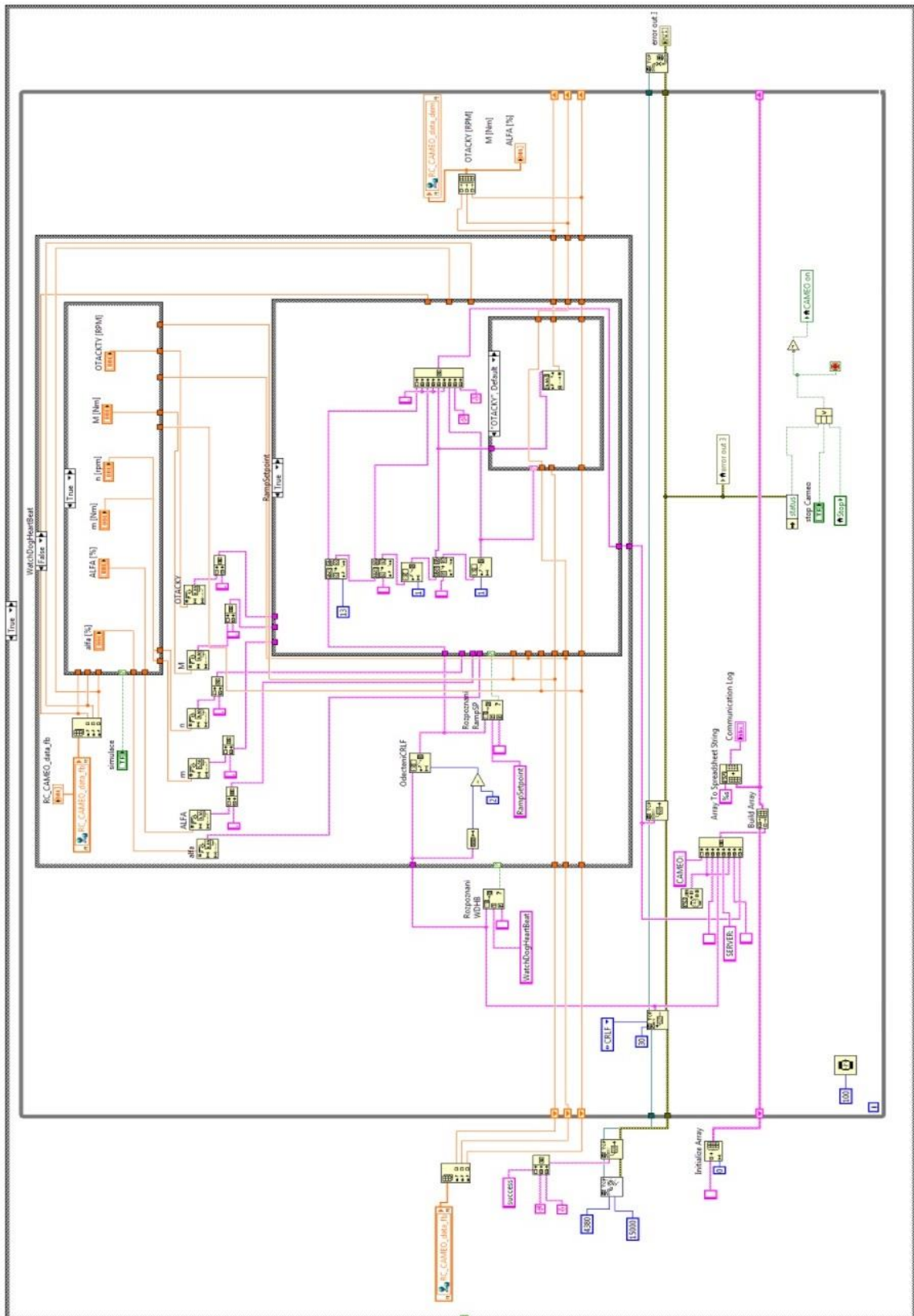


Obr. 52 – Nové schéma měřicího stanoviště .....	68
Obr. 53 – Nové schéma systému AVL CAMEO na měřicím stanovišti .....	68
Obr. 54 – Seznam podporovaných systémů AVL CAMEO 4 .....	69
Obr. 55 – Schéma komunikace mezi AVL CAMEO a ETAS INCA [18] .....	70
Obr. 56 – Nastavení ASAP3 komunikace v AVL CAMEO .....	71
Obr. 57 – Nastavení IndiCom komunikace v AVL CAMEO .....	73
Obr. 58 – TCP/IP komunikace mezi AVL CAMEO a testovacím systémem .....	74
Obr. 59 – Nastavení systému SimpleProtocol TCP/IP v AVL CAMEO .....	75
Obr. 60 – První blokový diagram v LabVIEW .....	77
Obr. 61 – Náhled první aplikace v LabVIEW .....	77
Obr. 62 – Diagram pro záznam komunikace .....	78
Obr. 63 – Ukázka záznamu komunikace .....	79
Obr. 64 – Blokový diagram WatchDogHeartBeat .....	80
Obr. 65 – Ukázka záznamu komunikace funkce WatchDog .....	80
Obr. 66 – Grafické rozhraní pro AVL CAMEO v řídicím systému .....	81
Obr. 67 – Průběh automatického testu .....	83

## Seznam příloh

- Příloha 1 – Část diagramu vytvořeného protokolu TCP/IP v NI LabVIEW
- Příloha 2 – Původní schéma systémů měřicího stanoviště
- Příloha 3 – Schéma systémů měřicího stanoviště s AVL CAMEO na HS DAQ PC
- Příloha 4 – Schéma systémů měřicího stanoviště s AVL CAMEO na CAMEO PC
- Příloha 5 – Hrubá data měřena bez automatizace

Příloha 1 – Část diagramu vytvořeného protokolu TCP/IP v NI LabVIEW









Příloha 4 – Schéma systémů měřicího stanoviště s AVL CAMEO na CAMEO PC

Hardware	Connection	Hardware	Software	connection	Hardware	Signal conditioning	Channels	Hardware	Hardware	Hardware	Hardware		
SWITCH Catalyst 2900XL	ethernet	HS DAQ PC 192.168.1.100	AVL INDI/COM	ethernet	AVL INDI/COM 192.168.1.210	AVL Micro IFEM 1 - 3	Analog in Pcy, PMAN, PEXH, IGN, INJ	Hardware	Hardware	Hardware	Hardware		
			ETAS INCA		Bosch MS6.1 ECU (DHCP)	AVL Crank Angle Calculator	CAN						
	ethernet	CAMEO PC 192.168.1.97	NI LabView	AVL CAMEO 4 R2	ethernet - XCP:3	1	CAN Communications	CAN1, 2, 3	Hardware	Hardware	Hardware	Hardware	
	ethernet	LS DAQ & Test Cell Automation PC 192.168.1.98	NI LabView NI_cRIO & NI_cDAQ HMI	ethernet	COM ports	1	8 AVL Smoke		Hardware	Hardware	Hardware	Hardware	
							3 Opacity						
	SWITCH Catalyst 2900XL	ethernet	LS DAQ & Test Cell Automation PC 192.168.1.98	ethernet	USB -> RS485	1	11 Fuel Balance		Hardware	Hardware	Hardware	Hardware	Hardware
							7 H-Sense						
							12 AVL 489 Particle Counter						
							14 Orbit Merret Vol Air Flow						
							Brooks (5x)						
							Orbit Merret						
NI9205 (AI)													
NI9401 (DI/DO)													
9862 (CAN1)													
X													
NI9214													
X													
X													
X													
X													
SWITCH Catalyst 2900XL	ethernet	ethernet	ethernet	Module	NI9205	AVL EMCON	AVL 515	AVL 577	Hardware	Hardware	Hardware	Hardware	
						32Ch 16bit_AI(+/-10V)	Tair, pair						Belimo
						8Ch 16bit_AI(0-20mA)	Act_spped, Act_trq, Act_THR						
						4Ch(24bitAI) RTD							
						4Ch(24bitAI) RTD							
						32 Ch 24V Dinput	Digital channels for Hybrid Interface	OK					OK
						32Ch TTL DI/DO	Digital channels for Hybrid Interface	Reset					Reset
						4Ch 16bit AO (0-20mA)	Hybrid Interface	Reset					Reset
						4Ch +/-10V AO (+/-10V)	RSV1, 2	Tairset, pairset					Tairset, pairset
ethernet	Comet_Cell 192.168.1.215												
ethernet	Comet_Comp 192.168.1.213												
ethernet	AVL_AMA_192.168.1.210												



Příloha 5 – Hrubá data měřena bez automatizace

