

УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“ ВО СКОПЈЕ



МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ – СКОПЈЕ



Никола Слободан Манев

МОДЕЛИРАЊЕ НА УПРАВУВАЊЕТО НА ДИЗЕЛ-МОТОР СО
ВНАТРЕШНО СОГОРУВАЊЕ ЗА НАМАЛУВАЊЕ НА ШТЕТНАТА
ИЗДУВНА ЕМИСИЈА

- докторска дисертација -

СКОПЈЕ, 2023

Ментор

Проф. д-р Даме Димитровски
Машински факултет - Скопје
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје

Членови на комисијата:

Проф. д-р Ристо Филкоски, претседател
Машински факултет - Скопје
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје

Проф. д-р Даме Димитровски, ментор
Машински факултет - Скопје
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје

Проф. д-р Зоран Марков
Машински факултет - Скопје
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје

Проф. д-р Елениор Николов
Воена академија „Генерал Михаило Апостолски“ - Скопје
Универзитет „Гоце Делчев“ во Штип

Вонр. проф. д-р Стелиос Ксантос
Катедра за индустриско инженерство и менаџмент
Меѓународен хеленски универзитет во Солун, Грција

Дата на одбрана:

17.11.2023

ТЕХНИЧКИ НАУКИ – МАШИНСТВО

м-р Никола Манев

МОДЕЛИРАЊЕ НА УПРАВУВАЊЕТО НА ДИЗЕЛ-МОТОР СО ВНАТРЕШНО СОГОРУВАЊЕ ЗА НАМАЛУВАЊЕ НА ШТЕТНАТА ИЗДУВНА ЕМИСИЈА

АПСТРАКТ:

Современите дизел-мотори содржат бројни потсистеми кои овозможуваат подобри перформанси на моторот, оптимална потрошувачка на гориво и исполнување на строги еколошки норми. Но со секој нов потсистем (како оној за високо-притисно впрскување на горивото, рецикулација на издувните гасови, ладење на свежото полнење и преполнување), бројот на влезни параметри во електронската управувачка единица на моторот се зголемува, со што се зголемуваат и димензиите на управувачката матрица. Од тука произлегува предизвикот за успешна калибрација и оптимизација на работата на моторот, кои се особено важни за унапредување на неговите перформанси ширум оперативниот опсег на брзини и оптоварувања. Токму затоа, калибрацијата како вештина е многу ценета во автомобилската индустрија, но методите за изучување на овој процес се толку финансиски исцрпни што може да си ги дозволат само најдобро опремените научни институции. Имајќи го предвид финансискиот фактор, со оваа докторска теза се предлага алтернативен пристап кон изучувањето на процесот на калибрација со помош на виртуелна алатка за тестирање и калибрација на мотор СВС изработена во софтверот MATLAB Simulink. Виртуелната алатка го фасилитира едукативниот процес создавајќи сеопфатна слика за проблемот на управување со потсистеми на моторот со потребното ниво на сложеност. Алатката во себе обединува термодинамички модел на средна вредност и модел на машинско учење за да го претстави процесот на согорување, механизмите на измена на работниот флуид и создавањето на издувната емисија кај современите дизел-мотори СВС. Овој напреден пристап кон моделирањето дозволува корисникот да изврши подесување на влезните параметри и во реално време да го проследи влијанието на овие промени врз количествата на издувната емисија за различни режими на работа на моторот. Научниот придонес на докторатот е во разбирање на процесите на поврзаност на управувањето на моторот со помош на различните фази логички мапи со излезните оперативни карактеристики на моторот и излезната емисија. Во исто време, истражувањето спроведено во врска со овој труд доведува до утврдување на точноста на техниките за симулација што се користат при дизајнирањето на новите дизел-мотори, за да се обезбедат алатки со поголема точност и прецизност што ќе може да се користат за дизајнирање поефикасни дизел-мотори во производствените циклуси во 2027 и 2030 година.

КЛУЧНИ ЗБОРОВИ:

виртуелна лабораториска тест-келија, еколошко-инженерски компромис, невронски мрежи, напредно моделирање, оптимизација

Nikola Manev, MSc. in Mech. Eng.

MODELING DIESEL INTERNAL COMBUSTION ENGINE CONTROL TOWARDS REDUCING ITS HARMFUL EXHAUST EMISSIONS

ABSTRACT: Today's diesel engines contain numerous subsystems that enable better performance, optimal fuel economy and compliance with strict emissions targets. But with each new subsystem (high-pressure fuel injection, exhaust gas recirculation, charge cooling and turbocharging), the number of input variables in the engine control unit increases. This increases the dimensions of the control matrix and poses a challenge for rapid calibration and optimization of the engine, which are vital in adjusting the engine's performance across its operational range of speeds and loads. That makes engine calibration a very sought-after skill in the automotive industry, but finding the means to teach it has been a challenge outside of better funded research institutions. This thesis proposes an essentially cost-free alternative through the development of a virtual engine test-cell built in MATLAB's Simulink, that facilitates the teaching process and improves understanding of the dynamics of engine operation through the creation of a comprehensive picture of the challenge of control of the engine's subsystems with the required level of complexity. The virtual engine test-cell makes use of a combined, novel modeling approach that integrates a mean-value engine model (MVEM) with Artificial Neural Networks to model the combustion and emission creation mechanisms that take place in a modern diesel engine. The model and the test-cell respond to inputs from the user and subsequently predict the quantity of different pollutants in the exhaust emission for different engine operating conditions with the results being available in real time. The scientific value of this PhD thesis is in understanding the inter-dependence of engine control with the output engine operating characteristics and output exhaust emissions. At the same time the research conducted in relation to this thesis will lead to determining the accuracy of the simulation techniques used in the design of new diesel engines, to provide more accurate and better suited tools that can be used to design more efficient diesel engines in the 2027 and 2030 production cycles.

KEYWORDS: virtual engine test-cell, environmental-engineering compromise, Neural Networks, advanced modeling, optimization

*Посветено на моите родители Вена и Слободан Манев,
чија скромност, трпеливост, упорност и поддршка ме научија
да чекорам цврсто на земја, но да посегнувам по небесите.*

Благодарност

Во оваа прилика би сакал да изразам искрена благодарност до сите кои придонесоа кон успешно комплетирање на докторската дисертација, како и за мојот досегашен академски развој.

Најпрво, огромно благодарам на мојот ментор - проф. д-р Даме Димитровски, од кого несомнено ја добив најголемата поддршка, а чија доверба и неколебливост упорно ме предизвикуваа да бидам најдобрата верзија од себеси притоа поместувајќи ги границите на она што можам да го постигнам со тезата. Благодарам и за времето посветено во размена на идеи и насоки, како и сите дискусии во кои несебично го споделуваше своето знаење и искуство.

Не би изоставил да се заблагодарам и на проф. д-р Ристо Филкоски и проф. д-р Зоран Марков, како и надворешниот член на комисијата проф. д-р Стелиос Ксантос од Меѓународниот хеленски универзитет во Солун, Грција кои во повеќе наврати, а почнувајќи од оформување на идејата за тезата, секој во својот домен ме насочуваа во текот на истражувачкиот процес, придонесувајќи со стручна помош и бројни совети за подобрување на тезата.

Особена благодарност и до проф. д-р Елениор Николов од Воената академија „Генерал Михаило Апостолски“ во Скопје, кој најрано се заложи за мојот академски развој, доверувајќи ми ја одговорната задача на асистент токму по неговите предмети.

Благодарност и до проф. д-р Ричард Бурке и Метју Тарнер од Институтот за напредни погонски технологии кај возилата, при Универзитетот во Бат, Обединето Кралство, кои во целост ми ги ставија на располагање техничките капацитети на институтот и со извршените заеднички експериментални мерења значително придонесоа кон зацврстување на научниот кредибилитет на тезата.

Најпосле, им благодарам и на сите колеги асистенти и лаборантите од лабораториите за Мотори со внатрешно согорување и Хидраулично инженерство при Машинскиот факултет во Скопје, кои придонесоа со споделување на знаење, стручна помош и морална поддршка.

Неизмерна благодарност на моето семејство за разбирањето и поддршката во текот на докторските студии и изработката на оваа дисертација. Ви благодарам што верувавте во мене, дури и кога самиот се сомневав.

Содржина

Благодарност	6
Листа на слики	10
Листа на табели	13
Листа на акроними	14
Листа на симболи	16
1 Вовед	18
1.1 Мотивација и предмет на истражувањето	19
1.1.1 Тестирање и калибрација на мотор СВС	20
1.1.2 Напреден модел на современ дизел-мотор	23
1.2 Цели	25
1.3 Работни хипотези	25
1.4 Очекуван научен придонес од истражувањето	26
1.5 Преглед на поглавјата	26
1.6 Референци	28
2 Современи дизел-мотори – теоретски основи, издувна емисија, напредни системи и развојни тенденции	31
2.1 Теоретски основи	31
2.1.1 Работен циклус	32
2.1.2 Процес на согорување	35
2.2 Издувна емисија и еколошки регулативи	37
2.2.1 Загадувачки материи од дизел-моторите СВС	37
2.2.2 ЕУРО стандарди за количеството на загадувачки материи во издувната емисија на возилата	40
2.2.3 Третман на издувната емисија	43
2.3 Карактеристични системи	45
2.3.1 „Common rail“ систем за довод на гориво и создавање на смеса	45
2.3.2 Турбополнач со варијабилна геометрија и ладилник на полнењето	47
2.3.3 Систем за рецикулација на издувните гасови со ладилник	48
2.3.4 Електронски систем за управување со работата на моторот	50
2.4 Развојни тенденции на возилата и нивните погонски агрегати	51
2.4.1 Присуство на дизел-моторите на пазарот со возила	51
2.4.2 Алтернативни горива и погонски технологии	53
2.5 Референци	54
3 Литературен преглед на претходни релевантни научни истражувања	59
3.1 Модели на мотор СВС – Предности и недостатоци	59
3.2 Регресионо моделирање	64

3.2.1	Алатка за калибрација со помош на модел на MATLAB	65
3.2.2	Модел на Лотка-Волтера	66
3.2.3	Модел на машинско учење (Регресија со повеќеслоен перцептрон)	67
3.3	Моделирање на издувната емисија на цврсти честички	68
3.4	Изучување на процесот на калибрација на моторите	73
3.4.1	Едукативни помагала и алатки	74
3.5	Референци	76
4	Експериментални мерења и регресиони модели	82
4.1	Експериментални мерења	82
4.2	Креирање на експеримент и калибрација со регресионен модел	84
4.3	Регресиони модели	88
4.3.1	Модел на машинско учење (Регресија со повеќеслоен перцептрон)	88
4.3.2	Модел на Лотка-Волтера за гасната издувна емисија	93
4.3.3	В-сплајн модел за издувната емисија на цврсти честички	94
4.4	Референци	95
5	Напреден модел на современ дизел-мотор во MATLAB Simulink	97
5.1	Модел на просторот за согорување – цилиндарски блок	98
5.2	Турбополнач	100
5.3	Гранка за полнење со ладилник на свежото полнење и гранка за празнење	102
5.4	Управување со соодносот гориво-воздух	103
5.5	Модел на Лотка-Волтера за гасната издувна емисија	105
5.6	В-сплајн модел за емисијата на цврсти честички	106
5.7	Влијанието на раното впрскување на гориво врз издувната емисија	107
5.8	Моделирање на влијанието на EGR системот врз количеството на издувна емисија	109
5.9	Комплетирање на моделот	109
5.9.1	Перформанси на моделот	110
5.9.2	Потенцијални недостатоци	110
5.10	Референци	112
6	Софтверска алатка за тестирање и калибрација на мотор CBC	114
6.1	Кориснички интерфејс	114
6.2	Побарувања од корисничкиот интерфејс	115
6.3	Работен прозорец	116
6.3.1	START UP мени	116
6.3.2	Прозорец за внес на влезни параметри (INPUTS)	118
6.3.3	Прозорец за отчитување на излезните параметри (OUTPUTS)	120
6.3.4	Прозорец за графички приказ на излезната оперативна карактеристика на моторот и издувната емисија (OSCILLOSCOPE)	120
6.4	Зачувување и пренос на податочното множество од тестирањето	121

7 Валидација, примена и евалуација на предложената софтверска алатка за тестирање и калибрација на дизел-мотор СВС.....	122
7.1 Валидација на моделот	122
7.2 Калибрација за оптимизирање на работата на моторот	127
7.2.1 Намалена потрошувачка на гориво и емисија на CO ₂	127
7.2.2 Намалена емисија на NO _x	129
7.3 Референци	131
8 Заклучок и понатамошна работа	132
8.1 Заклучок.....	132
8.2 Понатамошна работа	134
8.3 Референци	136
Прилози.....	138
Прилог А – Спецификација за моторот Ford Duratorq 2.4 TDCi	138
Прилог Б – Скрипта за тренирање на невронската мрежа	139
Прилог В – Спецификација за моторот VW 2.0 TDI CR (EA288).....	140
Прилог Г – Управувачки површини добиени во MATLAB за валидираните вредности на моделот	141

Листа на слики

Слика 1-1	Лабораториска тест-ќелија за испитување и калибрација на мотори СВС	21
Слика 1-2	Сензори конектирани кон мотор СВС подготвен за испитување	21
Слика 1-3	Вжарена цевка од гранката за празнење при работа на мотор СВС	22
Слика 1-4	Основен работен прозорец – софтвер за управување со лабораториската тест-ќелија CADET (Sierra CP)	22
Слика 1-5	Помошен прозорец - софтвер за управување со лабораториската тест-ќелија CADET (Sierra-cp)	23
Слика 1-6	Визуелен приказ на длабокото учење со користење на невронски мрежи како дел од вештачката интелигенција и машинското учење.....	24
Слика 2-1	Тактовите кај четиритактен дизел-мотор	32
Слика 2-2	p-V дијаграм за термодинамичкиот Дизелов циклус	33
Слика 2-3	p-V дијаграм за термодинамичкиот циклус на Сабате.....	33
Слика 2-4	Фази на согорувањето кај дизел-мотор.....	36
Слика 2-5	ЕУРО стандарди на емисија за дизел патнички автомобили.....	41
Слика 2-6	ЕУРО стандарди на емисија за тешки товарни возила.....	42
Слика 2-7	Двостепен каталитички конвертор.....	44
Слика 2-8	„Common rail“ изведба на систем за довод на гориво кај дизел-мотор	46
Слика 2-9	VGT турбополнач	48
Слика 2-10	Поврзаноста на EGR системот со моторот.....	49
Слика 2-11	Удел на различните погонски варијанти на пазарот за лесни патнички возила за 2020/21 година.....	52
Слика 2-12	Удел на различните погонски варијанти на пазарот за тешки комерцијални возила за 2020/21 година	52
Слика 3-1	Компромис сложеност/времетраење на компјутерската симулација за различните модели на мотор СВС.....	60
Слика 3-2	Концептот зад принципот на Полнење и Празнење	61
Слика 3-3	Принцип на функционирање на невронските мрежи	67
Слика 3-4	Хемискиот механизам на создавање РМ честички при согорување во моторот	69
Слика 3-5	Компромисот помеѓу создавањето на NOx и РМ честички.....	70
Слика 3-6	Резултати добиени со модел на емисиите на РМ честички за нестационарна и стационарна состојба на работа на моторот.....	71
Слика 3-7	Влијанието на раното впрскување на гориво врз степенот на ослободување на топлината	72
Слика 3-8	Хардверските компоненти на НИЛ алатката за изучување на процесот на калибрација на моторите на Универзитет во Брадфорд	75
Слика 3-9	Корисничкиот интерфејс на НИЛ алатката за изучување на процесот на калибрација на моторите на Универзитет во Брадфорд.....	76
Слика 4-1	Лабораториската тест-ќелија за испитување на моторот Ford Duratorq 2.4 (графички приказ).....	82
Слика 4-2	Лабораториската тест-ќелија за испитување на моторот Ford Duratorq 2.4 (реален приказ).....	83
Слика 4-3	Команден пулт за лабораториската тест-ќелија (реален приказ)	84
Слика 4-4	Чекорите од процесот на калибрација со помош на регресионен модел.....	84

Слика 4-5 Класичен пристап на избор на мерни, податочни точки од управувачките површини	85
Слика 4-6 Напреден пристап на избор на мерни, податочни точки од управувачките површини	86
Слика 4-7 Избор на 400 мерни, податочни точки со Халтоновиот распоред	87
Слика 4-8 Споредба за нормализираните вредности на просечната апсолутна грешка за различните методи на регресија предложени од МВС алатката	89
Слика 4-9 Резултати од испитувањето на прецизноста на различните алгоритми на машинско учење за тренирање на невронската мрежа	91
Слика 4-10 Споредба на нормализираните вредностите за просечната апсолутна грешка и времетраењето на различните методи на регресија	92
Слика 4-11 Вредности на коефициентот на корелација r за различните регресиони методи при различна големина на податочните множества	93
Слика 5-1 Дијаграм за предложениот напреден модел на современ дизел-мотор	97
Слика 5-2 Приказ на главните компоненти од моделот на современ дизел-мотор	98
Слика 5-3 Моделот на современ дизел-мотор (без турбополнач)	99
Слика 5-4 Моделот на просторот за согорување каде е вметнат моделот на машинско учење	99
Слика 5-5 Модел на турбополначот изработен во MATLAB Simulink	100
Слика 5-6 Улогата на граничникот на бројот на вртежи на турбополначот	101
Слика 5-7 Модел на гранката за полнење со ладилник на свежото полнење во MATLAB Simulink	103
Слика 5-8 Модел на гранката за празнење во MATLAB Simulink	103
Слика 5-9 Мапа за впрскувањето на гориво во моторот Ford Duratorq со зафатнина од 2.0l	104
Слика 5-10 Изглед на Simulink блокот за пресметка на односот гориво-воздух	104
Слика 5-11 Логичкиот тек на настаните во моделите на Лотка-Волтера за пресметка на количеството на CO, CO ₂ , NOx и THC во издувната емисија	105
Слика 5-12 Приказ на моделот на Лотка-Волтера за емисија на NOx изработен во Simulink ..	106
Слика 5-13 Приказ на В-сплајн моделот за емисија на PM честички изработен во Simulink ..	107
Слика 5-14 Влијанието на раното впрскување врз количеството на NOx	107
Слика 5-15 Влијанието на раното впрскување врз количеството на PM честички	107
Слика 5-16 Влијанието на раното впрскување врз количеството на THC	108
Слика 5-17 Влијанието на раното впрскување врз количеството на CO	108
Слика 5-18 Управувачка површина за NOx при рано впрскување на горивото	108
Слика 5-19 Управувачка површина за PM честички при рано впрскување на горивото	108
Слика 5-20 Управувачка површина за THC при рано впрскување на горивото	108
Слика 5-21 Управувачка површина за CO при рано впрскување на горивото	108
Слика 5-22 Горниот слој на напредниот модел на современ дизел-мотор во Simulink	110
Слика 5-23 Дијаграм на целосниот напреден модел на современ дизел-мотор	111
Слика 6-1 Приказ на корисничкиот интерфејс во менито START UP	117
Слика 6-2 Приказ на панелот за задавање на предупредувања	117
Слика 6-3 Логичкиот тек на настаните согласно кои функционира графичкиот интерфејс	118
Слика 6-4 Приказ на корисничкиот интерфејс во менито INPUTS	119
Слика 6-5 Приказ на корисничкиот интерфејс во менито OUTPUTS	120
Слика 6-6 Приказ на корисничкиот интерфејс во менито OSCILLOSCOPE	121

Слика 7-1 Интерфејсот на VCDS софтверот со избрани параметри за креирање на ново податочно множество	123
Слика 7-2 Калибрација на уредот за гасна анализа BrainBee AGS 688	124
Слика 7-3 Поставеност на сензорската сонда во ауспухот на возилото	124
Слика 7-4 Резултати од валидацијата на напредниот модел за NOx (Лотка-Волтера)	125
Слика 7-5 Резултати од валидацијата на напредниот модел за CO ₂ (Лотка-Волтера)	125
Слика 7-6 Резултати од валидацијата на напредниот модел за PM честички (В-сплајн)	125
Слика 7-7 Резултати од валидацијата на напредниот модел за THC (Лотка-Волтера)	126
Слика 7-8 Резултати од валидацијата на напредниот модел за CO (Лотка-Волтера)	126
Слика 7-9 Ефективна специфична потрошувачка на гориво при калибрација за намалување на CO ₂	128
Слика 7-10 Емисија на CO ₂ при калибрација за намалување на CO ₂	128
Слика 7-11 Емисија на CO при калибрација за намалување на CO ₂	129
Слика 7-12 Емисија на NOx при калибрација за намалување на CO ₂	129
Слика 7-13 Емисија на THC при калибрација за намалување на CO ₂	129
Слика 7-14 Емисија на PM честички при калибрација за намалување на CO ₂	129
Слика 7-16 Емисија на NOx при калибрација за намалување на NOx	130
Слика 7-17 Емисија на CO при калибрација за намалување на NOx	131
Слика 7-18 Емисија на CO ₂ при калибрација за намалување на NOx	131
Слика 7-19 Емисија на THC при калибрација за намалување на NOx	131
Слика 7-20 Емисија на PM честички при калибрација за намалување на NOx	131

Листа на табели

Табела 2-1 ЕУРО стандарди на емисија за дизел патнички автомобили.....	40
Табела 2-2 ЕУРО стандарди на емисија за тешки товарни возила.....	41
Табела 4-1 Оперативниот опсег на влезните параметри на моторот	87
Табела 4-2 Вредности за просечната апсолутна грешка за вртливиот момент, масениот проток и темп. во гранката за празнење за методите на регресија предложени од МВС алатката (без невронски мрежи)	89
Табела 4-3 Вредности за просечната апсолутна грешка за вртливиот момент, масениот проток и темп. во гранката за празнење; и времетраењето на различните регресиони методи.....	92
Табела 4-4 Оперативниот опсег на влезните параметри во Моделите на Лотка-Волтера за гасната емисија на CO, CO ₂ , NO _x и THC.....	94
Табела 4-5 Оперативниот опсег на влезните параметри во В-сплајн моделот за емисијата на РМ честички	95
Табела 6-1 Оперативен опсег на влезните параметри во графичкиот интерфејс.....	119

Листа на акроними

Англиска терминологија	Акроним	Македонска терминологија
3 Dimensional	3D	тридимензионален
Air to Fuel Ratio	AFR	сооднос воздух-гориво
Artificial Neural Networks	ANNs	вештачка невронска мрежа
Battery Electric Vehicles	BEV	возила со целосно електричен погон
Biofuels	BIO	биогорива
Bottom Dead Center	BDC	внатрешна крајна клипна положба (ВКП)
British Petroleum	BP	Британски Петролеум
Catenary Electric Vehicle	CAT	електрични возила со пантограф
Computation Fluid Dynamics	CFD	компјутерски модели од динамика на флуди
Carbon Monoxide	CO	јаглерод моноксид
Carbon Dioxide	CO ₂	јаглерод диоксид
Compressed National Gas	CNG	компримиран природен гас
Continuously Regenerative Technology	CRT	технологија на постојана регенерација на филтерот за цврсти честички
Comma-separated values	CSV	текстовен формат (.txt) за зачувување на датотеки
Design of Experiment	DOE	пристап за дизајнирање на статистички експеримент
Diesel Particulate Filter	DPF	филтер за цврсти честички кај дизел-моторите
Electronic Control Unit	ECU	Електронска управувачка единица (ЕУЕ)
Exhaust Gas Recirculation	EGR	систем за рецикулација на издувните гасови
Fuel to Air Ratio	FAR	сооднос гориво-воздух
Filling & Emptying	F&E	(модели на) полнење и празнење
Fire protection	/	против-пожарна (ПП) заштита
Fuel-cell Electric Vehicles	FCEV	возила со горивни ќелии
Graphical User Interface	GUI	кориснички интерфејс
Water	H ₂ O	вода
Hardware-in-the-Loop	HIL	симулација со хардвер во јамка
Internal Combustion Engine	ICE	Мотор со внатрешно согорување (СВС)
Institute for Advanced Automotive Propulsion Systems	IAAPS	Институт за напредни погонски технологии кај возилата
Liquefied Natural Gas	LNG	течен природен гас
Liquefied Petroleum Gas	LPG	течен нафтен гас

Mean Absolute Error	MAE	просечна апсолутна грешка
Mass Air Flow	MAF	масен проток на воздухот
Mass Flow Rate	MFR	масен проток
Model-based calibration	MBC	калибрација со помош на статистички модел
Multi-layer perceptron	MLP	повеќеслоен перцептрон
Mean-value Engine Model	MVEM	модел на средна вредност
Mean-value Soot Model	MVSM	модел на средна вредност за создавањето на цврсти честички (саѓи)
New European Driving Cycle	NEDC	Нов европски возен циклус за испитување на издувната емисија кај моторните возила
Nitric Oxide	NO	азот моноксид
Nitrogen Dioxide	NO ₂	азот диоксид
Nitrogen Oxide Pollutants	NO _x	азотни оксиди
Non-methane hydrocarbons	NMHC	не-метански јаглеводороди
Oxygen	O ₂	кислород
Plug-in Hybrid Electric Vehicle	PHEV	хибридни возила кои овозможуваат полнење од електричната мрежа
Particulate Matter	PM	цврсти честички
Predicted Residual Error Sum of Squares	PRESS	резидуална сума на квадратите на грешка
Quasi-steady	QS	квази-стационарни (модели)
Radial Basis Function	RBF	радијална базна функција (функција на радијална основа)
Revolutions per minute	RPM	вртежи во минута
Selective catalytic reduction	SCR	селективна каталитичка редукција
Sulphur Dioxide	SO ₂	сулфур диоксид
Top Dead Center	TDC	надворешна крајна клипна положба (НКП)
Turbocharged, Direct Injection	TDI	изведба на моторот со турбополнач и директно впрскување на горивото
Total unburned hydrocarbons	THC	вкупни несогорени јаглеводороди
Variable geometry turbocharger	VGT	турбополнач со варијабилна геометрија на турбината
Volatile organic compounds	VOC	испарливи органски соединенија
Wave-action model	WAM	модели на бранова активност (модели на масен проток)
Worldwide Harmonized Heavy Duty Certification	WHTC	Светски хармонизиран тест за издувната емисија на тешки возила
Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure	WLTP	Светски хармонизиран тест за издувната емисија на лесни возила

Листа на симболи

Симбол	Величина	Опис
b	/	карактеристика на невронот, услов за активација
c_p	kJ/kgK	топлински капацитет при константен притисок
γ	/	однос помеѓу топлинскиот капацитет при константен притисок и при константен волумен
γ_r	/	коефициент на заостанати продукти од согорувањето
f	/	преносна функција
f_{mg}	mg	количество на гориво
η_v	/	коефициент на полнење
η_C	/	изентропска ефикасност на компресорот
η_T	/	изентропска ефикасност на турбината
h	/	услов на активациска функција
λ	/	коефициент на вишокот на воздух
L_{min}	kg	минимално теоретско – стехеометриско количество воздух неопходно за согорување на 1 kg гориво
L_{real}	kg	количество на воздух што се доведува за 1 kg гориво
\dot{m}_C	kg/s	масен проток на воздух од компресорот кон ладилникот за полнење
\dot{m}_{eng}	kg/s	масен проток на работниот флуид во и надвор од цилиндрите на моторот
M_r	mol	количество на заостанати продукти од согорувањето
m_{real}	kg	маса на свежото полнење сместено во работниот простор по процесот на полнење
M_s	mol	количество на свежо полнење
\dot{m}_T	kg/s	масен проток на издувните гасови кои ја погонуваат турбината
m_{teor}	kg	маса на свежото полнење коешто теоретски може да се смести во работниот простор
\dot{m}_{tr}	kg/s	масен проток на работниот флуид
N или N_{eng}	RPM	број на вртежи на моторот во една минута
N_{TC}	kRPM	број на илјади вртежи на осовинката на турбополначот
Δp_p	Bar	специфична работа (притисок на пумпни загуби)
p	Bar	притисок
p_1	Bar	атмосферски притисок
p_2	Bar	притисок по компресорот, но пред ладилникот за полнење
p_3	Bar	притисокот во гранката за полнење, по ладилникот за полнење

p_{EXH} или p_4	Bar	притисок во гранката за празнење, пред турбината
p_5	Bar	притисок во гранката за празнење, по турбината
P_C	kW	моќност на компресорот
P_{ITC}	kW	моќност на ладилникот на полнење
P_T	kW	моќност на турбината
p_{rail}	Bar	притисок на горивото во заедничката распределитена шина
Q_1	kJ/kg	количество на доведена топлина во циклусот
Q_2	kJ/kg	количество на одведена топлина од циклусот
R	287 kJ/kgK	универзална гасна константа за идеален гас
r_{O_2}	/	количество на кислород во гранката за полнење
τ	/	временска константа во моделот на Лотка-Волтера
T	K	температура
T_1	K	атмосферска температура
T_C или T_2	K	температура по компресорот, но пред ладилникот за полнење
T_{ITC} или T_3	K	температура во гранката за полнење, по ладилникот за полнење
T_{EXH} или T_4	K	температура во гранката за празнење, пред турбината
T_5	K	температура во гранката за празнење, по турбината
t_{pulse}	μs	времетраење на впрскувањето
Tq	Nm	вртлив момент
V	m^3	волумен
w_i	/	„тежината“ доделена на влезот во невронската мрежа
$x - c_i$	/	растојание од влезот до центарот на невронот
x_i	/	влез во невронската мрежа
y	/	податоци добиени со мерење
\bar{y}	/	средна вредност на измерените податоци
\hat{y}	/	предвидени податоци
y_{NN}	/	излез од невронската мрежа

1 Вовед

Потребата на човештвото од брз и ефикасен транспорт засилено водат кон развој на транспортната инфраструктура, унапредување на правната регулатива за одвивање на транспортот и модернизација на транспортните средства. Притоа, тенденцијата при развојот на погонските агрегати во возилата секогаш одела во насока на поголема економичност, зголемена моќност, помала маса и подолг работен век. Во поново време, строгите законски нормативи ги принудуваат производителите на возила да работат и на полето на заштита на животната околина, па не помалку важни се малата емисија на локални загадувачи и стакленички гасови.

Од таа причина, денес постои изразено проширување на пазарот на патнички и лесни комерцијални возила, каде за сметка на моторите со внатрешно согорување (најпопуларната погонска изведба до сега) се зголемува присуството на возила со целосно или делумно електричен погон [1]. Тргувајќи од непостоечката директна издувна емисија, зголеменото присуство на електричните возила делува навидум оправдано [2-3] и затоа водејќи се првенствено од овој факт, Европската унија на почетокот од 2023 година визионерски има изгласано прекин на производството на возила со погон на мотор СВС по 2035 година [4].

Она што помалку се става во фокусот на овие настани за дефинирање на глобалната транспортна иднина е тоа што литиумските батерии, горивните ќелии и високо-ефикасните електрични мотори иако делуваат ветувачки [5] се исклучително скапи, контроверзна е достапноста на ретките материјали кои се користат за нивно производство, а емисиите за време на целиот животен циклус на електричните возила сеуште се високи.

Статистички, иако електричните возила имаат бавен, но константно стабилен продор на пазарот на патнички и лесни комерцијални возила, дури 95.8% од ново-продадените тешки комерцијални возила за 2021 година биле со погон на дизел-мотор [1, 6-7]. Дополнително, во Европа патничките и лесните комерцијални возила се со просечна старост од околу 12 години, додека тешките комерцијални возила се во просек стари по 14 години. Во државите од Источна и Југоисточна Европа вредностите за просечната старост на возните паркови на државите членки на Европската унија достигнуваат и до 19 години за патнички возила и повеќе од 21 година за тешките комерцијални возила [8].

Впрочем, и транспортната инфраструктура сеуште не е подготвена за целосен премин кон електрични возила, па многу поцелисходно сценарио во догледна иднина би било зачестено присуство на хибриди (делумно-електрични возила) на патиштата и употреба на био-горива од третата генерација како соодветна алтернатива за намалување на локалните и глобалните емисии [9-10]. Но дури и кога бројот на возила погонувани од мотор СВС би се намалувал со посакуван интензитет, ќе остане употребата во специјални машини, бродови, локомотиви и други средства кои сметаат на моќта и издржливоста на дизел-моторите. Тоа пак значи дека најмалку во наредните триесет до

педесет години ќе се задржат и најголем дел од недостатоците кои се поврзани со нивната употреба, а пред се способноста да загадуваат [11-12].

Загадувањето од транспортниот сектор, а во особено голем дел од патниот сообраќај се има наметнато како тема уште во осумдесеттите години од минатиот век [13]. Повеќето Западноевропски земји, САД, Јапонија и други, во тој период почнуваат со воведување на конкретни граници на загадувањето, со поставување на максимално дозволени концентрации на штетните елементи во издувната емисија на моторите за патнички и комерцијални возила, најпрво ограничувајќи ја зацрнетоста на издувната емисија (опацитетот), а подоцна воведувајќи строги граници за компоненти како: јаглерод моноксид, јаглерод диоксид, вкупни азотни оксиди, цврсти честички, сулфурни оксиди, испарливи соединенија, несогорено гориво и други [14].

Проблемите со издувната емисија кај моторите кои потекнувале од составот на горивата (бензини со оловни адитиви и сулфур во дизелите), успешно се решени со целосната забрана на овие адитиви [15], со што драстично се намалува присуството на олово и сулфурни оксиди во амбиенталниот воздух. Каталитичките конвертори (катализаторите) и филтрите за цврсти честички во издувната гранка на моторот исто така влијаат кон исполнување на еколошките норми предвидени со сегашната регулатива [16].

Најпосле, знаејќи дека штетните компоненти во издувната емисија на моторите се производ на процесот на согорување особено е важно да се влијае на начинот на одвивање на согорувањето. Од тука произлегува потребата за изнаоѓање нови техники и методи за управување и подесување на согорувањето во моторот, односно оптимизација на неговата работа согласно регулативите и нормативите за заштита на околината, но истовремено и задоволување на експлоатационите потреби на возилото и побарувањата на возачот.

1.1 Мотивација и предмет на истражувањето

Инженерско-еколошкиот компромис претставува концепт со кој најуспешно може да се опише пристапот при дизајнирањето на новите дизел-мотори, а кој подразбира истовремено исполнување на строгите критериуми за составот на издувните гасови и оптимална потрошувачка на гориво, за сметка на незначителни загуби во моќноста на моторот. Овој пристап евозможен единствено благодарение на управувачката ера во автомобилската технологија која започнува кон крајот на дваесетиот век и која има за цел поедноставување и унапредување на употребата на автомобилите и секако на нивните мотори.

Па така, за современите мотори СВС е карактеристично тоа што содржат бројни потсистеми кои овозможуваат подобри перформанси и поголема управливост на возилото. Поконкретно, технолошкиот напредок во насока на почисто согорување вклучува високо-притисно впрскување на горивото, рецикулација на издувните гасови, преполнување и ладење на свежото полнење на влезот од просторот за согорување [17].

Секој од овие потсистеми води кон зголемување на бројот на влезни променливи и зголемен обем на информации за состојбата на моторот, што резултира со зголемени димензии на управувачката матрица за што е потребен развој на напредни системи за управување со моторот [18], но и брза и прецизна управувачка логика без големи процесирачки побарувања [19].

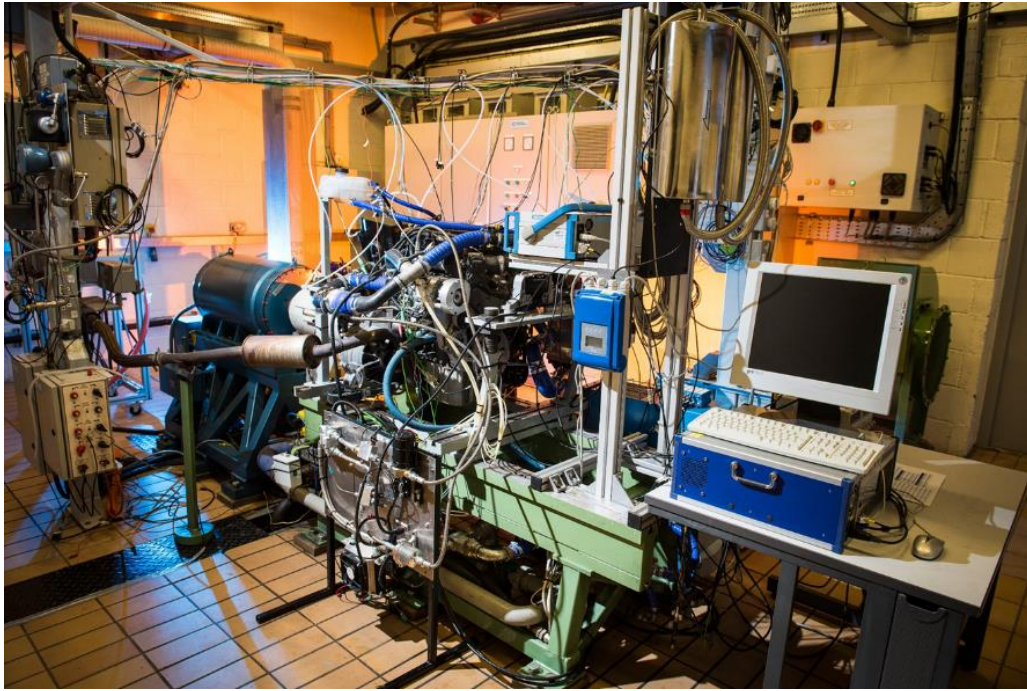
Калибрацијата на моторот е сложен процес кој е неизоставен при дизајнот на новите мотори и кој предвидува подесување на овие променливи со цел да се подобрат перформансите низ оперативниот опсег на брзини и оптоварувања на моторот [20]. Имајќи предвид дека секоја променлива е меѓусебно зависна со останатите, невозможно е да се изврши калибрација со подесување на променливите една по една и независно од останатите променливи. Во минатото, производителите на управувачки единици користеле лук-ап (од англ. look-up) табели кои ја претставувале управувачката, фази логика (од англ. fuzzy logic) и различните комбинации на влезни променливи - мапи, а кои ги добивале со помош на многу тестирање односно користење на методата „проба и грешка“, на овој начин акумулирајќи искуство потребно за успешна калибрација и последователно оптимизација на работата на моторот [21].

Главен недостаток кај управувањето со помош на фази логички лук-ап табели е потребата од голема меморија и времето потребно за избор на соодветна лук-ап табела согласно желбата на возачот и условите на експлоатација. Затоа, калибрацијата на денешните високо-сложени мотори во кои примарно место зема компромисот помеѓу перформансите, економичноста и емисиите е предизвик дури и за најискусните автомобилски инженери и автомобилската индустрија воопшто.

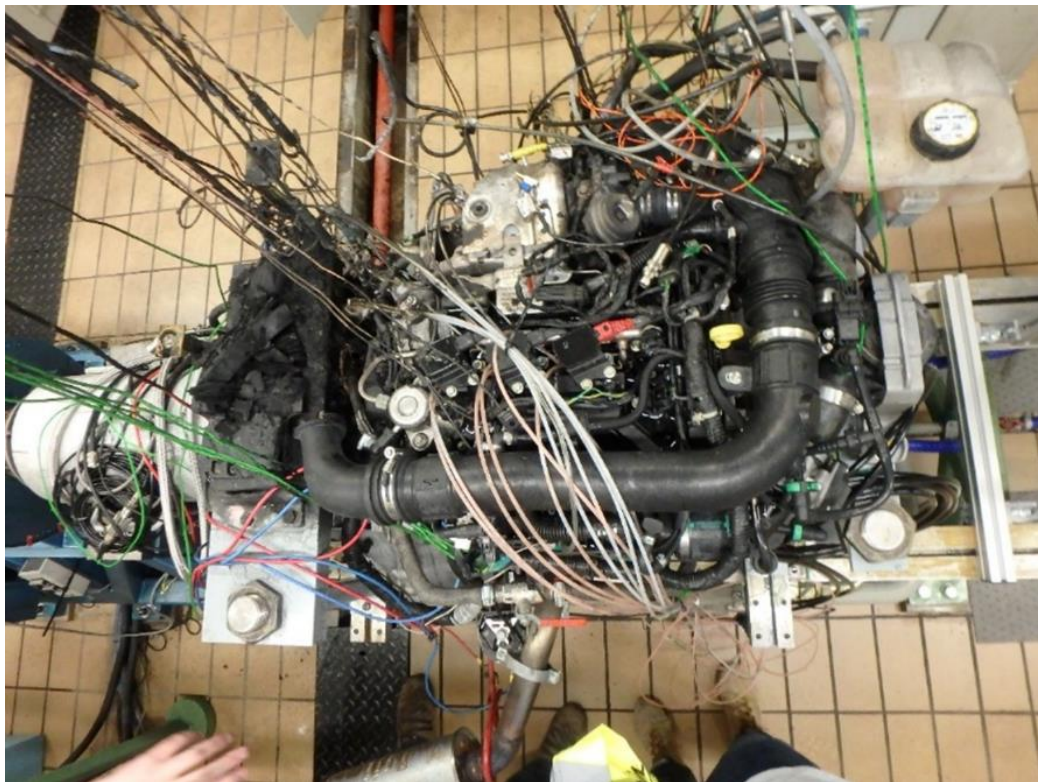
1.1.1 Тестирање и калибрација на мотор СВС

Токму претставници од автомобилската индустрија тврдат дека калибрацијата на моторите СВС е исклучително потребна вештина и искуствата од оваа област при новите вработувања се драгоцени за нив [22]. Но и покрај тоа, калибрацијата како процес на подесување на работните параметри на моторот ретко се изучува на машинските факултети, што пред сè се должи на сложеноста на процесот и високите технички, материјални и финансиски побарувања за лабораториска, мерна опрема. Впрочем, кога станува збор за практичното изучување на процесот на калибрација, добро опремените лабораториски тест-ќелии претставуваат навидум единствено едукативно помагало од оваа област за инженерите.

Но дури и кога достапноста на ресурсите за опремување на лабораториската тест-ќелија не би претставувале предизвик за научната институција - домаќин, уреденоста на самата лабораторија со предметниот мотор, уредот за симулирање на оптоварување, мноштвото сензори, мерни инструменти, напонски единици, процесирачки единици итн. (слики 1-1 и 1-2), сочинуваат комплексна и недоволно погодна средина за стекнување на нови знаења.



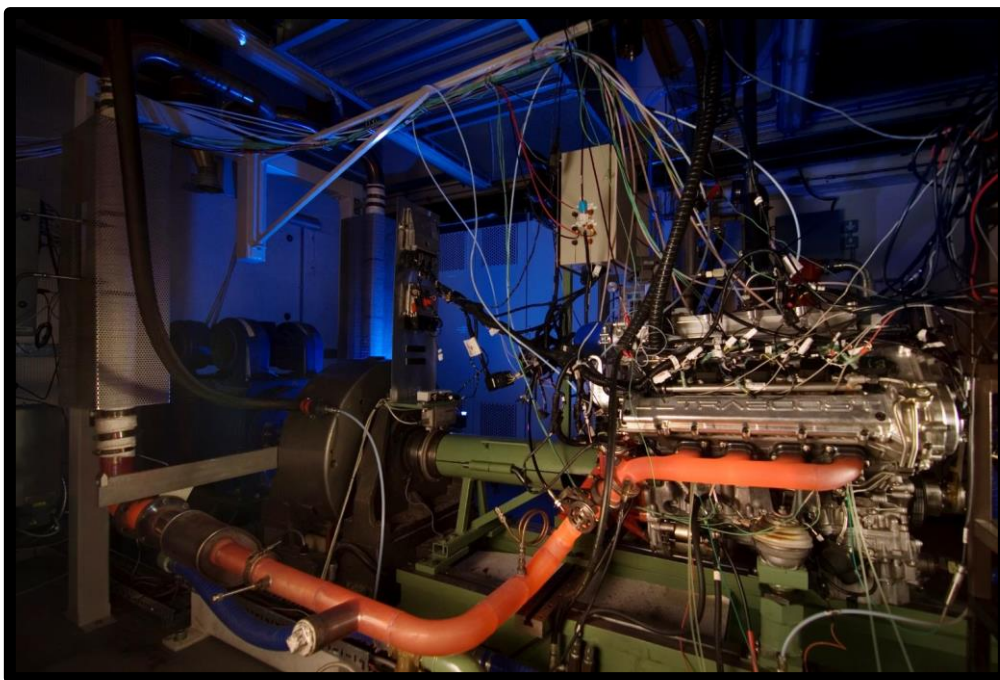
Слика 1-1 Лабораториска тест-келија за испитување и калибрација на мотори СВС [23]



Слика 1-2 Сензори конектирани кон мотор СВС подготвен за испитување [23]

На тоа се надоврзува значителен ризик од истекување на штетни издувни гасови во просторот за тестирање, а не се исклучува и ризикот од пожар поради развојот на високи температури кај моторот (слика 1-3), па командниот пулт како дел од мерките за заштита при работа без исклучок е сместен надвор од самата тест-келија. Затоа, може да

да се заклучи дека целото искуство главно подразбира интеракција со некаков софтвер (слики 1-4 и 1-5) кој преку командниот пулт би овозможил работа со моторот и останатите инструменти во внатрешноста на тест-келијата.

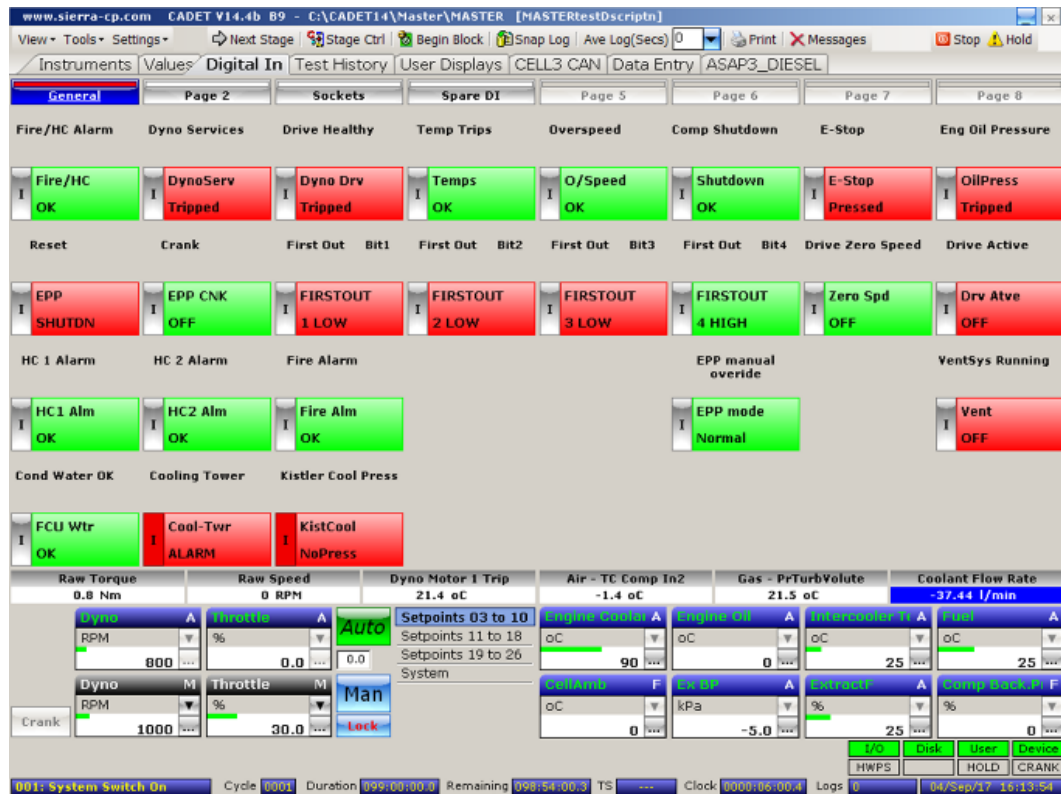


Слика 1-3 Вжарена цевка од гранката за празнење при работа на мотор CVC [23]



Слика 1-4 Основен работен прозорец – софтвер за управување со лабораториската тест-келија CADET (Sierra CP)

Имајќи ги предвид сите овие причини, важно е да се изнајде соодветна алтернатива во форма на софтверска алатка со која процесот на калибрација би станал поопиплив и подостапен. Ваквата алатка би имала за цел успешно да го долови процесот на калибрација и да овозможи разбирање на процесите на поврзаност на управувањето на моторот со помош на различните фази логички мапи со излезната оперативна карактеристика на моторот и излезната емисија.



Слика 1-5 Помошен прозорец - софтвер за управување со лабораториската тест-келија CADET (Sierra-cp)

1.1.2 Напреден модел на современ дизел-мотор

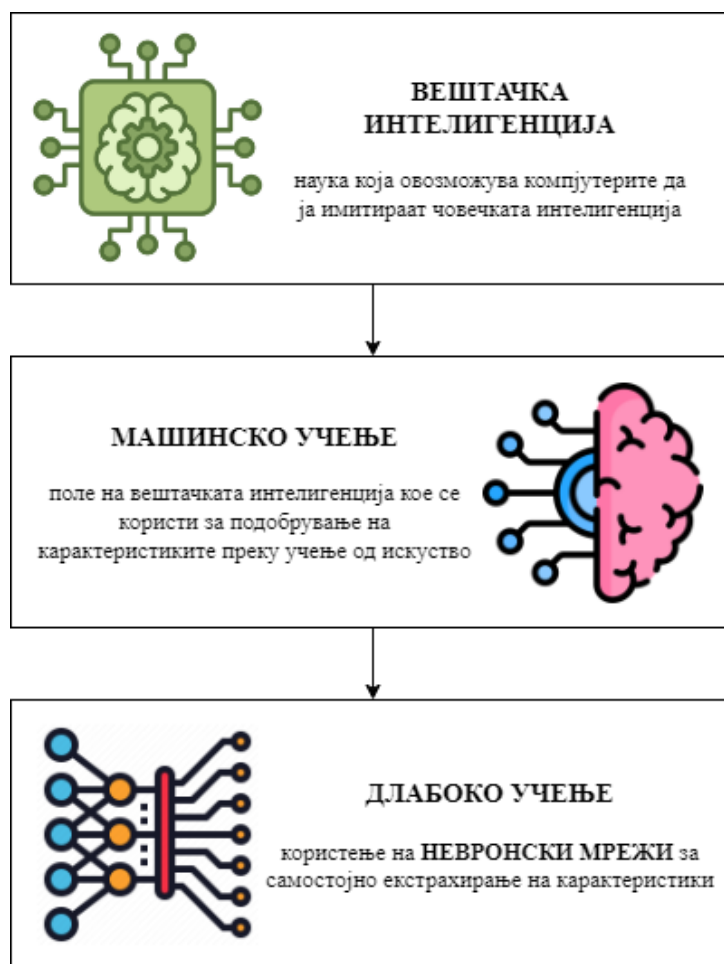
Моделирањето и компјутерските симулации овозможуваат подобро да се разбере динамиката на функционирање на моторите и благодарение на тоа водат кон создавање на посеопфатна слика за предизвиците на управувањето со нив и нивните потсистеми, со потребното ниво на сложеност и апстрактност [21,24]. Следствено на тоа, разбирливиот, едноставен и лесно прилагодлив модел на мотор претставува многу потребна основа за успешен дизајн на новите дизел-мотори како и за нивната понатамошна калибрација и оптимизирање на работата согласно инженерско-еколошкиот компромис [19,25].

Успешноста на предлог-алатката за калибрација на моторот во голема мера ќе зависи токму од моделот на мотор врз чии работни параметри ќе се извршуваат подесувањата. За таа цел, така подготвениот модел мора да поседува доволно висок степен на комплексност за соодветно да го долови причинско-последичниот однос

помеѓу влезните параметри и неговата излезна оперативна карактеристика и издувната емисија, а притоа да овозможи работа на алатката за тестирање и калибрација во реална брзина.

Меѓутоа, одредени процеси во моторот, како протокот на работниот флуид низ потсистемите на моторот, согорувањето и механизмите на создавање на штетната издувна емисија, бараат неразумно голем напор за да се измоделираат или сеуште се само делумно дефинирани, а нивното успешно функционирање како дел од некој модел бара преголема процесирачка моќ односно време за процесирање [26-28].

Но, со засилениот развој на концептите вештачка интелигенција, машинско учење, длабоко учење и примена на моделите на големи податоци се отвара простор за изработка на напреден, експериментален модел на современ дизел-мотор кој во себе би обединил повеќе методи на моделирање со цел поедноставување на моделот и намалување на неговите процесирачки побарувања.



Слика 1-6 Визуелен приказ на длабокото учење со користење на невронски мрежи како дел од вештачката интелигенција и машинското учење

Меѓу овие методи може да се вброи машинското учење и примената на невронските мрежи [28] како метод на регресија со кој верно може да се доловат

последниците кои резултираат од промените на работниот флуид при согорувањето во моторот. Со оглед на тоа што калибрацијата со помош на модел и подесувањето на работните променливи во процес на менување на фази-логичките мапи во управувачката единица нуди примамливи можности за оптимизирање на работата на моторот, едноставниот модел на дизел-мотор како алатка за калибрација ќе го рационализира, поедностави и забрза процесот на калибрација и оптимизирање на моторот [29-30], со што би можело да се постигне контролирана и намалена емисија на локални загадувачи и стакленички гасови, односно подобрена еколошка карта на моторот [25].

1.2 Цели

Главната цел на докторската теза е развој на софтверско решение (алатка) кое ќе служи како едукативно помагало за изучување на процесот на калибрација на мотор СВС, а за чија потреба ќе биде развиен напреден модел на дизел-мотор со мали процесирачки побарувања. Напредниот модел ќе биде изработен во софтверскиот пакет MATLAB, по што ќе биде поврзан со кориснички интерфејс наречен „Engine Labs“ во кој ќе бидат имплементирани сите физички карактеристики вообичаени за една лабораториска тест-ќелија. За да се постигне главната цел, предвидено е да се постигнат и следните помошни цели:

- Дефинирање на потребното ниво на сложеност на моделот и карактеристиките на софтверската алатка согласно корисничките побарувања;
- Извршување на експериментални, лабораториски мерења за формирање на доволно обемно податочно множество кое ќе се користи во моделирањето на дизел-моторот;
- Тестирање на перформансите, процесирачките побарувања и времето на процесирање на различни методи на регресија со цел нивно интегрирање во напредниот модел на моторот;
- Итеративен развој на моделот и негова постепена интеграција во софтверската алатка со прогресивно зголемување на сложеноста;
- Имплементација на модели за штетната издувна емисија на азотни оксиди (NO_x), јаглерод диоксид (CO₂), јаглерод моноксид (CO), вкупни несогорени јаглевородороди (THC) и цврсти честички (PM);
- Целосна интеграција на моделот со корисничкиот интерфејс „Engine Labs“ и испитување на нивната взаемна функционалност.

1.3 Работни хипотези

Главната хипотеза на докторската дисертација гласи: Со предложената алатка за тестирање и калибрација на дизел-мотор СВС се надминува предизвикот на управување со работните променливи на моторот и нивните интерконекциски зависимости.

Од оваа главна хипотеза, произлегуваат две споредни хипотези:

- **Споредна хипотеза 1:** Калибрацијата со помош на модел овозможува успешен инженерско-еколошки компромис помеѓу експлоатационите побарувања на возачот и задоволување на строгите еколошки норми кај дизел-мотор СВС; и
- **Споредна хипотеза 2:** Методологијата предложена во ова истражување ќе поттикне примена на слични пристапи при унапредувањето на постоечките и дизајнирање и развој на новите дизел-мотори.

1.4 Очекуван научен придонес од истражувањето

Со истражувањето направено за изработка на докторскиот труд, а кое во најголема мера ќе се однесува на креирање на напреден модел на дизел-мотор СВС, ќе се дефинира компромисот при конструирањето на дизел-моторите од гледна точка на еколошките влијанија и подобрување на еколошката карта на моторот, перформансите на моторот и намалување на потрошувачката на гориво преку процесот на калибрација и оптимизирање на работните параметри на моторот.

Дополнително, ќе се уточнат и специфицираат постапките за мерење на работните параметри на моторот, а со примена на моделите на големи податоци и длабоко учење ќе се измоделира процес кој ќе го претставува процесот на согорувањето кое се одвива во мерениот мотор. Моделот треба да реагира на влезна возбуда од командите за управување, податоците на мерните сензори и еколошките параметри во издувната емисија. Моделот ќе биде апликативен кон софтверска алатка која ќе служи како едукативно помагало во изучувањето на процесот на калибрација на моторите, а новите подесувања ќе може да се внесат во предметниот мотор за понатамошно тестирање.

Научниот придонес на овој докторат ќе биде во разбирање на процесите на поврзаност на управувањето на моторот со помош на различните фази-логички мапи со излезната оперативна карактеристика на моторот и излезната емисија. Во исто време, истражувањето спроведено во врска со оваа теза ќе доведе до утврдување на точноста на техниките за симулација што денес се користат при дизајнирањето на новите дизел-мотори, за да се обезбедат алатки со поголема точност и прецизност што ќе може да се користат за дизајнирање поефикасни дизел-мотори во производствените циклуси во 2027 и 2030 година.

1.5 Преглед на поглавјата

Докторската дисертација е поделена во осум поглавја. По краткиот **вовед** во тезата и дефинирање на мотивацијата зад нејзината изработка, како и предметот, целите на истражување, работните хипотези и очекуваниот научен придонес, **втората глава** ги содржи теоретските основи на современите дизел-мотори со осврт на физичките и термодинамичките начела со кои е дефинирана нивната работа и механизмите на создавање на штетната издувна емисија. Следува анализа на потсистемите карактеристични за современите дизел-мотори, при што вниманието е насочено кон

електронската управувачка единица и актуелните решенија за намалување на штетната издувна емисија и подобрување на ефикасноста на моторот како турбополнач, ладилник на свежото полнење, систем за високо-притисно впрскување на горивото и систем за рецикулација на издувните гасови со новото полнење. Во значително помала мера се опфатени каталичките конвертори и филтерските решенија во издувната гранка на моторот. Кон крајот на ова поглавје се разгледани правците на развој на автомобилската индустрија.

Во **третата глава** е направен преглед на досегашните релевантни достигнувања во областа, со акцент на термодинамичките модели на мотор СВС и нивните предности и недостатоци. Од особена важност во ова поглавје е анализата на новите техники за моделирање на процесот на измена на работниот флуид во моторот, согорувањето и механизмите на создавање на штетната емисија кои подразбираат калибрација со помош на регресионен модел, примена на моделите на големи податоци и концептите на машинско и длабоко учење, невронски мрежи, моделот на Лотка-Волтера за гасната издувна емисија и В-сплајн моделот за издувната емисија на цврсти честички.

Четвртата глава е посветена на спроведените експериментални мерења и формирање на доволно обемно податочно множество кое ќе се користи во моделирањето на дизел-моторот, но претходно користејќи сегменти од истото податочно множество е извршено тестирање на перформансите, процесирачките побарувања и времето на процесирање на различни методи на регресија со цел нивно интегрирање во напредниот модел на современ дизел-мотор.

Петтата глава содржи детали за изработката на напреден, експериментален модел на современ дизел-мотор кој во себе обединува термодинамички модел на средна вредност (од англ. Mean-value engine model – MVEM) на просторот за согорување со регресионен модел на машинско учење изработен во MATLAB Simulink и моделите на гранката за полнење, ладилникот на свежо полнење, турбополначот, EGR системот, гранката за празнење, механизмите за утврдување на соодносот гориво-воздух и влијанијата од раното впрскување на горивото. По обединување на различните компоненти во единствен напреден модел на современ дизел-мотор, направена е анализа на перформансите на моделот, погодноста за употреба во софтверската алатка за изучување на процесот на калибрација и потенцијалните недостатоци на моделот.

Во **шестата глава** е опишан корисничкиот интерфејс „Engine Labs“ како дел од софтверската алатка за изучување на процесот на калибрација со сите негови функционалности. Во оваа глава исто така се утврдува способноста за успешно доловување на причинско-последичниот однос помеѓу влезните параметри и излезната оперативна карактеристика на моторот, но најважно и издувната емисија. Во **седмата глава** е извршена валидација на моделот, а потоа користејќи ја софтверската алатка се изведени две оптимизации на работата на моторот, првата со цел намалување на неговата потрошувачка на гориво и емисијата на стакленички гасови (CO₂), а втората со цел намалување на азотните оксиди (NO_x) како водечки загадувач кој потекнува од издувната емисија на возилата погонувани од дизел мотор.

На крајот, во **заклучокот** се сумирани резултатите, применетите техники и методологии, како и заклучоците и препораките за понатамошна работа. Направен е детален преглед на истражувањето и резултатите од него со акцент на научниот придонес и можноста за примена на резултатите.

1.6 Референци

[1-1] ACEA (2021) Fuel types of new trucks. European Automobile Manufacturers Association. Available at: <https://www.acea.auto/figure/trucks-eu-fuel-type/>

[1-2] B. Preston (2020) EVs Offer Big Savings Over Traditional Gas-Powered Cars. Consumer Reports. Available at: <https://www.consumerreports.org/hybrids-evs/evs-offer-big-savings-over-traditional-gas-powered-cars/>

[1-3] EERE (2020) Reducing Pollution with Electric Vehicles. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Available at: <https://www.energy.gov/eere/electricvehicles/reducing-pollution-electric-vehicles>

[1-4] K. Abnett (2023) EU lawmakers approve effective 2035 ban on new fossil fuel cars. Reuters. Available at: [https://www.reuters.com/business/autos-transportation/eu-lawmakers-approve-effective-2035-ban-new-fossil-fuel-cars-2023-02-14/#:~:text=EU%20lawmakers%20approve%20effective%202035%20ban%20on%20new%20fossil%20fuel%20cars,-By%20Kate%20Abnett&text=BRUSSELS%2C%20Feb%202014%20\(Reuters\),vehicles%20and%20combat%20climate%20change](https://www.reuters.com/business/autos-transportation/eu-lawmakers-approve-effective-2035-ban-new-fossil-fuel-cars-2023-02-14/#:~:text=EU%20lawmakers%20approve%20effective%202035%20ban%20on%20new%20fossil%20fuel%20cars,-By%20Kate%20Abnett&text=BRUSSELS%2C%20Feb%202014%20(Reuters),vehicles%20and%20combat%20climate%20change)

[1-5] M. Contestabile, G. Offer, R. Slade, F. Jaeger, and M. Thoennes (2011) Battery electric vehicles, hydrogen fuel cells and biofuels. which will be the winner? Energy & Environmental Science. Volume 4 (10) pp. 3754–3772

[1-6] McKinsey & Company (2014) Electric Vehicles in Europe: Gearing up for a new phase. Technical Report

[1-7] A. C. Askin, G. E. Barter, T. H. West, and D. K. Manley (2015) “The heavy-duty vehicle future in the United States: A parametric analysis of technology and policy tradeoffs”. Energy Policy. 81, pp. 1–13

[1-8] ACEA (2022) Average age of the EU vehicle fleet, by country. European Automobile Manufacturers Association. Available at: <https://www.acea.auto/figure/average-age-of-eu-vehicle-fleet-by-country/#:~:text=EU%20cars%20are%20now%20on,the%20EU%20is%2011.9%20years.>

[1-9] P. Enkvist, T. Nauc ler, and J. Rosander (2007) A cost curve for greenhouse gas reduction. McKinsey Quarterly. Volume 1, pp. 34

[1-10] T. B. Johansson, P. Kagesson, H. Johansson, L. Jonsson, J. Westin, H. Hejenstedt, O. Hadell, K. Holmgren, and P. Wollin (2013) Fossilfrihet pa vag. Ministry of Enterprise, SOU 2013:84

- [1-11] J. J. Michalek, M. Chester, P. Jaramillo, C. Samaras, C. N. Shiau, and L. B. Lave (2011) Valuation of plug-in vehicle life-cycle air emissions and oil displacement benefits. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America
- [1-12] C. W. Tessum, J. D. Hill, and J. D. Marshall (2014) “Life cycle air quality impacts of conventional and alternative light-duty transportation in the United States.” Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.
- [1-13] F. Delasalle and D. Erdenesanaa (2019) Planes, Trains and (Big) Automobiles: How Heavy Transport Can Reduce Emissions and Save Money. World Resources Institute. Available at: <https://www.wri.org/blog/2019/07/planes-trains-and-big-automobiles-how-heavy-transport-can-reduce-emissions-and-save>
- [1-14] N. Hooftman (2018) A review of the European passenger car regulations – Real driving emissions vs local air quality. Renewable Sustainable Energy Rev. 86
- [1-15] European Parliament (1998) Directive 98/70/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 1998 relating to the quality of petrol and diesel fuels and amending Council Directive 93/12/EEC Official Journal L 350, 28/12/1998 P. 0058 – 0068 Available at: http://publications.europa.eu/resource/cellar/9cdbfc9b-d814-4e9e-b05d-49dbb7c97ba1.0008.01/DOC_1
- [1-16] E. Giakoumis (2017) Diesel and Spark Ignition Engines Emissions and After-Treatment Control: Research and Advancements. Energies 10
- [1-17] W. A. Majewski and M. K. Khair (2006) Diesel Emissions and their Control. SAE International. Warrendale, PA, USA
- [1-18] O. L. Jonsson (2021) A GENeric Internal Combustion Engine Model: LiU-Genie. Master Thesis in Electrical Engineering. Linköping University. Linköping, Sweden
- [1-19] R. Isermann (2014) Engine Modeling and Control. Springer. Heidelberg, Berlin, Germany
- [1-20] Z. Mirakovski (2018) Optimization of the working parameters of an IC engine to reduce its fuel consumption and CO₂ emissions. Master Thesis in Mechanical Engineering. Faculty of Mechanical Engineering – Skopje
- [1-21] H. Sequenz (2013) Emission Modelling and Model-Based Optimisation of the Engine Control. Doctoral Thesis. Technical University Darmstadt. Darmstadt, Germany
- [1-22] H. Ihme-Schramm (2014) Model-based engine calibration - a challenge for teaching. MTZ worldwide. 75 (11). pp. 40–43. Doi: 10.1007/s38313-014-0250-5
- [1-23] R. Burke (2020) Summer School 2020. Centre for Doctoral Training. University of Bath
- [1-24] B. A. Thompson (2017) Development of a high-fidelity engine modelling framework in Simulink with automated combustion parameter tuning, Doctoral Thesis. Department of Mechanical Engineering, University of Alabama

- [1-25] C. M. Atkinson, M. Allain, Y. Kalish, and H. Zhang (2009) Model-Based Control of Diesel Engines for Fuel Efficiency Optimization. SAE Technical Paper 2009-01-0727
- [1-26] J. H. Horlock, and D. E. Winterbone (1986) The Thermodynamics and Gas Dynamics of Internal Combustion Engines. Vol. II, Clarendon Press, Oxford University Press, Oxford
- [1-27] M. Sjekavica (2009) Modeliranje i regulacija modernog dizleskog motora s turbonabijanjem. Master Thesis. University of Zagreb
- [1-28] C. Tan (2015) Model based control for a modern automotive diesel engine, Doctoral Thesis, School of Mechanical Engineering. University of Birmingham
- [1-29] T. Gabriel (2018) Model-Based Optimization of Combustion-Engine Control. Doctoral Thesis. Lund University
- [1-30] P. K. Wong, L. M. Tam, and K. Li (2012) Automotive engine power performance tuning under numerical and nominal data. Control Engineering Practice. 20. pp. 300-314

2 Современи дизел-мотори – теоретски основи, издувна емисија, напредни системи и развојни тенденции

Современиот развој на моторите се базира на развојот на технологијата и индустријата во целина. Притоа, значителен напредок е постигнат со развојот на технологијата на производство на нови материјали, нови и современи видови горива, мазива и адитиви за нив.

Развојот на електрониката исто така дава нов импулс на развојот на елементите за контрола и управување, па така, во последните дваесетина години најголем број бензински и дизел-мотори во својата конструкција и опрема содржат електронски компоненти кои значително ја подобруваат нивната работа, но во исто време ја усложнуваат и ја поскапуваат нивната конструкција.

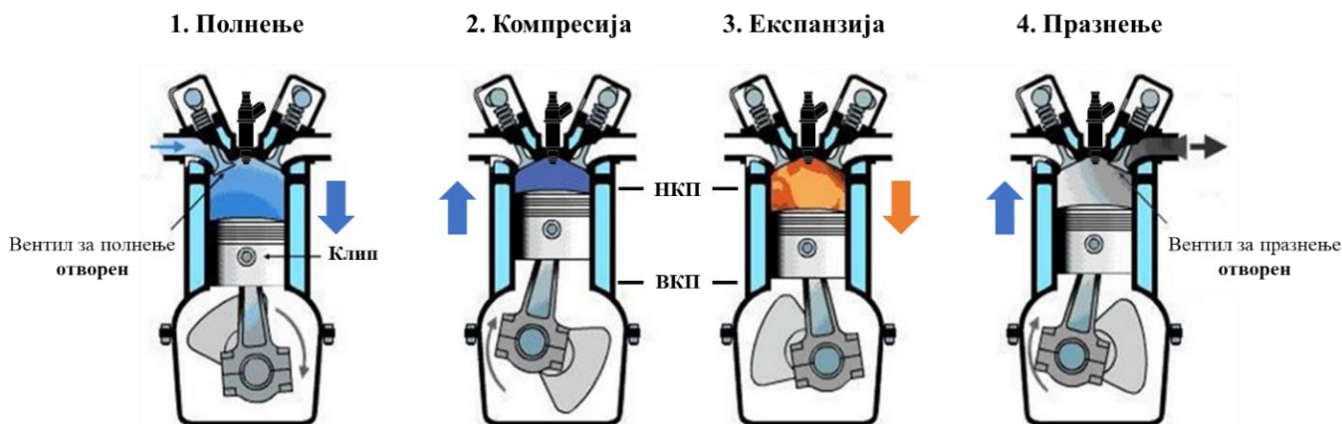
Се построгите законски нормативи ги принудуваат производителите на автомобили и мотори да работат и на полето на заштита на човековата околина како со намалување, така и со подобрување на издувната емисија на моторите со внатрешно согорување.

2.1 Теоретски основи

Моторите СВС се топлински машини кај кои хемиската енергија од согорувањето на горивото во единствен простор се трансформира во топлинска, а потоа со директно дејство на продуктите на согорување, се остварува механичка работа. Се разликуваат мотори СВС со константен работен волумен (млазни мотори) и мотори со променлив работен волумен. Понатаму, променливоста на работниот волумен може да се постигне со примена на механизам со елементи кои ротираат (ротациони мотори) или со примена на елементи кои вршат праволиниско движење (клипни мотори).

Клипните мотори се најпопуларната изведба на мотор СВС. Кај нив променливоста на волуменот се остварува со праволиниско движење од една до друга крајна положба на цилиндричен елемент (клип) во работен простор во форма на цилиндар. За да функционираат моторите, во работниот простор треба да се доведе свежо полнење и од него да се одведат продуктите од согорувањето. Свежото полнење и продуктите на согорувањето се нарекуваат работна материја (работен флуид), а според начинот на измена на работната материја, моторите се делат на четиритактни и двотактни.

Во текот на работата клипот се движи од надворешната крајна положба НКП (клипот е најдалеку од замислената оска на коленестото вратило), до внатрешната крајна положба ВКП (клипот е најблиску до замислената оска на коленестото вратило). Со повратно движење на клипот од едната до другата крајна положба, се остварува еден такт. Четиритактен мотор е таков мотор кај кој работниот циклус се извршува за четири ода (такта) на клипот од едната до другата крајна положба. Тактовите на четиритактниот дизел-мотор се прикажани на слика 2-1:



Слика 2-1 Тактовите кај четиритактен дизел-мотор

Од настанувањето до денес, клипниот мотор со внатрешно согорување брзо се усовршувал и се развивал, следејќи го трендот на развојот по експоненцијална крива, но ниту до денес не го постигнал своето совршенство, ниту пак се решени сите проблеми и барања кои се поставуваат пред него. Заради тоа и натаму се вршат истражувања и усовршувања на полето на нивниот развој. Основните правци на натамошниот развој и усовршување на денешните клипни мотори се следните [1]:

- усовршувања на процесите на создавање смеса и согорување со цел зголемување на економичноста и смалување на токсичноста на продуктите од согорувањето;
- зголемување на моќноста со примена на преполнување;
- овозможување користење алтернативни горива;
- зголемување на моќноста со зголемување на бројот на вртежи;
- усовршување на конструкцијата со цел смалување на механичките и топлинските загуби; и
- подобрување на еколошките карактеристики на моторот.

2.1.1 Работен циклус

Процесите во моторот се одвиваат по кружен циклус што се повторува. Во текот на кружниот циклус се врши претворба на топлината ослободена со согорување на горивото во механичка работа. Степенот на претворба на топлината во механичка работа зависи од видот на кружниот циклус.

Реалниот циклус по кој работи моторот е многу комплексен, недоволно познат и неусовршен. Заради полесно разгледување и споредба, при анализата се воведуваат низа упростувања и притоа, во зависност од степенот на упростувањето може да се формираат три вида циклуси, и тоа: термодинамички, теоретски и реални циклуси. Во термодинамичките циклуси се воведуваат релативно груби упростувања кои се далеку од реалноста, но тие овозможуваат лесна анализа на ефективностата на одвивањето на работните циклуси.

Основни претпоставки кај термодинамичките циклуси се:

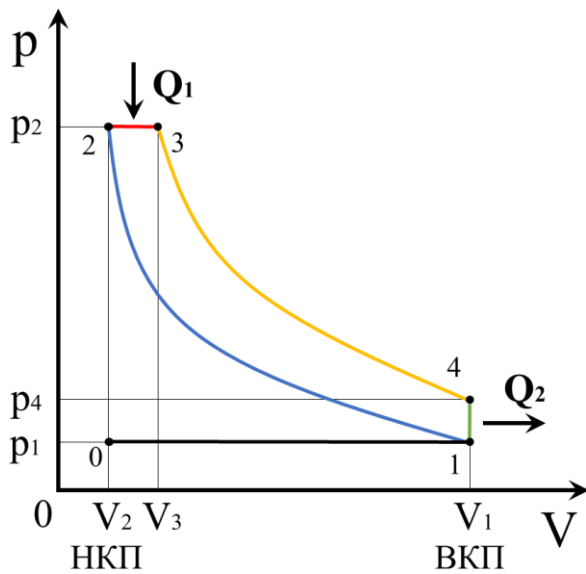
- Работен флуид во циклусот е материја која не се менува во текот на циклусот (составот на гасот останува ист);
- Работен флуид во циклусот е идеален гас чии својства не се менуваат во текот на циклусот;
- Процесот на согорување и процесот на измена на работната материја се заменуваат со доведување и одведување на топлина од циклусот и
- Процесите на компресија и експанзија се изведуваат без топлински загуби (адијабатски).

Термодинамички ДИЗЕЛОВ циклус

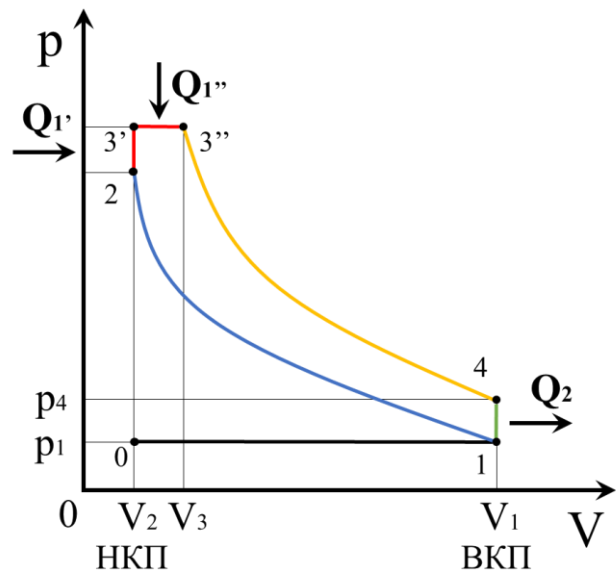
Термодинамичкиот Дизелов циклус е прикажан на сликата 2-2 и основна карактеристика на овој циклус е доведување топлина при константен притисок. Дизеловиот кружен циклус се состои од следните фази:

0-1 празнење; 1-2 адијабатска компресија; 2-3 изобарско доведување на топлина Q_1 , 3-4 адијабатска експанзија, 4-1 изохорско одведување на топлина од циклусот Q_2 , 1-0 празнење.

Основно барање за реализација на овој циклус е регулирано и постепено доведување топлина кое го надополнува падот на притисокот предизвикан со експанзијата. Регулирано и постепено доведување на топлина во реалност тешко може да се оствари и кон овој циклус најмногу се приближуваат големите бавноодни дизел-мотори кои можат со развлечено впрскување на горивото да го контролираат законот на согорувањето, односно законот на доведување на топлината.



Слика 2-2 p - V дијаграм за термодинамичкиот Дизелов циклус



Слика 2-3 p - V дијаграм за термодинамичкиот циклус на Сабате

Термодинамички циклус на САБАТЕ

Од термодинамичките циклуси, поблизок до работата на современите брзоодни дизел-мотори, со директно впрскување на горивото (кои наоѓаат голема примена кај патничките возила) е циклусот на Сабате (слика 2-3).

Основна карактеристика на циклусот на Сабате е комбинирано доведување топлина-делумно при константен волумен, а делумно при константен притисок. Циклусот на Сабате се состои од следните фази:

0-1 полнење; 1-2 адијабатска компресија; 2-3' изохорско доведување на топлина Q_1' ; 3'-3'' изобарско доведување на топлина Q_1'' ; 3''-4 адијабатска експанзија; 4-1 изохорско одведување на топлина од циклусот Q_2 ; 1-0 празнење.

Процес на измена на работната материја

Процесот на измена на работната материја ги опфаќа деловите од циклусот наменети за полнење на цилиндарот со свежо полнење и негово празнење од продуктите од согорувањето. Процесите на измена на работната материја треба да се одвиваат така што да овозможат што е можно поголемо количество од продуктите од согорувањето од претходниот циклус да се исфрли од цилиндарот и што е можно повеќе свежо полнење да се внесе во цилиндарот. Квалитетот на изведување на овој процес се дефинира врз основа на три фактори, а тоа се: специфична работа (Δp_p), коефициент на полнење (η_v) и коефициент на заостанати продукти од согорувањето (γ_r).

Специфичната работа на процесот на измена на работната материја или притисокот на пумпните загуби (Δp_p) ја дефинира потрошувачката на работата на струјните загуби во текот на процесот на празнење и полнење на цилиндарот. Во зависност од разликата на притисоците при полнењето и празнењето таа може да биде негативна, но кај дизел-моторите со преполнување, таа е позитивна.

Коефициентот на заостанати продукти од согорувањето (γ_r) ја дефинира масата на заостанати гасови кои од претходниот се пренесуваат во наредниот циклус, и претставува мерило на квалитетот на празнењето на цилиндарот после исфрлување на продуктите од согорувањето. Дефиниран е како сооднос меѓу количеството (бројот на молови) на заостанатите продукти (M_r) и количеството (бројот на молови) на свежото полнење (M_s):

$$\gamma_r = \frac{M_r}{M_s} \quad 2.1$$

Коефициентот на полнење го дефинира количеството свежо полнење (чист воздух кај дизел-моторите) коешто после процесот на измена на работната материја, останува во цилиндарот, овозможувајќи одвивање на циклусот и претставува мерило на квалитетот на полнењето. Дефиниран е со односот меѓу количеството на свежото полнење сместено во работниот простор после процесот на полнењето (m_{real}) и количеството на свежото полнење коешто теоретски може да се смести во него (m_{teor}):

$$\eta_v = \frac{m_{real}}{m_{teor}} \quad 2.2$$

Коефициентот на полнење на цилиндарот е најважниот параметар на процесот на измена на работната материја, бидејќи од него зависи големината на остварената моќност на моторот.

2.1.2 Процес на согорување

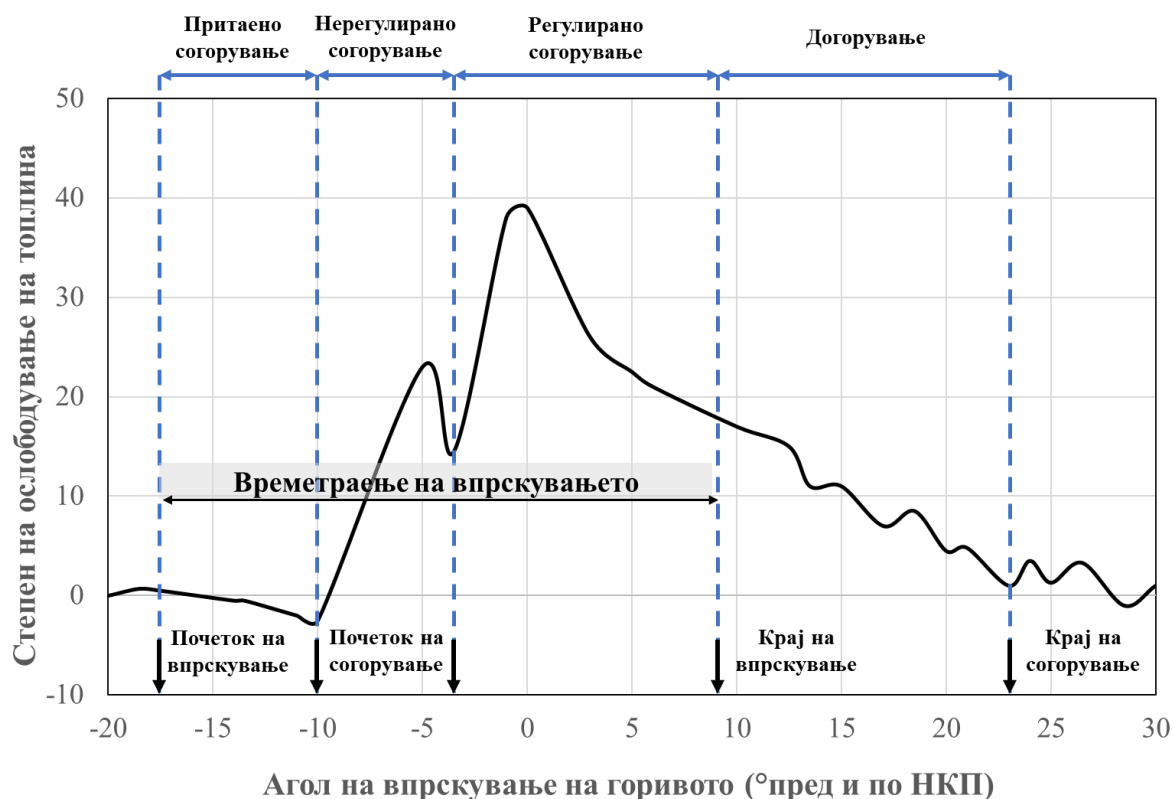
Процесот на согорување во моторот битно зависи од начинот на образување на смесата и е тесно поврзан со него. Дизел-моторите работат со хетерогена (неизмешана) смеса, односно во цилиндарот кој е исполнет со воздух се впрскува ситно распрскано гориво, при што се создава смеса [1]. Претходно, воздухот во цилиндарот се компримира до високи притисоци и температури, коишто доведуваат до samozапалување на така создадената смеса. Образовањето на смесата и согорувањето кај дизел-моторите се одвиваат речиси истовремено, но целиот процес може да се раздели на неколку фази кои се одвиваат во внатрешноста на работниот простор, а тоа се: дозирање на горивото, испарување на горивото, мешање на горивото со воздухот, палење и согорување.

Дозирање на горивото се врши со хидраулично впрскување на горивото под притисок. Основните задачи на впрскувањето се да дозира точно количество гориво во функција од оптоварувањето на моторот и да го распраши горивото на ситни капки. Целта е да се зголеми вкупната површина на млазот и да се забрза неговото испарување. Потоа, мешањето на горивото со воздухот е предуслов за согорување. Самото согорување, од почетокот на впрскувањето до крајот на ослободувањето на топлината може да се подели на четири карактеристични периоди, а тоа се: I – притаено согорување (период на индукција), II – бурно (нерегулирано) согорување, III – регулирано согорување и IV – догорување.

Саканиот тек на согорувањето се регулира со законот на мешање со кој се постигнува регулирано впрскување на горивото. За да не се разликуваат законитостите на впрскување и согорување, впрскувањето се врши малку порано, пред да започне согорувањето. Периодот на притаено согорување започнува со почетокот на впрскување на гориво за одреден агол на порано впрскување (анг. °BeforeTDC, °α пред НКП) и трае се до забележителниот пораст на притисокот над линијата на компресија, до почетокот на интензивното ослободување на топлина. Во текот на овој период се впрскуваат првите количества гориво по одреден закон за впрскување, горивото се распрскува, доаѓа во допир со воздухот, се меша со него и се подготвува, физички и хемиски, за запалување.

Периодот на нерегулирано согорување (бурно согорување) се карактеризира со нагол пораст на притисокот во цилиндарот, заради наглото ослободување на топлина. Имено, после првото запалување и развивање на топлина, одеднаш се подобруваат условите за испарување на горивото и за запалување. По овој период следува периодот на регулирано, односно „вистинско“ согорување кон кое се настојува кај дизел-моторите. Тогаш, условите за запалување се многу поволни. После впрскувањето на

горивото и кус период на индукција, тоа веднаш се пали и законот на согорување го следи законот на впрскување на горивото, и само тогаш настанува карактеристично дифузно согорување (согорување диктирано со образување на смесата).



Слика 2-4 Фази на согорувањето кај дизел-мотор

Периодот на догорување почнува од моментот на постигнување максимална температура и продолжува во текот на експанзијата. Согорувањето на остатокот од горивото се одвива во крајно неповолни услови кои се карактеризираат со мало количество воздух и големо количество продукти од согорувањето, па оттаму и ефикасноста на согорувањето е мала.

Квалитетот на согорувањето зависи од составот на смесата со која работи моторот. Смесата се состои од горивна смеса и заостанати продукти од претходниот циклус, додека горивната смеса се состои од воздух и гориво, измешани во соодветен сооднос. Ако во смесата има точно толку воздух колку што му е потребно на горивото за целосно да согори, таквата смеса е стехеометриска. Ако има повеќе воздух од минималното количество за целосно согорување, смесата е сиромашна, а доколку има помалку воздух од минималното количество за целосно согорување, смесата е богата.

Еден од параметрите за оценување на квалитетот на смесата е коефициентот на вишокот на воздух (λ) кој е претставен со соодносот:

$$\lambda = \frac{L_{real}}{L_{min}} \quad 2.3$$

каде што L_{real} е реално количество на воздух што се доведува за 1 kg гориво, а L_{min} е минимално теоретско – стехеометриско количество воздух неопходно за согорување на 1 kg гориво.

Со коефициентот на вишокот на воздух се дефинира дали смесата има повеќе или помалку воздух од минималното потребно количество. Ако коефициентот на вишок на воздух е еднаков на единица ($\lambda = 1$), смесата е стехеометриска. Но, ретко се случува моторите да работат со стехеометриска смеса. Впрочем, сите дизел-мотори работат со сиромашни смеси $\lambda = 1,20$ до $3,00$ (наспроти вредноста за богата смеса која изнесува $\lambda = 0.8$ до 1.3 , со која работат ОТО моторите).

2.2 Издувна емисија и еколошки регулативи

Иако транспортот претставува репер за економскиот и општествениот просперитет во светски рамки, а функционирањето на општествата во голема мера се потпира на добро развиена транспортна инфраструктура, позитивниот импакт на транспортот, особено во последните дваесетина години се произразено е во сенката на негативните последици кои ги има врз животната средина [2].

Издувната емисија која е резултат на согорувањето на конвенционалните, фосилни горива во погонските агрегати (моторите) на транспортните средства е меѓу водечките причинители зад загадувањето на воздухот и глобалното затоплување, кои пак водат до значително намалување на квалитетот на воздухот и квалитетот на животот [3-4]. Благодарение на високата зависност од нафтени деривати (повеќе од половина од вкупната глобална побарувачка), транспортот придонесува кон климатските промени со околу 22% од глобалните емисии на CO_2 , а покрај тоа е главен извор на низа загадувачи, но најмногу CO , NO_x и PM честички [5-7]. Дизел-моторите имаат највисоки стапки на емисии на овие загадувачи [8-9].

2.2.1 Загадувачки материи од дизел-моторите СВС

При експлоатација на моторите СВС, покрај добиената работа, како резултат на конверзијата на хемиската енергија во топлинска, па потоа во механичка работа, се јавуваат и продукти од самиот процес на конверзија кои се нарекуваат продукти на согорувањето. Овие продукти, нивното количество и механизмите на нивното создавање зависат од повеќе услови, како составот на горивото, непосредните услови во кои се одвива процесот на согорување како и системите за третман на продуктите на согорувањето кои се наоѓаат во автомобилите, а чија цел е намалување или трансформација на настанатите продукти на согорување во цилиндрите на моторот [10].

Најчести непожелни појави при согорувањето кај дизел-моторите се црн дим во продуктите од согорувањето и токсична емисија на продуктите [11]. Компонентите на издувната емисија кај дизел-моторот претставуваат соединенија составени од јаглерод, азот, водород и сулфур кои најчесто се поделени според агрегантната состојба на гасни соединенија (јаглерод моноксид – CO , азотни оксиди – NO_x и сулфур диоксид – SO_2) и цврсти честички (со големини од редот на неколку микрометри како $PM_{2.5}$ и PM_{10}) [12-

13]. Следува кус преглед на компонентите кои потекнуваат од издуната емисија како и механизмите на нивно создавање.

Јаглерод моноксид (CO)

Јаглерод моноксидот е отровен, безбоен гас, без мирис и вкус. Проценето е дека 80% од јаглерод моноксидот кој е присутен во атмосферата потекнува од природни извори, а природата е способна да го спречи зголемувањето на концентрацијата на јаглеродниот моноксид во атмосферата. Останатите 20% произлегуваат од активностите на човекот, односно од нецелосното согорување на горивата базирани на јаглерод, како дрвата кои се користат во индустријата и во домаќинствата како и нафтените дестилати кои се употребуваат во патниот сообраќај [14]. Јаглеродниот моноксид е резултат на нецелосно согорување на горивото во моторите СВС односно на нецелосна трансформација на хемиската енергија на горивото во топлинска. Причина за нецелосното согорување на горивото најчесто е нискиот сооднос на смесата на воздух и гориво во цилиндрите на моторите СВС, а што е типично за дизел-моторите кои работат со сиромашни смеси. Споменатите услови се најчести при стартување на моторите СВС кога доводот на воздух во цилиндрите на моторите е попречен односно пригушен [15].

Азотни оксиди (NOx)

Азотните оксиди се создаваат при реакција помеѓу молекуларниот азот и молекуларниот кислород при услови на висока температура. Оваа реакција се случува со согорување на фосилни горива во котлите во постројките за производство на електрична и топлинска енергија, но и од останати извори во индустријата. Сепак, главен извор на азотните оксиди во урбаните средини се продуктите на согорување од моторите СВС на автомобилите [16]. При согорување на горивата во моторите СВС прво се формира азот моноксид (NO), од кој мал дел (2-5%) по кратко време со слободниот кислород се трансформира во азот диоксид (NO₂). Збирот на така формираните оксиди се означува со NOx. Дооксидацијата на останатиот NO во NO₂ се одвива во атмосферата, при распростирање на гасовите. Пресметката на емисијата на азотни оксиди во атмосферата условно се сведува на NO₂.

Сулфур диоксид (SO₂)

Сулфур диоксидот е гас со остар мирис, а настанува со согорување на горива и материјали кои содржат сулфур. При вообичаени концентрации во амбиенталниот воздух, сулфур диоксидот може да реагира со водата која се наоѓа во воздухот и да формира сулфурна киселина. При согорување на горива кои содржат сулфур, истиот оксидира во сулфур диоксид и дополнително реагира со останатите загадувачки материји и на тој начин создава аеросоли [17]. Сулфурниот диоксид повеќе не е присутен во продуктите од согорување кај моторите СВС бидејќи контролата и отстранувањето на сулфурот при производниот процес на горивото го оневозможија создавањето на сулфурни оксиди во емисиите на загадувачки материји.

Цврсти честички ($PM_{2.5}$ и PM_{10})

Цврстите честички се состојат од цврсти материи во форма на прав, чад и пареа и може да останат присутни во атмосферата позначителен период. $PM_{2.5}$ се фини честички со големина еднаква или помала од 2.5 микрометри [18] и потекнуваат од директната емисија на примарни честички или се создаваат преку секундарни реакции кои вклучуваат емисии на испарливи органски соединенија (VOC), сулфур диоксид (SO_2) и азотни оксиди (NO_x) од возилата, а особено од тешките товарни возила и автобуси кои користат дизел гориво, како и од останати извори на согорување [19]. Малите, вдишливи честички може да бидат едни од најтешките загадувачки супстанции од воздухот. Цврстите честички со дијаметар еднаков или помал од 10 микрометри (PM_{10}) може да продраат длабоко во респираторниот систем на луѓето и водат кон бројни респираторни заболувања.

Несогорени јаглеводороди (THC) или Испарливи органски соединенија (VOCs)

Несогорените јаглеводороди се голема група на органски хемиски соединенија во чиј состав се јавува јаглеродот со исклучок на следните соединенија: јаглерод моноксид, јаглерод диоксид, јаглеродна киселина, метални карбиди и амониум карбонат [20]. Емисијата на THC е директно поврзана со нецелосното согорување на фосилните горива, најчесто при недостаток на оксидатор односно кислород. Со подобрувањето на технологиите во моторите СВС како и во сите индустриски гранки значително е намалена емисијата на овие соединенија [21].

Јаглерод диоксид (CO_2)

Јаглерод диоксидот не претставува загадувач, но главниот проблем кој се поврзува со емисијата на CO_2 е неговата улога и влијание во глобалните и локалните климатски промени, како директен причинител на глобалното затоплување односно глобалното покачување на просечната температура [22]. Јаглеродниот диоксид се создава при согорување на фосилните горива, при што јаглеродните атоми од горивото се сврзуваат со кислородот од оксидаторот (воздухот) и го формираат соединението јаглерод диоксид. Се проценува дека 15% од вкупните количини на CO_2 кои произлегуваат од човечките активности се резултат на согорување на горивата во моторите СВС [23].

Емисијата на CO_2 во атмосферата како резултат на процесот на согорување зависи од содржината на јаглерод во фосилните горива и од количеството гориво кое се согорува. Ова значи дека со зголемување на потрошувачката на гориво, се зголемува и емисијата на CO_2 во издувната емисија. Иако дизел горивото содржи повеќе јаглерод отколку бензинот, емисијата на CO_2 од дизел-моторите е помала од онаа на бензинските мотори што се должи на поголемата ефикасност на дизел-моторите и условите под кои се изведува процесот на согорување (високиот степен на компресија и работа на моторот со сиромашни смеси).

2.2.2 ЕУРО стандарди за количеството на загадувачки материи во издувната емисија на возилата

Во периодот помеѓу 1990 и 2009 година, емисијата на гасови од патниот сообраќај кои придонесуваат кон ефектот на стаклена градина во Европската унија се зголемила за 27%, со што уделот на патниот сообраќај во вкупната емисија на гасови кои придонесуваат кон ефектот на стаклена градина пораснал од 12% на 17% [24]. Веќе во 2020 година, оваа вредност изнесувала близу 20% [25]. Потребата за контролирање на емисијата на загадувачки материи како и нејзиното намалување е од особен интерес во последните децении, а со таа цел се развиени повеќе стратегии кои директно би влијаеле на ограничување и намалување на емисијата на овие материи како и такви кои би го зголемиле квалитетот на животната средина. Сите стратегии чија цел е намалување на загадувањето од мобилните извори во основа се потпираат на два концепти:

- Намалување на интензитетот на патниот сообраќај односно намалување на бројот на возила преку зголемување на ефикасноста при транспортот, промоција на алтернативни средства за превоз како и зголемување на ефикасноста и атрактивноста на јавните урбани транспортни системи; и
- Контрола, односно намалување на емисијата на загадувачки материи од моторите СВС преку поставување на максимални гранични вредности кои производителите на различните видови на возила треба да ги задоволат уште во производниот процес.

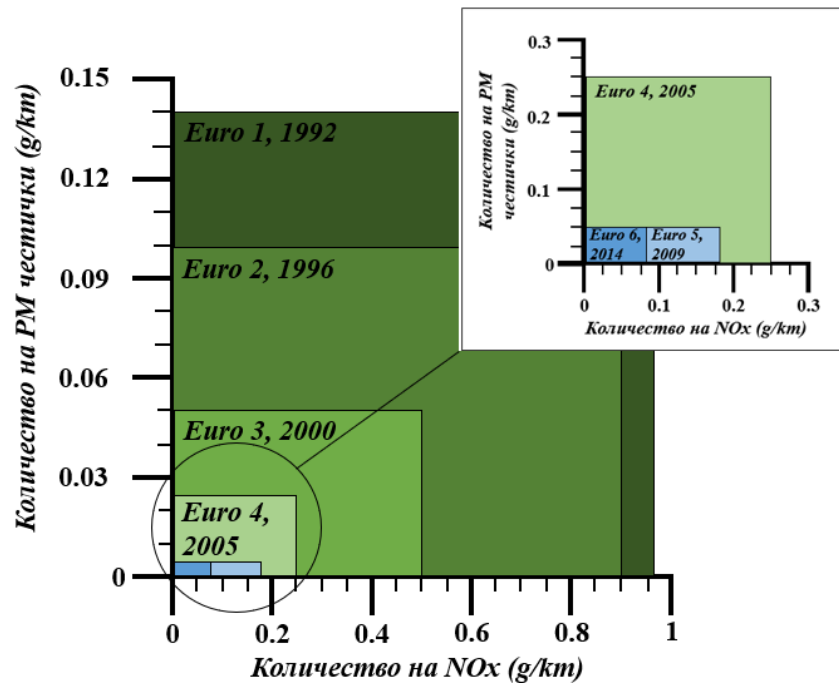
Емисијата на загадувачките материи од мобилните извори е контролирана од стандарди на емисија кои во Европската унија постојат од седумдесетите години на минатиот век, а самите стандарди се подоцна именувани во ЕУРО стандарди на емисија на загадувачки материи, кои денес ги контролираат и регулираат емисиите на азотните оксиди (NO_x), јаглеводородите (HC), јаглерод монооксидот (CO), јаглерод диоксидот (CO₂) и цврстите честички (PM) кои без разлика на својата димензија се ставени во една група [26-27].

Табела 2-1 ЕУРО стандарди на емисија за дизел патнички автомобили (g/km)

ЕУРО стандард на емисија	CO (g/km)	THC (g/km)	NMHC (g/km)	NO _x (g/km)	HC+NO _x (g/km)	PM (g/km)
<i>Дизел</i>						
<i>Euro 1</i>	2.72 (3.16)	-	-	-	0.97 (1.13)	0.14 (0.18)
<i>Euro 2</i>	1.00	-	-	-	0.70	0.08
<i>Euro 3</i>	0.64	-	-	0.50	0.56	0.05
<i>Euro 4</i>	0.50	-	-	0.25	0.30	0.025
<i>Euro 5</i>	0.500	-	-	0.180	0.230	0.005
<i>Euro 6</i>	0.500	-	-	0.080	0.170	0.005

Овие ЕУРО стандарди ги опфаќаат сите видови на возила погонувани од мотор СВС кои се учесници во сообраќајот поделени според неколку категории: мотоцикли, патнички автомобили, лесни товарни возила, тешки товарни возила, минибуси и

автобуси. Во многу држави низ светот, продажбата на возила е овозможена единствено доколку возилата ги исполнуваат ЕУРО стандардите на емисија пропишани со соодветните закони и правилници. Кај лесните моторни возила емисиите на загадувачки материи се изразуваат како маса на загадувачки материи за поминат пат (g/km), додека пак кај тешките возила количеството на емисија е изразено во однос на искористената енергија (g/kwh) [28]. Максималните гранични вредности за дизел патничките автомобили и тешките товарни возила за секој ЕУРО стандард имплементиран во дадена година се дадени во Табела 2-1 и Табела 2-2 [29].



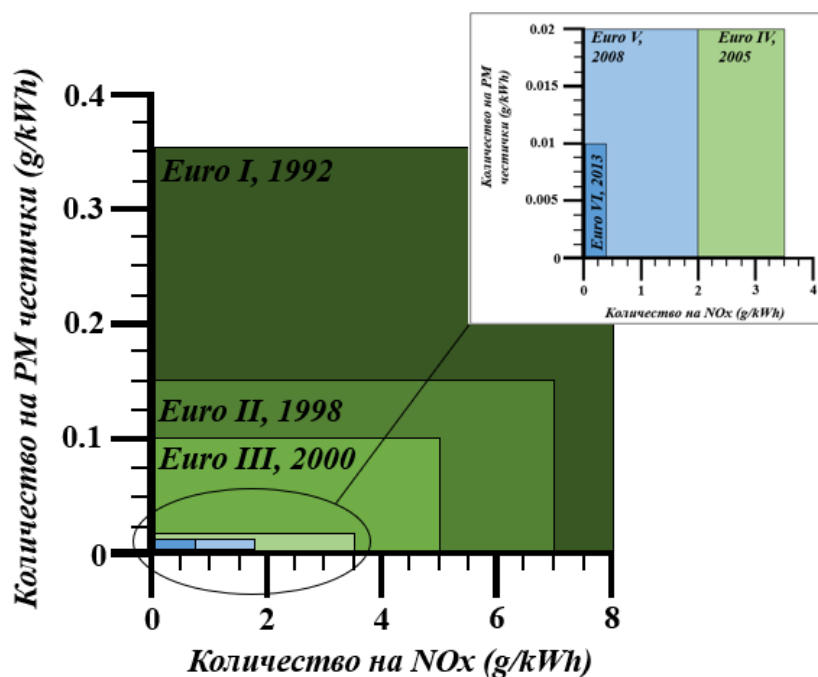
Слика 2-5 ЕУРО стандарди на емисија за дизел патнички автомобили

Табела 2-2 ЕУРО стандарди на емисија за тешки товарни возила (g/kWh)

ЕУРО стандард на емисија	CO (g/kWh)	HC (g/kWh)	NOx (g/kWh)	PM (g/kWh)
Euro I	4.5	1.1	8.0	0.612
	4.5	1.1	8.0	0.36
Euro II	4.0	1.1	7.0	0.25
	4.0	1.1	7.0	0.15
Euro III	1.0	0.25	2.0	0.02
	2.1	0.66	5.0	0.10/0.13
Euro IV	1.5	0.46	3.5	0.02
Euro V	1.5	0.46	2.0	0.02
Euro VI	1.5	0.13	0.4	0.01

Во моментот е на сила ЕУРО 6 стандардот на емисија, што значи дека сите новопроизведени возила мора да ги исполнуваат емисионите норми утврдени со овој стандард, а се до воведувањето на ЕУРО 7 стандардот на емисија околу 2025 година [30]. Како дел од целите на Европскиот зелен договор, во насока на намалување на

негативното влијание на патниот транспорт врз животната средина особено кога станува збор за емисијата на стакленички гасови и загадувачи, е и развојот на новата предлог регулатива, со која во целост ќе биде опфатен ЕУРО 7 стандардот на емисија [31]. Согласно проценките на Европската унија, до 2035 година, ЕУРО 7 стандардот на емисија ќе придонесе за намалување на количеството на NOx од лесните патнички и комерцијални возила за 35%, и од тешките товарни возила за 56% споредено со ЕУРО 6 стандардот. Во исто време, количеството на PM честички би се намалило за 13% од лесните патнички и комерцијални возила, и за 39% од тешките товарни возила. Кога станува збор за емисијата на CO₂, целите на ЕУ за 2035 година се намалување на количеството на овој гас на стаклена градина за цели 100% кај лесните патнички и комерцијални возила [31].



Слика 2-6 ЕУРО стандарди на емисија за тешки товарни возила

Испитувањата на емисиите на загадувачки материи кај возилата од патниот сообраќај се врши по претходно утврдени тестови кои имаат за цел да ја симулираат реалната возна состојба и однесување на моторот и возилото. Овие тестови се разликуваат по видот на возилата кои се испитуваат, па така, за лесните патнички и комерцијални возила чија маса не надминува 3500 килограми се користи менлив циклус кој содржи забрзување, забавување, промена на степенот на пренос како и промена на оптоварувањето. Новиот европски возен циклус (анг. New European Driving Cycle - NEDC) е еден таков тест кој се применувал од 1997 до 2018 година, додека по 2018 година, за утврдување на количествата на различните материи во издувната емисија на лесните патнички и комерцијални возила се користи Светскиот хармонизиран тест за лесни возила (анг. Worldwide harmonized light vehicles test procedure – WLTP) чиј пандан за тешки товарни возила е Светскиот хармонизиран тест и сертификација за тешки товарни возила (анг. Worldwide harmonized heavy-duty certification – WHTC).

2.2.3 Третман на издувната емисија

Дизел-моторите во минатото имале примена главно во специјални машини, тешки товарни возила и секаде онаму каде била потребна голема робусност и моќност, и долг животен век во сложени услови на експлоатација. Меѓутоа, со развојот на технологиите за кои веќе стана збор погоре, се намалувал габаритот на дизел-моторите, што водело кон зголемување на нивното присуство во патничките возила. Дополнително, кон крајот на деведесеттите години очите на пошироката експертска јавност биле силно вперени кон глобалното затоплување и ефектите кои ги има емисијата на CO_2 како гас на стаклена градина. Во прв момент, количеството CO_2 кое го емитираат дизел-моторите е значително помало од нивниот најсилен конкурент - бензинскиот мотор, па природно ова било дополнителен стимул за потенцијалните сопственици да се одлучат за возило погонувано од дизел-мотор [32].

Но, помеѓу недостатоците на дизел-моторите е емисијата на значајни количини загадувачи во амбиенталниот воздух, па во насока на намалување на локалното загадување се направени големи напори и истражувања со цел доаѓање до оптимални решенија или унапредување на технологијата за третман на издувните гасови од дизел-моторите.

Каталитички конвертор

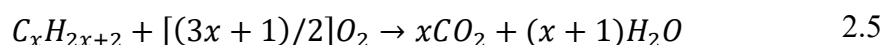
Каталитичкиот конвертор е уред кој врши неутрализација на штетните компоненти на издувните гасови од моторите. Во неговата структура е содржан катализатор кој предизвикува хемиска реакција во која штетните нуспродукти од согорувањето низ процес на хемиска трансформација се претвораат во помалку токсични супстанции [33]. Историски гледано, најпрво се користеле едностепени конвертори кои вршеле комбинирање на јаглерод моноксид (CO) и несогорени јаглеводороди (HC) за добивање на јаглерод диоксид (CO_2) и вода (H_2O).

Едностепениот каталитички конвертор уште се нарекува оксидациски катализатор. Тој извршува 2 важни функции:

- Оксидирање на јаглерод моноксидот (CO) до јаглерод диоксид (CO_2), хемиски процес кој се одвива според равенката:



- Оксидација на несогорените јаглеводороди (HC) до јаглерод диоксид (CO_2) и вода (H_2O), опишана со равенката:



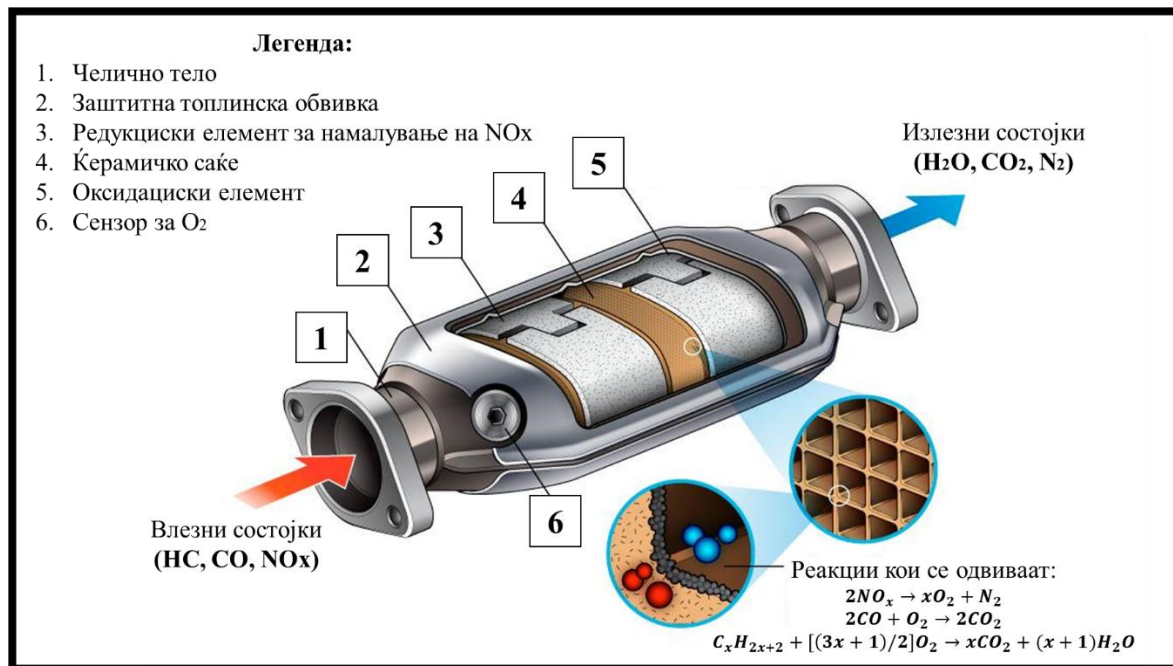
Овој тип на катализатор се употребува кај дизел-моторите за неутрализација на HC и CO . За да може катализаторот да функционира потребно е во издувниот систем да се доведе дополнително количество воздух, бидејќи кислородот од смесата гориво – воздух не е доволен. Но, со доведување поголемо количество воздух, се зголемува

присуството на NO_x . Редукцијата на NO_x се врши со двостепен катализатор кој денес масовно се употребува. Двостепениот катализатор врши:

- Редукција на азотните оксиди (NO_x) на азот (N_2) и кислород (O_2):



и повторно, оксидација (догорување) на CO до CO_2 согласно равенката 2.4 и оксидација на несогорените јаглеродороди до CO_2 и H_2O согласно равенката 2.5.



Слика 2-7 Двостепен каталитички конвертор [34]

Овие каталитички конвертори функционираат со повеќе од 90% ефикасност, скоро целосно го елиминираат мирисот на дизел и помагаат да се намали количеството на цврсти честички, саѓи и црн чад.

Селективна каталитичка редукција и Азотно-оксидна стапица

Од поновите технологии за намалување на количеството на азотни оксиди во издувната емисија на дизел-моторите, силно комерцијално присуство има селективната каталитичка редукција (анг. Selective Catalytic Reduction - SCR). SCR системите остваруваат трансформација на азотните оксиди во нетоксичен азот и водена пара во катализатор кој користи амонијак како средство за редукција [35]. Бидејќи амонијакот е опасна супстанција, неговата употреба во патниот транспорт е ограничена, а комерцијалните возила користат нетоксичен, безмирисен 32,5% раствор на уреа (познат под комерцијалното име AdBlue). Управувачката единица на моторот управува со дозирањето на уреа-растворот во протокот на топли издувни гасови. Под влијание на високата температура на издувните гасови, растворот на уреа се разложува на амонијак и јаглерод диоксид. Амонијакот потоа реагира со азотните оксиди за да формира слободен азот и водена пара.

Филтер за цврсти честички

Издувните гасови од дизел-моторите содржат големи количества на саѓи и цврсти честички кои најчесто се составени од елементарен јаглерод. Катализаторот не го трансформира елементарниот јаглерод, што значи дека единственото решение за прочистување на овие честички е со примена на метод на филтрација [36]. Филтерот на цврсти честички (анг. Diesel Particulate Filter – DPF) се вградува во издувната гранка на моторот и е изработен со внатрешна изведба на филтерска решетка која го присилува издувниот гас низ минералните ѕидови на решетката, притоа заробувајќи ги цврстите честички со успешност од 85% до близу 100% (при одредени услови) [37].

Со нивното воведување делумно се елиминира емисијата на црн чад карактеристичен за возилата со дизел-мотори. Со цел да се исфилтрира поголемото количество од цврстите честички, како и хемиските соединенија штетни за животната средина, DPF-филтрите се користат заедно со други елементи од системот за третман на издувните гасови, т.е. оксидациски катализатори. CRT системот (анг. Continuously Regenerative Technology) претставува комбинација од оксидациски катализатор и филтер за цврсти честички.

2.3 Карактеристични системи

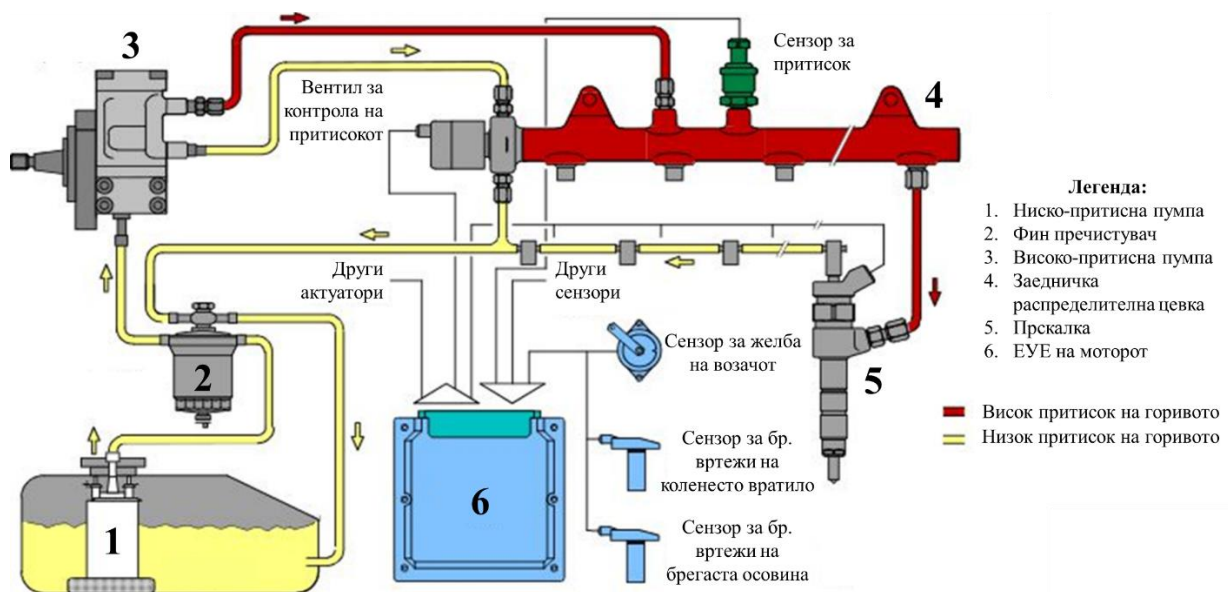
Важно е да се посвети повеќе внимание на конструкцијата на современите дизел-мотори од аспект на електронски-управуваните потсистеми и компонентите карактеристични за нив, чие присуство води кон намалување на потрошувачката на гориво, подобрување на перформансите на моторот ширум оперативниот опсег на брзини и оптоварувања и намалување на штетната емисија.

2.3.1 „Common rail“ систем за довод на гориво и создавање на смеса

Во 1996 година, по долги години истражување и развој „FIAT-AUTO“ го дизајнирале и ставиле во сериско производство првиот „common rail“ мотор во светот чиј систем за довод на гориво и создавање на смесата со впрскување е целосно електронски управуван. Моторот е претставен на јавноста во 1997 година во автомобилот „Алфа Ромео, модел 156“, а благодарение на овој систем за високо-притисно впрскување на горивото кој заедно со турбополначот и ладилникот на свежо полнење придонесува кон подобрување на економичноста, перформансите и реакцијата на самиот автомобил согласно желбата на возачот, започнува експанзијата на дизел-моторите на европскиот пазар.

Доколку буквално се преведе англискиот израз „common rail“, името на оваа изведба на системот за довод на гориво и создавање на смеса кај дизел-моторите, би гласело систем со заедничка распределителна цевка (шина). Од самиот назив може да се заклучи дека станува збор за цилиндрична изведба која служи како резервоар за висок притисок на горивото кое потекнува од електронски-управуваната, високо-притисна пумпа. Притоа, кон оваа заедничка распределителна цевка се поврзани одводи на гориво, кои водат до секој од цилиндрите на моторот (односно до секоја од прскалките од системот за довод на гориво и создавање на смеса).

Главната предност на овој систем за довод на горивото е што овозможува менување, обликување и прилагодување на притисокот, моментот и времетраењето на впрскување на гориво во просторот за согорување, независно од бројот на вртежи на моторот (што како принцип на работа е карактеристичен за постарите изведби на механички високо-притисни пумпи) [38]. Тоа се постигнува благодарение на независната функција на високо-притисната пумпа од прскалките за гориво. Главните делови на „common rail“ изведбата на системот за довод на гориво (слика 2-8) се: пумпа за низок притисок (1), фин пречистувач (2), пумпа за висок притисок (3), заедничка распределителна цевка (4), прскалки (5) и електронска управувачка единица на моторот (6).



Слика 2-8 „Common rail“ изведба на систем за довод на гориво кај дизел-мотор

Високо-притисната пумпа е наменета за компримирање на горивото под постојано висок притисок (од околу 1600 bar) во заедничката распределителна цевка. Притисокот на горивото во цевката се регулира со помош на вентил за контрола на притисокот, при што евентуалниот вишок од горивото повторно се одведува и враќа во резервоарот. Бројот на прскалки соодветствува на бројот на цилиндри на моторот. Најновите генерации на „common rail“ системи (почнувајќи од 2003 година) наместо прскалки кои функционираат на принципот на електромагнетна индукција, користат прскалки со пиезо-елементи кои од конструкциски аспект имаат значително помала маса, помало абење на внатрешните компоненти и подолг животен век. Од аспект на функцијата, пиезо-прскалките имаат побрз одзив на активацискиот сигнал и благодарение на тоа овозможуваат повеќефазно впрскување на гориво (дури до 5 впрскувања во еден циклус). Предностите кои произлегуваат од нивната употреба подразбираат пораст на моќноста на моторот за околу 7%, намалена штетна издувна емисија за дури 20% и помала потрошувачка на гориво од 3% [39].

Најпосле, успешната работа на секој од компонентите на системот за довод на гориво и создавање на смеса и целиот систем воопшто, во целост зависи од

електронската управувачка единица на моторот која постојано извршува пресметки за моментот на впрскување на горивото, количеството на впрскано гориво (времетраење на впрскувањето) и висината на притисокот во распределителната цевка. Влезни параметри во овие пресметки се податоците кои пристигнуваат од сензорите за состојбата на моторот (температури, притисоци, итн.) како и податоци за оптоварувањето на моторот и моменталното работно подрачје (број на вртежи, вртежен момент, итн.).

2.3.2 Турбополнач со варијабилна геометрија и ладилник на полнењето

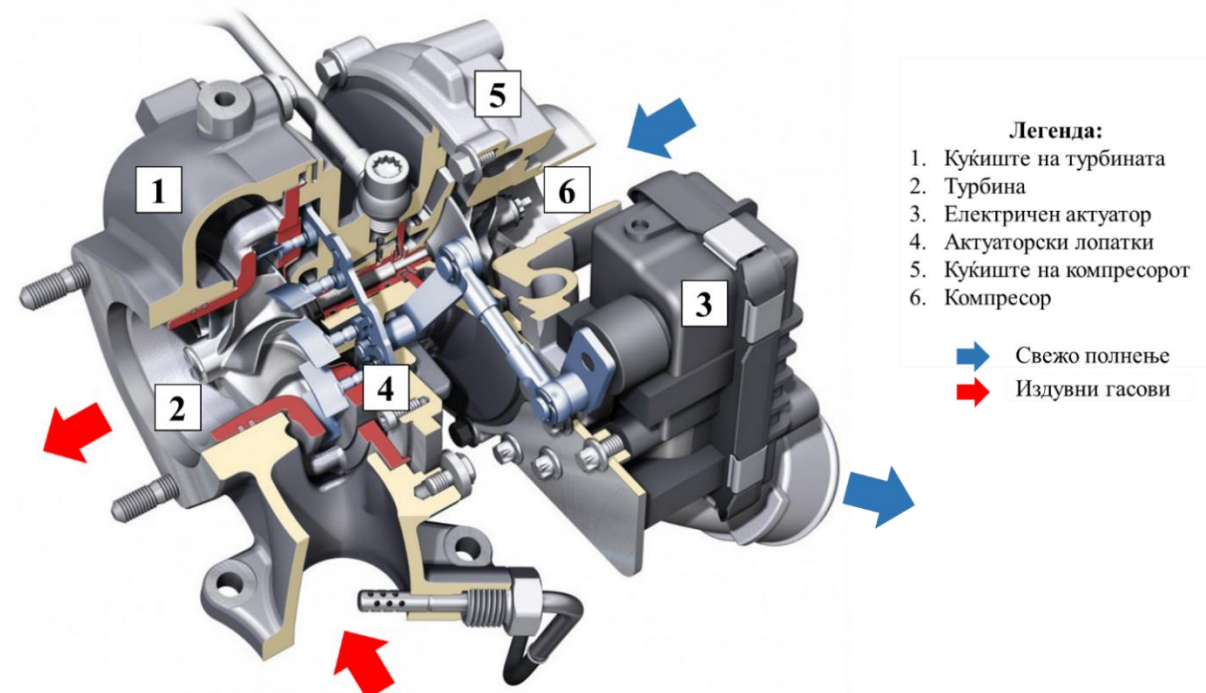
Коефициентот на полнењето зависи од густината на свежото полнење. Заради тоа практичен и едноставен начин на зголемување на моќноста на моторот е да се зголеми количеството на свежото полнење со зголемување на неговата густина, што може да се постигне со компримирање на свежото полнење со додатен компресор вклучен во системот за преполнување. Преполнувањето кај современите дизел-мотори се остварува со примена на систем со турбополнач (или турбокомпресор) со погон со гасна турбина. Кај овој систем, компресорот кој врши преткомпресија е погонуван од гасна турбина која ја троши неискористената енергија на издувните гасови кои излегуваат од цилиндарот со одреден притисок и температура, со што се подобрува економичноста на моторот.

Кај дизел-моторите денес главно се користат две нивоа на преполнување, со среден и висок притисок на преполнување, додека преполнувањето со низок притисок своја примена главно наоѓа кај ОТО моторите. Со пораст на притисокот на преполнување се зголемуваат и механичките и термичките оптоварувања кои стануваат ограничувачки фактор на примената на преполнувањето бидејќи ги смалуваат ефектите од преполнувањето (заради загревање на полнењето зад компресорот се смалува неговата густина). За да се подобрат ефектите од преполнувањето потребно е меѓуладење на полнењето. Тоа се постигнува со вградување на ладилници помеѓу компресорот и системот за полнење на моторот, така што на влезот во моторот полнењето има значително пониска температура. Притоа, за ист притисок на преполнување, се зголемува коефициентот на полнењето, а со него и моќноста и економичноста на моторот.

Карактеристична за современите дизел-мотори е примената на турбополначи со варијабилна геометрија (анг. Variable-geometry turbocharger – VGT) кои овозможуваат подобар (побрз) одговор согласно желбата на возачот. Кај оваа изведба на турбополначот, притисокот на полнење се регулира со помош на актуаторски склоп кој се состои од лопатки способни за менување на аголот на прострујување со што го регулираат количеството на проток на издувните (погонски) гасови кон турбината и благодарение на тоа се менува брзината на турбополначот. Управувањето со аголот на прострујување на актуаторските лопатки е овозможено со помош на пневматски или електричен актуатор, а благодарение на управувачкиот сигнал кој потекнува од електронската управувачка единица (ЕУЕ) на моторот.

Придобивките од присуството на VGT турбополначот се чувствуваат долж целиот работен опсег на брзини на моторот. Со цел поголем вртлив момент при

пониските брзини на работа, потребен е повисок притисок на преполнување. Во овие услови на работа, актуаторските лопатки се поставуваат така што го смалуваат напречниот пресек на протокот на издувните гасови кон турбината што доведува до поголема брзина на прострујување на издувните гасови. На овој начин е избегната таканаречената „турбо дупка“ бидејќи резултатот е поголема брзина на турбополначот и пораст на притисокот на преполнување, па возачот не чувствува пад во моќноста при пониските брзини на работа на моторот.



Слика 2-9 VGT турбополнач [40]

При повисоки брзини на работа, актуаторските лопатки ослободуваат поголем напречен пресек на проток на издувните гасови, за успешно да се прифати поголемото количество на издувни гасови кои се производ на работата на моторот. Притоа, се постигнува потребниот притисок на преполнување, без истиот да биде надминат, што го заштитува моторот од позначителни механички оптоварувања.

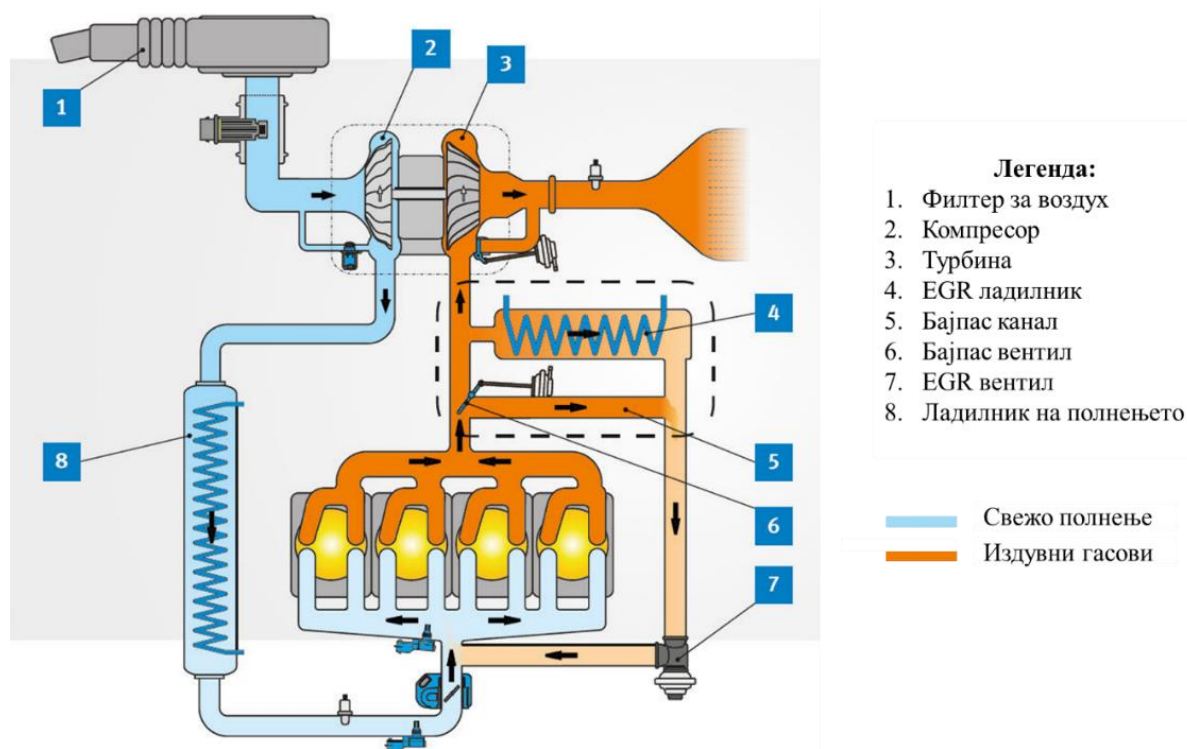
2.3.3 Систем за рецикулација на издувните гасови со ладилник

Присуството на систем за рецикулација на издувните гасови (анг. Exhaust Gas Recirculation System – EGR) кај современите дизел-мотори е предодрено исклучиво од потребата за намалување на издувната емисија на азотни оксиди. Големите брзини на одвивање на согорувањето и хетерогената природа на смесата во цилиндрите на моторот, во одредени случаи доведуваат до појава на т.н. „џебови“ во просторот за согорување кои се богати со кислород. На местата од овие кислородни џебови се јавуваат локални температурни екстреми кои надминуваат 2200 K. Ваквото согорување води кон позначителен удел на NOx во вкупната издувна емисија.

EGR системот овозможува повраток на дел од издувните гасови од изминатиот циклус во моторот како дел од полнењето во новиот циклус. Издувните гасови кои се

однесуваат инертно, со своето присуство значително го намалуваат количеството на кислород во цилиндарот. Притоа, целосно се задоволува потребата во цилиндарот сеуште да има доволно количество на кислород за впрсканото гориво целосно да согори, а фронтот на пламенот е поширок, што води кон намалување на брзината на согорување. Малата брзина на согорување за последица има намалена температура на согорувањето ($< 2200\text{ K}$) и намалено количество на NO_x .

Иако постојат две изведби на EGR системот, изведбата со висок притисок (наспроти онаа со низок притисок) значително почесто се применува, а се состои од следните компоненти (слика 2-10): EGR вентил (7), EGR ладилник (4) и бајпас вентил (6) поставени така што дел од издувните гасови од гранката за полнење, пред турбината (3) се издвојуваат кон EGR вентилот, а потоа и кон гранката за полнење каде се мешаат со свежото полнење.



Слика 2-10 Поврзаноста на EGR системот со моторот [41]

Уделот на количеството издувни гасови во свежото полнење зависи од разликата во притисоците кои владеат во гранката за празнење и гранката за полнење, односно од положбата на EGR вентилот кој е пневматски или електронски управуван. За воопшто да се оствари повраток на издувните гасови, притисокот во гранката за празнење мора да биде повисок од оној во гранката за полнење што кај лесните дизел-мотори е случај во скоро сите режими на работа. Единствено при мало оптоварување на моторот, оваа состојба се постигнува со присуството на бајпас вентил (кој исто така е електронски управуван) со кој се премостува протокот на издувните гасови за да се оствари потребната разлика во притисоците.

Со цел подобрување на ефикасноста на EGR системот во процесот на намалување на количеството на NOx, издувните гасови кои се одведуваат назад кон гранката за полнење потребно е да се изладат, што се постигнува со присуството на EGR ладилник (8). Со ладењето на издувните гасови, температурата на смесата од издувните гасови и свежото полнење е значително пониска. На овој начин се спречува појава на температури над 2200 K за време на согорувањето. При ладен старт, а до постигнување на работната температура на моторот, како и при работа на моторот со мали оптоварувања, EGR ладилникот целосно се исклучува од системот премостувајќи го токот на издувните гасови со помош на уште еден електронски управуван вентил.

2.3.4 Електронски систем за управување со работата на моторот

Карактеристично за работата на современите дизел-мотори е правовремено електронско управување со процесите во моторот што води кон негова помирна работа, но уште поважно и поголема економичност и моќност ширум оперативниот опсег на брзини и оптоварувања, како и помали количества на штетна издувна емисија. Електронскиот систем за управување со моторот ги обединува сите останати потсистеми со цел нивна уедначена работа, а се состои од бројни сензори, актуатори и централна електронска управувачка единица (EUE).

Поважните сензори се: сензор за позиција на папучата за гас (сензор за желба на возачот), сензор за број на вртежи на брегастата осовина, сензор за број на вртежи на коленестото вратило, сензор за апсолутен притисок во гранката за полнење, сензор за температура на воздухот во гранката за полнење, сензор за температура на моторот (температура на течноста за ладење), сензор за температура на издувните гасови, сензор за температура на горивото во нископритисниот вод, сензор за притисок во заедничката распределителна цевка, сензор за масен проток на воздухот во гранката за полнење, и др.

Актуатори со кои управува EUE се: електричната ниско-притисна пумпа за гориво, магнетскиот вентил за дозирање на гориво во високо-притисната пумпа, стартерот на моторот, EGR вентилот, вентилот за проток на издувните гасови кон EGR ладилникот, модулот за греачи на горивото, прскалките за гориво, електромагнетниот вентил за управување со позицијата на клапната за воздух во гранката за полнење, актуаторските лопатки на VGT турбополначот, вентилаторот на ладилникот на моторот, и др.

EUE, преку влезниот модул, врши прием, анализа и обработка на влезните сигнали од сензорските склопови. Потоа, врз основа на управувачките површини (фазил-логички мапи зачувани во меморијата на EUE), управувачката единица брзо ги процесира влезовите од сензорите и како излез испраќа сигнал до актуаторите за промена на нивната положба за да се задоволат потребите на возачот и моќта која треба да ја испорача моторот, но и еко-нормите кои треба да ги исполнува, и секако тоа да се исполни со оптимална потрошувачка на гориво. Во исто време EUE на моторот комуницира со податочната магистрала на возилото и останатите негови системи.

2.4 Развојни тенденции на возилата и нивните погонски агрегати

2.4.1 Присуство на Дизел-моторите на пазарот со возила

Периодот од 1996 до 2016 година во Европа со право би можел да се нарече „златна“ ера на дизел-моторот бидејќи во целата своја историја од нешто повеќе од еден век, дизел-моторот нема доживеано споредлива популарност и финансиски успех [39]. Во 2005 година, тогашниот главен инженер за развој на „FIAT“, г-динот Риналдо Ринолфи, за германскиот научно-популарен магазин „ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift“ изјавил дека очекува продажен „бум“ на возилата погонувани од дизел-мотори во наредните десет години (до 2015 година) по што главно заради засилената еколошка легислатива и стандарди за количеството на штетни соединенија во издвнната емисија на возилата (ЕУРО 5 стандардот на емисија кој требало да стапи на сила во 2009/10 година и ЕУРО 6 во 2014/15 година), бројот на новопродадени возила со дизел-мотор повторно ќе се придвижи во надолна линија [42].

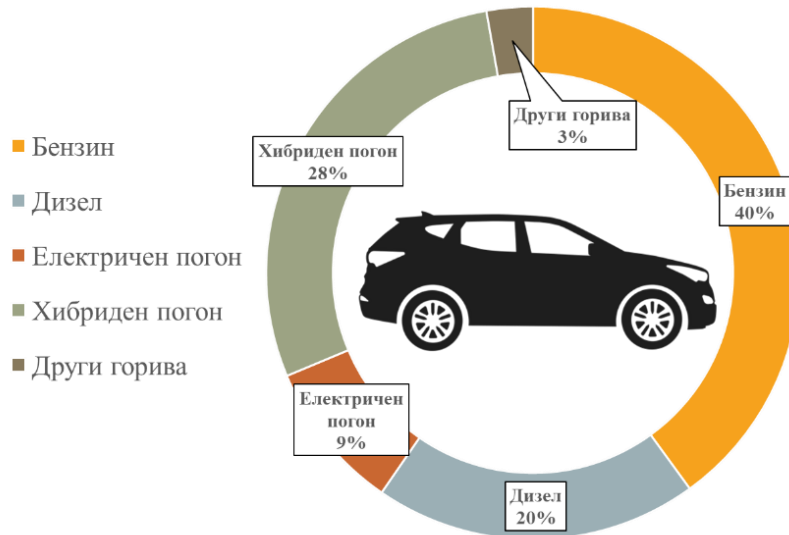
Денес интензивно се работи на исполнување на ригорозните лимити за штетната издвнна емисија кои веќе ги предвидува ЕУРО 7 еколошкиот стандард за лесни патнички и комерцијални возила (иако треба да стапи на сила во 2025 година) и се инвестираат огромни финансиски средства во развојот на нови технологии, системи и компоненти кои би воделе кон намалување на количеството на NOx и PM честички како последен предизвик во контролата и намалувањето на штетната издвнна емисија на дизел-моторите. Овие инвестиции водат до изразено зголемување на разликата во цената помеѓу возилата погонувани од дизел-мотор и оние кои користат ОТО, односно бензински мотор како погонски агрегат.

Токму затоа, просечното учество на дизел-моторите во патничките автомобили и лесните комерцијални возила во земјите на Европската унија во 1996/1997 година изнесувало 25%, а веќе во 2015/2016 година оваа бројка достигнала над 50%. Дополнително, во периодот опфатен од оваа временска рамка, во некои од Европските земји, како на пример Австрија, Луксембург, Белгија и Франција, уделот на дизел-моторите во сегментот на патнички возила надминувал 70% [39]. Но денес статистиката говори дека електричните возила стабилно продираат на пазарот на патнички и лесни комерцијални возила и тоа главно на сметка на патничките возила кои претходно користеле дизел-мотор [43-44]. Од процентот на новопродадени патнички возила за 2021 година (слика 2-11), само 19.6% биле погонувани од дизел-мотор, со тенденција овој процент да продолжи да опаѓа во годините кои следуваат [45].

Меѓутоа кога станува збор за тешките комерцијални возила (слика 2-12), ситуацијата е дијаметрално спротивна, бидејќи таму возилата погонувани од дизел-мотор го земаат високото прво место со 95.8%, што претставува огромна маргина во поглед на сите останати погонски варијанти [46]. Ваквиот податок не изненадува, бидејќи вртливиот момент, моќноста, ефикасноста и изразено подолгиот животен век кои се карактеристични за дизел-моторите ги прави погодни за примена кај тешките комерцијални возила (камиони и влекачи), специјалните машини, градежната

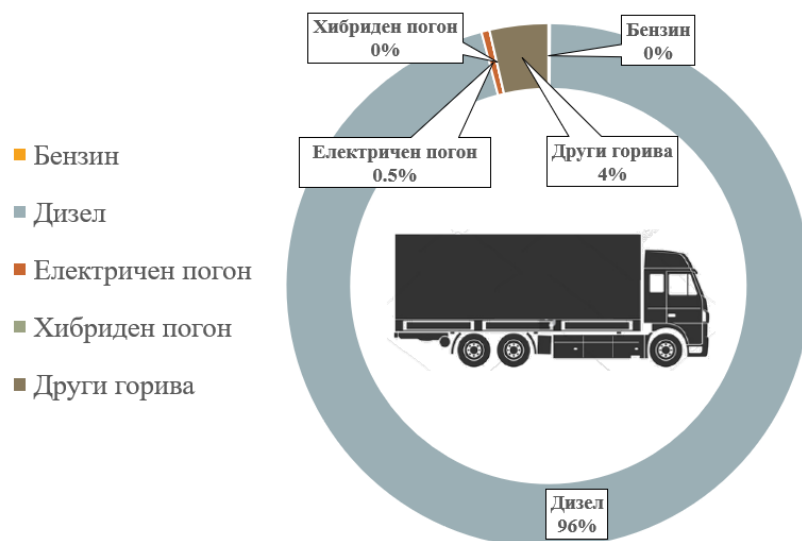
механизација, и транспортните средства кои се употребуваат во железницата (како локомотивите) и во поморскиот сообраќај (товарните бродови и танкерите).

Удел на различните погонски варијанти на пазарот за патнички возила за 2020/21 г.



Слика 2-11 Удел на различните погонски варијанти на пазарот за лесни патнички возила за 2020/21 година [45]

Удел на различните погонски варијанти на пазарот за тешки комерцијални возила за 2020/21 г.



Слика 2-12 Удел на различните погонски варијанти на пазарот за тешки комерцијални возила за 2020/21 година [46]

Согласно овие податоци и според сите проекции за составот на возните паркови на моторни возила во Европа и светот, моторите СВС, а меѓу нив и дизелите, со сигурност нема скоро да заминат надвор од употреба. Тоа пак значи дека ќе се задржат

и најголем дел од недостатоците кои се поврзани со нивната употреба, а пред се способноста да загадуваат [3-4].

2.4.2 Алтернативни горива и погонски технологии

Бројни студии укажуваат на тоа дека моторот СВС во двете најпродавани изведби: погонувани од бензин или дизел гориво, безмалку подеднакво придонесуваат кон влошување на последиците од глобалното затоплување и дополнително водат кон загадување и намалување на квалитетот на воздухот [47]. Токму затоа, најпрво меѓународните регулаторни тела, а потоа и самата автомобилска индустрија, засилено се обидуваат да ја поттикнат продажбата на возила кои се карактеризираат со мал габарит на погонскиот агрегат и мала потрошувачка на гориво, возила кои комбинираат две погонски варијанти како електричен и мотор СВС, односно хибриди или возила со целосно електричен погон. Со оглед на тоа што зависноста од фосилните горива на подолг рок дополнително ќе ја усложни употребата на моторите СВС како од финансиски, така и од аспект на заштита на животната средина, во иднина (во помал или поголем број) би можеле да зборуваме за употребата на следните алтернативни горива: течен нафтен гас (LPG), течен природен гас (LNG), компримиран природен гас (CNG) и биогорива (BIO); и неколку погонски изведби: возила со целосно електричен погон (BEV), електрични возила со пантограф (CAT), хибридни возила кои овозможуваат полнење од мрежа (PHEV) и возила со горивни ќелии (FCEV) [47].

Истражувањето поврзано со употребата на овие алтернативни горива и погонски технологии е во подем, па заклучоците од анализата на нивните предности и недостатоци, како и потенцијалните последици врз животната средина сеуште не се дефинитивни. Согласно наодите од изданието „Енергетски перспективи“ на Exxon Mobil од 2014 година [48], кои се потврдуваат и во поновите изданија на „енергетските перспективи“ на BP (во минатото познат како British Petroleum) [49], бројот на возилата во една држава ќе расте согласно порастот на бруто-домашниот производ. Понатаму, во Глобалните транспортни сценарија на Светскиот енергетски совет (анг. World Energy Council), се говори за две главни насоки на развој на автомобилската индустрија до 2050 година [50], а со тоа и на возните паркови од патнички возила:

1. Пазарно сценарио - во преден план ги става побарувањата на потрошувачите, и предвидува дека светскиот возен парк на патнички возила ќе се состои од 89% возила кои се погонувани од мотор СВС, додека само 6% од возилата би имале делумно или целосно електричен погон, или пак би биле погонувани од горивни ќелии, 5% припаѓаат на останатите погонски или горивни варијанти;
2. Регулативно сценарио – предвидува дека светскиот возен парк во 2050 година ќе биде многу разноврстен и само 26% од возилата ќе бидат погонувани од мотор СВС (19% со бензински мотор и 7% со дизел-мотор), а 44% ќе имаат делумно електричен погон (хибриди); 16% целосно електричен погон; и 14% за сите останати погонски варијанти (од кои најголем дел се возила кои користат природен гас како погонско гориво).

Важна напомена кон развојот на овие две сценарија е тоа што се осмислени пред да стапи на сила забраната за производство на патнички возила со мотор СВС по 2035

година, донесена од страна на Европската унија [51]. Меѓутоа, регулативното сценарио води сметка за појавата на легислатива со која ќе се охрабри и стимулира сопствеништвото на возила со делумно или целосно електричен погон, како и легислатива со која ќе се ограничи производството на возила погонувани од мотор СВС.

Сепак, производството и подоцна присуството на делумно или целосно електричните возила на светските патишта треба да се земе со резерва бидејќи литиумските батерии, горивните ќелии и високо-ефикасните електрични мотори иако делуваат ветувачки [50] се исклучително скапи, контроверзна е достапноста на ретките материјали кои се користат за нивно производство, а емисиите за време на целиот животен циклус на електричните возила сеуште се високи. Исто така, треба да се има предвид дека овие напредни погонски технологии нема во исто време ниту пак во исти количини да допрат до различните пазари за патнички возила што главно се должи на финансискиот јаз помеѓу нив. Така на пример, дури и ако во земјите од Западна Европа до 2050 година бројот на возила со мотор СВС го следи регулативното сценарио и значително се намали, благодарение на финансискиот јаз, во земјите од Западен Балкан, ваквите промени ќе доцнат со околу десетина години, а може и подолго во останатите помалку развиени делови од светот [53].

2.5 Референци

[2-1] K. Mollenhauer & H. Tschoeke (2010) Handbook of Diesel Engines. Springer. Doi: 10.1007/978-3-540-89083-6

[2-2] N. Manev, D. Dimitrovski, E. Nikolov, et al. (2021) Evaluation of the air pollution impact of heavy goods, diesel driven vehicles, along the A1 highway in North Macedonia, IJEES, Volume 11/4 <https://doi.org/10.31407/ijeess11.426>

[2-3] J. J. Michalek, M. Chester, P. Jaramillo, et al. (2011) Valuation of plug-in vehicle life-cycle air emissions and oil displacement benefits. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America

[2-4] C. W. Tessum, J. D. Hill, J. D. Marshall (2014) Life cycle air quality impacts of conventional and alternative light-duty transportation in the United States. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America

[2-5] Air Quality Expert Group (2019) Report to the Department for Environment, Food and Rural Affairs; Scottish Government; Welsh Government; and Department of the Environment in Northern Ireland, on non-exhaust emissions from road traffic. Available at: https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat09/1907101151_20190709_Non_Exhaust_Emissions_typeset_Final.pdf

[2-6] N. Hooftman (2018) A review of the European passenger car regulations – Real driving emissions vs local air quality. Renewable Sustainable Energy Rev. 86

[2-7] P. S. Fedotov, M. S. Ermolin, V. K. Karandashev & D. Ladonin (2014) Characterization of size, morphology and elemental composition of nano-, submicron, and micron particles of

street dust separated using field-flow fractionation in a rotating coiled column. *Talanta* 130. pp. 1-7

[2-8] L. Jin, C. Braun, J. Miller and C. Buysse (2021) Air quality and health impacts of heavy-duty vehicles in G20 economies. *The International Council on Clean Transportation*

[2-9] V. S. Petrovic (2008) Particulate matters from diesel engine exhaust emission. *Thermal Science Journal*. Volume 12 (2). pp. 183-198

[2-10] Institution of Mechanical Engineers (2013) *Internal Combustion Engines: Performance, Fuel Economy and Emissions* – Woodhead Publishing

[2-11] A. U. Dharmadhikari (2020) Particulate matter emissions characteristics, dynamics and control in compression ignition engines. Doctoral thesis. Department of Mechanical Engineering. University of Birmingham

[2-12] J. Sharaf (2013) Exhaust Emissions and Its Control Technology for an Internal Combustion Engine. *International Journal of Engineering Research and Applications*. Volume 3, No. 4 – 2013

[2-13] K. Vaaraslahti, J. Ristimäki, A. Virtanen, J. Keskinen, B. Giechaskiel & A. Solla (2006) Effect of oxidation catalysts on diesel soot particles. *Environmental science & technology*, 40, pp. 4776-4781

[2-14] D. G. Penney (2007) *Carbon Monoxide Poisoning*. CRC Press

[2-15] H. N. Gupta (2012) *Fundamentals of Internal Combustion Engines*. PHI Learning

[2-16] R. Klimisch (2012) *The Catalytic Chemistry of Nitrogen Oxides*. Springer Science & Business Media

[2-17] E. N. Ramsden (1996) *Chemistry of the Environment* – Nelson Thornes

[2-18] S. Webb (2008) Research Needs Associated with Particulate Emissions at Airports. *Transportation Research Board*

[2-19] V. Ganesan (2008) *Internal combustion engines*. McGraw-Hill Education (India) Pvt Ltd.

[2-20] P. Tata, J. Witherspoon & C. Lue-Hing (2016) *VOC Emissions from Wastewater Treatment Plants: Characterization, Control and Compliance*. CRC Press

[2-21] R. Friedrich & S. Reis (2013) *Emissions of Air Pollutants: Measurements, Calculations and Uncertainties*. Springer Science & Business Media

[2-22] Y. Luo & H. A. Mooney (1999) *Carbon Dioxide and Environmental Stress*. Academic Press

[2-23] G. W. Koch & J. Roy (1995) *Carbon Dioxide and Terrestrial Ecosystems*. Academic Press

- [2-24] K. Lindqvist (2012) Emission standards for light and heavy road vehicles. Air Pollution & Climate Secretariat Sweden
- [2-25] European Environmental Agency (2022) Greenhouse gas emissions from transport in Europe. Available online: <https://www.eea.europa.eu/ims/greenhouse-gas-emissions-from-transport>
- [2-26] DieselNet (2023) Emission standards: Summary of worldwide engine and vehicle emission standards. Available online: <https://dieselnet.com/standards/>
- [2-27] TNO Science and Industry (2005) Euro 5 technologies and costs for Light-Duty vehicles. Netherlands Organization for Applied Scientific Research
- [2-28] European Commission (2013) The Future of Vehicle Emissions Regulation in the EU and Internationally
- [2-29] European Commission (2016) EU Climate Action Road transport: Reducing CO₂ emissions from vehicles
- [2-30] S. S. Gill (2012) Controlling Diesel NO_x & PM Emissions Using Fuel Components and Enhanced Aftertreatment Techniques - Developing The Next Generation Emission Control System. Doctoral Thesis. University of Birmingham
- [2-31] European Commission (2022) Proposal of a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on type-approval of motor vehicles and engines and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles, with respect to their emissions and battery durability (Euro 7). Available online: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_6495
- [2-32] A. Fayyazbakhsh, M. L. Bell, X. Zhu, X. Mei, M. Koutný, N. Hajinajaf and Y. Zhang (2022) Engine emissions with air pollutants and greenhouse gases and their control technologies. *Journal of Cleaner Production* 376 (2022) 134260
- [2-33] J. Gao, G. Tian, A. Sornioti, A. E. Karci and R. Di Palo (2019) Review of thermal management of catalytic converters to decrease engine emissions during cold start and warm up. *Applied Thermal Engineering Journal* 147 (2019) pp. 177-187
- [2-34] Cars.com (2023) Catalytic Converter. Service & Repair: Glossary. Available online: <https://www.cars.com/auto-repair/glossary/catalytic-converter/>
- [2-35] P. S. Sadashiva (2018) A Review on Selective Catalytic Reduction (SCR)-A Promising Technology to mitigate NO_x of Modern Automobiles. *International Journal of Applied Engineering Research*. 13 (1). pp. 5-9
- [2-36] H. Al-Thani, M. Koç, C. Fountoukis and R. J. Isaifan (2020) Evaluation of particulate matter emissions from non-passenger diesel vehicles in Qatar. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 70 (2)
- [2-37] T. Nash (2003) Diesels: The Smoke is clearing. *Motor* Vol. 199 (5). Hearst Business Publishing Inc.

- [2-38] Y. H. Teoh, H. G. How, C. G. Peh, T. D. Le and H. T. Nguyen (2020) Implementation of Common Rail Direct Injection System and Optimization of Fuel Injector Parameters in an Experimental Single-Cylinder Diesel Engine. *Processes* 2020, 8, 1122; Doi: 10.3390/pr8091122
- [2-39] M. Sjekavica (2009) Modeliranje i regulacija modernog dizleskog motora s turbonabijanjem, Master Thesis. University of Zagreb
- [2-40] X-engineer (2023) Variable Geometry Turbocharger. X-engineer.org. Available online: <https://x-engineer.org/variable-geometry-turbocharger-vgt/>
- [2-41] Rheinmetall (2023) Cooled exhaust gas recirculation - Function and application. Available online: <https://www.ms-motorservice.com/en/technipedia/post/cooled-exhaust-gas-recirculation/>
- [2-42] R. Rinolfi (2005) Diesel – Boom 2015 wieder zu Ende. *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift*. ATZ 5/2005, pp. 367
- [2-43] McKinsey & Company (2014) Electric Vehicles in Europe: Gearing up for a new phase. Technical Report.
- [2-44] A. C. Askin, G. E. Barter, T. H. West, and D. K. Manley (2015) The heavy-duty vehicle future in the United States: a parametric analysis of technology and policy tradeoffs. *Energy Policy* 81, pp. 1–13
- [2-45] ACEA (2021) Fuel types of new passenger cars in the EU. European Automobile Manufacturers Association <https://www.acea.auto/figure/fuel-types-of-new-passenger-cars-in-eu/>
- [2-46] ACEA (2021) Fuel types of new trucks. European Automobile Manufacturers Association. Available at: <https://www.acea.auto/figure/trucks-eu-fuel-type/>
- [2-47] N. Manev, D. Dimitrovski, Z. Markov & V. Iliev (2021) Environmental footprint of the Heavy goods vehicles of the future, *Proceedings of the International Conference on Ecosystems*. Tirana, Albania
- [2-48] ExxonMobil (2014) Outlook for Energy 2014. ExxonMobil Corporation Analysis
- [2-49] BP (2023) BP Energy Outlook 2023 Edition. BP energy Economics
- [2-50] World Energy Council (2011) Global Transport Scenarios 2050. World Energy Council
- [2-51] K. Abnett (2023) EU lawmakers approve effective 2035 ban on new fossil fuel cars. Reuters. Available online: [https://www.reuters.com/business/autos-transportation/eu-lawmakers-approve-effective-2035-ban-new-fossil-fuel-cars-2023-02-14/#:~:text=EU%20lawmakers%20approve%20effective%202035%20ban%20on%20new%20fossil%20fuel%20cars,-By%20Kate%20Abnett&text=BRUSSELS%2C%20Feb%202014%20\(Reuters\),vehicles%20and%20combat%20climate%20change](https://www.reuters.com/business/autos-transportation/eu-lawmakers-approve-effective-2035-ban-new-fossil-fuel-cars-2023-02-14/#:~:text=EU%20lawmakers%20approve%20effective%202035%20ban%20on%20new%20fossil%20fuel%20cars,-By%20Kate%20Abnett&text=BRUSSELS%2C%20Feb%202014%20(Reuters),vehicles%20and%20combat%20climate%20change)

[2-52] M. Contestabile, G. Offer, R. Slade, F. Jaeger, and M. Thoennes (2011) Battery electric vehicles, hydrogen fuel cells and biofuels. which will be the winner? *Energy & Environmental Science*. Volume 4 (10) pp. 3754–3772

[2-53] OECD (2021) *OECD: Competitiveness in Southeast Europe 2021: A Policy Outlook, Competitiveness and Private Sector Development*. OECD Publishing, Paris

3 Литературен преглед на претходни релевантни научни истражувања

Ова поглавје има за цел:

- темелна анализа на релевантната научна литература која се однесува на категоризацијата на термодинамичките модели на мотор, со предностите и недостатоците на секој од различните видови;
- анализа на употребата на регресионото моделирање и методите на статистичка регресија како сегмент од моделот на мотор СВС кој може успешно да ја долови динамиката на процесот на согорување во моторот, без притоа да ги зголеми процесирачките побарувања на самиот модел, а со посебен акцент на користењето на напредни технологии како длабоко учење и вештачки невронски мрежи; и
- да овозможи увид во сложеноста на моделирањето на издувната емисија и научните пристапи за решавање на предизвикот соодветно да се претстават количествата на различните гасни компоненти и цврсти честички во издувната емисија на моторот.

На самиот крај од ова поглавје:

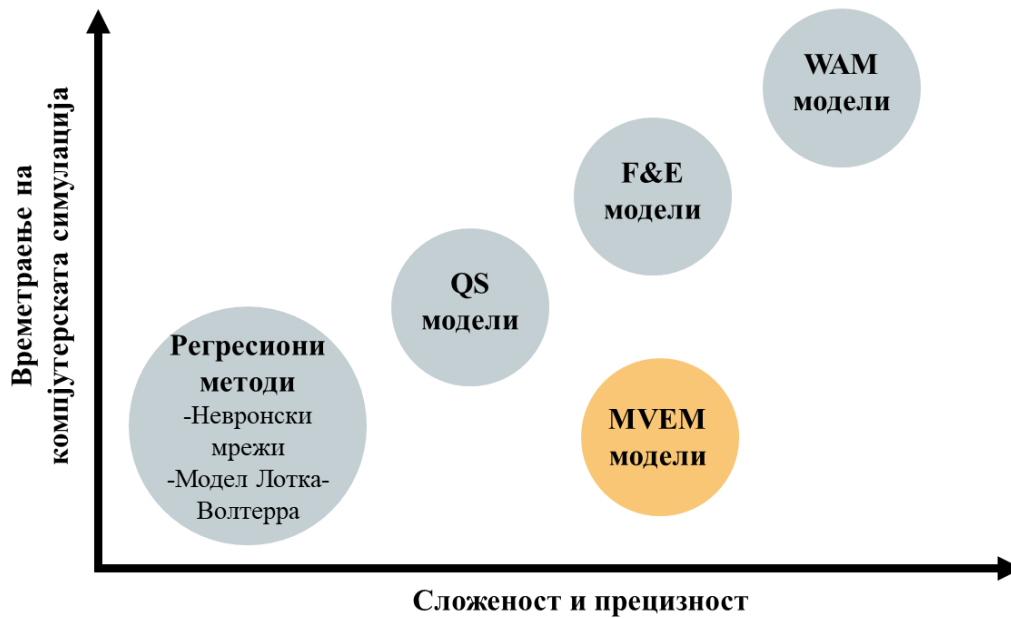
- даден е краток осврт на алатките за тестирање на моторите СВС и изучување на процесот на калибрација заради оптимизирање на работните параметри на моторот како и потребата од нив.

3.1 Модели на мотор СВС – Предности и недостатоци

Во литературата се споменуваат три категории на термодинамички модели на мотор СВС, а начинот на кој е направена категоризацијата во преден план ја става сложеноста на моделот и времето потребно за реализација на компјутерската симулација со овој модел, односно захтевноста на моделот за поголеми процесирачки ресурси или процесорска моќ [1-2]. Овие три категории подразбираат:

- Квази-стационарни модели на моторот (од англ. Quasi-steady или QS engine models);
- Модели на полнење и празнење (од англ. Filling-and-emptying или F&E engine models), а уште познати и како 0-димензионални модели; и
- Модели на бранова активност или модели на масен проток (од англ. Wave-action engine models или WAM), а за кои се користи и терминот 1-димензионални модели на мотор.

Редоследот по кој се наведени моделите воедно се однесува и на прогресивноста во нивното ниво на сложеност, прецизност и процесирачките побарувања [3-4]. Дополнително, во слика 3-1 е прикажан токму компромисот помеѓу сложеноста на моделот и способноста да се доловат поситни детали од работата на моторот наспроти времетраењето на компјутерската симулација, кое пак е резултат на процесирачките побарувања на самиот модел.



Слика 3-1 Компромис сложеност/времетраење на компјутерската симулација за различните модели на мотор СВС

На сликата 3-1 не се наведени CFD моделите (од англ. Computational Fluid Dynamics) кои се изработуваат во посебен софтвер за 3-димензионално моделирање и се убедливо најпрецизната категорија од сите претходно наведени модели. Овие модели бараат исклучително голема процесорска моќ што ги прави непогодни за намената на напредниот модел на современ дизел-мотор предвиден со оваа докторска теза која подразбира интеграција на моделот во софтверската алатка за тестирање и калибрација на мотор СВС, а за која е важно симулациите да се одвиваат во реално или близу реално време.

„The thermodynamics and gas dynamics of internal-combustion engines“ на Horlock & Winterbone, 1986 [4] претставува врвно техничко дело од областа на термодинамиката и моторите СВС и како такво во него се содржани детални примери за равенствата со кои може да се опише секој од трите претходно споменати категории на модели. Квази-стационарните модели се убедливо наједноставни, затоа што целосно ги занемаруваат промените во притисокот и температурата во текот на работниот циклус на моторот. Но, за да се надомести за малата прецизност, кон моделот се додаваат емпириски податоци со што значително се подобрува прецизноста, без притоа да се зголемат процесирачките побарувања. QS моделите уште се нарекуваат и „модели на стационарна состојба“ што значи дека динамичкото однесување на моторот како систем би можело да се долови со користење на некаква преносна функција. Вообичаено равенствата со кои се дефинираат QS моделите се целосно емпириски, или пак комбинација од стационарни и емпириски (равенство 3.1), а поретко само стационарни.

$$\dot{m}_{tr} = \frac{\sigma \eta_v \rho_3 V_s N_f}{\left(1 - \frac{1}{r}\right) 60} \quad 3.1$$

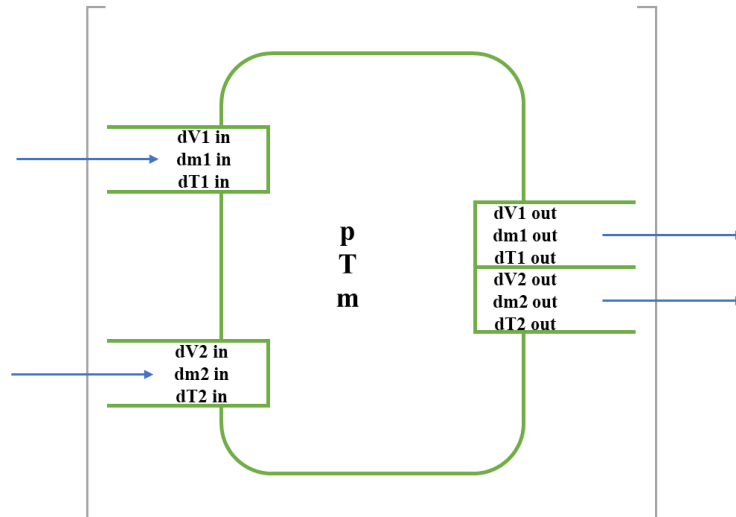
Во оваа равенство за масениот проток \dot{m}_{tr} , со η_v е означена волуметриската ефикасност на моторот (ефикасност на полнење).

Кај квази-стационарните модели на моторот, најголемиот дел од константите се изведуваат емпириски или пак се пресметуваат со помош на лук-ап табели. Впрочем, таков е случајот со QS моделот наведен во референцата [5] каде ефикасноста на полнење (равенство 3.2) се пресметува со помош на емпириски-изведените константи a , a_1 и a_2 , кои зависат од бројот на вртежи на моторот (N).

$$\eta_v = a + a_1 N + a_2 N^2 \quad 3.2$$

Моделите на полнење и празнење се одликуваат со повисок степен на прецизност отколку квази-стационарните системи. F&E моделите го третираат моторот како збир од повеќе засебни волумени (за гранката за полнење, цилиндрите или просторот за согорување и гранката за празнење), па соодветно секој од овие волумени е дефиниран со засебно равенство.

Концептот на полнење и празнење со кој е дефинирана оваа категорија на модели на мотор СВС предвидува размена на маса, топлина и енергија помеѓу работните волумени на моторот, а единствениот недостатокот е во тоа што моделот сеуште не ги предвидува промените во притисокот и температурата во секој од работните волумени [6]. На сликата 3-2 е прикажан F&E концептот за еден работен волумен.



Слика 3-2 Концептот за принципот на Полнење и Празнење [7]

Според [4] овој тип на модели би биле соодветен избор за споредба на мотори со иста зафатнина, а различна големина на компресор и турбина како компоненти на турбополначот, со цел да се дознае која комбинација би дала најдобар резултат во работата на предметниот мотор како поголема ефикасност, економичност, моќност и сл. Примерот покажува дека оваа категорија на модели се погодни за употреба во ситуации каде е поважно да се запазат причинско-последичните односи помеѓу влезните и излезните параметри на моторот, без притоа да се бара особено ниво на прецизност или

пак да се испитуваат нестационарни состојби при работата на моторот. Притоа, процесирачките побарувања на моделот сеуште се доволно ниски за да се добие релативно кратко времетраење на компјутерската симулација.

Овие две категории на модели се имплементирани во поткатегијата термодинамички модели на средна вредност (анг. Mean-value engine model – MVEM) во кои волуменот на просторот на согорување се дефинира со едноставни, емпириски изведени равенства, со целосна примена на термодинамичките закони [8-9]. MVEM моделите мошне успешно ги доловуваат сите фундаментални карактеристики на нестационарните состојби на моторот и динамиката на струење на воздухот, односно работниот флуид во работните волумени на моторот [10]. Слично како и F&E моделите, нивниот единствен и воедно најголем недостаток е тоа што не овозможуваат да се претстават промените на притисокот и температурата во работните волумени [3].

Со напредокот во компјутерски-помогнатото проектирање (анг. computer aided design), моделирањето и симулацијата на работата на моторите СВС се водечки алатки за воведување иновации во развојот на новите мотори. Меѓу софтверските пакети за симулација - MATLAB/Simulink често се користи за математичко моделирање на автомобилски системи [11]. Архитектурата на MATLAB и нејзината палета на алатки меѓу кои и Powertrain Blockset дозволува блоковите на системите на моторот да се поврзат на физички репрезентативен начин во работната околина Simulink, со што значително се намалува времето на изработка на моделот. Притоа секој модел на одреден систем комуницира со моделите на останатите системи благодарение на меѓусебната врска помеѓу нив [12]. Тоа го прави софтверот MATLAB особено погоден за 0D и во помала мера 1D моделирање. Согласно [13], резултатите добиени со симулацијата може да се искористат за да се добијат доволно добри и издржани проценки за перформансите на моторот.

Следното ниво на сложеност и воедно прецизност при претставувањето на нестационарните состојби на моторот може да се постигне со примена на моделите на бранова активност, но само под претпоставка дека процесирачките побарувања не претставуваат пречка за функционирањето на компјутерската симулација. Како пример за примената на оваа категорија на модели може да се разгледува гранката за празнење на моторот чиј дизајн и изведба сериозно влијаат на перформансите на моторот и затоа моделирањето на овој потсистем бара повисоко ниво на прецизност [4].

Во научно-истражувачката работа на [14] се споменуваат WAM модели изработени во програма кодирана во FORTRAN, чија прецизност позитивно се истакнува, но секогаш без исклучок се посочува дека времетраењето на процесирање на моделот при компјутерската симулација е исклучително долго, особено со прогресивното зголемување на сложеноста на моделот. Сепак, овој факт треба да се земе со резерва, бидејќи трудот иако претставува врвно референтно научно дело, имаат поминато безмалку 20 години од неговото објавување, а компјутерската технологија значително има напреднато, така што предизвиците кои постоеле тогаш, се делумно надминати.

WAM моделите се состојат од голем број на подволумени или зони, а општото равенство кое се користи за да се дефинираат односите во системот измоделиран како WAM модел е [4]:

$$\sum \left(\frac{dQ}{dt} \right)_n - \sum \left(P \frac{dV}{dt} \right)_n = \sum \left(\frac{d(me)_n}{dt} \right) + h_{out} \left(\frac{dm}{dt} \right)_{out} - h_{in} \left(\frac{dm}{dt} \right)_{in} \quad 3.3$$

Со равенството 3.3 одлично се доловува енергетскиот биланс помеѓу вкупниот број на зони (n) во некоја област од моторот, за една временска итерација dt . Кога би ги споредиле ова и равенството 3.1, веднаш доаѓа до израз сложеноста со која работат WAM за разлика од QS моделите.

Софтверите кои зачестено се користат за 1D моделирање на моторите CBC денес како оние на Ricardo (Wave), AVL (AVL Boost или iceSUITE) и Gamma Technologies (GT-Power) и се сметаат за водечки во областа нудат богата резолуција и голема деталност на симулацијата. Сепак, согласно наодите на [15-17] и иако во голема мера зависи од комплексноста на моделот, покрај зголемената процесорска моќ на компјутерите, како и алатките за паралелно процесирање (анг. parallel computing), времетраењето на компјутерската симулација користејќи некој од овие модели останува премногу долго, но со тенденција на намалување и доближување до реално време.

Најпосле, референцата [6] одлично ги сумира наодите за сложеноста, прецизноста и процесирачките побарувања на трите категории на модели во табелата 3-1. Критериумите кои авторите ги користат за да ги споредат различните категории на модели се: сложеност, увид во динамиката на функционирање на моделираниот систем, времетраење на компјутерската симулација и приспособливост на моделот. Секој од овие критериуми придонесува кон тоа подобро да се разберат доверливоста, прецизноста и процесирачките побарувања на моделот. Кога станува збор за димензионалноста, таа се однесува на способноста на моделот да долови набљудување на масениот проток на работниот флуид во 0, 1 или 3 димензии, при што CFD моделите за кои и претходно беше спомнато служат за изработка на најсложените и најпрецизните модели за претставување на целосниот работен циклус на моторот.

Во референцата [18] детално е прикажан процесот на изработка на 0-димензионален, MVEM модел на мотор CBC. Притоа, авторот максимално посветено ги анализира предностите и недостатоците и ја валидира оваа поткатегија на модели, давајќи увид во методите кои се применети. Моделот целосно ги занемарува промените во температурата, притисокот, испарувањето на горивото, мешањето на воздухот и горивото во еден работен флуид и состојбата на не-еквилибриум во системот, при што резултатите повторно се со завидно ниво на прецизност, додека процесирачките побарувања остануваат минимални. Споредбено со сите останати категории на модели, компромисот прецизност/процесирачки побарувања е најизбалансиран кај MVEM моделите и токму затоа оваа поткатегија на модели претставува одлична солуција за управувањето и калибрацијата на моторот со помош на модел [8-9].

Table 3-1 Споредба на различните категории на модели на мотор СВС [6]

	QS модели	F&E модели	WAM	3D (CFD) Модели
Сложеност	Мала	Мала	Висока	Многу висока
Увид во динамиката на функционирање на системот	Мал	Умерен	Умерен	Темелен
Времетраење на симулацијата	Занемарливо	Кратко	Долго	Многу долго
Приспособливост	Мала	Умерена	Умерена (кон мала)	Мала

Имајќи го предвид изложеното, MVEM моделот е најпогоден за изработката на напреден модел на современ дизел-мотор СВС согласно побарувањата на оваа докторска теза.

3.2 Регресионо моделирање

Во статистиката, регресијата претставува метод на моделирање кој вообичаено се користи кога едната случајна променлива произлегува од другата. Ова подразбира дека регресионите модели може да се користат за предвидување трендови од конкретно податочное множество, кои понатаму може да се користат самостојно како веродостојна претстава за системот од кој потекнуваат.

Од домашната литература „Веројатност и статистика за инженери“ од Чакмаков, 2015 [19] дава увид во соодветната терминологија од областа статистика и дополнително посветува цело поглавје на регресионата анализа. Ова дело служи како добар вовед во методите кои ги опфаќа регресионата анализа, при што се наведени сосема доволен број на примери кои успешно ги доловуваат предностите на овој принцип на моделирање.

Референцата [20] исто така е одлично дело од областа регресија и регресионо моделирање каде авторот едноставно, а сосема ефективно ги опишува начелата кои важат за методите на регресија, притоа самиот референцирајќи бројни релевантни дела од научната област статистика. Во оваа референца е идентификувана појавата на претренирање при изработката на регресиониот модел, како негативна појава која би можела да води кон слаби перформанси на моделот и покрај тоа што коефициентот на детерминација (R^2)¹ помеѓу основното и новокреираното податочное множество може да има висока вредност. Практично, тоа значи дека моделот ја губи способноста да претстави или препознае карактеристично однесување во други податочни множества различни од она со кое бил трениран.

¹ Се користи за оценка на соодветноста на регресиониот модел (Чакмаков, 2015)

3.2.1 Алатка за калибрација со помош на модел на MATLAB

Калибрацијата со помош на модел и подесувањето на работните променливи во процес на менување на фази-логичките мапи нуди примамливи можности за оптимизирање на работата на моторот, со што би можело да се постигне контролирана и намалена емисија на локални загадувачи и стакленички гасови, односно подобрена еколошка карта на моторот [21]. Алатката за калибрација со помош на модел на MATLAB (ориг. MATLAB's Model-based Calibration Toolbox, MBC Toolbox) претставува корисно помагало кое многу успешно може да се користи при менаџирањето со податочните множества за потребите на регресионата анализа и тоа чија примена се однесува на моторите СВС [11].

Регресионите модели достапни во MBC алатката се потпираат на употребата на преносни функции и вклучуваат полиномни модели, модели базирани на радијално базни функции (анг. Radial Basis Function – RBF, се користи и терминот функција на радијална основа), хибридни модели и модели со примена на невронска мрежа (модел на машинско учење). Помошната документација на MATLAB [22] содржи доволно податоци за тоа како најефективно може да се искористи алатката при калибрацијата на мотор СВС користејќи регресионен модел. Кон оваа документација, на официјална веб-страница се достапни и голем број на вебинари и готови предмети кои ги доближуваат можностите на алатката до корисниците.

Како пример за полезноста на алатката за калибрација, [23] користи метод на регресија со кубен полином (анг. third grade cubic polynomial regression method) за одредување на специфичната потрошувачка на гориво на дизел-мотор СВС, кога единствените познати променливи потекнуваат од условите на работа на моторот. Соодветното равенство е запишано во формата подолу:

$$\hat{b}_e = \hat{a}_1 + \hat{a}_2 Tq + \hat{a}_3 N + \hat{a}_4 TqN + \hat{a}_5 Tq^2 + \hat{a}_6 N^2 + \hat{a}_7 TqN^2 + \hat{a}_8 Tq^3 + \hat{a}_9 N^3 + \hat{a}_{10} Tq^2N \quad 3.4$$

Во конкретниот случај, терминот \hat{a}_n се однесува на коефициентите од кубниот полином кој се користи како метод на регресија. Грешката (разликата) помеѓу вака креираниот регресионен модел и реалната, ефективната специфична потрошувачка на гориво изнесувала 10 g/kWh, или околу 5%.

Во референцата [24] е опишан процес на калибрација со помош на повеќедимензионален, линеарен регресионен модел (анг. multimodels) кој се одвива во MBC алатката при што се користат два влезни параметри (вртлив момент и брзина на моторот) и околу нив се дизајнира статистички експеримент. Вредноста на трудот е во тоа што многу темелно ги опишува постапките кои претходат на успешното креирање на статистичкиот експеримент, притоа демонстрирајќи голем дел од функционалностите на алатката. Дополнително, во [25] авторите ја имаат користено MBC алатката во своите калибрациски испитувања за намалување на количеството на CO во издвнната емисија на предметен мотор и велат дека истата значително го намалува времетрањето на процесот на калибрација.

3.2.2 Модел на Лотка-Волтера

Со осврнување на литературата каде повеќе внимание е посветено на примената на регресиона анализа при моделирањето на мотор СВС, најголем дел од насловите укажуваат на тоа дека моделот на Лотка-Волтера и моделот на машинско учење со невронска мрежа враќаат најпрецизни резултати. Па така, во студијата [26], моделот на Лотка-Волтера се користи за моделирање на динамичкиот одговор на мотор СВС за емисиите на NOx со помош на 6 влезни параметри. Авторите во [27] исто така предлагаат користење на моделот на Лотка-Волтера за претставување на емисиите на NOx и тоа при ладен старт, при загревање и при услови на достигната работна температура на моторот. Во референцата [28], моделот на Лотка-Волтера успешно се користи за моделирање на потрошувачката на гориво и емисијата на CO₂ при согорување на фосилни горива за потребите за производство на електрична струја.

Во [29] е направена споредба на неколку нелинерани методи за динамичко моделирање на емисиите на HC и NOx, каде невронската мрежа на повеќеслоен перцептрон (анг. Multi-layer perceptron – MLP) и моделот на Лотка-Волтера демонстрираат најмали грешки, заедно со Hammerstein-Wiener моделот. Анализата направена во рамките на овој труд придонесува кон создавањето на подобра претстава за тоа кои методи на регресиона анализа се најсоодветни за предвидување на динамичките услови на работа на мотор СВС. Од предложените методи за регресиона анализа, најнеповолни резултати се добиени од моделот базиран на RBF функција.

Главната причина зошто моделот на Лотка-Волтера е поценет и попривлечен од моделите базирани на RBF функцијата па дури и оние со примена на невронска мрежа се неговите мемориски кернели. Подолу е прикажан временски-зависен ред на Волтера со кернели од n -ти ред, каде со tn е претставено временското задоцнување [30]:

$$y(t) = K_1x(t) + K_2x^2(t) + K_3x^3(t) + \dots + K_nx^n(t) \quad 3.5$$

$$y(t) = H_1[x(t)] + H_2[x(t)] + H_3[x(t)] + \dots + H_n[x(t)] \quad 3.6$$

$$H_n[x(t)] = \int \dots \int h_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)x(t - \tau_1)x(t - \tau_2) \dots x(t - \tau_n)dt_1dt_2 \dots dt_n \quad 3.7$$

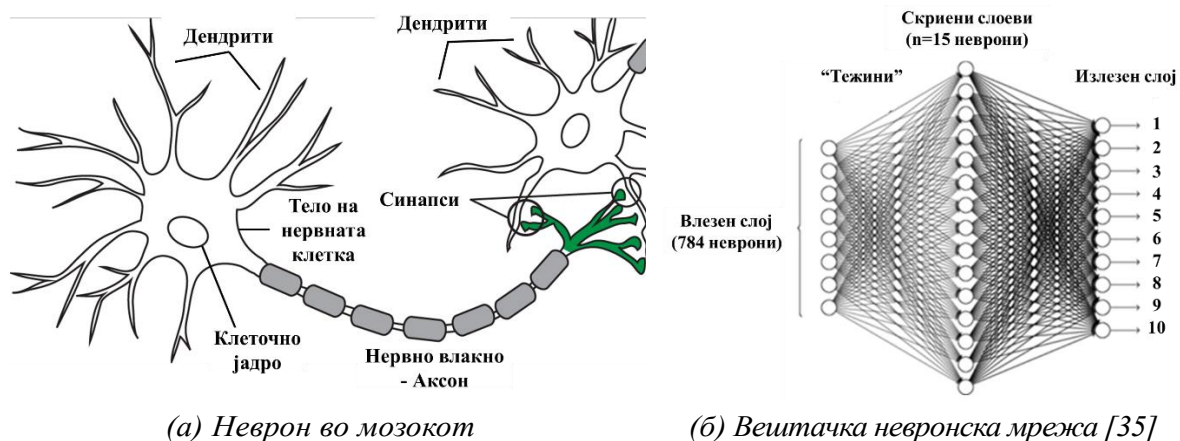
Од равенството 3.7 може да се забележи дека и задоцнување со најмала вредност може да влијае на прецизноста и претренирањето на моделот. Во споредба со полиномниот регресионен модел, моделот на Лотка-Волтера нуди дополнителна димензија која произлегува од неговите временски константи.

Во референците [31-32] е дискутирана погодноста на моделот на Лотка-Волтера од аспект на управувањето со помош на модел, а од нивните заклучоци произлегува консензусот дека помеѓу посилните предности на овој вид на моделирање е и краткото времетраење на симулацијата.

3.2.3 Модел на машинско учење (Регресија со повеќеслоен перцептрон)

Невронската мрежа на повеќеслоен перцептрон е посочен како метод на регресија кој успешно може да се користи за моделирање и калибрација на нестационарните состојби на моторот од повеќе автори [33-34]. Невронските мрежи кои функционираат на принципот на повеќеслоен перцептрон овозможуваат регресија онака како што невроните предаваат информации во човечкиот мозок (слика 3-3а). Преносот на податоци од еден на друг неврон се остварува преку тенки влакна наречени дендрити, а понатаму податокот, во форма на кумулативен електричен сигнал минува долж аксонот (нервно влакно) и остварува синапса (функционална врска) со невроните од околината, на овој начин предавајќи го сигналот (податокот) на соседните неврони [35].

Слично, вештачката невронска мрежа (анг. Artificial Neural Networks - ANNs) се состои од повеќе слоеви, каде секој неврон прима податоци од одреден број на влезови. Притоа, на секој од влезните податоците му се придодава вредност врз основа на еден или повеќе критериуми, а која ја отсликува „тежината“ или пак важноста на овој податок [36]. Излезниот податок има вредност кој претставува збир од вредностите на сите врски (аксони) долж патеката на податокот низ слоевите на невронската мрежа. Начинот на кој податокот (сигналот) преоѓа од еден на друг неврон, односно од еден во друг слој на невронската мрежа зависи од синаптичките правила кои ги поставил креаторот на мрежата, а благодарение на кои се остваруваат врски помеѓу соодветните, соседни неврони. Концептот на функционирање на вештачката невронска мрежа со повеќе слоеви е прикажан во слика 3-3б [37].



Слика 3-3 Принцип на функционирање на невронските мрежи

Дополнително, повеќеслојниот перцептрон претставува тип на невронска мрежа со еднонасочни, директни врски, што ги прави погодни за моделирањето на мотор СВС. Вообичаено перцептронот е претставен со равенството 3.8 [38]:

$$y_{NN} = f\left(\sum_i w_i x_i + b\right) \quad 3.8$$

Во овој случај i го претставува бројот на влезови, со x_i е означен самиот влез, додека f е преносната функција која го моделира излезот y на системот за секој од

влезовите; w_i ја претставува „тежината“ доделена на влезот, додека b е карактеристиката на неврнот (условот) од кој зависи дали истиот ќе се активира или не.

Излезот од мрежата може да се изрази уште со равенството 3.9, каде сега со h се претставени условите на активациската функција, а $x - c_i$ е растојанието од влезот до центарот на неврнот. Локацијата на центарот на неврнот ја одредува креаторот на неврнската мрежа како начин на подесување на тренирањето на резултатите.

$$y_{NN} = \sum_{i=1}^N w_i * h(x - c_i) \quad 3.9$$

Излезот од моделот на машинско учење е резултат од тренирањето на алгоритмот со веќе постоечки податоци. Кога моделот е обезбеден со голем број на податоци за тренирање, како излез се добива предвидување засновано на овие податоци [39].

Во дел од литературата се преферира употребата на поедноставните методи на регресија отколку машинското учење со неврнска мрежа [40], при што авторите наведуваат дека тоа главно се должи на големиот бројот на влезни параметри, потребата од големо, односно доволно обемно податочно множество [22] и ризикот од претренирање на моделот при што и покрај високите вредности за коефициентот на детерминација, моделот враќа слаби или недоволно прецизни резултати.

Наспроти овој став, авторите во [41] имаат создадено модел на моторот Раукап 1600-НС успешно применувајќи го методот на регресија со неврнска мрежа, при што истакнуваат дека моделот се карактеризира со голема прецизност. Во споредба со неврнската мрежа на повеќеслоен перцептрон, RBF функцијата поседува само еден скриен слој во кој условите за активација дефинирани од преносната функција може да варираат [22]. При споредбата на модел на линеарна регресија и модел на машинско учење со неврнска мрежа за дизел-мотор кој работи со смеса од биодизел и етанол, резултатите на [42] исто така укажуваат на прецизноста на моделот со неврнска мрежа. До слични заклучоци имаат стигнато и во референцата [43], но тука авторите напоменуваат дека изборот на соодветна топологија на мрежата влијае на симулациската брзина и прецизноста на резултатите од симулацијата.

3.3 Моделирање на издувната емисија на цврсти честички

Моделите на издувната емисија на цврсти честички во минатото често се изработувале во CFD софтверот KIVA, програмиран во програмскиот јазик FORTRAN поради способноста на софтверот веродостојно да ги претстави количествата на различните продукти во издувната емисија како и механизмите на нивно создавање [44-46]. Меѓутоа, ниту еден од овие трудови не сугерира какво е времетраењето на компјутерските симулации и процесирачките побарувања на моделот. Сепак, со оглед на тоа што станува збор за 3D модел, се претпоставува дека времетраењето на симулацијата е од занемарлива важност во споредба со потребата од поголема прецизност.

Во трудот [47] е направен преглед и категоризација на познатите методи за моделирање на емисијата на цврсти честички кај дизел-моторите. Дополнително, во трудот се опишани и механизмите кои водат кон создавањето на цврстите честички, почнувајќи од нуклеација, па потоа коагулација и најпосле оксидација (слика 3-4).



Слика 3-4 Хемискиот механизам на создавање РМ честички при согорување во моторот [47]

Категоризацијата на моделите на издувната емисија повторно е направена врз основа на компромисот сложеност и процесирачки побарувања на моделот, при што се издвоени:

- Емпириски модели на издувната емисија на цврсти честички – едноставни модели чии ограничувања зависат од природата и обемот на податочното множество врз основа на кое биле создадени. Вака создадените модели сметаат на емпириското податочно множество за предвидување на трендовите поврзани со создавањето на издувната емисија на цврсти честички;
- Полу-емпириски модели – овие модели иако користат емпириски податоци, имаат способност за решавање на „равенката на одвивање на хемиската реакција“² со што многукратно се подобрува прецизноста на моделот; и
- Теоретски модели – најуспешно ги отсликуваат механизмите на создавање на издувната емисија како резултат на процесот на согорување во моторот,

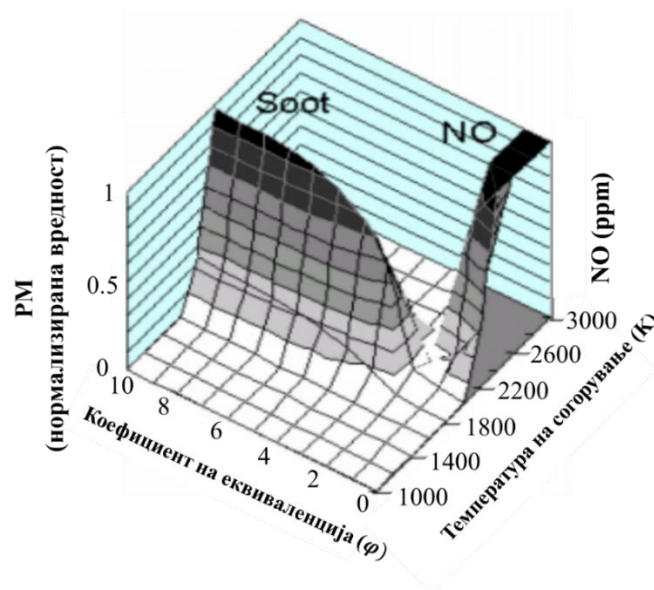
² Равенка која ја поврзува брзината на одвивање на хемиската реакција со концентрациите на реактантите.

при што за оваа цел се употребуваат познати хемиски законитости, но самиот модел вклучува бројни пресметки, а тоа пак влијае на зголемување на процесирачките побарувања на моделот.

Трудот [47] содржи дел од равенствата кои се користат кај секој од моделите, но во ниту еден момент не го наведува очекуваното времетраење на компјутерската симулација, ниту пак сугерира за успешната примена на некој од овие модели.

Во докторската теза од референцата [48] предложен е модел на средна вредност за создавањето на цврстите честички (анг. Mean value soot model – MVSM), со кој успешно се пресметани количествата на цврсти честички во издувната емисија при стационарна и нестационарна состојба на работа на моторот, кај три различни мотори кои се тестирани како дел од тезата. Иако моделот не е погоден за претставување на екстремите во емисијата кои следат непосредно по преминот од стационарна во нестационарната состојба, натамошниот период на следење е точно претставен.

Онаму каде било возможно, CFD пресметките за дел од хемиските механизми на создавање на РМ честичките се заменети со емпириски модели заради намалување на процесирачките побарувања на моделот. Коефициентот на детерминација R^2 помеѓу измерените податоци добиени од експерименталните мерења за емисијата на предметните мотори и податоците добиени од моделот изнесувал 0.71 до 0.9 што говори за успешноста и веродостојноста на моделот.



Слика 3-5 Компромисот помеѓу создавањето на NOx и РМ честички [48]

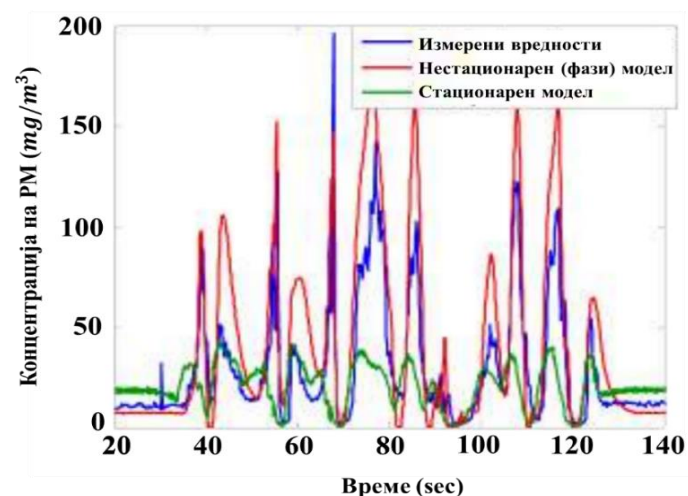
Докторската теза од референцата [48] содржи детали и за влијанието на системот за рецикулација на издувните гасови врз количеството на РМ честички и NOx. EGR системот овозможува повраток на дел од издувните гасови од гранката за празнење кон гранката за полнење на моторот, каде се мешаат со свежото полнење, на овој начин намалувајќи го присуството на кислород при согорувањето, со што се влијае на намалување на максималната температура при процесот на согорување, а тоа пак води кон намалување на создавањето на NOx [49]. Меѓутоа, отсуството на кислород води и

кон непотполно согорување, со што се зголемува количеството на цврсти честички (од несогореното гориво). Овој процес укажува на постоењето на компромис (слика 3-5) помеѓу количеството на NOx и PM честички во издувната емисија на моторот [48].

Во магистерската теза од референцата [50] е изработен регресионен модел за создавањето и емисијата на цврсти честички за различни услови на работа на моторот и тоа за неколку различни мотори при што процентот на грешка за секој од моторите изнесувал високи 49%, 67% и 82%. Сепак авторите во [51] користејќи интерполациски методи успеале да создадат модели за NOx и PM честички, чиј процент на грешка изнесувал 5%, односно 29%. Притоа, влезни параметри во моделот се брзината на моторот, количеството на впрскано гориво, моментот на впрскување на горивото (агол на впрскување), количеството на кислород потребно за достигнување на стохиометриско согорување и парцијалниот притисок на кислородот во гранката за полнење.

При споредбата на емисијата на цврсти честички во стационарна, „квази-стационарна“ и нестационарна состојба, авторите во [52] заклучуваат дека количеството на PM честички во издувната емисија би можело да се предвиди со помош на регресионен модел изработен од податочно множество со „квази-стационарни“ вредности за работата на моторот. Меѓутоа, во трудот не се претставени равенствата кои го помагаат менаџирањето на податочното множество, ниту пак е објаснето како е стигнато до заклучоците.

Слично, во [53] е објавен труд каде се претставуваат два модели (за стационарна и нестационарна состојба на работа на моторот) базирани на невронска мрежа и на фази логика (анг. fuzzy logic), во кои се вметнати низа поедноставувања при моделирањето на емисиите на NOx и PM честички. Притоа, моделот на стационарната состојба вратил резултати што покажуваат за 60% помали вредности на цврсти честички и за 21% помали вредности за количеството на NOx. Но, за разлика од моделот на стационарната состојба, моделот на нестационарна состојба успешно ги предвидува екстремите во количеството на цврсти честички кои следат по преминот од стационарна во нестационарна состојба (слика 3-6).

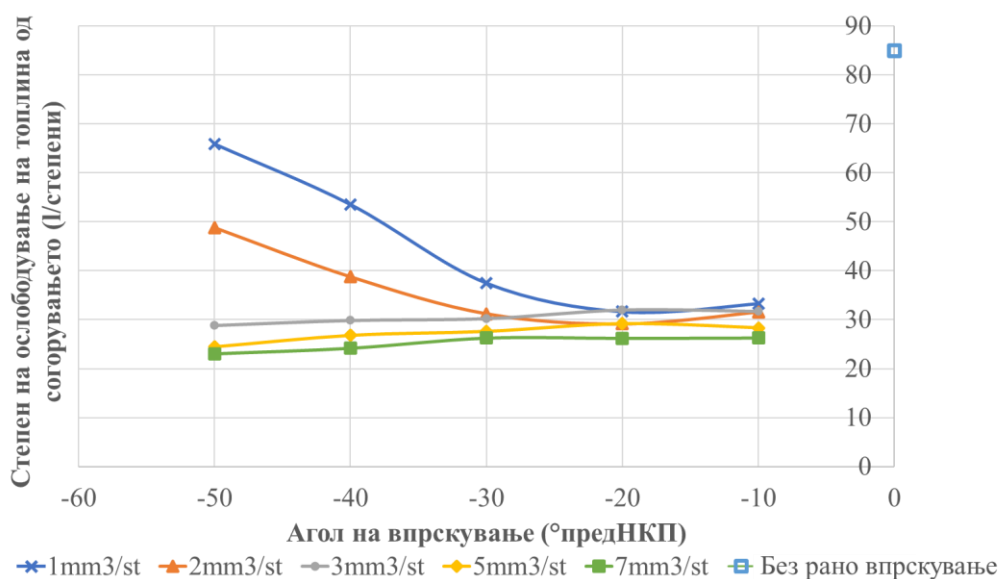


Слика 3-6 Резултати добиени со модел на емисиите на PM честички за нестационарна и стационарна состојба на работа на моторот [53]

Од поедноставните модели кои се среќаваат во литературата, моделот во [54] и покрај бројните поедноставувања се карактеризира со висок степен на прецизност во резултатите, меѓутоа авторите не ги посочуваат регресионите равенства кои ги употребиле во моделот.

Во остатокот од анализираната литература, иако доста детално се опишани 0 и 1-димензионалните емпириски модели на емисијата на цврсти честички, во ниту еден од нив не е специфично прикажан начинот како е имплементиран методот на регресија и како придонесува кон прецизноста на моделот, така што овие модели не би можеле да се репродуцираат [55-58]. Она што може да се издвои како заклучок е дека основата на сите овие модели за емисијата на цврсти честички потекнуваат од истражувањето на [59-60].

Во [61] се испитувани ефектите на раното впрскување на горивото и на EGR системот врз количеството на THC, PM, NOx и CO во издувната емисија за дизел-мотор со систем за директно впрскување на горивото. Раното впрскувањето на гориво се одвива за одреден агол непосредно пред главното впрскување (на кое се должи работниот такт на моторот) [62] и служи за намалување на максималната температура на согорувањето, што во теорија би значело и помало количество на NOx (слика 3-7) во издувната емисија.



Слика 3-7 Влијанието на раното впрскување на гориво врз степенот на ослободување на топлината [61]

Резултатите од [61] покажуваат дека количеството на впрскано гориво и аголот на рано впрскување значително влијаат на издувната емисија, а особено на количеството на NOx. Меѓутоа, она што е вредно да се напомене е дека доближувањето на аголот на рано впрскување до надворешната крајна положба (НКП) на клипот влијае и на намалување на количеството на THC и CO во издувната емисија. Но, намалувањето на количеството на THC и CO води кои зголемување на емисијата на NOx и PM честички. Согласно наодите на [61] раното впрскување секогаш ќе резултира со зголемување на

вкупното количество на издувната емисија, затоа што на овој начин се впрскува поголемо количество на гориво при работниот такт на моторот.

3.4 Изучување на процесот на калибрација на моторите

Со зголемување на сложеноста на современите мотори СВС, се зголемува и потребата од соодветно разбирање на сите нивни функционалности и процесите на поврзаност на управувањето на моторот со неговата излезна оперативна карактеристика и излезната емисија. Авторот на [63] смета дека ова особено важи за инженерите кои непосредно откако ќе се здобијат со факултетска диплома ќе се вработат во автомобилската индустрија. Во својот труд „Model-based engine calibration – A challenge for teaching“ тој го анализира зголемениот број на студенти кои се запишуваат на факултетските насоки на Универзитетот во Хамбург кои се поврзани со автомобилската индустрија и додава дека благодарение на прогресивното размислување на универзитетот, создаден е нов предмет која изрично го изучува процесот на калибрација на мотор СВС со помош на модел.

Притоа, авторот напоменува дека интересот за предметот помеѓу новите студенти е многу висок, а дека содржината предвидува студентите сами да изработуваат регресиони модели на мотор СВС на кои подоцна го изучуваат процесот на калибрација на повеќе параметри кои водат кон оптимизација на работата на моторот. Во референцата [63] е заклучено дека студентите се свесни дека совладувањето на калибрацијата како вештина ќе ги направи попосакувани за идните работодавачи во автомобилската индустрија и заради тоа посетеноста на предметот е толку голема.

Неизоставен дел од едукацијата за процесот на калибрација се бројни тестирања на предметните мотори кои ќе овозможат увид во добиените промени по подесувањето на работните параметри. Ваквите тестирања вообичаено се реализираат во високо-опремени лабораторски тест-ќелии кои покрај предметниот мотор содржат и уред за симулирање на оптоварување, мноштво сензори за параметрите на моторот и издувната емисија, мерни инструменти, напонски единици, процесирачки единици и команден пулт со софтвер кој овозможува управување со сета оваа опрема. Опременоста на лабораториските тест-ќелии повлекува големи финансиски побарувања и затоа нивното присуство претставува своевиден луксуз со кој малку универзитети можат да се пофалат.

Дополнително, опременоста и одржувањето на тест-ќелиите зависи и од количеството на научно-истражувачка работа која се спроведува и произлегува од нив, па ретко се достапни да служат единствено како едукативни помагала. Затоа се јавува потребата од изнаоѓање на поефтина и пофлексибилна замена која успешно би го потпомогнала изучувањето на процесот на калибрација на моторите СВС. Според [64], со оглед на тоа што врвна цел на сите високо-научни институции треба да биде студентите да се доволно мотивирани сами да земат контрола над своето студиско искуство, се јавува потреба од индивидуално едукативно помагало од виртуелна природа кое ќе биде интуитивно за употреба и со кое студентот по пат на експериментирање и испробување на различни комбинации ќе може да го научи процесот на калибрација на мотор СВС.

Вака конципираното помагало ќе им помогне на студентите да ги научат причинско-последичните врски помеѓу влезните параметри и излезната оперативна карактеристика на моторот и издвнната емисија. За таа цел, прецизноста на алатката е важна само до одреден степен се додека успешно се доловуваат тенденциите за промена на излезните вредности како резултат на промените во влезните параметри, а многу поважно е резултатите да се достапни во реално време.

3.4.1 Едукативни помагала и алатки

Кога станува збор за изучување на процесот на калибрација на моторите СВС како и достапните едукативни помагала и алатки кои би служеле за оваа намена, автомобилските компании вешто ги чуваат корпоративните тајни зад методите за едукација на сопствените вработени [65]. Истото важи и за сопствениците на најпознатите и воедно најкористените софтвери за моделирање на моторите СВС, како Ricardo, GT и AVL кои често ги презентираат можностите на сопствените софтверски производи на научните конференции од интерес за автомобилските инженери, но во многу мала мера откриваат детали за самиот процес на калибрација, креирањето на статистички експеримент и регресионен модел на моторот кој понатаму би можел да се оптимизира, бидејќи првенствено намената на овие презентации е промоција, а не едукација [66].

Со трудот [65] е забележан првиот обид да се развие виртуелно едукативно помагало за тестирање на мотор СВС, така што се симулира работата на електронската управувачка единица на моторот, а притоа на нејзино место се користи фази логички управувач.

Предложената алатка има неколку недостатоци меѓу кои најочигледен е малиот број на влезни параметри кои може да се подесуваат (агол на впрскување и количество на впрскано гориво). Сите фази-логички управувачи поседуваат база на знаење, изразена преку релевантни фази-знанствени правила за решавање на управувачкиот проблем [67]. Меѓутоа, бројот на овие правила се зголемува експоненцијално во зависност од бројот на влезови во фази-логичкиот управувач, а токму експанзијата од правила ја зголемува експертската база на системот што директно влијае на неговата способност да донесува попрецизни заклучоци. Тоа значи дека со секој нов влез и со секое ново правило ќе се зголемуваат и процесирачките побарувања на управувачот. Вака дизајнираната алатка истовремено нема да може да понуди прецизност и процесирање на податоците во реално време за позначителен број на влезови, што е карактеристичен за современите дизел-мотори. Позитивно за алатката е што претставува целосно софтверско решение и како такво не бара употреба на скапи хардверски компоненти.

Во [68] применуваат Hardware-in-the-Loop (HIL) пристап во дизајнирањето на својата алатка за изучување на процесот на калибрација кај моторите СВС на Универзитетот во Брадфорд (анг. University of Bradford), Обединето Кралство. Алатката користи Emerald K3 електронска управувачка единица која нуди можност за репрограмирање на нејзините управувачки површини, што ја прави погодна да биде дел од систем чија намена е токму многукратно менување на управувачките површини кои ја дефинираат работата на моторот. HIL системот наменет за изучување на процесот на

калибрација овозможува подесување на три влезни параметри: позиција на папучата за гас, агол на впрскување и количество на впрскано гориво.

Недостатокот на вака дизајнираната алатка е пред се финансискиот аспект кој предвидува набавка на скап хардвер (слика 3-8) и електронска управувачка единица, што за една мала и слабо опремена лабораторија за мотори со внатрешно согорување може да претставува голем трошок.

Позитивно за проектот опфатен во [68] е што предвидува интеграција на нивната алатка со програмскиот пакет MATLAB и овозможува визуелизирање на промените во управувачките површини. На овој начин, корисниците би можеле да добијат нумерички и графички повратен одговор за промените кои ги направиле кај влезните параметри и како овие промени влијаат врз излезната оперативна карактеристика на моторот (сооднос гориво/воздух и вртлив момент).

Во трудот [68] се наведени многу малку детали за тоа како е развиен моделот на мотор врз кој се извршуваат подесувањата и колкава е неговата прецизност, но од друга страна авторите сугерираат дека користењето на оваа алатка имало успешно влијание врз подобрување на заинтересираноста на студентите за процесот на калибрација и неговото совладување во пократок временски период.



Слика 3-8 Хардверските компоненти на НИЛ алатката за изучување на процесот на калибрација на моторите на Универзитет во Брадфорд [68]



Слика 3-9 Корисничкиот интерфејс на HIL алатката за изучување на процесот на калибрација на моторите на Универзитет во Брадфорд [68]

3.5 Референци

- [3-1] O. L. Jonsson (2021) A GENeric Internal combustion Engine model LiU-Genie. Master Thesis in Electrical Engineering. Department of Electrical Engineering, Linköping University
- [3-2] J. Tang, G. G. Zhu and Y. Men (2021) Review of engine control-oriented combustion models. International Journal of Engine Research. 23 (3). <https://doi.org/10.1177/1468087421992955>
- [3-3] L. Guzzella & C. H. Onder (2010) Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems. Second Edition. Springer. Doi: 10.1007/978-3-642-10775-7
- [3-4] J. H. Horlock & D. E. Winterbone (1986) The Thermodynamics and Gas Dynamics of Internal Combustion Engines. Vol. II, Clarendon Press, Oxford University Press, Oxford
- [3-5] R. Younes, J. Champoussin & A. Liazid (1993) Modeling of turbocharged diesel engine for optimal control, Entropie (in French) 174/175. pp. 31–42
- [3-6] C. D. Rakopoulos & E. G. Giakoumis, E. G. (2006) Review of thermodynamic diesel engine simulations under transient operating conditions. SAE Technical Paper. SAE International. Doi: 10.4271/2006-01-0884
- [3-7] F. Karlsson (2001) Modelling the intake manifold dynamics in a diesel engine, Avdelning, Institution: Department of Electrical Engineering, Available at: http://www.vehicular.isy.liu.se/Publications/MSc/01_EX_3084_FK.pdf
- [3-8] O. Grondin, R. Stobart, H. Chafouk, H. and J. Maquet (2004) Modelling the compression ignition engine for control: Review and future trends SAE-Technical Paper
- [3-9] C. Tan (2015) Model based control for a modern automotive diesel engine. Doctoral Thesis. University of Birmingham. School of Mechanical Engineering

- [3-10] S. Haiteng (2018) Design and Simulation of Engine Control System. Master Thesis. Polytechnic University of Turin
- [3-11] B. Thompson and H. Yoon (2020) Internal Combustion Engine Modeling Framework in Simulink: Gas Dynamics Modeling. Hindawi Modelling and Simulation in Engineering Volume 2020, Article ID 6787408. Doi: 10.1155/2020/6787408
- [3-12] B. A. Thompson (2017) Development of a high-fidelity engine modelling framework in Simulink with automated combustion parameter tuning, Doctoral Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Alabama, Alabama, USA
- [3-13] D. K. Dond, N. P. Gulhane and C. L. Dhamejani (2017) Mathematical Modelling & MATLAB Simulation of Diesel Engine. International conference on Advances in Thermal Systems, Materials and Design Engineering (ATSMDE2017)
- [3-14] V. S. Movva (2004) Simulation of Fluid Flow Internal Combustion Engines Using Wave Action Simulation. Master Thesis. Texas Tech University
- [3-15] D. Dimitrov, G. Pirker, E. Schnessl & A. Wimmer (2016) 1-D simulation as an element of an efficient methodology for engine concept development. Scientific proceedings of the XXIV International scientific-technical conference "trans & MOTAUTO '16", Vol 1, pp. 92-95
- [3-16] A. Marinoni, M. Tamborski, T. Cerri, G. Montenegro, G. D'Errico, A. Onorati, E. Piatti & E. E. Pisoni (2021) 0D/1D Thermo-Fluid Dynamic Modeling Tools for the Simulation of Driving Cycles and the Optimization of IC Engine Performances and Emissions. Appl. Sci. 2021, 11 (17), Doi: 10.3390/app11178125
- [3-17] M. N. Nabi & M. G. Rasul (2019) One-Dimensional Thermodynamic Model Development for Engine Performance, Combustion and Emissions Analysis Using Diesel and Two Paraffin Fuels. Energy Procedia, 156, pp. 259–265. Doi: 10.1016/j.egypro.2018.11.139
- [3-18] D. E. Foster (1985) An Overview of Zero-Dimensional Thermodynamic Models for IC Engine Data Analysis. International Fuels and Lubricants Meeting and Exposition Tulsa, Oklahoma, October 21-24, 1985
- [3-19] D. Chakmakov (2015) Probability and Statistics for Engineers (in Macedonian). University "Ss. Cyril and Methodius" – Skopje
- [3-20] J. Frost (2013) Four tips on how to perform a regression analysis that avoids common problems. Available at: <http://blog.minitab.com/blog/adventures-in-statistics/four-tips-on-how-to-perform-a-regression-analysis-that-avoids-common-problems>
- [3-21] X. Z. Yu, L. Y. Wang, D. Filev and X. Yao (2022) Internal Combustion Engine Calibration Using Optimization Algorithms. Applied Energy, 305
- [3-22] MathWorks (2022) Model-based Calibration Toolbox: Getting Started Guide. Available at: https://uk.mathworks.com/help/pdf_doc/mbc/mbc_gs.pdf

- [3-23] L. Corredor, A. Escobar, I. Portnoy & E. Velez (n.d.) Prediction of specific fuel consumption in turbocharged diesel engines under partial load performance. Available at: <http://www.icrepq.com/icrepq'12/762-corredor.pdf>
- [3-24] J. P. Styron (2008) Using model-based calibration toolbox multimodels for cycle optimized diesel calibration, in 'Mathworks Automotive Conference'. Available at: http://www.mathworks.com/tagteam/72792_06_ford_mbc_for_diesel_calibration_paper.pdf
- [3-25] R. Kozan and M. Gokce (2009) Two-Stage Engine Mapping for the Calibration of Carbon Monoxide Emission. *Modern Applied Science*. 3 (4). pp. 30–36
- [3-26] W. Baumann, K. Klug, B U. Kohler & K. Ropke (2011) Modelling of transient diesel engine emissions. *Design of Experiments in Engine Development*. 6th edn, Expert Verlag. pp. 41–53
- [3-27] R. Burke, B. Fath, S. Akehurst, C. Brace, W. Baumann & R. Wascheck (2011) Practical approach to thermo-dynamic modelling of diesel engine emissions. *Design of Experiments in Engine Development*. 6th edn, Expert Verlag. pp. 88–103
- [3-28] B. H. Tsai, C. J. Chang and C. H. Chang (2016) Elucidating the consumption and CO₂ emissions of fossil fuels and low-carbon energy in the United States using Lotka–Volterra models. *Energy*. 100. pp. 416–424
- [3-29] C. Guhmann & J. M. Riedel (2011) Comparison of identification methods for nonlinear dynamic systems. *Design of Experiments in Engine Development*. 5th edn, Expert Verlag. pp. 290–309
- [3-30] C. Xin (2008) Volterra series: Introduction & application. Available at: http://ece.tamu.edu/~sanchez/665_Volterra_2008.pdf.
- [3-31] C. Panuganti (2016) Control-oriented modelling, validation, and analysis of a natural gas engine architecture. Master Thesis. Purdue University
- [3-32] Y. Shi, D. L. Yu, Y. Tian and Y. Shi (2015) Modified Volterra model-based non-linear model predictive control of IC engines with real-time simulations. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 39 (2). pp. 208-223
- [3-33] M. A. Z. Khan (2011) Transient engine model for calibration using two-stage regression approach. Doctoral Thesis. Loughborough University Institutional Repository
- [3-34] J. D. Martínez-Morales, E. R. Palacios-Hernández & J. A. Morales-Saldaña (2017) Performance comparison of MLP and RBF neural networks to predict CO emissions of a spark ignition gasoline engine. *National Congress of Automation Control 2017*. Monterrey, Nuevo León, Mexico, 4-6 October, 2017
- [3-35] M. Nielsen (2016) Using neural nets to recognize handwritten digits. Available at: <http://neuralnetworksanddeeplearning.com/chap1.html>

- [3-36] D. Leverington (2009) A basic introduction to feedforward backpropagation neural networks. Available at: http://www.webpages.ttu.edu/dleverin/neural_network/neural_networks.html
- [3-37] C. Stergiou & D. Siganos (n.d.) Neural networks. Available at: https://www.doc.ic.ac.uk/~nd/surprise_96/journal/vol4/cs11/report.html.
- [3-38] IAV GmbH (2005) DoE - Design of Experiments. Verlag Moderne Industrie
- [3-39] S. Domazetovska (2022) The use of AI in the recognition and classification of sound events. Doctoral Thesis in Mechanical Engineering. Faculty of Mechanical Engineering – Skopje. University “Ss. Cyril and Methodius” – Skopje
- [3-40] I. Brahma & J. N. Chi (2012) Development of a model-based transient calibration process for diesel engine electronic control module tables – part 2: modelling and optimization. *International Journal of Engine Research*. 13 (2). pp. 147–168
- [3-41] S. Rezazadeh & G. R. Vossoughi (2003) Design and application of hybrid intelligent systems, in A. Abraham, M. Köppen & K. Franke, eds, ‘Design and application of hybrid intelligent systems’, IOS Press, Amsterdam, The Netherlands, chapter Modeling and Optimization of an Internal Combustion Engine Mapping Using Neural Networks and Particle Swarm Optimization, pp. 1094–1103
- [3-42] E. Tosun, K. Aydin & M. Bilgili (2016) Comparison of linear regression and artificial neural network model of a diesel engine fueled with biodiesel-alcohol mixtures. *Alexandria Engineering Journal*. 55 (4). pp. 3081–3089. Doi: 10.1016/j.aej.2016.08.011
- [3-43] A. N. Bhatt and N. Shrivastava (2021) Application of Artificial Neural Network for Internal Combustion Engines: A State of the Art Review, *Archives of Computational Methods in Engineering*. 29 (2). pp. 897–919
- [3-44] X. Cheng, L. Chen, G. Hong, F. Yan & S. Dong (n.d.) Modeling study of soot formation and oxidation in DI diesel engine using an improved soot model. Technical report. Open Publications of UTS Scholars
- [3-45] S. Hong, M. S. Wooldridge, H. G. Im, D. N. Assanis & E. Kurtz (2004) Modeling of diesel combustion, soot and NO emissions based on a modified eddy dissipation concept. *Combustion Science and Technology*
- [3-46] K. H. McDonald (2016) Kiva. Available at: <http://www.lanl.gov/projects/feynman-center/deploying-innovation/intellectual-property/technology-opportunities/kiva-fortran-computational-fluid-dynamics-software.php>.
- [3-47] H. Omidvarborna, A. Kumar & D. S. Kim (2015) Recent studies on soot modeling for diesel combustion, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 48. pp. 635–647
- [3-48] P. Kirchen (2008) Steady-State and Transient Diesel Soot Emissions: Development of a Mean Value Soot Model and Exhaust-Stream and In-Cylinder Measurements. Doctoral Thesis. ETH Zurich

- [3-49] Cambustion (2016) Exhaust gas recirculation (EGR) and NO_x measurement. Available at: <http://www.cambustion.com/products/egr>
- [3-50] M. Adlouni (2011) Modeling of soot emission for heavy-duty diesel engines in transient operation. Master Thesis. Lund University: Department of Automatic Control. Box 118 SE-22100 Lund, Sweden
- [3-51] M. Grahn, K. Johansson & T. McKelvey (2014) Data-driven emission model structures for diesel engine management system development. *International Journal of Engine Research*
- [3-52] P. G. Eastwood, K. Tufail, T. Winstanley, A. Darlington, S. Karagiorgis, Y. Hardalupas & A. M. K. P. Taylor (2009) Estimation of deviations in NO and soot emissions between steady-state and EUDC transient operation of a common-rail diesel engine. *SAE Int. J. Engines*. 2. pp. 648–659. Doi: 10.4271/2009-24-0147
- [3-53] R. Johri, A. Salvi & Z. Filipi (2011) Real-time transient soot and NO_x virtual sensors for diesel engine using neuro-fuzzy model tree and orthogonal least squares. *ASME*
- [3-54] J. Bayer & D. E. Foster (2003) Zero-dimensional soot modeling. SAE Technical Paper. SAE International. Doi: 10.4271/2003-01-1070
- [3-55] X. L. J. Seykens, R. S. G. Baert, L. M. T. Somers & F. P. T. Willems (2009) Experimental validation of extended NO and soot model for advanced HD diesel engine combustion. *SAE Int. J. Engines* 2. pp. 606–619. Doi: 10.4271/2009-01-0683
- [3-56] D. L. Siebers (1999) Scaling liquid-phase fuel penetration in diesel sprays based on mixing-limited vaporization. SAE Technical Paper. SAE International. Doi: 10.4271/1999-01-0528
- [3-57] C. T. S. Maranta (2014) Modeling soot emissions in diesel engines by means of semi-empirical approaches and a combustion model based on detailed chemistry. Master Thesis. Politecnico di Milano
- [3-58] P. Versaevel, H. Colas, C. Rigaudeau, R. Noiro, G. C. Koltsakis & A. M. Stamatelos (2000) Some empirical observations on diesel particulate filter modeling and comparison between simulations and experiments. Society of Automotive Engineers, Inc.
- [3-59] H. Hiroyasu, T. Kadota & M. Arai (1983) Development and use of a spray combustion modeling to predict diesel engine efficiency and pollutant emissions combustion modeling. *Bulletin of the JSME*. 26 (214)
- [3-60] A. Sabau & O. Emil (2010) Soot modeling in diesel engine. Proceedings of the 3rd International Conference on Environmental and Geological Science and Engineering
- [3-61] T. Tanaka, A. Ando & K. Ishizaka (2002) Study on pilot injection of {DI} diesel engine using common-rail injection system {JSAE} Review. 23 (3). pp. 297–302
- [3-62] T. Minami, K. Takeuchi & N. Shimazaki (1995) Reduction of Diesel Engine NO_x Using Pilot Injection. SAE Technical Paper 950611. Doi: 10.4271/950611

- [3-63] Ihme-Schramm, H. (2014) Model-based engine calibration - a challenge for teaching. *MTZ worldwide* 75 (11), pp. 40–43. Doi: 10.1007/s38313-014-0250-5
- [3-64] W. Houghton (2004) *Engineering Subject Centre Guide: Learning and Teaching Theory for Engineering Academics*. The Higher Education Academy Engineering Subject Centre
- [3-65] C. W. Gomes, A. A. M. Lagana, G. O. de Campos & C. A. Moraes (2010) Internal combustion engine calibration teaching by Stand Alone System. *SAE Technical Paper*. SAE International. Doi: 10.4271/2010-36-0346
- [3-66] J. Seabrook & D. Clarke (2008) Application of DoE Techniques to Engine Calibration.
- [3-67] N. Manev (2019) Early forest fire detection system based on a fuzzy-logic controller. Master Thesis. Faculty of Mechanical Engineering in Skopje. University “Ss. Cyril and Methodius” – Skopje
- [3-68] S. Moraitis, B. Mason, A. Pezouvanis & M. Ebrahimi (2011) A practical, simulation based approach to the teaching of engine mapping and calibration fundamentals. *SAE Technical Paper*. SAE International. Doi: 10.4271/2011-01-1109

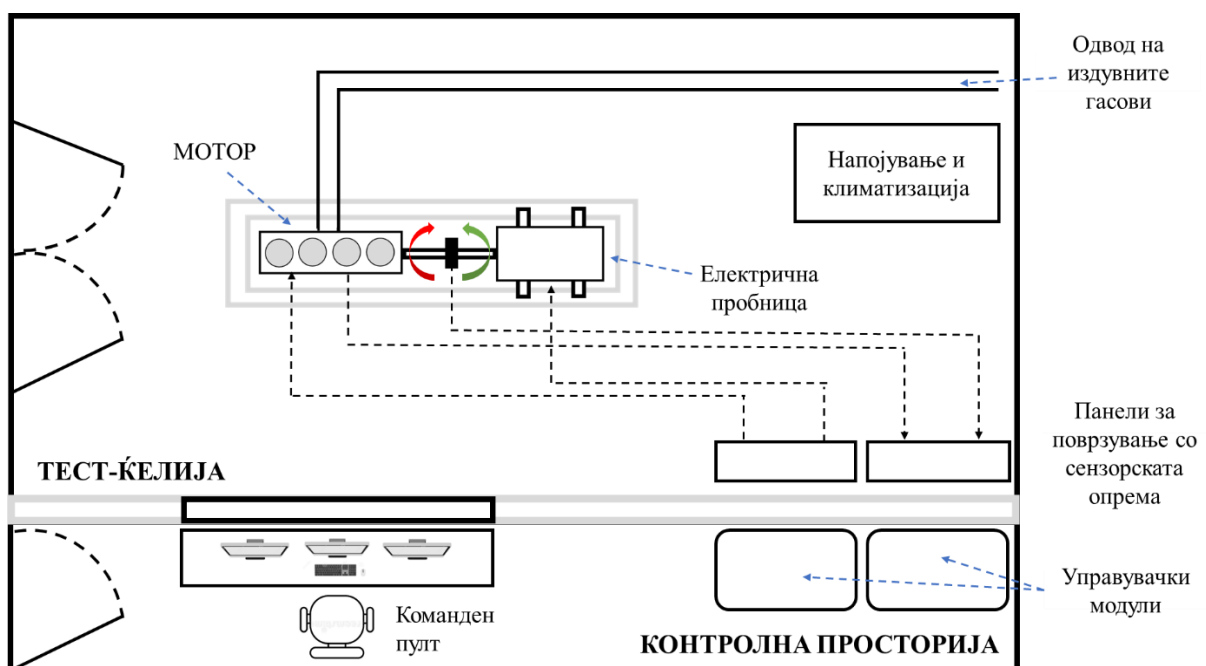
4 Експериментални мерења и регресиони модели

4.1 Експериментални мерења

Експерименталните мерења за потребите на докторската теза во најголем дел се реализирани на Институтот за напредни погонски технологии кај возилата (анг. Institute for Advanced Automotive Propulsion Systems, IAAPS) при Универзитетот во Бат (анг. University of Bath), Обединето Кралство. Научната посета се одвиваше во временски период од месец и половина. За тоа време беше уредена лабораториска тест-ќелија со 4-цилиндричниот, дизел-мотор со турбополнач и директно впркување на горивото, Ford Duratorq со зафатнина од 2.4l, за кој е достапна спецификација во Прилог А. Од овој мотор потекнува податочното множество кое послужи за тренирање на невронската мрежа.

Во изработката на напредниот модел на современ дизел-мотор се користат оперативни вредности добиени и од два други мотори од Duratorq програмата на Ford. Во периодот кој претходел на посетата, на институтот се испитувани мотор со зафатнина од 2.2l, по чиј урнек е измоделиран турбополначот, додека мапите за впркување на горивото и управувањето со односот гориво-воздух потекнуваат од мотор со зафатнина од 2.0l [1-2].

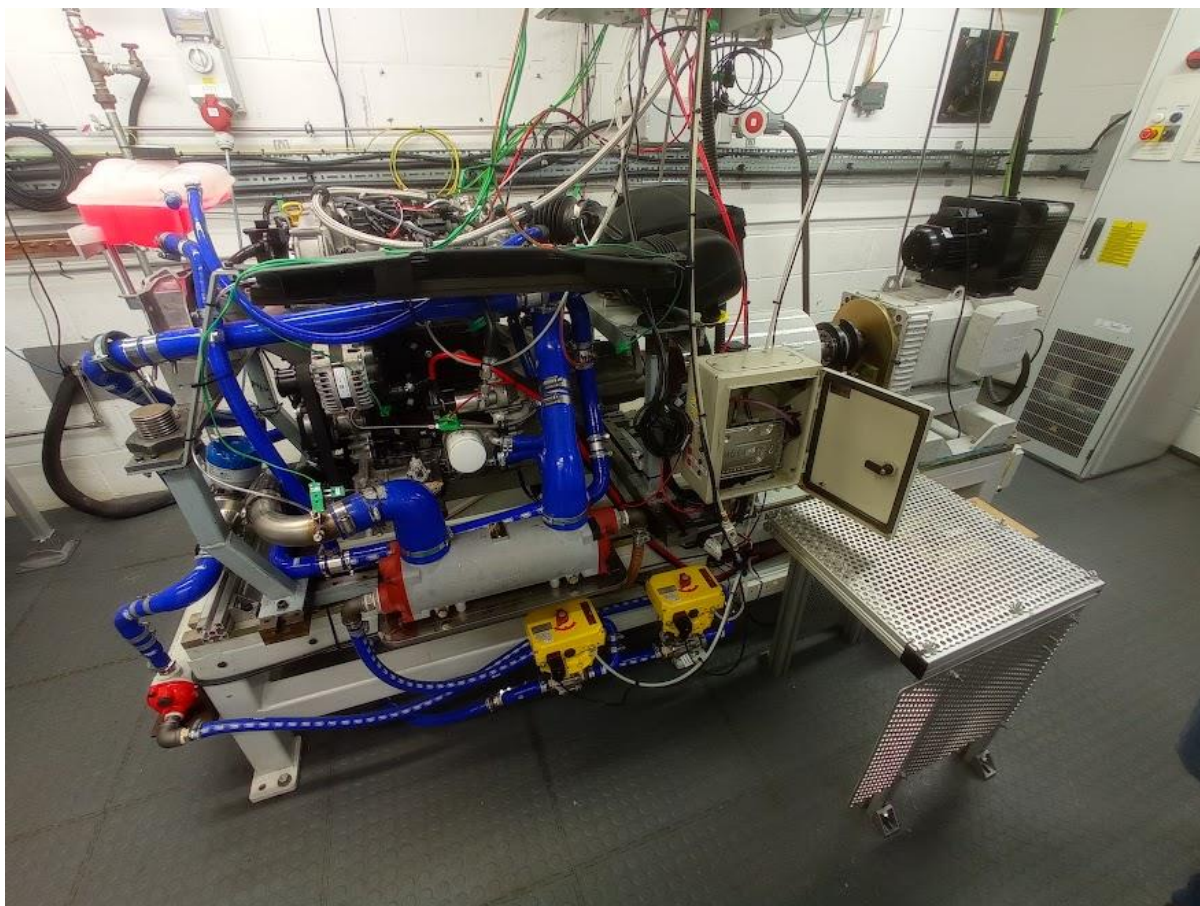
При тренирање на алгоритмот на машинско учење, потребно е да се користат податоци чија содржина е соодветна за апликацијата и обемно податочно множество, со цел да се овозможи подобрување на прецизноста и точноста на моделите на машинско учење со невронска мрежа. Податочното множество претставува извор на податоци со различна содржина, која треба да ги има следните карактеристики: исклучително голем обем на податоци, способност на обработка со голема брзина и веродостојност [3].



Слика 4-1 Лабораториската тест-ќелија за испитување на моторот Ford Duratorq 2.4 (графички приказ)

Во таа насока, лабораториската тест-ќелија (слика 4-1 и 4-2) беше така уредена да може да поднесе голем обем на мерења и следствено да достави обемно податочно множество низ широк режим на вртежи и оптоварувања на моторот. Моторот Ford Duratorq со зафатнина од 2.4l беше поврзан на електричен уред за симулирање на оптоварување (електрична пробница со максимална излезна моќност од 135 kW), мноштво сензори за следење на параметрите на моторот како и за мерење на издувната емисија (главно од производителот МЕХА, за концентрациите на O₂, CO, CO₂, THC и NO_x) во стационарна и нестационарна состојба на работа на моторот и команден пулт опремен со софтвер за управување со лабораториската тест-ќелија и менаџирање со податоците од мерењата (CADET, од производителот Sierra-ср).

Традиционално, мерењата за енергетската ефикасност на моторите како и издувната емисија се одвивале единствено за стационарна состојба на работа на моторот. Меѓутоа, со оглед на тоа што користењето на автомобилите подразбира главно нестационарни состојби на работа, потрошувачката на гориво и издувната емисија ќе биде значително полоша за нестационарна отколку за стационарна состојба [4]. Вака опремената тест-ќелија е целосно оспособена за испитување на моторот согласно Новиот европски возен циклус (NEDC) и Светскиот хармонизиран тест за лесни возила (WLTP) [5].



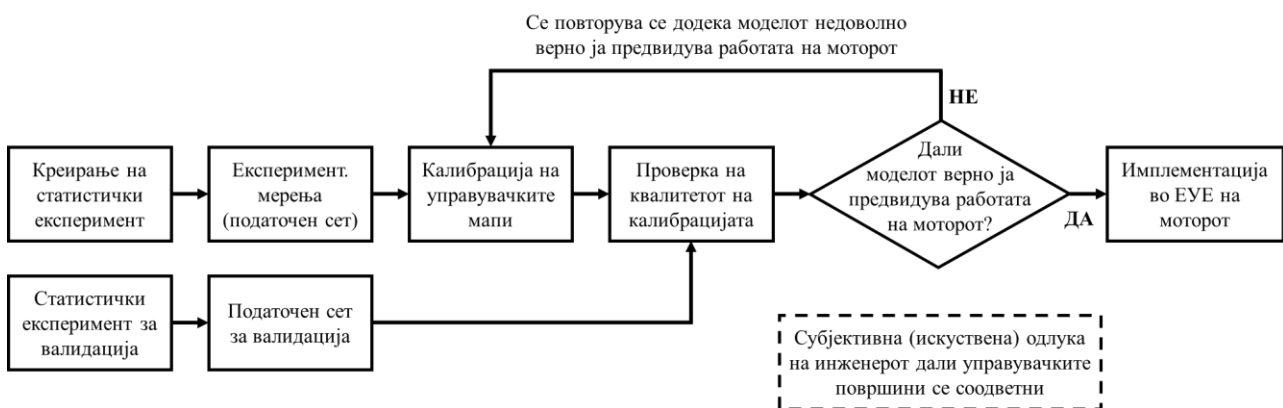
Слика 4-2 Лабораториската тест-ќелија за испитување на моторот Ford Duratorq 2.4 (реален приказ) [6]



Слика 4-3 Команден пулт за лабораториската тест-келија (реален приказ) [6]

4.2 Креирање на експеримент и калибрација со регресионен модел

Процесот на калибрација со помош на регресионен модел предвидува креирање на модел на моторот со помош на методот на регресиона анализа. МВС алатката го фасилитира процесот на калибрација на мотор СВС на тој начин што овозможува тестирање на повеќе различни методи на регресија и нивна оцена се со цел да се создаде најадекватен модел кој претставува најверна копија од тест-моторот. Затоа, во овој момент од интерес се само првите три чекори од процесот на калибрација (слика 4-4) со помош на регресионен модел, односно само оние чекори кои водат до создавањето на моделот.

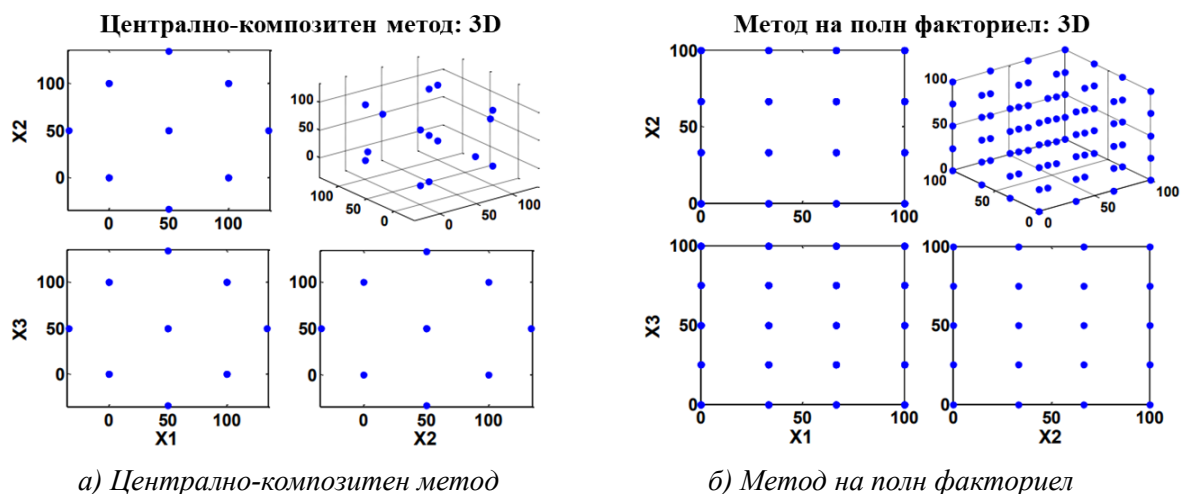


Слика 4-4 Чекорите од процесот на калибрација со помош на регресионен модел

Првиот чекор од процесот на калибрација со помош на модел (слика 4-4) е креирањето на статистички експеримент (анг. Design of Experiment, DoE), користејќи податочно множество кое ја одразува работата на тест-моторот. Креирањето на статистичкиот експеримент овозможува систематски пристап кој истовремено ги зема предвид сите параметри важни за веродостојно предвидување на работата на моторот и има за цел целосно да го замени принципот „проба и грешка“ кој нанзад се има користено за акумулирање искуство потребно за успешна калибрација и оптимизација на моторот [7].

Калибрацијата со помош на регресионен модел овозможува автоматизирана и високо-интелегентна селекција на различни мерни, податочни точки ширум управувачките површини за параметрите кои ја дефинираат работата на моторот [8]. Овој пристап води кон предвидување засновано на овие податоци дури и за оние делови од управувачката површина за кои не се измерени вредности при спроведеното тестирање [9]. Па затоа, при креирањето на статистичкиот експеримент се поставуваат две прашања: Првото е колку мерни, податочни точки се потребни за да се опфати целата управувачка површина, а второто е како би се извршил изборот на овие мерни, податочни точки така што нема да останат непознати делови од управувачката површина?

Алатката за калибрација со помош на модел на MATLAB нуди два пристапи за надминување на овие предизвици, од кои првиот е класичен и предвидува избор на мерните, податочни точки со помош на правилни организациски шеми (слика 4-5), додека вториот, напреден пристап почива на принципот на рандомизација или случајност, при што нема очигледни правила на кој начин се врши изборот на точките [10].



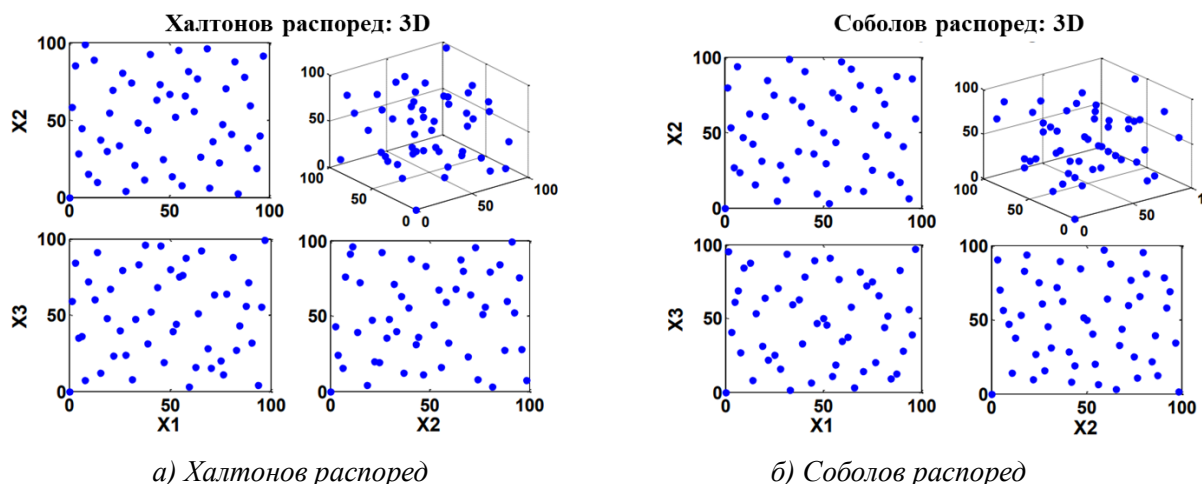
Слика 4-5 Класичен пристап на избор на мерни, податочни точки од управувачките површини

На сликата 4-5 се прикажани два методи од класичниот пристап на избор на мерни, податочни точки при креирањето на статистичкиот експеримент. Дизајнот се однесува на три фиктивни влезни параметри X_1 , X_2 и X_3 , од кои секој има опсег на

вредности од 0 до 100. Кај централно-композитниот метод (слика 4-5а), во 2-димензионалниот приказ, првата точка е позиционирана централно, додека останатите се избираат следејќи правилен кружен распоред околу неа. Во 3-димензионалниот приказ, важи истото правило на избор, со тоа што обликот на формата во која се избираат мерните, податочни точки сега е сферичен. Кај методот на полн факториел (слика 4-5б) изборот на мерните, податочни точки следи распоред на правилна мрежа (квадратна решетка). Секој од методите на претставување на изборот на мерни, податочни точки важи за n -број на димензии, со тоа што се усложнува визуелизацијата на резултатите од изборот.

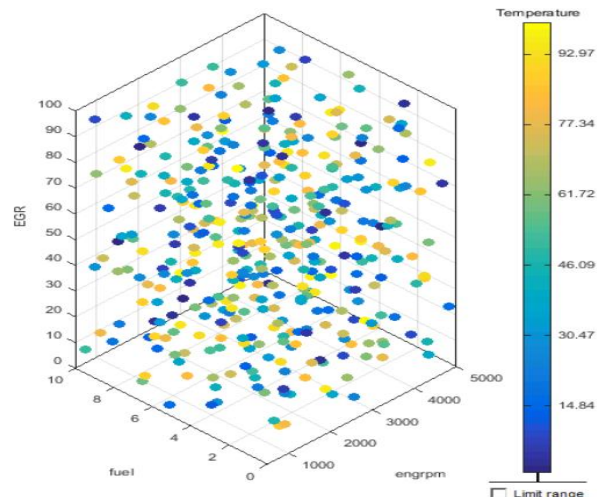
Класичниот пристап на избор на мерните, податочни точки поради правилниот распоред на точките го поедноставува процесот на последователен развој на лук-ап табели со калибрираните управувачки површини. Меѓутоа, методот на полн факториел иако ја покрива целата управувачка површина, празнините на решетката остануваат непознати, додека централно-композитниот метод не е погоден бидејќи не ги доловува мерните, податочни точки долж мерните екстреми и граничните вредности.

Алтернативниот, напреден пристап на избор на мерните, податочни точки работи по принципот на автоматско исполнување на целата управувачка површина со псевдо-рандомизиран распоред на точките. За распоредот не би можело да се каже дека е целосно случаен, бидејќи методите кои ги предвидува овој пристап повторно почиваат на некаков алгоритам, но согласно изгледот на работниот простор (слика 4-6) очигледно е дека просторот е подобро и потемелно исполнет. Од методите кои се достапни во МВС алатката, најпогодни за примена согласно потребите за менаџирање со податочното множество од моторот Ford Duratorq од 2.4l се Халтоновиот и Соболовиот распоред.



Слика 4-6 Напреден пристап на избор на мерни, податочни точки од управувачките површини

На сликата 4-7 е даден приказ на работниот простор за 4 влезни параметри и избор на 400 мерни, податочни точки со Халтоновиот распоред во рамки на креирањето на статистичкиот експеримент за докторската теза.



Слика 4-7 Избор на 400 мерни, податочни точки со Халтоновиот распоред

Во следниот чекор, МВС алатката предвидува креирање на регресионен модел со помош на некој од методите на регресиона анализа опишани во претходното поглавје, а користејќи го податочното множество и веќе креираниот експеримент. Креираниот статистички експеримент со чија помош се изработува моделот на мотор предвидува 9 влезни параметри чиј опсег на вредности е содржан во табелата 4-1. Иако опсегот на вредностите за одредени параметри можеби изгледа премногу широк, причината зад оваа одлука е за регресиониот метод целосно да ги опфати и успешно да ги предвиди граничните вредности во моделот.

Табела 4-1 Оперативниот опсег на влезните параметри на моторот

Влезен параметар		Оперативен опсег		Единица мерка
		Минимум	Максимум	
1	Степен на отвореност на EGR вентилот	0	90	°
2	Моќност на ладење на EGR ладилникот	0	5000	W
3	Брзина на моторот	500	5000	RPM
4	Сооднос гориво/воздух	0	0.06	()
5	Времетраење на впрскувањето на горивото	300	1500	μs
6	Притисок во гранката за полнење	1	3	Bar
7	Температура во гранката за полнење	350	550	K
8	Притисок во гранката за празнење	1.5	5	Bar
9	Агол на впрскување на горивото	-20	20	°Пред НКП или °По НКП

Со цел да се подобри прецизноста на регресиониот модел, а согласно достапното време за испитување на моторот податочното множество содржи 10.000 мерни, податочни точки. Вака структурираното податочно множество не е дел од напредниот модел на современ дизел-мотор, туку служи единствено за тренирање на моделот на машинско учење, па така обемот на податоците нема никакво влијание врз процесирачките побарувања на моделот во неговата крајна форма. Со МВС алатката се креирани статистички експерименти за 100, 1000 и 10.000 мерни, податочни точки (целото податочно множество), при што Халтоновиот распоред е користен за исполнување на работниот простор.

4.3 Регресиони модели

За да се потврдат наодите од литературниот преглед на релевантни научни истражувања и за да се избере најсоодветниот метод на регресиона анализа од палетата на методи кои ги поседува МВС алатката и воопшто MATLAB, а со акцент на увид во предностите на машинското учење и невронските мрежи успешно да ја доловат динамиката на работа на моторот, подолу се тестирани неколку различни регресиони методи. Целта е да се одбере методот кој најуспешно ќе ја претстави работата на тест-моторот, но и методот кој успешно би можел да се интегрира со останатите компоненти од напредниот MVEM модел и кој ќе влијае на намалувањето на процесирачките побарувања на моделот и времетраењето на компјутерската симулација.

4.3.1 Модел на машинско учење (Регресија со повеќеслоен перцептрон)

По вметнување на податочното множество со мерни вредности за оперативните параметри на моторот Ford Duratorq од 2.4l во статистичкиот експеримент преку DoE уредувачот од МВС алатката, во следниот чекор се испитани различните регресиони методи. Секој од регресионите модели е формиран од 1000 случајно одбрани, мерни, податочни точки од целосното податочно множество. Адекватноста на моделот е утврдена врз основа на степенот на истренираност и вредноста за просечната апсолутна грешка (анг. Mean Absolute Error – MAE) за секој од методите на регресија кои се пресметани за 100 случајно одбрани мерни, податочни точки избрани со Халтоновиот распоред.

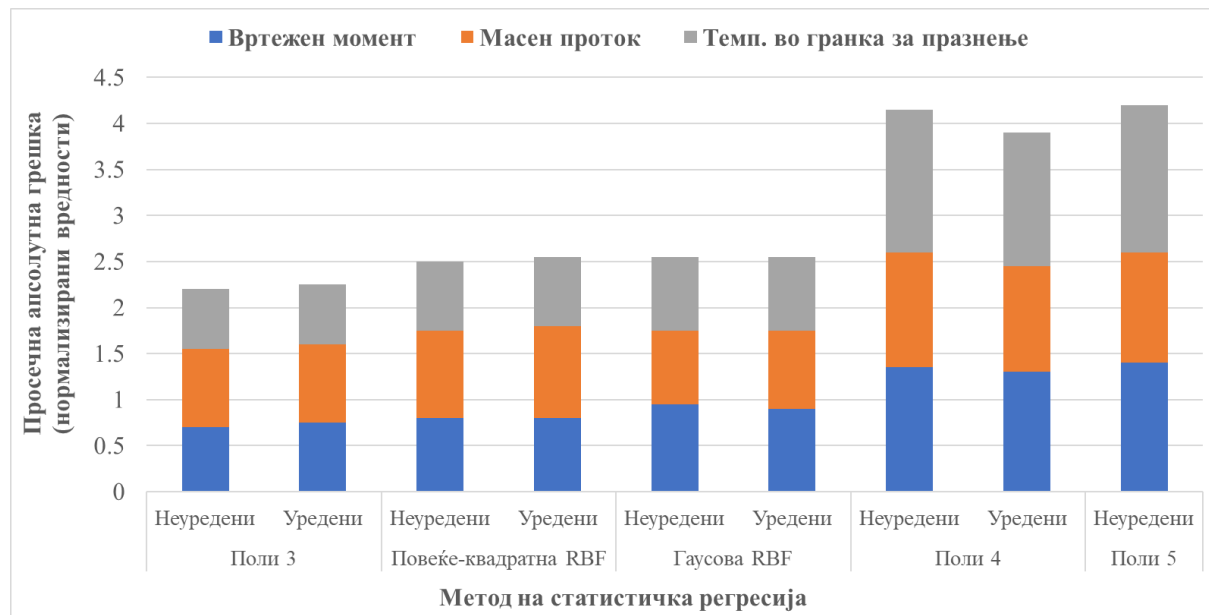
Прегледот во табелата 4-2 и сликата 4-8 е направен со цел увид во погодноста на останатите методи за регресиона анализа кои ги предлага МВС алатката, пред да се испитаат предностите и недостатоците на моделот на машинско учење со невронска мрежа. Од сликата 4-8 може да се види дека степенот на истренираност за методот на регресија со кубен полином е најпрецизен, бидејќи вредноста на просечната апсолутна грешка за комбинацијата од посочените параметри (вртлив момент, масен проток и температура во гранката за празнење) е најмала. Дополнително, имплементирањето на овој метод при формирањето на регресиониот модел има и покусо времетраење отколку креирањето на моделите со помош на повеќе-квадратна RBF и Гаусова RBF функција. Кај полиномните модели пак кои користат полином од повисок (n -ти) ред доаѓа до претренирање на моделот.

Табела 4-2 Вредности за просечната апсолутна грешка за вртливиот момент, масениот проток и температурата во гранката за празнење за методите на регресија предложени од МВС алатката (без невронски мрежи)

Метод*	Просечна апсолутна грешка			Нормализирана вредност за апсолутната грешка		
	Вртежен момент (Nm)	Масен проток (kg/s)	Темп. во гранка за празнење (K)	Вртежен момент (Nm)	Масен проток (kg/s)	Темп. во гранка за празнење (K)
Поли 3	10.538	0.001488	27.592	0.72	0.83	0.668
RBF Повеќе-квадратна	11.756	0.001756	29.914	0.803	0.979	0.725
RBF Гаусова	13.776	0.001477	32.675	0.941	0.824	0.791
Поли 4	20.091	0.002287	62.761	1.372	1.275	1.52
Поли 5	20.351	0.002168	66.788	1.39	1.209	1.618
Просечна вредност	15.3024	0.0018352	43.946	1.0452	1.0234	1.0644

* 1000 точки за тренирање на моделот; 100 точки за споредување

МВС алатката дава можност за користење и на статистичката мерка резидуална сума на квадратите на грешка (анг. Predicted Residual Sum of Squares, PRESS) за оцена на адекватноста на моделот, но во конкретниот случај за вредноста на PRESS не е воочена константна поврзаност на оваа вредност со подобрување на прецизноста и адекватноста на различните модели.



Слика 4-8 Споредба за нормализираните вредности на просечната апсолутна грешка за различните методи на регресија предложени од МВС алатката (Поли X се однесува на полиномен модел од n-ти ред)

Алатката за тренирање на невронски мрежи во MATLAB (анг. MATLAB's Neural Networks Fitting Tool) овозможува генерирање на вештачка невронска мрежа на повеќеслоен перцептрон со потребен број на скриени слоеви и три алгоритми на

машинско учење (Levenberg-Marquardt, Баесова регулација и алгоритмот на конјугиран градиент) кои може да се користат за тренирање на мрежата.

Непосредно пред процесот на тренирање и тестирање на системот потребно е да се дефинираат два параметри:

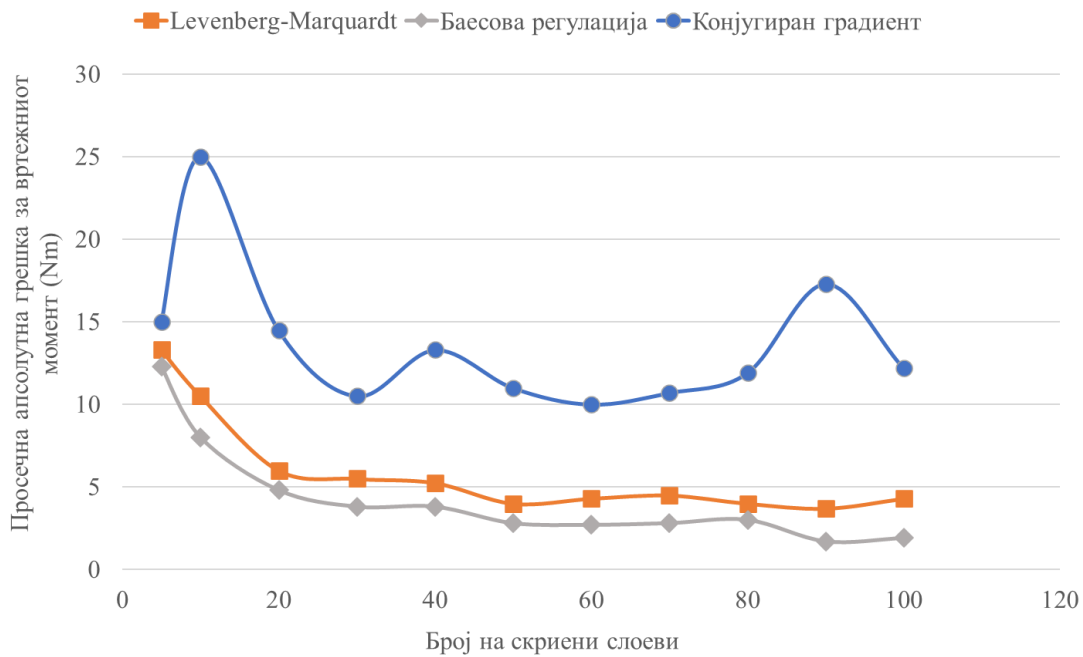
- Број на епохи (epochs) - Целокупен број на поминување на целото податочно множество низ невронската мрежа; и
- Број на серии (batches) - Број на примероци кои се процесираат пред да се обноват перформансите на моделот. Притоа, бројот на серии мора да биде поголем или еднаков на 1, а помал од целокупниот број на податоци кои се користат за тренирање.

Доколку базата на податоци има x број на примероци, се избира n број на епохи и m број на серии. За n број на епохи, целата база на податоци ќе помине низ моделот n пати во целиот процес на тренирање. Една епоха генерално ќе ја намали средната загуба на множеството на тренирање се додека системот се тренира, па со зголемување на бројот на епохи ќе се намали загубата и ќе се зголеми прецизноста при предвидување [3].

Поради ограничениот број на епохи во алатката за изучување на податочното множество, за потребите на тезата е креиран код со чија помош бројот на епохи е зголемен, а во насока на подобрување на прецизноста на моделот. Скриптата од кодот за генерирање на невронската мрежа е прикажана во Прилог Б. На сликата 4-9 се дадени резултатите за просечната апсолутна грешка за вртливиот момент на моторот при тренирање на моделот на машинско учење со 1000 мерни, податочни точки, додека вредноста за просечната апсолутна грешка повторно е пресметана за 100 случајно одбрани мерни, податочни точки избрани со Халтоновиот распоред.

Согласно [11], алгоритмот за тренирање на невронската мрежа на Levenberg-Marquardt има најкусо времетраење, додека алгоритмот со Баесова регулација најуспешно се справува со „предизвиците“, притоа мислејќи на високо-нелинеарни функции. Последниот, алгоритмот на конјугиран градиент е најпогоден за симулации кога се работи со ограничена меморија. Од трите алгоритми, оној со Баесова регулација покажува најмали вредности за просечната апсолутна грешка.

Од анализата на слика 4-9 може да се забележи одреден степен на флукуација помеѓу трендовите за резултатите на различните алгоритми прикажани на графикот. Овие флукуации се должат на тоа што невронските мрежи се оптимизираат со примена на различни тежински вредности секогаш кога се применува нов метод на регресија, односно нов алгоритам за тренирање. Од таа причина никогаш нема да се случи да се добијат две потполно исти невронски мрежи.



Слика 4-9 Резултати од испитувањето на прецизноста на различните алгоритми на машинско учење за тренирање на невронската мрежа

Меѓу предностите на примена на невронските мрежи во споредба со методите на регресија дискутирани претходно се вбројува и тоа што нема појава на претренирање на моделот која би водела кон лажен пораст на вредноста на просечната апсолутна грешка. Дополнително, невронските мрежи се тренирани со само 1000 мерни, податочни точки, што влијае на прецизноста на моделот (поголемо податочно множество – поголема прецизност). Зголемувањето на бројот на слоеви исто така ја подобрува прецизноста на моделот, но влијае на зголемување на времетраењето потребно за креирање на моделот. При тренирањето на невронските мрежи со секој од различните алгоритми беа испробани невронски мрежи со големина до 100 слоја, по што времетраењето на тренирање за секој од моделите почна да надминува 3 часа.

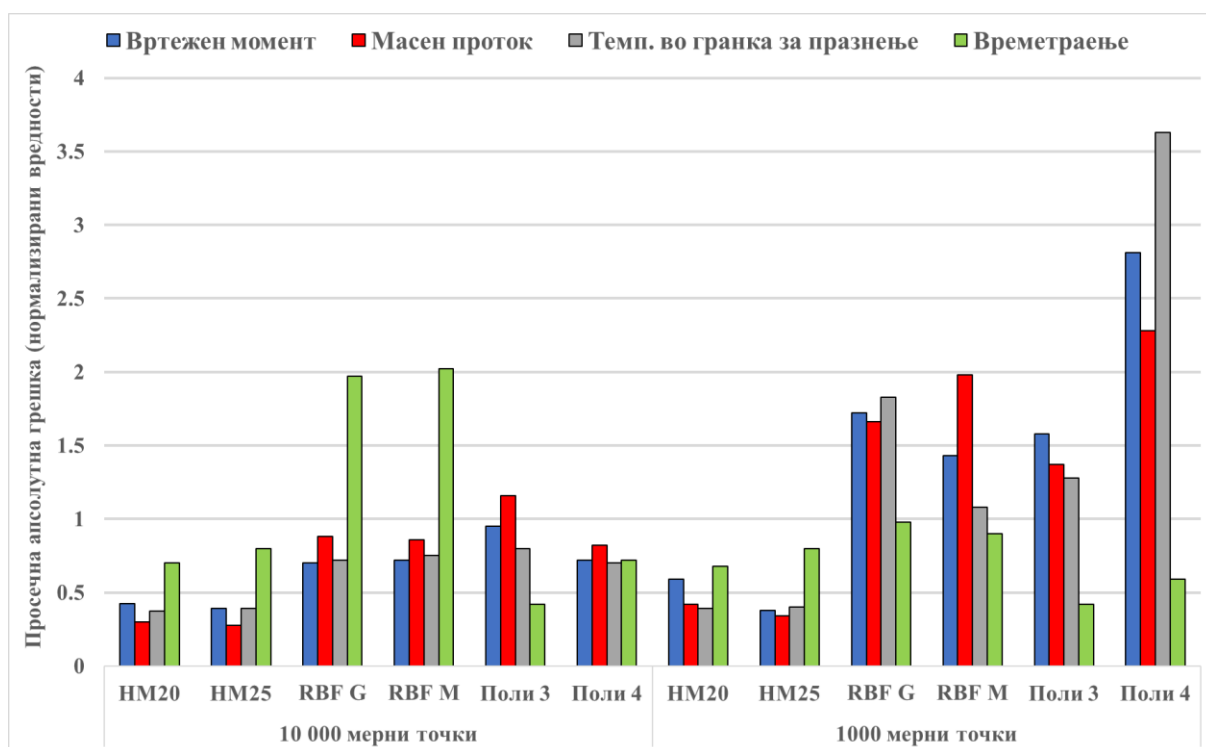
По споредување на моделот на машинско учење со невронска мрежа со моделите кои претходно меѓусебно беа споредени во сликата 4-8, се забележува дека сите невронски мрежи кои содржат 10 или повеќе скриени слоеви ќе дадат подобри резултати од методот на регресија со кубен полином, кој претходно се покажа најдобро. Резултатите се прикажани во табелата 4-3, а потоа и во сликата 4-10 при што секој од моделите овој пат е создаден со помош на помалото податочно множество од 1000 мерни, податочни точки, но и целосното податочно множество кое се состои од 10.000 мерни, податочни точки.

Главниот тренд кој се забележува при анализата на сликата 4-10 е намалувањето на вредноста за просечната апсолутна грешка кога моделите се креирани со помош на податочно множество од 10.000 мерни, податочни точки. Оваа изјава важи за сите прикажани методи на регресија со исклучок на методот со примена на невронска мрежа, чии вредности се слични во двата случаи.

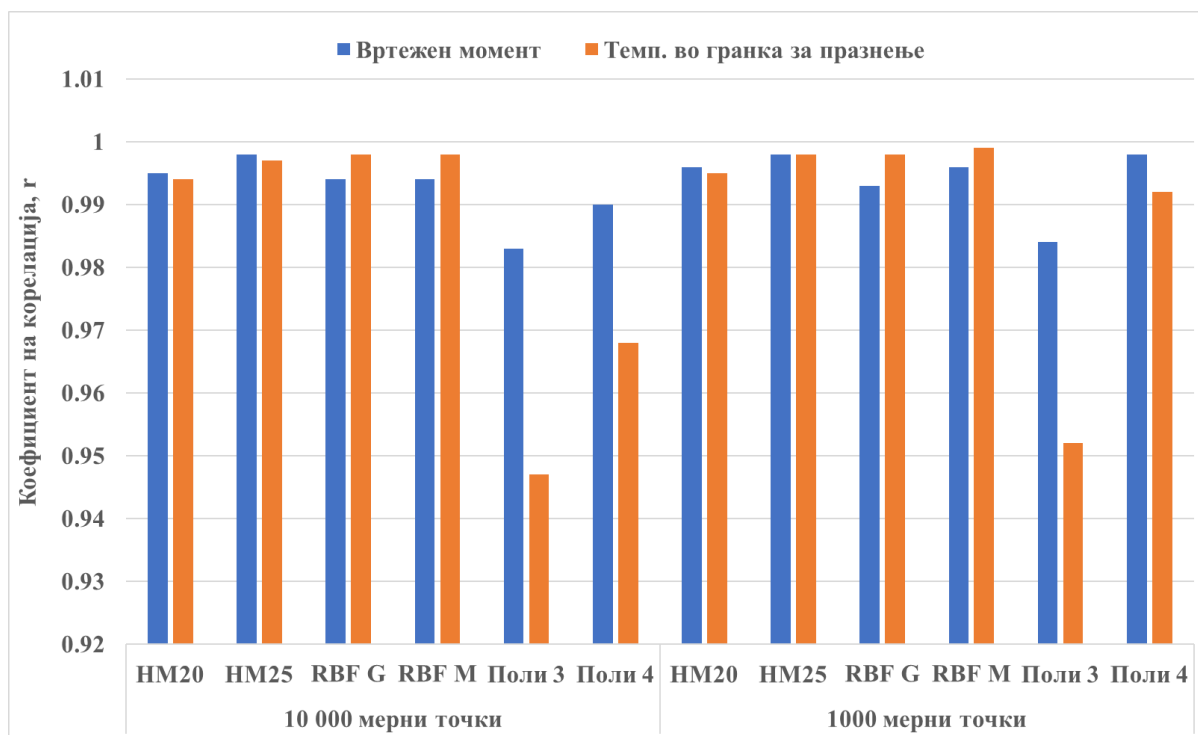
Табела 4-3 Вредности за просечната апсолутна грешка за вртливиот момент, масениот проток и температурата во гранката за празнење; и времетраењето на различните регресиони методи

		Просечна апсолутна грешка				Нормализирана вредност за апсолутната грешка		
		Вртежен момент (Nm)	Масен проток (kg/s)	Темп. во гранка за празнење (K)	Времетраење (s)	Вртежен момент (Nm)	Масен проток (kg/s)	Темп. во гранка за празнење (K)
10000 мерни, податочни точки	HM20	4.759	0.00038	11.311	49.393	0.425	0.3	0.375
	HM25	4.197	0.000324	11.98	57.34	0.39	0.275	0.39
	RBF Повеќе-квadratна	8.013	0.001086	23.291	142.573	0.7	0.88	0.72
	RBF Гаусова	7.834	0.001106	22.364	139.728	0.72	0.86	0.75
	Поли 3	10.273	0.001452	24.526	29.691	0.95	1.16	0.8
	Поли 4	7.946	0.001045	21.22	50.043	0.72	0.82	0.7
1000 мерни, податочни точки	HM20	6.499	0.000538	11.844	47.193	0.59	0.42	0.39
	HM25	4.211	0.000435	12.253	56.852	0.38	0.34	0.4
	RBF Повеќе-квadratна	15.74	0.002483	33.051	63.855	1.72	1.66	1.83
	RBF Гаусова	18.806	0.002087	56.327	69.1	1.43	1.98	1.08
	Поли 3	17.23	0.001715	39.625	29.922	1.58	1.37	1.28
	Поли 4	30.853	0.002884	112.449	42.101	2.81	2.28	3.63
	Просечна вредност	11.36341667	0.001294583	31.68675	64.81591667	1.034583333	1.02875	1.02875

Како и претходно, за 1000 мерни, податочни точки, полиномниот регресионен модел од 4ти ред демонстрира претренирање што води кон зголемување на вредноста за просечната апсолутна грешка и помала прецизност (што не е случај со моделот базиран на кубен полином). Меѓутоа, во групата каде се користи податочна множесто од 10.000 мерни, податочни точки, се случува токму спротивното и полиномниот модел од повисок ред прави попрецизни предвидувања.



Слика 4-10 Споредба на нормализираните вредностите за просечната апсолутна грешка и времетраењето на различните методи на регресија



Слика 4-11 Вредности на коефициентот на корелација r за различните регресиони методи при различна големина на податочните множества

Вредно да се забележи е дека и RBF функциите демонстрираат подобра прецизност за поголемото податочно множество, но тоа е проследено со подолго времетраење. Полиномните модели имаат идентично времетраење за двата случаи кое е најкучо од сите останати методи на регресија. Но од графикот на сликата 4-10 може да се заклучи и дека невронската мрежа со 25 слоја е убедливо најпрецизна, а времетраењето на тренирање на мрежата е подолго само од она на полиномните модели. Бројот на слоеви кај невронската мрежа може да се промени подоцна доколку е потребна поголема прецизност (со поголем број на слоеви) или пократко времетраење (со помал број на слоеви).

Слични заклучоци можат да се извлечат и од сликата 4-11 каде се прикажани вредностите на коефициентот на корелација r за различните методи на регресија. Најдобро се истренирани моделите на машинско учење со невронски мрежи и тоа за податочно множество со големина од 1000 и од 10.000 мерни, податочни точки. Очигледна е и последичноста помеѓу редот на полиномниот модел и вредноста на коефициентот на корелација.

4.3.2 Модел на Лотка-Волтера за гасната издувна емисија

Моделот на Лотка-Волтера служи за моделирање на гасната издувна емисија, така што се создадени засебни модели за CO, CO₂, NO_x и THC. Работата на овие модели има започнато пред посетата на Универзитетот во Бат [1,12], но за време на истата, моделите се пренаменети со цел да се интегрираат во напредниот модел на дизел-мотор за потребите на софтверската алатка за изучување на процесот на калибрација. Моделите се така оформени што претставуваат повеќедимензионални равенства со мемориски

влезови и динамички филтри, а чии влезни параметри (табела 4-4) се прилагодени на опсегот на податочното множество од 10.000 мерни, податочни точки.

Табела 4-4 Оперативниот опсег на влезните параметри во Моделите на Лотка-Волтера за гасната емисија на CO, CO₂, NO_x и THC

	Влезен параметар	Оперативен опсег		Единица мерка
		Минимум	Максимум	
1	Брзина на моторот	780	2540	RPM
2	Вртлив момент	-3	278	Nm
3	Агол на впрскување на горивото	-8.31	5.31	°ATDC
4	Масен проток на воздухот	16	355	kg/h
5	Притисок на горивото (Common Rail)	223	1438	Bar

Согласно референцата [13], времетраењето на компјутерската симулација за модел изработен во Simulink може да се подобри така што би се намалил бројот на компајлирани блокови со програмски код (како MATLAB функции и S-функции) во моделот. Од таа причина, беше одлучено дека моделот на Лотка-Волтера ќе се изработи со примена на „прости“ блокови од библиотеката на Simulink.

Секој од засебните модели за гасната емисија на CO, CO₂, NO_x и THC е истрениран за влезните параметри од табела 4-3, со помош на сигнал во форма на честотна модулација во празен од на моторот.

4.3.3 В-сплајн модел за издувната емисија на цврсти честички

Моделирањето на издувната емисија на цврсти честички се покажа особено предизвикувачки бидејќи ова беше единствената категорија за која не беа обезбедени податоци при испитувањето на моторот Ford Duratorq од 2.4l. Од таа причина, алтернативното решение беше да се обезбеди податочно множество кое се користело за потребите на некој друг научно-истражувачки проект.

Од податочните множества кои беа достапни, најпрво се разгледуваа податоци од мерења извршени на дизел-мотор со директно впрскување и турбополнач (анг. Turbocharged, Direct Injection – TDI) со зафатнина од 1.9l од производителот Volkswagen [14]. Меѓутоа, податоците беа премногу стари (1999 година) што ги прави нерелевантни за современите дизел-мотори кои исполнуваат многу поригорозни стандарди за емисијата на цврсти честички. Понатаму, се разгледуваа истражувањата од [15-17] поради нивните модели на емисијата на цврсти честички изработени во Simulink, но беше увидено дека секој од овие модели значително би ги зголемил процесирачките побарувања на напредниот MVEM модел на дизел-мотор. Исто така, емпириските податоци врз основа на кои биле креирани овие модели, не беа објавени.

Табела 4-5 Оперативниот опсег на влезните параметри во В-сплајн моделот за емисијата на РМ честички [18]

Влезен параметар		Оперативен опсег		Единица мерка
		Минимум	Максимум	
1	Брзина на моторот	780	2540	RPM
2	Количество на впрскано гориво	3	63	mg/cylinder/stroke
3	Агол на впрскување на горивото	-8	4	°ATDC
4	Количество на O ₂ во гранката за полнење	0.15	0.21	/
5	Притисок во гранката за полнење	1	2.5	Bar

Најпосле, беше пронајден В-сплајн модел за емисијата на NO_x и цврсти честички за 5-цилиндричен, дизел-мотор на Volvo со зафатнина од 2.4l, опишан во трудот [18]. Поради истата зафатнина со моторот Ford Duratorq кој служеше како тест-мотор при формирањето на податочното множество за креирање на регресиониот модел на моторот, се претпоставува дека количеството на цврсти честички во издувната емисија на двата мотори би било слично.

Податочното множество со чија помош бил трениран В-сплајн моделот не беше објавено, но авторот го достави преку е-мејл кореспонденција [18]. Влезните параметри во В-сплајн моделот и опсегот на нивните вредности е даден во табелата 4-5. Резултатите за просечната апсолутна процентна грешка на моделот изнесуваат 5% за NO_x и 29% за количеството на РМ честички.

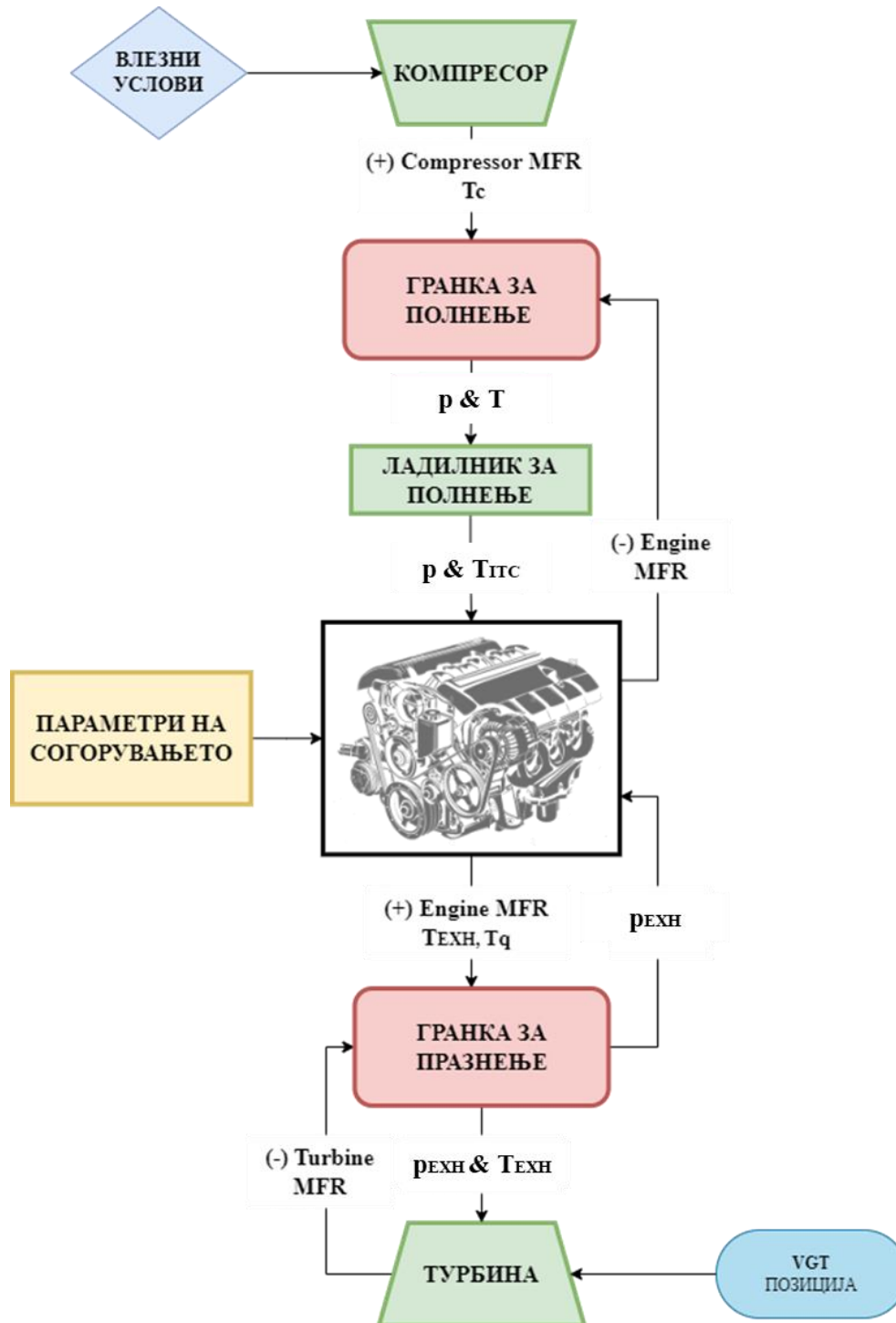
4.4 Референци

- [4-1] R. D. Burke, W. Baumann, S. Akehurst, and C. J. Brace, Dynamic modelling of diesel engine emissions using the parametric volterra series (2013) Journal of Automobile Engineering 228 (2), pp. 164–179
- [4-2] P. Dowell (2012) Real-Time Heat Release Model of a HDSI Diesel Engine. Doctoral Thesis. University of Bath
- [4-3] S. Domazetovska (2022) The use of AI in the recognition and classification of sound events. Doctoral Thesis in Mechanical Engineering Faculty of Mechanical Engineering – Skopje. University “Ss. Cyril and Methodius” – Skopje
- [4-4] C. D. Rakopoulos, and E. G. Giakoumis (2009) Diesel Engine Transient Operation: Principles of Operation and Simulation Analysis. Springer, Berlin
- [4-5] M. Mouzouras (2022) New methodologies for assessing the behavior of vehicles under real driving emissions testing regimes. Doctoral thesis. University of Bath

- [4-6] N. Manev (2022) Postgraduate Researcher visit to the University of Bath 07.11-09.12.2022
- [4-7] T. Burggraf, M. Joswig, E. M. Pfetsch, M. Radons & S. Ulbrich (2020) Semi-automatically optimized calibration of internal combustion engines, *Optimization and Engineering*, 21, pp. 73-106
- [4-8] R. Isermann & H. Sequenz (2016) Model-based development of combustion-engine control and optimal calibration for driving cycles: general procedure and application. *IFAC-PapersOnLine series*, 49 (11), pp. 633-640
- [4-9] R. V. Everett (2011) An Improved Model-Based Methodology for Calibration of an Alternative Fueled Engine. Master Thesis. Graduate Program in Mechanical Engineering - The Ohio State University
- [4-10] IAV GmbH (2005) DoE - Design of Experiments Verlag Moderne Industrie
- [4-11] Mathworks (2022) Improve neural network generalization and avoid overfitting. <http://uk.mathworks.com/help/nnet/ug/improve-neural-network-generalization-and-avoid-overfitting.html>
- [4-12] R. Burke, B. Fath, S. Akehurst, C. Brace, W. Baumann & R. Wascheck (2011) Practical approach to thermo-dynamic modelling of diesel engine emissions. *Design of Experiments in Engine Development*, 6th edn, Expert Verlag, pp. 88–103
- [4-13] S. Popinchalk (2012) Improving simulation performance in Simulink, *Mathworks Newsletter*. URL: <http://uk.mathworks.com/company/newsletters/articles/improving-simulation-performance-in-simulink.html?refresh=true>
- [4-14] S. Sluder. Oak Ridge National Laboratory
- [4-15] D. L. Siebers (1999) Scaling liquid-phase fuel penetration in diesel sprays based on mixing-limited vaporization, in ‘SAE Technical Paper’, SAE International. Doi: 10.4271/1999-01-0528
- [4-16] P. Versaevel, H. Colas, C. Rigaudeau, R. Noirot, G. C. Koltsakis & A. M. Stamatelos (2000) ‘Some empirical observations on diesel particulate filter modeling and comparison between simulations and experiments’, Society of Automotive Engineers, Inc.
- [4-17] C. T. S. Maranta (2014) Modeling soot emissions in diesel engines by means of semi-empirical approaches and a combustion model based on detailed chemistry. Master Thesis. Politecnico di Milano
- [4-18] M. Grahn, K. Johansson & T. McKelvey (2014) Data-driven emission model structures for diesel engine management system development. *International Journal of Engine Research*

5 Напреден модел на современ дизел-мотор во MATLAB Simulink

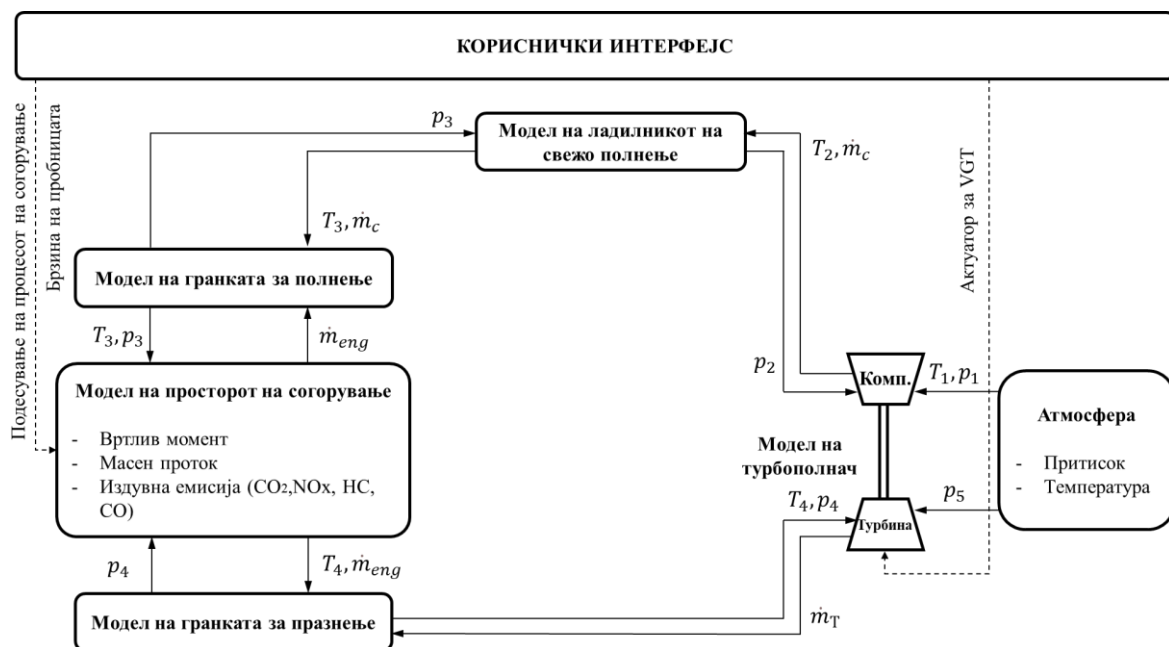
Во претходното поглавје беше изработен регресионен модел на мотор со помош на податочно множество добиено од 4-цилиндричниот, дизел-мотор Ford Duratorq со зафатнина од 2.4l. Овој модел на машинско учење со невронска мрежа, заедно со моделите на Лотка-Волтера за гасната издувна емисија и В-сплајн моделот за издувната емисија на цврсти честички во голема мера ги претставуваат механизмите на измена на работниот флуид во моторот.



Слика 5-1 Дијаграм за предложениот напреден модел на современ дизел-мотор

Во ова поглавје останува да се измоделираат гранката за полнење, ладилникот на свежо полнење, турбополначот, EGR системот, гранката за празнење, механизмите за утврдување на соодносот гориво-воздух и влијанијата од раното впрскување на горивото, по што следи обединување на различните компоненти во единствен, напреден модел на современ дизел-мотор.

Во сликите 5-1 и 5-2 се дадени дијаграми за предложениот напреден модел. Врз основа на овие дијаграми, во MATLAB Simulink се изработени засебните компоненти на моделот, а структурата и пристапот во креирањето на секој од нив се дадени подолу во ова поглавје. Во дијаграмот од сликата 5-2 кај одредени блокови е ставен знак (+) или (-) како индикација за насоката на движење на масениот проток на работниот флуид. Иако поради бројни причини може да се појават одредени загуби на работниот флуид, заради едноставноста на моделот и внимавајќи на процесирачките побарувања и времетраењето на компјутерската симулација, се смета дека овие загуби се занемарливи.



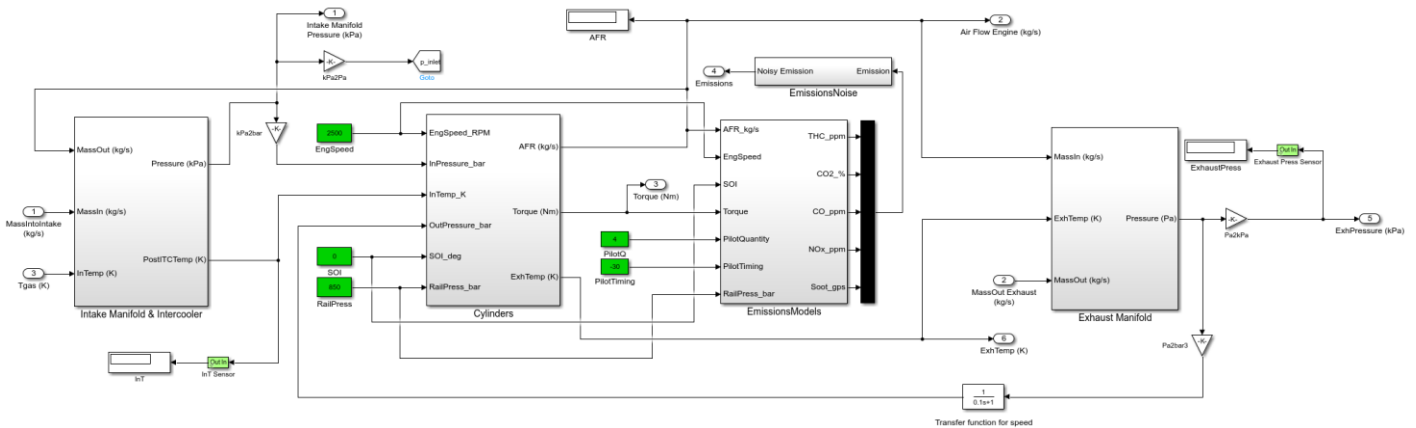
Слика 5-2 Приказ на главните компоненти од моделот на современ дизел-мотор

Секогаш кога влезот во одреден блок на некаков начин зависи од излезот од истиот тој блок се појавуваат алгебарски грешки поради повратната врска (анг. algebraic loop errors). Намалувањето на бројот на овие грешки е неопходно за да се обезбеди оптимално времетраење на компјутерската симулација. Така на пример, случајот каде температурата од ладилникот за полнење се пресметува по гранката за полнење е нелогично, но доколку се подели блокот на гранката за полнење т.ш. во еден дел од блокот ќе се пресметува и температурата, тоа ќе води кон создавање на дополнителни алгебарски грешки и значително подолго времетраење на компјутерската симулација.

5.1 Модел на просторот за согорување – цилиндарски блок

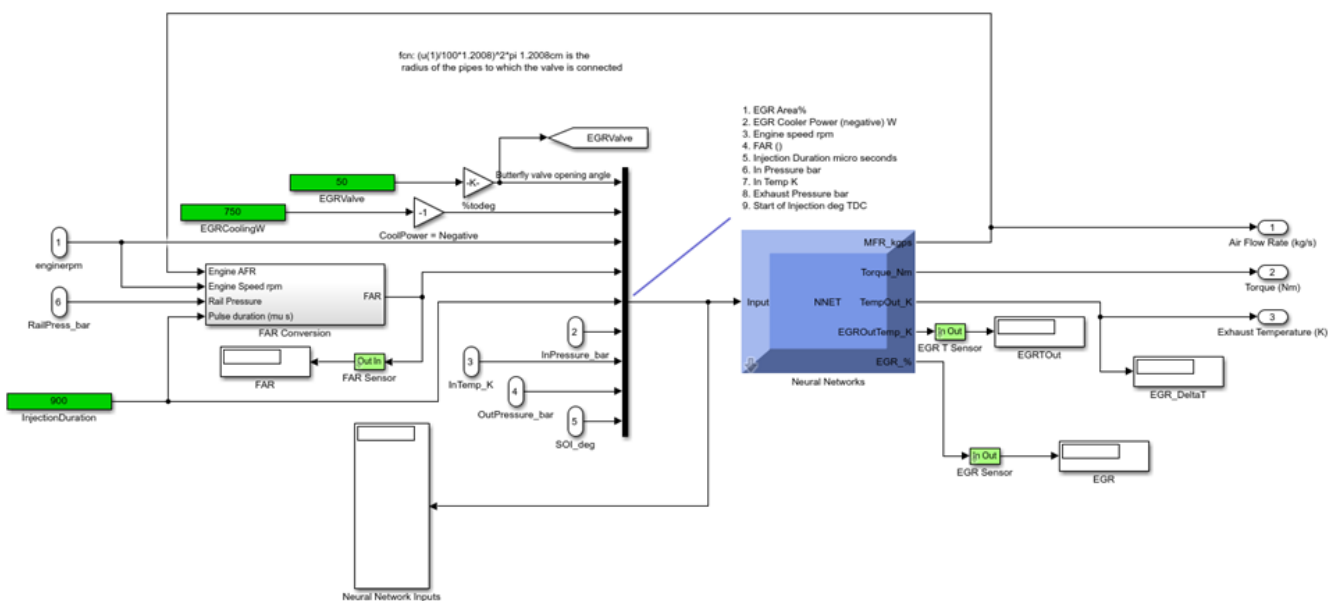
Моделот на просторот за согорување е измоделиран како потсистем на напредниот модел на дизел-мотор, при што потсистемот се служи со лук-ап табели за

да го пресмета масениот проток на работниот флуид во и надвор од цилиндрите (\dot{m}_{eng}) со помош на притисокот во гранката за полнење (p_3), температурата во гранката за полнење (T_3), притисокот во гранката за празнење (p_4) и брзината на моторот (N_{eng}). Моделот на просторот за согорување исто така ја предвидува температурата во гранката за празнење (T_4), вртливиот момент на моторот и количеството на CO, CO₂, NO_x, THC и PM честички во издувната емисија, за што ќе го користи претходно креираниот модел на машинско учење и лук-ап табели развиени за потребите на неколку други модели на мотор [1-4].



Слика 5-3 Моделот на современ дизел-мотор (без турбополнач)

Дополнително, моделот на просторот за согорување исто така мора да ги земе предвид параметрите кои влијаат на процесот на согорување како количеството на впрскано гориво и почетокот на впрскување на горивото, односно аголот на впрскување. Најпосле во моделот на просторот на согорување се вметнати и влијанијата од присуството на EGR системот, бидејќи истиот не е измоделиран како засебен блок.

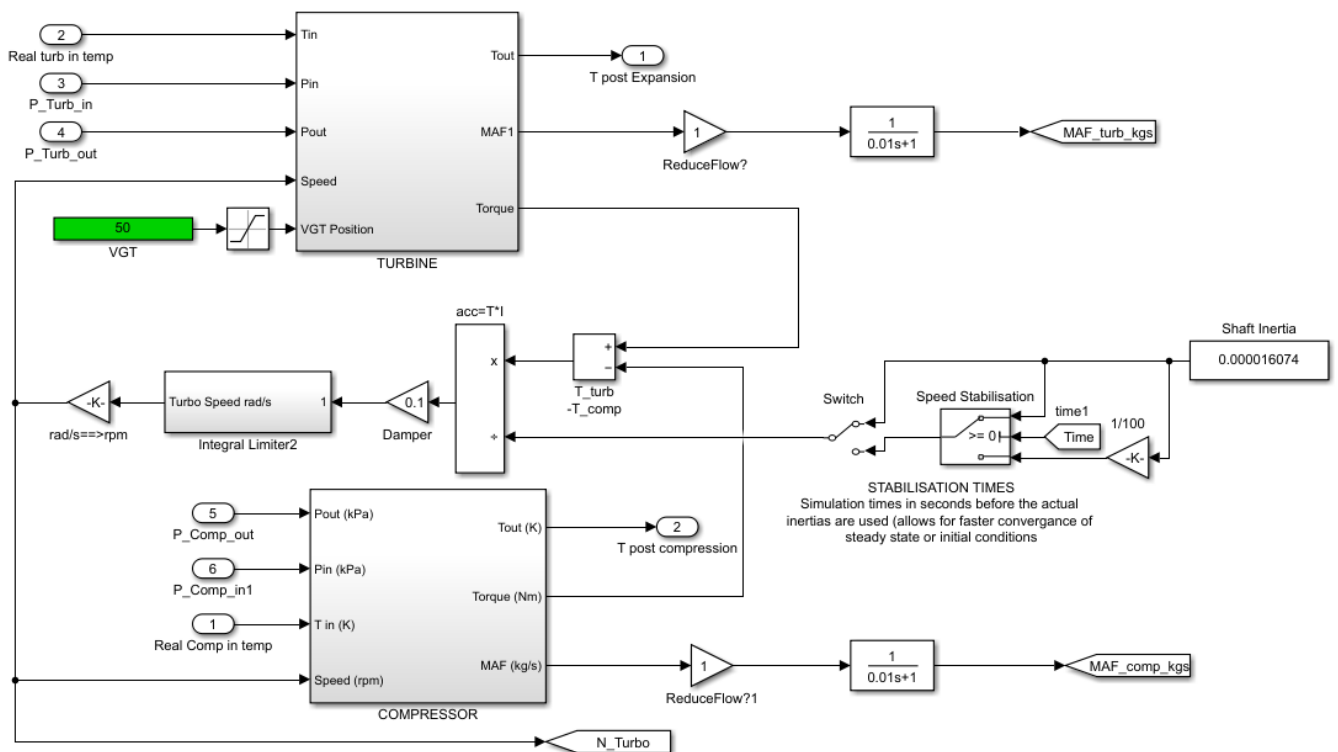


Слика 5-4 Моделот на просторот за согорување каде е вметнат моделот на машинско учење

Најважниот сегмент на овој потсистем на моторот е моделот на машинско учење со невронска мрежа (слика 5-4) кој ги предвидува термодинамичките механизми при работата на моторот. Користејќи ја скриптата од кодот за генерирање на невронската мрежа (прикажан во Прилог Б) во MATLAB, генерирана е невронска мрежа со 25 слоја. За тренирање на мрежата се користи податочното множество од 10.000 мерни, податочни точки и алгоритмот на Баесова регулација.

5.2 Турбополнач

Моделот на турбополначот е изработен на Универзитетот во Бат, како дел од проект за потребите на компанијата Ford, а со цел оптимизирање на работата на турбополначот, па затоа заедно со него не бил изработен модел на мотор. Со оглед на тоа што станува збор за турбополнач од моторот Ford Duratorq со зафатнина од 2.2l, се претпоставува дека функционалните карактеристики на овој турбополнач се многу слични на оној со кој е опремен моторот со зафатнина од 2.4l кој претходно беше испитуван. За да се прилагоди моделот за потребите на докторската теза, од него се отстранети непотребните компоненти и се ажурирани и обединети 1-димензионалните управувачки мапи (за ефикасноста и масениот проток) во 3-димензионални интерполациски табели (заради намалување на процесирачките побарувања) [5]. Моделот се состои од модели на компресорот и турбината, со соодветни мапи за нивната работа и модел на осовина (слика 5-5).



Слика 5-5 Модел на турбополначот изработен во MATLAB Simulink

Моделот на осовина е задолжен за пресметка на бројот на вртежи во минута на осовината (ротациона брзина на турбополначот), со помош на вредностите за моќноста на турбината и компресорот (P_T и P_C), соодветно (равенство 5.1):

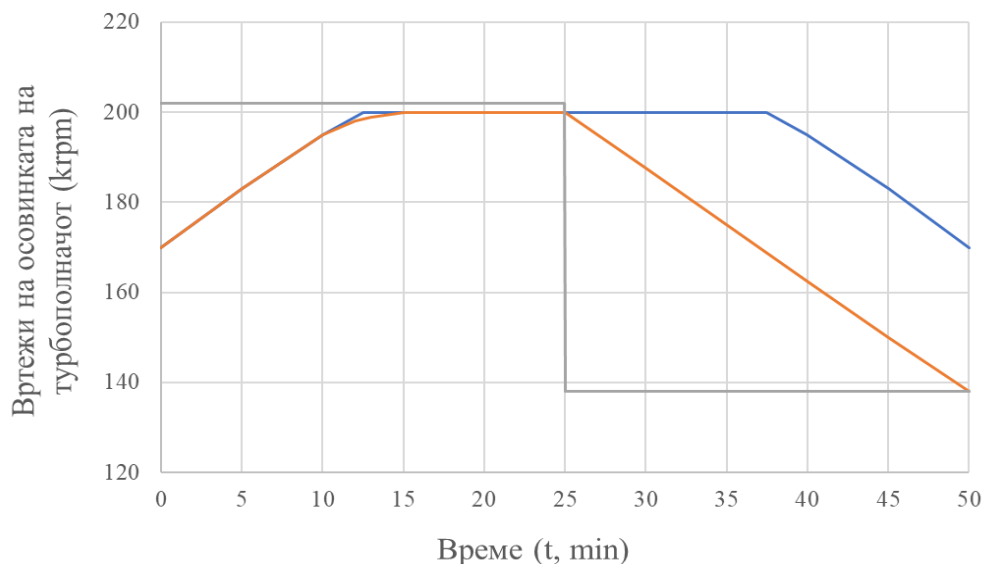
$$N_{TC} = \frac{P_T - P_c}{N_{TC}} dt \quad 5.1$$

Управувачките мапи (лук-ап табели) за компресорот и турбината содржат равенства за масениот проток (\dot{m}_c и \dot{m}_t) и изентропските ефикасности (η_C и η_T) како функции од притисокот и брзината на турбополначот. Овие мапи овозможуваат предвидување на излезните вредности за моќноста и температурата на компресорот (равенство 5.2 и 5.3) и турбината (T_2 и T_5).

$$P_c = \dot{m}_c c_p (T_2 - T_1) \quad 5.2$$

$$T_2 = T_1 \left(1 + \frac{\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\eta_C} \right) \quad 5.3$$

Вака креираниот модел на турбополнач функционираше успешно со една забелешка која се однесува на надминување на предвидениот број на вртежи на осовината. По достигнување на брзина на турбополначот од 220.000 RPM, моделот сам престанува со работа. Бидејќи не е позната природата на појава на овој проблем (односно е надвор од обемот на истражувањето поврзано со докторската теза), наједноставно решение беше вметнување на граничник на бројот на вртежи кој го спречува турбополначот да надмине брзина од 200.000 RPM. Брзината на турбополначот и улогата која ја игра граничникот за нејзина успешна регулација е прикажана на графикот на сликата 5-6.



Слика 5-6 Улогата на граничникот на бројот на вртежи на турбополначот

За да се постигне ефектот на присуство на турбополнач чија турбина има варијабилна геометрија (карактеристична за современите мотори), во блокот на

турбината е додаден влез кој ја претставува позицијата на лопатките од турбината како процент на проток на издувните гасови кои го погонуваат турбополначот.

5.3 Гранка за полнење со ладилник на свежото полнење и гранка за празнење

Гранката за полнење со ладилник на свежото полнење и гранката за празнење се измоделирани како засебни работни волумени низ кои минува работниот флуид. Во двата работни волумени важно е да се изврши пресметка на масениот проток на работниот флуид и притисокот кој владее во овие волумени. За оваа намена се користат равенствата 5.4 и 5.5:

$$m = m_0 + \int_0^{end} (MFR_{in} - MFR_{out}) = m_0 \int_0^{end} dm_{in} - \int_0^{end} dm_{out} \quad 5.4$$

$$p_i = \frac{m_i RT_i}{V_i} \quad 5.5$$

Во равенството на идеален гас (равенство 5.5), идеалната гасна константа за воздух изнесува $R = 287 \text{ J/kgK}$. За потребите на моделот, се смета дека влијанието на издувните гасови (согорено гориво) кои потекнуваат од EGR системот врз работниот флуид во гранката за полнење е занемарливо [6].

Вкупната маса која може да биде акумулирана во секој од двата работни волумени се пресметува со равенствата 5.6 и 5.7:

$$dm_{in} = (\dot{m}_c - \dot{m}_{eng})dt \quad 5.6$$

$$dm_{ex} = (\dot{m}_{eng} - \dot{m}_T)dt \quad 5.7$$

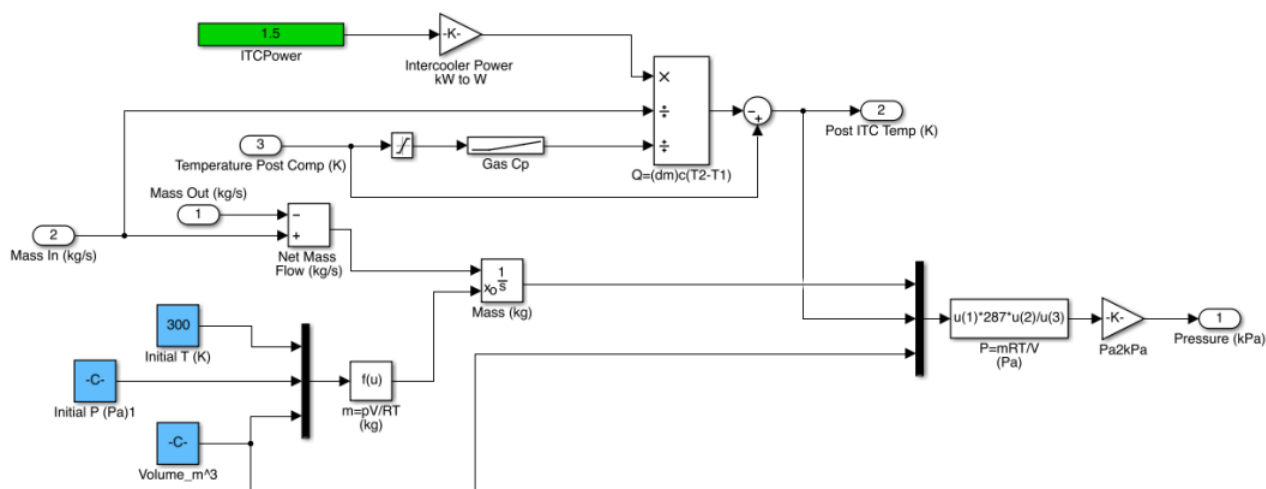
На сликата 5-7 е прикажан модел на гранката за полнење со ладилник на свежото полнење во MATLAB Simulink. Од сликата може да се забележи дека вредноста за моќноста на ладилникот на свежо полнење се подесува со внес од страна на корисникот. Ладилникот на свежо полнење претставува едноставен модел за размена на топлината со околината (P_{ITC}), а служи за пресметка на температурата во гранката за полнење (T_3) по ладилникот, при што падот во притисокот во ладилникот е занемарен ($p_3 = p_2$).

$$P_{ITC} = \dot{m}_c c_p (T_3 - T_2) \quad 5.8$$

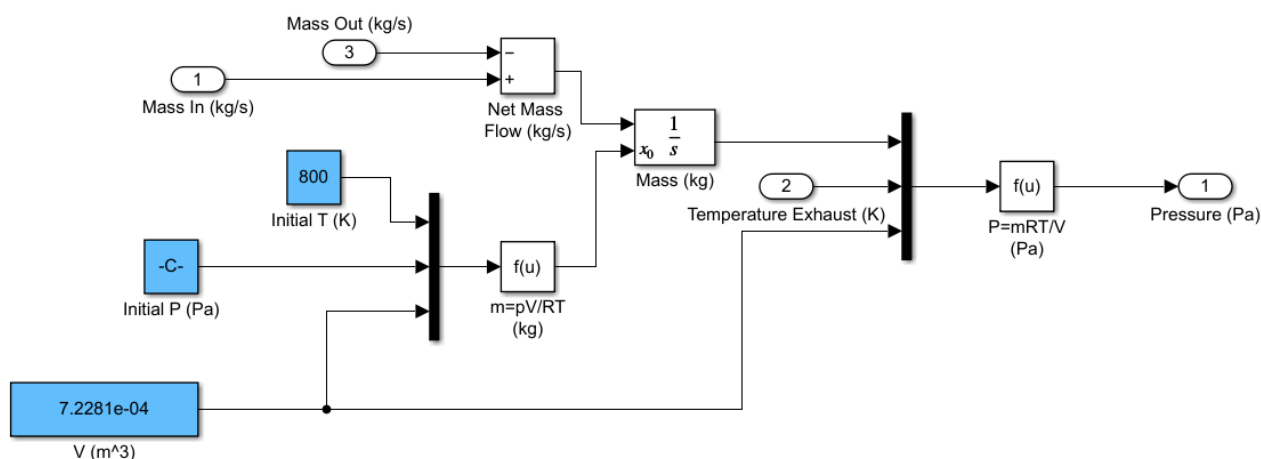
$$T_3 = T_2 - \frac{P_{ITC}}{\dot{m}_c c_p} \quad 5.9$$

На слика 5-8 е даден моделот на гранката за празнење. За овој модел, главно важат истите равенства како за гранката за полнење, со исклучок на температурата T_4 која претставува влез во потсистемот на гранката за празнење, а потекнува од моделот на машинско учење со невронска мрежа кој се наоѓа во блокот на моторот. И тука, како и во гранката за полнење се занемарува фактот дека издувните гасови имаат различни

својства од оние на воздухот, а во пресметките се користи идеалната гасна константа за воздух (R). Специфичниот топлински капацитет на воздухот се пресметува со помош на интерполяциски блок преземен од моделот на турбополначот.



Слика 5-7 Модел на гранката за полнење со ладилник на свежото полнење во MATLAB Simulink



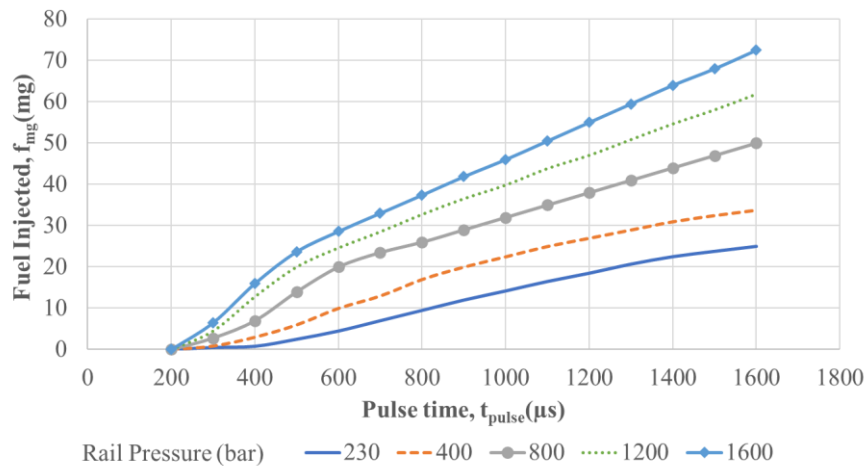
Слика 5-8 Модел на гранката за празнење во MATLAB Simulink

5.4 Управување со соодносот гориво-воздух

Соодносот гориво-воздух е клучен за верното претставување на процесот на согорување во блокот на моторот бидејќи од него зависи како ќе се одвива овој процес. За да се пресмета соодносот гориво-воздух (анг. Fuel to Air Ratio – FAR) потребни се вредностите за притисокот во заедничката распределителна цевка од системот за довод на гориво и создавање на смеса.

Докторската теза [2] одбранета на Универзитетот во Бат, содржи емпириска мапа за впрскувањето на гориво за моторот Ford Duratorq со зафатнина од 2.0l чии влезни параметри се времетраење на сигналот за активација на прскалките и количество на впрскано гориво. Со оглед на тоа што и овој мотор е од истата програма на Ford, само

има различна зафатнина од моторот од 2.4l кој беше испитуван, се претпоставува дека изведбата на системот за довод на гориво и создавање на смеса, а особено на прскалките е многу слична за двата мотори. Затоа, мапата прикажана во слика 5-9 е претворена во интерполациски потсистем кој го предвидува количеството на впрскано гориво и како таква е вметната во блокот на моторот.

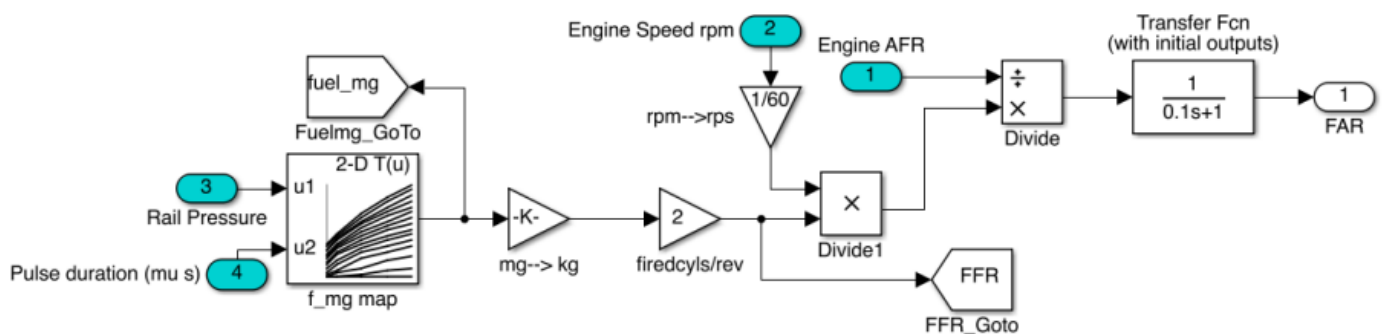


Слика 5-9 Мапа за впрскувањето на гориво во моторот Ford Duratorq со зафатнина од 2.0l [2]

Врз основа на мапата, во блокот за пресметка на соодносот гориво-воздух (слика 5-10) е имплементирано и равенството 5.10:

$$FAR = \frac{f_{mg}(p_{rail}, t_{pulse})N_f(\frac{N}{60})}{AFR} \quad 5.10$$

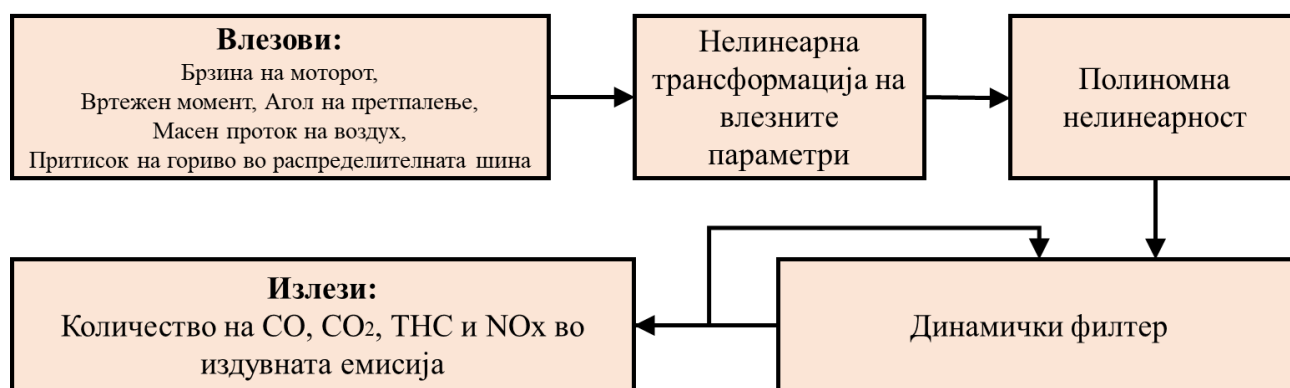
Во слика 5-10 е прикажан изгледот на Simulink блокот за пресметка на односот гориво-воздух. Бидејќи еден во влезовите во овој блок е односот воздух-гориво кој потекнува од блокот на моторот, во блокот за пресметка на односот гориво-воздух е вметната преносна функција која спречува појава на алгебарски грешки поради повратната врска.



Слика 5-10 Изглед на Simulink блокот за пресметка на односот гориво-воздух

5.5 Модел на Лотка-Волтера за гасната издувна емисија

Претходно беше напоменато дека моделите на Лотка-Волтера за гасната издувна емисија на CO, CO₂, NO_x и THC потекнуваат од претходно истражување спроведено на Универзитетот во Бат [1,7] по што беа прилагодени за употреба во напредниот модел на дизел-мотор, за потребите на софтверската алатка за изучување на процесот на калибрација. Моделите се базирани на повеќедимензионални равенства со мемориски влезови и динамички филтри, а чии влезни параметри се прилагодени на опсегот на податочното множество од 10.000 мерни, податочни точки. Вака креираните модели, заедно со моделот на невронска мрежа успешно го предвидуваат динамичкото однесување на гасната издувна емисија како резултат на работата на моторот, а на сликата 5-11 е даден логичкиот тек на настани и калкулации потребен за пресметката на количеството на CO, CO₂, NO_x и THC. Со цел помали процесирачки побарувања, моделите се изработени во Simulink, бидејќи кодирањето во MATLAB код би можело значително да ја забави симулацијата [5].



Слика 5-11 Логичкиот тек на настаните во моделите на Лотка-Волтера за пресметка на количеството на CO, CO₂, NO_x и THC во издувната емисија

Пример за користените равенства во секој од засебните блокови за емисијата на CO, CO₂, NO_x и THC е даден подолу [1]:

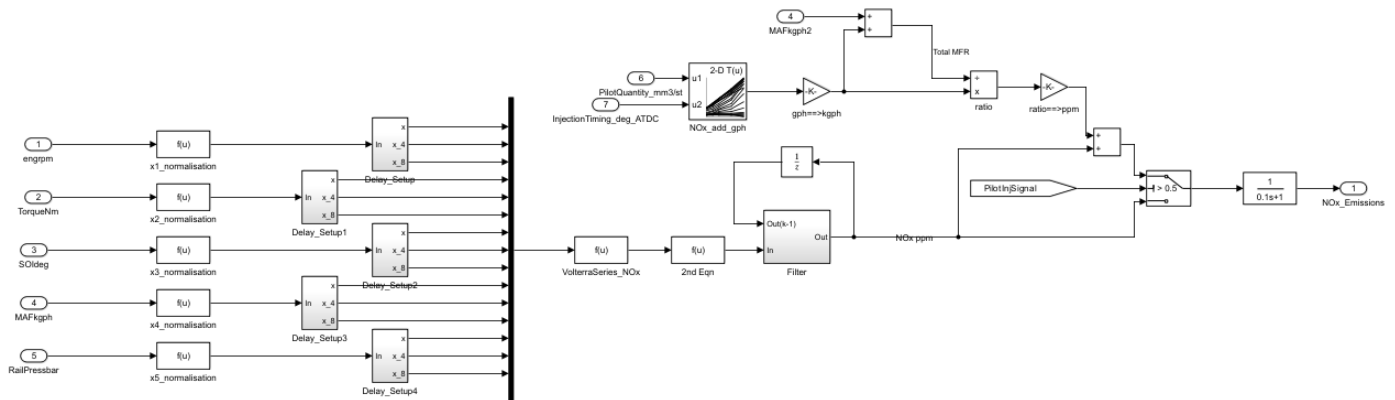
$$\begin{aligned}
 y = & p(1) + p(2)x_{5_8} + p(3)x_{2_8} + p(4)x_{1_8} + p(5)x_{2_4} + p(6)x_5 + p(7)x_4 \\
 & + p(8)x_3 + p(9)x_1 + p(10)x_{4_8}x_{5_8} + p(11)x_{4_8}^2 + p(12)x_{2_8}^2 \\
 & + p(13)x_{1_8}x_{2_8} + p(14)x_{1_8}^2 + p(15)x_3x_4 + p(16)x_2x_4 \\
 & + p(17)x_2x_3 + p(18)x_1x_5 + p(19)x_1x_2 + p(20)x_1^2
 \end{aligned} \tag{5.11}$$

Во равенството 5.11, влезовите се x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 и p кои ги претставуваат оптимизираните константи на системот. Индексите претставуваат вредност за задоцнувањето, како на пример x_{4_8} се однесува на четвртиот влезен сигнал, но забавен за 8 примероци. Со оглед на тоа што моделот е трениран со сигнал од 10 Hz, вкупното задоцнување изнесува 0.8 s.

$$y = (0.25y + 1)^4 \tag{5.12}$$

Равенството 5.12 е второто равенство кое се применува во секој од моделите, додека со равенството 5.13 се моделира влијанието на динамичкот филтер, каде со τ е означена временската константа, додека y_1 е излезот забавен за 1 примерок.

$$y = (1 - \tau) * input + \tau y_1 \quad 5.13$$



Слика 5-12 Приказ на моделот на Лотка-Волтера за емисијата на NOx изработен во Simulink

Овие равенства се вметнати во засебни Simulink модели за емисијата на CO, CO₂, NOx и THC. На сликата 5-12 е даден приказ на моделот на Лотка-Волтера за емисијата на NOx.

5.6 В-сплајн модел за емисијата на цврсти честички

За моделирање на емисијата на цврсти честички се користи В-сплајн модел за емисијата на NOx и цврсти честички за 5-цилиндричен, дизел-мотор на Volvo со зафатнина од 2.4l, опишан во трудот [3]. Поради истата зафатнина со моторот Ford Duratorq од 2.4l и периодот на производство (ЕУРО стандардот на емисија кој го исполнуваат), се претпоставува дека количеството на цврсти честички во издувната емисија на двата мотори би било слично. Најголем дел од податоците потребни за моделирање на издувната емисија на цврсти честички и соодносот со емисијата на NOx, не се содржани во трудот, но се добиени по пат на е-мејл кореспонденција со авторот.

Количеството на цврсти честички (како вкупно количество на саѓи) во издувната емисија се пресметува согласно равенството 5.14:

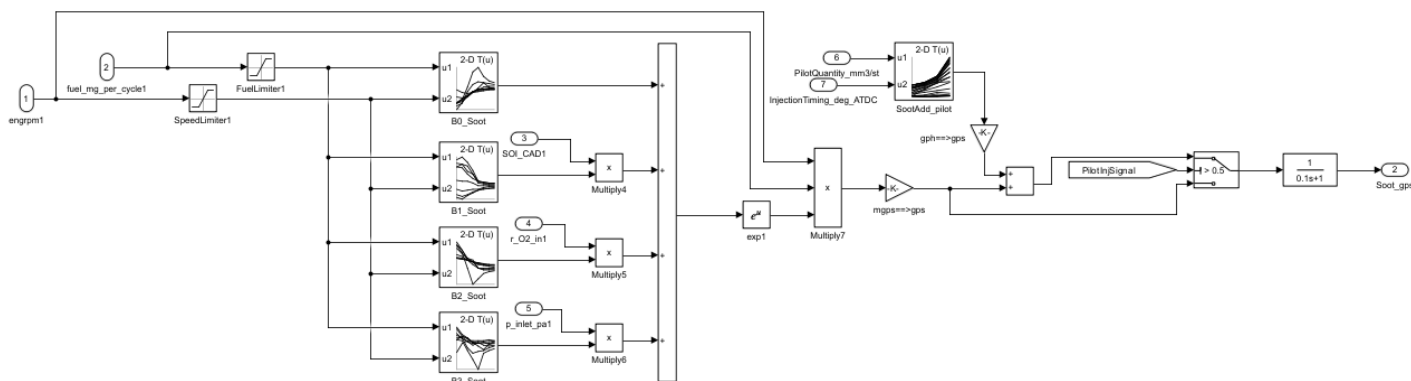
$$Soot(mg/s) = N f_{mg} e^{(B_0 + B_1 SOI + B_2 r_{O_2} + B_3 P_{in})} \quad 5.14$$

Каде со B се претставени емпириските константи кои се преземени од 2-димензионална лук-ап табела во која влезните параметри се количеството на впрскано гориво и бројот на вртежи на моторот. Вредноста за количеството на O₂ во гранката за полнење се пресметува согласно равенството 5.15:

$$r_{O_2} = 0.21 \left(1 - \frac{EGR(\%)}{100}\right) \quad 5.15$$

Во ова равенство се направени две претпоставки, првата: земена е константна вредност за присуството на O_2 во гранката за полнење (како процент од вкупното количество на воздух со вредност 0.21) и втората: гасовите кои потекнуваат од EGR системот не содржат O_2 .

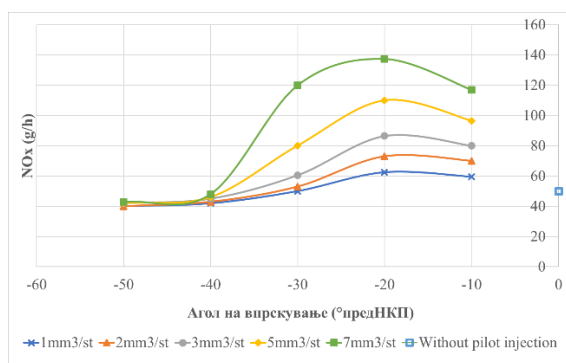
В-сплајн моделот во кој се имплементирани овие равенства е прикажан на сликата 5-13. Сличен модел кој потекнува од истражувањето спроведено во [3] е развиен и за количеството на NO_x поради компромисот за присуството на NO_x и PM честички во издувната емисија на моторот.



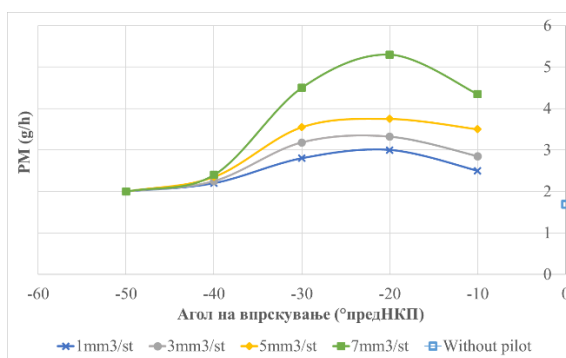
Слика 5-13 Приказ на В-сплајн моделот за емисијата на PM честички изработен во Simulink

5.7 Влијанието на раното впрскување на гориво врз издувната емисија

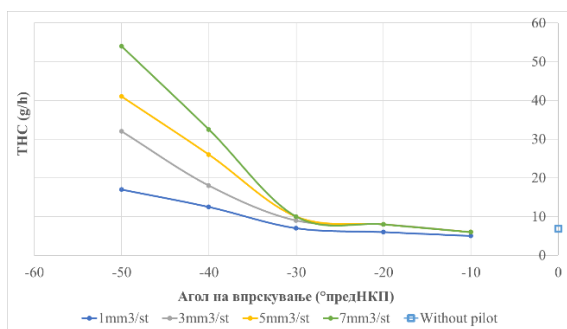
Во трудот [4] е образложено влијанието на раното впрскување на горивото врз издувната емисија и количествата на цврсти честички, THC , NO_x и CO_2 . За да се долови влијанието на раното впрскување на горивото врз емисиите и во напредниот модел на современ дизел-мотор, дијаграмите кои беа приложени во [4] (слика 5-14 до слика 5-17) беа пресликани со помош на MATLAB функција и вметнати во блокот на моторот како управувачки површини (слика 5-18 до слика 5-21).



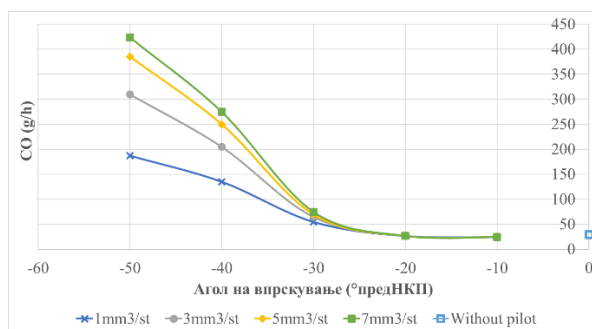
Слика 5-14 Влијанието на раното впрскување врз количеството на NO_x



Слика 5-15 Влијанието на раното впрскување врз количеството на PM честички

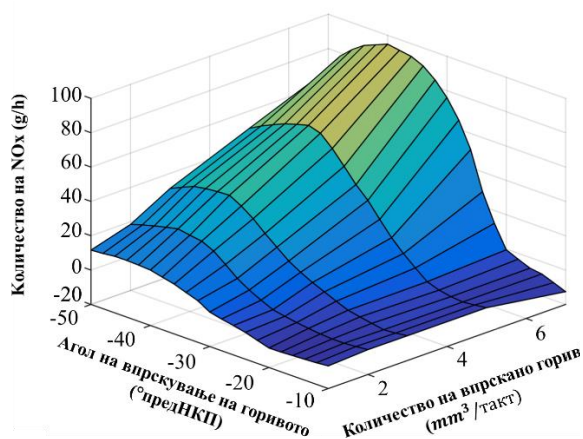


Слика 5-16 Влијанието на раното врскување врз количеството на THC

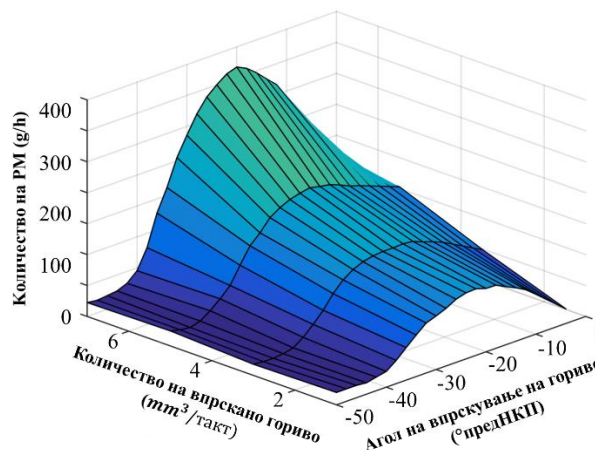


Слика 5-17 Влијанието на раното врскување врз количеството на CO

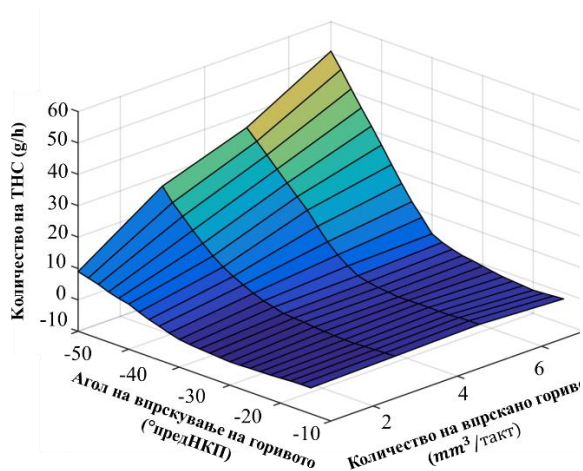
Овој пристап смета на претпоставката дека кривите ќе останат исти за сите услови на работа на моторот, иако испитувањето во [4] е реализирано при константен број на вртежи (2000 RPM) и за агол на врскување 0° пред/по НКП.



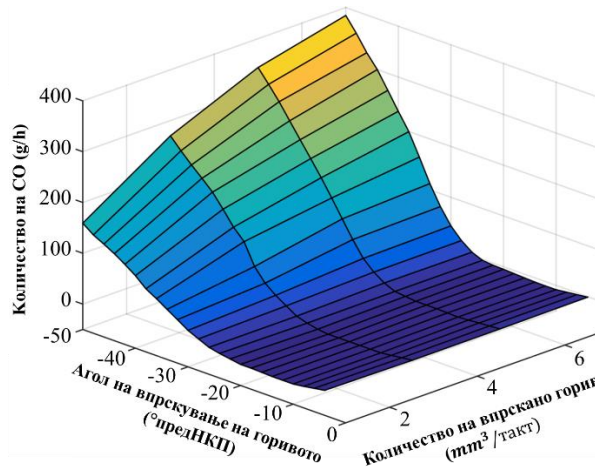
Слика 5-18 Управувачка површина за NOx при рано врскување на горивото



Слика 5-19 Управувачка површина за PM честички при рано врскување на горивото



Слика 5-20 Управувачка површина за THC при рано врскување на горивото



Слика 5-21 Управувачка површина за CO при рано врскување на горивото

Бидејќи пресметката на количествата на РМ честички, ТНС, NOx и CO₂ се одвива преку соодветните модели на Лотка-Волтера, секоја од управувачките површини од слика 5-18 до слика 5-21 е вметната во соодветниот модел. На овој начин веродостојно е претставено динамичкото однесување на гасната издувна емисија, при што не е изоставено ниту влијанието на раното впрскување како карактеристика на современите мотори и нивните електронски управувани системи за довод на гориво и создавање на смеса.

5.8 Моделирање на влијанието на EGR системот врз количеството на издувна емисија

EGR системот не е измоделиран како засебен блок во напредниот модел на современ дизел-мотор, меѓутоа со оглед на тоа што намената на алатката за калибрација и моделот како нејзин најважен дел е едукација, причинско-последичната врска помеѓу присуството на EGR системот и количеството на NOx и РМ честички во издувната емисија мора верно да се долови [8].

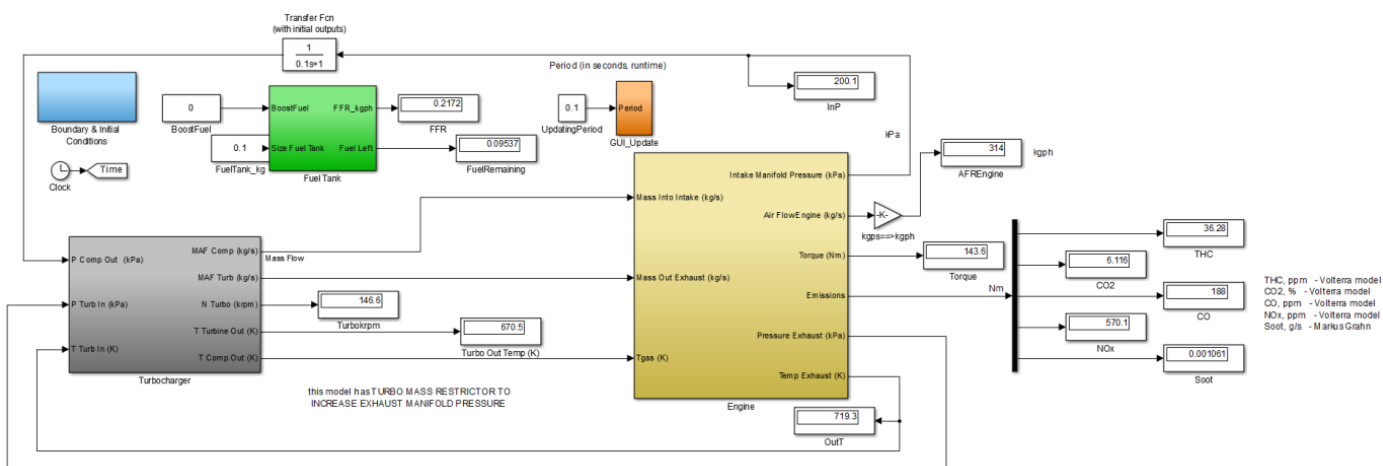
Тоа е постигнато со користење на наодите од истражувањето на [3] и последователно развиениот модел за компромисот помеѓу присуството на NOx и РМ честички во издувната емисија. Моделите на Лотка-Волтера како регресиони модели, исто така го вклучуваат влијанието на присуството на EGR системот со удел на издувните гасови во масениот проток на работниот флуид, но и таму не може да се изолира посебен блок. Од таа причина, емисијата на NOx и РМ честички напредниот модел ја пресметува со помош на моделот Лотка-Волтера за NOx и В-сплајн моделот за NOx и РМ честичките.

5.9 Комплетирање на моделот

Напредниот модел на современ дизел-мотор е составен од сите претходно дефинирани потсистеми чии меѓусебни зависимости се математички регулирани. Горниот слој на комплетниот модел во Simulink е прикажан на слика 5-22.

Вака креираниот модел се состои од:

1. MVEM модел за просторот на согорување кој ги предвидува процесите на масен проток на работниот флуид, согорување и создавање на вртлив момент. MVEM моделот е изграден во интеграција со регресионен модел на машинско учење со невронска мрежа од податочно множество на дизел-моторот Ford Duratorq со зафатнина од 2.4l;
2. Регресионен модел на Лотка-Волтера и В-сплајн модел за механизмите на создавање на CO, CO₂, NOx, ТНС и РМ честички во издувната емисија на моторот [1,3];
3. Физички модели на гранката за полнење и гранката за празнење како засебни работни волумени за моторот Ford Duratorq со зафатнина од 2.4l;
4. Едноставен модел за размена на топлината со околината за ладилникот на свежо полнење; и
5. Полу-физички модел на турбополнач [9].



Слика 5-22 Горниот слој на напредниот модел на современ дизел-мотор во Simulink

5.9.1 Перформанси на моделот

Компјутерската симулација со напредниот модел на современ дизел-мотор се одвива во скоро реално време, со минимални задоцнувања. Процесирачките побарувања се значително намалени така што моделот на просторот за согорување е изведен како модел на машинско учење со невронска мрежа со 25 слоеви. Дијаграмот на логичкиот тек на настани и калкулации на моделот во својата конечна форма е претставен на сликата 5-23. Дијаграмот укажува на сите места каде има појава на алгебарски грешки поради повратната врска, предизвик кој беше надминат со вметнување на преносни функции во потсистемите на моделот каде имаше потреба за тоа. На овој начин се минимизирани сите нестабилности во работата на моделот.

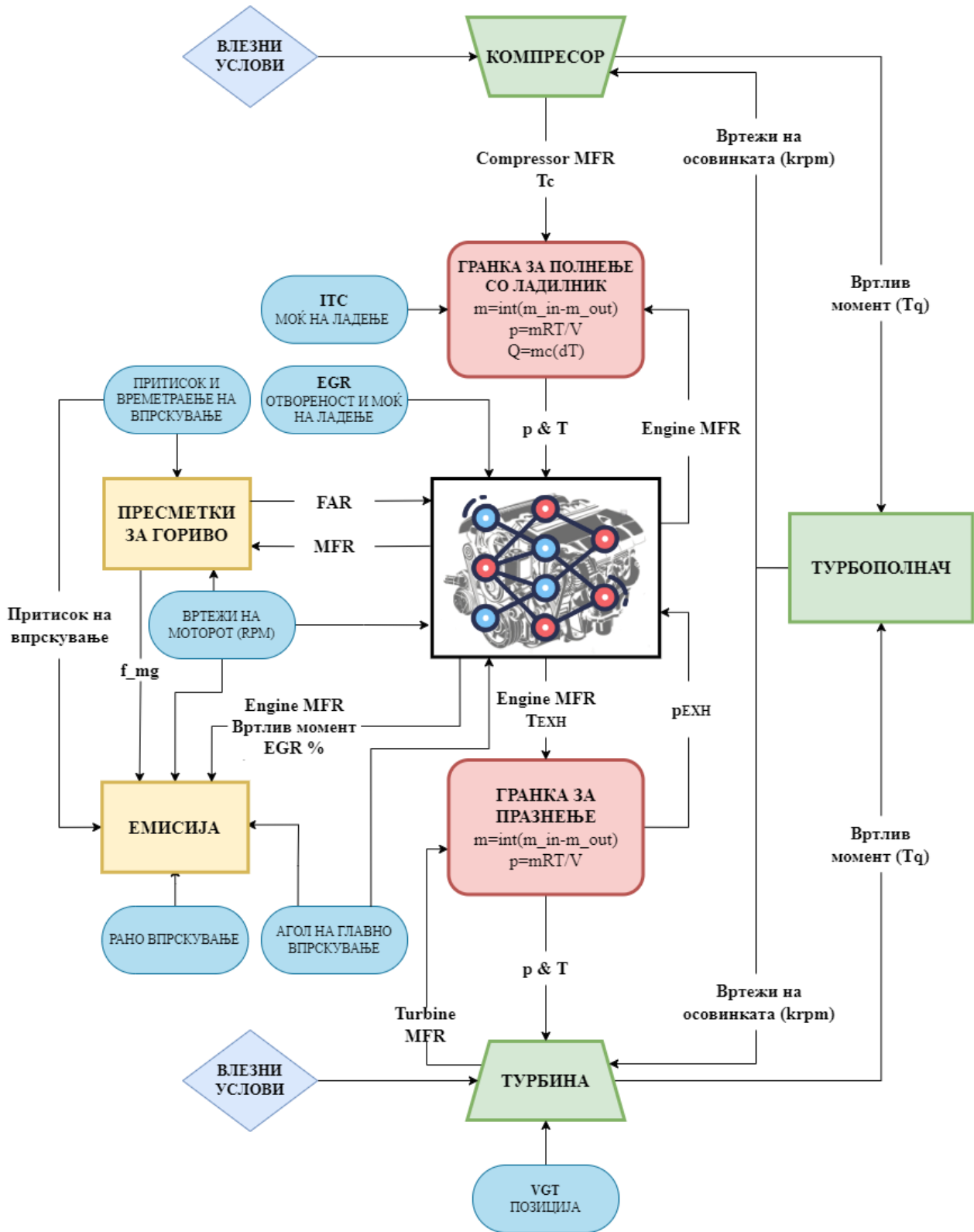
Моделот главно користи методи на регресија (модел на машинско учење, модел на Лотка-Волтера и В-сплајн модел) и едноставни законитости од термодинамика и динамика на флуиди за однесувањето на работниот флуид со цел предвидување на перформансите на моторот. Акцентот во најголема мера е ставен на одржување на правилните причинско-последични врски помеѓу параметрите, а во помала мера на прецизноста на излезите.

Општо земено, тешко е да се креираат модели кои точно ги предвидуваат сите излезни параметри, додека процесирачките побарувања и времетраењето на компјутерската симулација остануваат минимални. Таков е случајот и со напредниот модел на дизел-мотор, кој се потпира на употребата на емпириски податоци, по цена на намалената прецизност. Со тоа што, примената на моделот на машинско учење со невронска мрежа е убедливо најсоодветното решение кое е достапно во моментот за подобрување на прецизноста на моделот без сериозно зголемување на процесирачките побарувања.

5.9.2 Потенцијални недостатоци

Пресметките за вредноста на притисокот во гранката за полнење и гранката за празнење се базирани на 100% воздух, што секако е неточна претпоставка, бидејќи

продуктите од согорувањето имаат друга гасна константа. Присуството на EGR системот влијае на составот на работниот флуид во гранката за полнење, меѓутоа согласно наодите од [10] потенцијалната грешка би изнесувала околу 2% и затоа е занемарена.



Слика 5-23 Дијаграм на целосниот напреден модел на современ дизел-мотор

Исто така, најголемиот бенефит од присуството на EGR системот е намалување на количеството на NO_x во издувната емисија. Познато е уште и дека намалување на максималната температура на согорувањето и намалување на количеството на O₂ во просторот за согорување потребни за да се намали емисијата на NO_x би водела кон зголемување на количеството на PM честички во издувната емисија. Меѓутоа, согласно наодите од докторската теза од референцата [11] присуството на EGR системот влијае и врз количеството на емисијата на сите останати состојки од издувната емисија. Ова не е вклучено во моделот, што може да се смета за негов недостаток.

Дел од компонентите на моделот се засновани на проценки и претпоставки од други релевантни научни дела и затоа е важно да се нагласи дека просторот за грешка е веројатно поголем во споредба со други посложени модели на мотор што може да доведе до необјаснето однесување на моделот.

5.10 Референци

- [5-1] R. D. Burke, W. Baumann, S. Akehurst, and C. J. Brace (2013) Dynamic modelling of diesel engine emissions using the parametric Volterra series. *Journal of Automobile Engineering*. 228 (2). pp. 164–179
- [5-2] P. Dowell (2012) Real-Time Heat Release Model of a HDSI Diesel Engine. Doctoral Thesis. University of Bath
- [5-3] M. Grahn, K. Johansson & T. McKelvey (2014) Data-driven emission model structures for diesel engine management system development. *International Journal of Engine Research*
- [5-4] T. Tanaka, A. Ando & K. Ishizaka. (2002) Study on pilot injection of {DI} diesel engine using common-rail injection system {JSAE} Review. 23 (3). pp. 297–302
- [5-5] S. Popinchalk (2012) Improving simulation performance in Simulink. *Mathworks Newsletter*. Available online: <http://uk.mathworks.com/company/newsletters/articles/improving-simulation-performance-in-simulink.html?refresh=true>
- [5-6] J. M. Cimbala. (n.d.) The ideal gas constant. Available online: <http://web.itu.edu.tr/zerefsan/Fluid%20Mechanics/Gas%20Constant-2.pdf>
- [5-7] R. Burke, B. Fath, S. Akehurst, C. Brace, W. Baumann & R. Wascheck (2011) Practical approach to thermo-dynamic modelling of diesel engine emissions. *Design of Experiments in Engine Development*. 6th edn, Expert Verlag. pp. 88–103
- [5-8] M. K. Khair & H. Jaaskelainen (2015) Effect of EGR on emissions and engine performance. Available online: https://www.dieselnet.com/tech/engine_egr_performance.php
- [5-9] R. D. Burke (2014) Analysis and modelling of the dynamic behaviour of automotive turbochargers, *ASME J. Eng. Gas Turb. Power*. 136, GTP-14-1108. Doi: 10.1115/1.4027290
- [5-10] H. Jaaskelainen (2011) Diesel exhaust gas. Available online: https://www.dieselnet.com/tech/diesel_exh.php

[5-11] P. Kirchen (2008) Steady-State and Transient Diesel Soot Emissions: Development of a Mean Value Soot Model and Exhaust-Stream and In-Cylinder Measurements. Doctoral Thesis. ETH Zurich

6 Софтверска алатка за тестирање и калибрација на мотор СВС

Клучен чекор при креирањето на софтверското решение (алатката) кое ќе служи како едукативно помагало за изучување на процесот на калибрација на мотор СВС е дефинирање на општите побарувања од напредниот модел на дизел-мотор, корисничкиот интерфејс и алатката воопшто. Тие се:

- 1) Алатката треба да претставува целосно софтверско решение (компјутерска десктоп апликација) без потреба од хардверски компоненти за нејзиното успешно функционирање;
- 2) Алатката треба успешно да функционира на било кој компјутер каде е инсталиран програмскиот пакет MATLAB и Simulink (верзијата во која е изработен моделот е 2022a);
- 3) Алатката треба самостојно да менаџира со грешките кои може да се појават или пак со нелогичните барања на корисникот;
- 4) Корисничкиот интерфејс на алатката треба да биде интуитивен, да се карактеризира со висок степен на стабилност и доверливост, и да овозможи внес и повлекување на податоци во CSV формат;
- 5) Корисничкиот интерфејс треба да биде доволно ефикасен и робустен, и да не бара промени во програмскиот код од страна на корисникот за време на користењето;
- 6) Сложеноста на напредниот модел на дизел-мотор мора верно да го долови причинско-последичниот однос помеѓу влезните параметри и излезната оперативна карактеристика на моторот и издувната емисија;
- 7) Симулациите во заднина, треба да се одвиваат во реално, или близу реално време.

MATLAB, односно Simulink се избрани како оперативна средина во која ќе биде изработена алатката поради скоро универзалната достапност на програмскиот пакет на техничките факултети. Притоа се очекува, дека потенцијалниот корисник би имал некако претходно искуство со работа во програмскиот пакет MATLAB, но и без тоа тенденцијата при дизајнот на алатката ќе биде со мало предзнаење успешно да се користи моделот и самата алатка.

6.1 Кориснички интерфејс

Корисничкиот интерфејс (GUI) за софтверската алатка за тестирање и калибрација на мотор СВС е дизајниран врз основа на софтверот CADET (слики 1-4 и 1-5). Интерфејсот се состои од две MATLAB скрипти. Со помош на првата скрипта се креира GUI и во неа се дефинирани сите повикувачки функции, додека втората скрипта се повикува (активира) од страна на Simulink моделот и истата ги собира и обединува податоците од моделот и со тоа прави ажурирање на интерфејсот. Командите од првата скрипта се извршуваат само еднаш - при стартување (активација) на софтверот од страна на корисникот, додека втората скрипта (UpdateGUI) се повикува секој пат кога е потребна проверка на функциите кои се повикани во првата скрипта (GUI скриптата).

Согласно првичната замисла корисничкиот интерфејс би бил управуван со т.н. функции „слушатели“ (анг. listener functions) во Simulink, со кои би можеле да се следат влезните и излезните сигнали и истите да се праќаат кон функциите во MATLAB. Тоа

значи дека повикувачките функции би чекале да се случи настан за тие да се активираат, со цел да го ажурираат корисничкиот интерфејс, но бидејќи функцијата „слушател“ е својствен дел од Simulink моделот, истата би се извршувала за секој временски чекор. Меѓутоа, со развојот на графичкиот интерфејс станува очигледно дека со тоа ќе се зголеми и времето потребно за извршување со што значително се забавува времето на симулацијата. Од оваа причина функциите „слушатели“ беа заменети со нов потсистем кој ќе ја повикува функцијата Update GUI на одредена фреквенција на ажурирање.

Користејќи го овој метод, моделот и GUI би можеле да работат на засебни фреквенции за ажурирање, со што би се спречило непотребно губење на време при ажурирање на GUI. Скриптата UpdateGUI ќе се извршува само кога модулот на тековното време и периодот одреден од корисникот ќе бидат на нула. Единствениот недостаток на овој метод е тоа што е потребно да се искористи модел за регулирање на временските интервали од почетокот па се до крајот на симулацијата, а кој во случајот на оваа софтверска алатка ќе биде поставен на 0.01 секунда, што е подобро отколку променлив временски интервал.

6.2 Побарувања од корисничкиот интерфејс

Со оглед на тоа што главната цел на докторската теза е да развие софтверско решение (алатка) кое ќе служи како едукативно помагало за изучување на процесот на калибрација на мотор СВС, важно е неговиот интерфејс да биде доволно интуитивен и едноставен за новите корисници лесно да може да го совладаат ракувањето со него. Истовремено, за да може да се направи успешна транзиција кон посложените алатки кои се користат во процесот на калибрација, GUI мора да содржи најголем дел од карактеристиките на овие алатки. Во таа насока, беше изработена следната листа на интеракции и побарувања од графичкиот интерфејс:

- 1) Вклучи/исклучи (On/Off) копчиња кои ја менуваат бојата врз основа на тоа дали се притиснати или не;
- 2) Статични покажувачи за отчитување на бројни вредности (влезови и излези);
- 3) Покажувачи со стрелка (за брзина на моторот, вртежен момент и сл.);
- 4) Покажувач на притисок на моторното масло (изработен како притисочен столб);
- 5) Потенциометар за контрола на вртежен момент на уредот за симулирање на оптоварување на моторот (пробница);
- 6) Полиња за внес на параметри (со можност за менување за време на испитувањето);
- 7) Осцилоскоп за визуелен приказ на излезната оперативна карактеристика на моторот и излезната емисија;
- 8) Копче за снимање и зачувување на излезната оперативна карактеристика со креирање на целосно податочно множество или отчитување на моменталните вредности;
- 9) Групирање на достапните функционалности од работниот прозорец во различни менија со цел подобрување на корисничкото искуство;
- 10) Светлосно предупредување за достигнување на ограничувањата, опасност од преоптоварување и исклучување на системот;

- 11) Проверки пред стартување: вклучена вентилација, циркулација на течност за ладење, вклучен систем за против-пожарна (ПП) заштита, вклучена пробница, постигнат притисок на моторно масло.

6.3 Работен прозорец

Врз основа на листата на побарувања е направена поделба на интерфејсот во 4 менија: START UP (почетно мени), INPUTS (влезни параметри), OUTPUTS (излезни параметри) и OSCILLOSCOPE (графички приказ на излезната оперативна карактеристика на моторот), со тоа што приказот во отворениот прозорец е поделен на средна лента која е менлива зависно од избраното мени, и горна и долна лента кои се постојано присутни во работниот прозорец.

Во долната лента се наоѓаат 3 покажувачи со стрелка, за приказ на: брзината на моторот (број на вртежи на коленестото вратило), вртежен момент на моторот и брзина на турбополначот (број на вртежи на осовината), а веднаш над секој од нив се наоѓаат статични покажувачи за попрециозно отчитување на овие вредности. Во горниот лев агол од лентата има копче со чие притискање се отвара прозорец во кој може да се изврши промена на брзината на моторот. Под ова копче се наоѓа приказ на времетраењето на симулација (изразено во секунди), како и копче за почеток (START) и паузирање (PAUSE) на тестирањето. По започнување на симулацијата, овие копчиња соодветно се менуваат во копчиња за целосно запирање на симулацијата (STOP) или нејзино продолжување (CONTINUE).

Горната лента содржи јазичиња за избор на секое од четирите менија, како и панел со копчиња за управување со излезното податочно множество од моторот. Од лево кон десно овие копчиња се:

- EXPORT DATA TO CSV – овозможува преземање на зачуваното податочно множество во .CSV формат;
- START/STOP RECORDING – се притиска за да се започне/прекине со снимање на работата на моторот за одреден временски интервал (креирање на комплетно податочно множество);
- INSTANT RECORDING – се притиска за да се снимат моменталната состојба на моторот;
- CLEAR RECORDED DATA – се брише претходно зачуваното податочно множество.

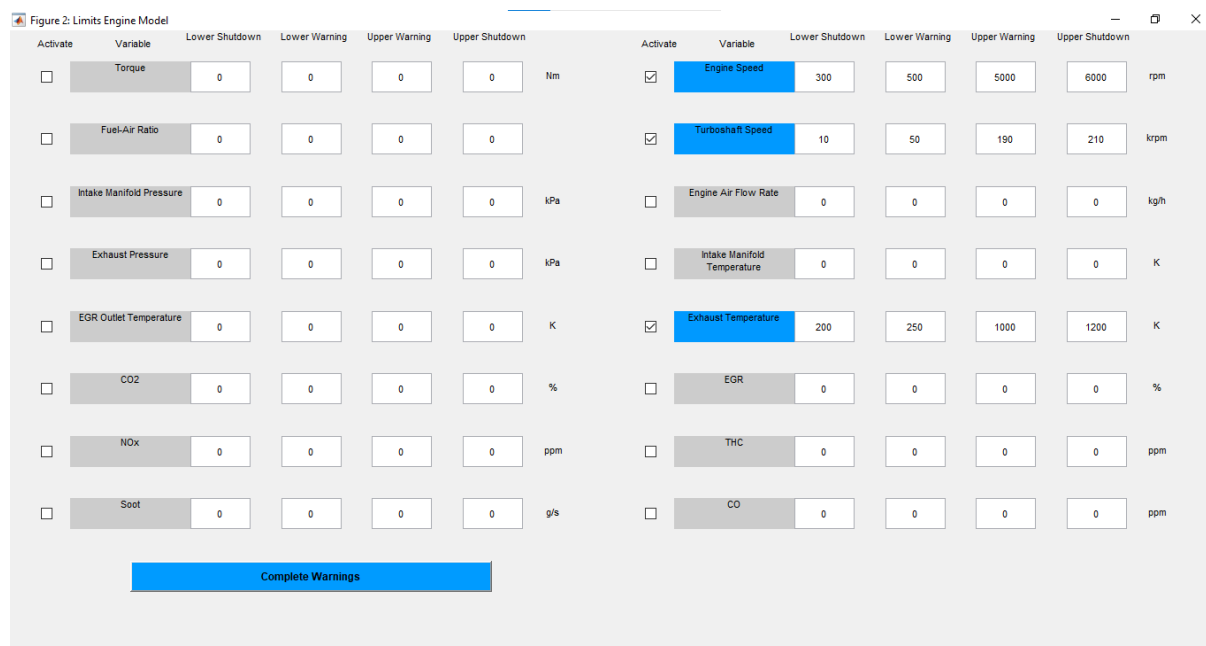
6.3.1 START UP мени

Главниот работен прозорец кој се отвара при стартување на апликацијата е START UP мениот (слика 6-1). Притоа, во средната лента од прозорецот, во две колони се сместени 8 копчиња со иста големина, од кои 7 работат на принципот вклучи/исклучи и служат за активирање на помошните системи во лабораториската тест-ќелија (вентилација, ПП заштита, циркулација на течност за ладење). Без активација на секој од овие помошни системи, не може да се продолжи кон тестирање на моторот. Од десната страна во истиот прозорец се наоѓа притисочен столб кој го прикажува моменталниот притисок (изразен во Bar) на моторно масло.

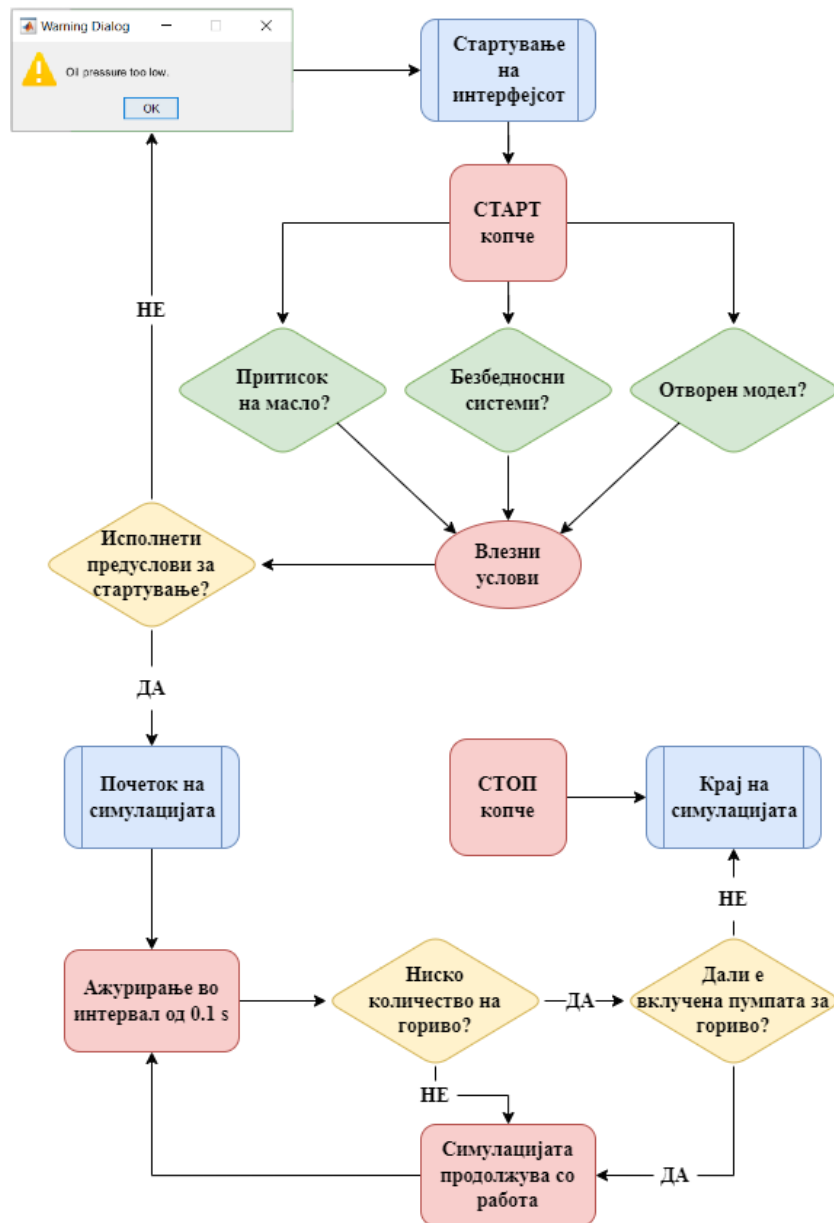


Слика 6-1 Приказ на корисничкиот интерфејс во менито START UP

Последното копче во десната колона, води кон нов прозорец (слика 6-2) кој служи како Панел за задавање предупредувања, во кој може да се дефинираат граничните вредности во кои корисникот посакува да работи системот, а за чие приближување и надминување корисникот би добил светлосно предупредување. Доколку корисникот не направи промена во вредностите на влезните параметри со кои би го вратил моторот во неговите нормални оперативни граници, тогаш самиот софтвер ќе го прекине тестирањето, а со цел да се избегне хаварија.



Слика 6-2 Приказ на панелот за задавање на предупредувања



Слика 6-3 Логичкиот тек на настаните согласно кои функционира графичкиот интерфејс

На сликата 6-3 е прикажан дијаграм на логичкиот тек на настаните согласно кои функционира графичкиот интерфејс. Доколку не се исполнети мерките на безбедност при стартување на алатката, односно не се вклучени помошните и безбедносните системи, софтверот враќа соодветно предупредување со кое му укажува на корисникот што треба да преземе за успешно да започне со тестирање.

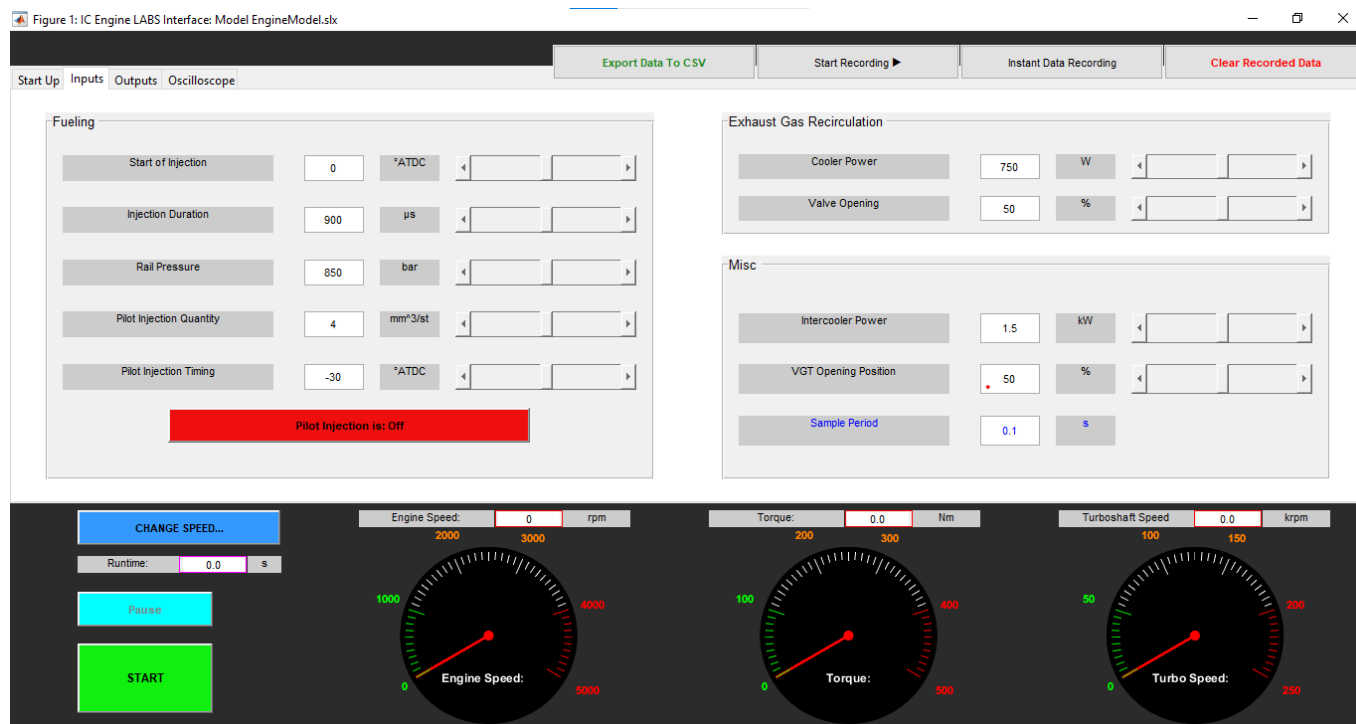
6.3.2 Прозорец за внес на влезни параметри (INPUTS)

Со притискање на јазичето INPUTS се отвара второто мени во кое корисникот може да управува со моделот т.ш. прави промени во влезните параметри на моторот. Притоа, менито е поделено на три групи на параметри: FUELING, EGR и MISCELLANEOUS. Имајќи ги предвид границите во кои беше трениран моделот на невронска мрежа, сега се поставени граници за влезните параметри кои меѓусебно соодветствуваат со оние од моделот.

Табела 6-1 Оперативен опсег на влезните параметри во графичкиот интерфејс

Панел	Влезен параметар	Минимум	Максимум	Единица мерка
Гориво	Притисок во заедничката распределителна цевка	200	1500	Bar
	Времетраење на впрскувањето	300	1500	μs
	Почеток на впрскувањето	-20	20	$^{\circ}ATDC$
	Рано впрскување (Вклучено/исклучено)	0	1	/
	Впрскано количество при рано впрскување	1	7	mm^3/st
	Почеток на рано впрскување	-50	-10	$^{\circ}ATDC$
EGR	Процент на отвореност на EGR вентилот	0	100	%
	Моќност на ладење на EGR ладилникот	0	5000	W
Разно	Моќност на ладење на ладилникот на полнење	0	3	kW
	Позиција на актуаторските лопатки кај VGT турбополначот	0	100	%
	Интервал на ажурирање на интерфејсот	0.1	∞	s

Интерактивноста со корисникот е постигната преку вметнување на лизгачи со чија помош се одбира посакуваната вредност за конкретниот влезен параметар. За да се подобри прецизноста при изборот, корисникот може да оствари внес на вредности во полињата кои се наоѓаат до лизгачите, при што лизгачот автоматски ќе ја земе посакуваната позиција.

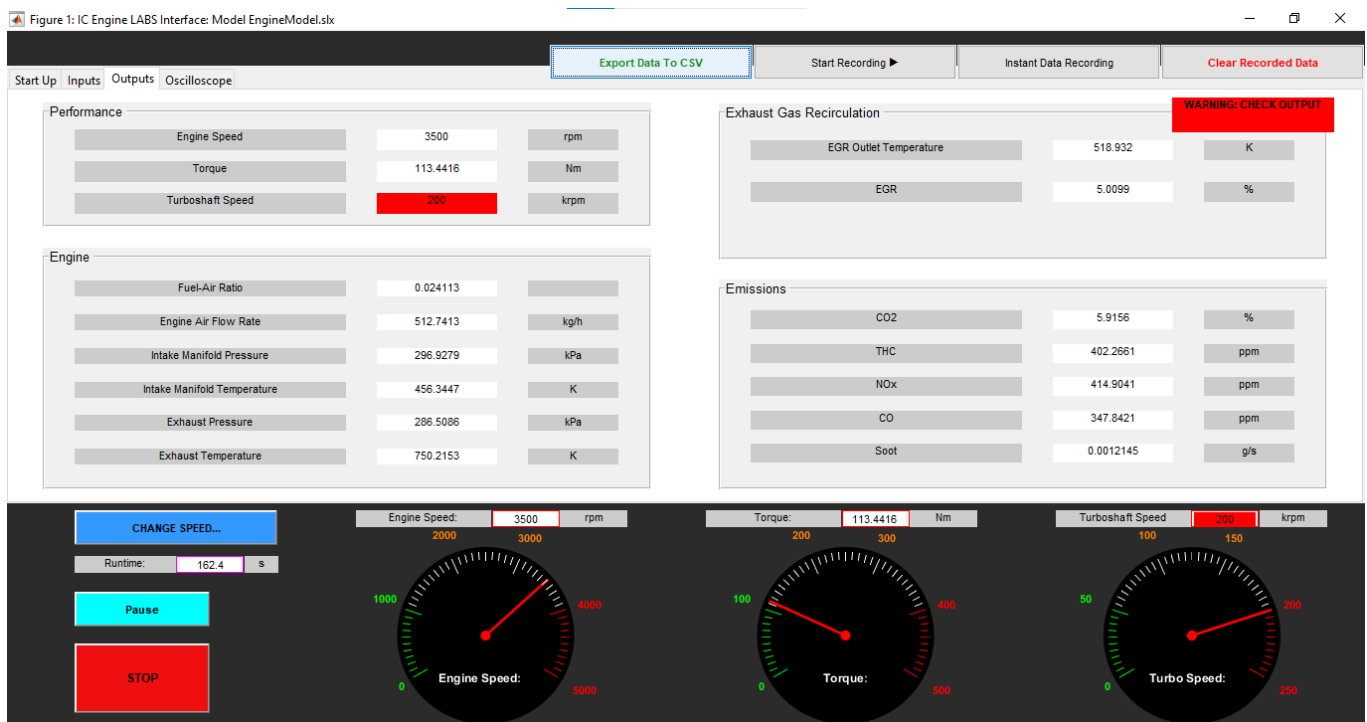


Слика 6-4 Приказ на корисничкиот интерфејс во менито INPUTS

Доколку корисникот внесе вредност која е надвор од границите на моделот, софтверот автоматски врши корекција и притоа за влезна вредност ја зема вредноста која е најблиска до максимумот/минимумот за овој влезен параметар.

6.3.3 Прозорец за отчитување на излезните параметри (OUTPUTS)

Притискање на третото јазиче води кон менито за отчитување на излезните параметри на моторот кои се поделени во четири групи: PERFORMANCE, ENGINE, EGR и EMISSIONS. Податоците во овој прозорец се ажурираат согласно интервалот на ажурирање внесен во претходното мени. Така што, доколку корисникот бара поголема прецизност потребно е интервалот на ажурирање да има помала вредност. Доколку некоја од вредностите се доближува до граничната вредност претходно внесена во панелот за задавање предупредувања, тогаш во десниот агол од овој прозорец (и во главниот прозорец) ќе се појави општо светлосно предупредување, додека во исто време ќе биде обележана излезната вредност која ги надминала зададените граници.



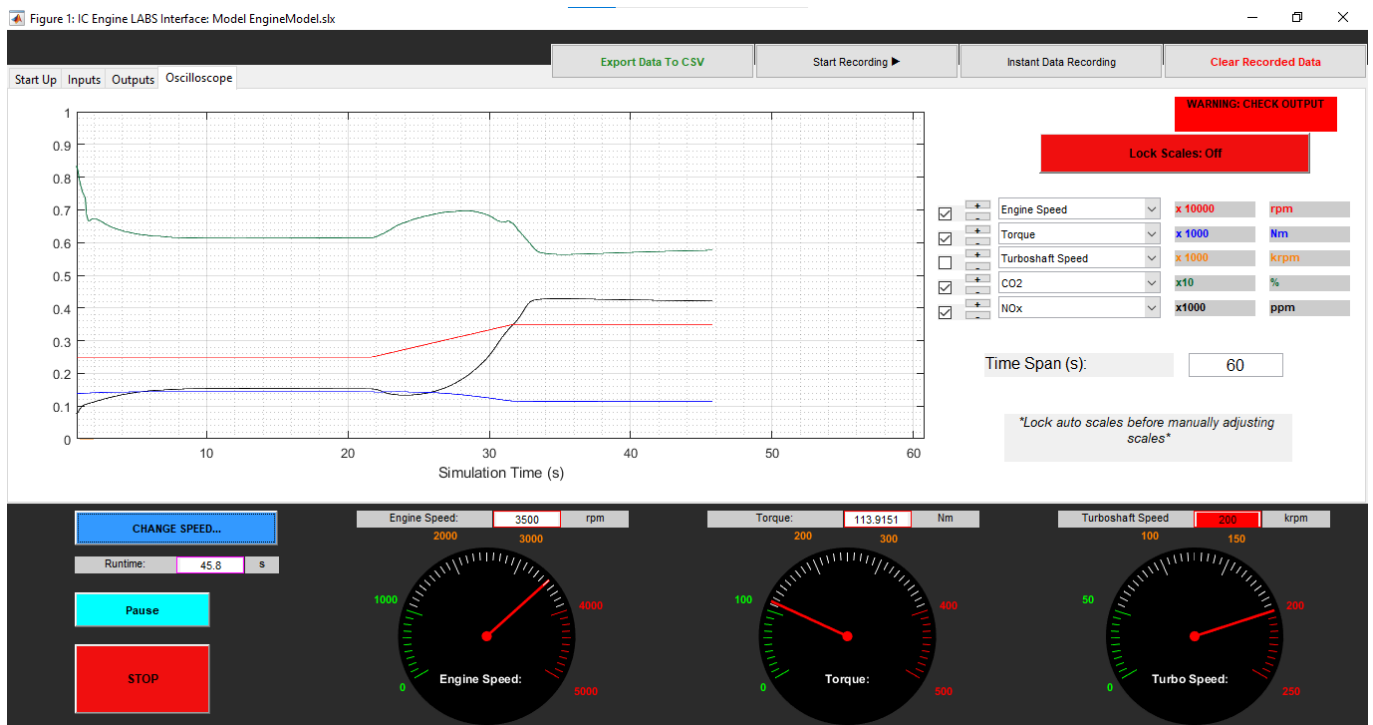
Слика 6-5 Приказ на корисничкиот интерфејс во менито OUTPUTS

6.3.4 Прозорец за графички приказ на излезната оперативна карактеристика на моторот и издвнната емисија (OSCILLOSCOPE)

Со цел графичко претставување на излезната оперативна карактеристика и количеството на различните продукти од согорувањето во издвнната емисија на моторот, во четвртото мени од работниот прозорец е вметнат осцилоскоп. Осцилокопот во реално време ги претставува кривите на најмногу 5 излезни параметри, а со цел секој од овие параметри да биде опфатен во дијаграмот нивните вредности се пропорционално зголемени или намалени и се прикажуваат на вертикалната оска.

Треба да се напомене дека приказот во осцилокопот може моментално драстично да се промени зависно од промената во вредностите на излезните параметри,

па така, за да се задржи истиот формат на прикажување вметнато е копчето LOCK SCALES со чие притискање е оневозможено автоматско менување на пропорциите на излезните параметри. Сепак, корисникот може рачно да одбере чии вредности за излезните параметри да бидат прикажани во осцилоскопот и исто така може да ја одбере пропорцијата на зголемување/намалување на вредностите (со фактор 10). Уште една поволност во прикажувањето на вредностите за излезните параметри е тоа што корисникот може да го промени интервалот на прикажување на податоците (на слика 6-6 интервалот на прикажување изнесува 60 секунди), при што моменталната состојба се прикажува на точно 75% од должината на хоризонталната оска.



Слика 6-6 Приказ на корисничкиот интерфејс во менито OSCILLOSCOPE

6.4 Зачувување и пренос на податочното множество од тестирањето

Една од причините зошто оваа алатка е изработена во MATLAB се однесува и на меѓусебната компатибилност со алатката за калибрација со помош на модел (MBC Toolbox) за која веќе стана збор во претходните поглавја. Ова значи дека податочното множество добиено со тестирање на моторот, може да се зачува во .CSV формат надвор од оваа алатка, а така форматираниот податочен множество е многу лесно да се вметне во MBC алатката на MATLAB во која би се креирале новите управувачки површини.

На корисникот му се достапни две опции за зачувување на податоците: како комплетно податочно множество и моментална состојба на моторот. Со притискање на копчето START/STOP RECORDING се креира ново податочно множество чии мерни податочни точки се одбираат во интервалот кој е одбран за интервалот на ажурирање. Откако корисникот ќе заврши со снимање, доволно е само да го прекине снимањето, по што може веднаш да изврши зачувување (и пренос) на податочното множество на посакувана локација надвор од алатката и надвор од MATLAB (доколку тоа е потребно).

7 Валидација, примена и евалуација на предложената софтверска алатка за тестирање и калибрација на дизел-мотор СВС

За целите на докторската теза беше креирано софтверско решение (алатка) кое првенствено е наменето да служи како едукативно помагало за изучување на процесот на калибрација на мотор СВС, а за чија потреба беше развиен напреден модел на дизел-мотор со мали процесирачки побарувања. Моделот како и корисничкиот интерфејс, се изработени во софтверскиот пакет MATLAB, а при нивната изработка вниманието беше насочено кон задржување на соодветна прецизност на моделот особено од аспект на верно претставување на каузалниот однос помеѓу влезните параметри и излезната оперативна карактеристика на моторот, како и излезната емисија. Притоа, моделот почива на примена на напредни техники на моделирање (машинско учење и регресија со повеќеслоен перцептрон) како интегрален дел од термодинамички MVEM модел за да ги претстави механизмите на согорување во моторот.

Имајќи ја предвид експерименталната природа на моделот и фактот што комбинира повеќе методи на моделирање, како и тоа што дел од компонентите на моделот се засновани на проценки и претпоставки од други релевантни научни дела, важно е што поточно да се утврди успешноста на алатката за тестирање и калибрација и секако доколку е возможно да се квантифицираат предностите и недостатоците на моделот, односно алатката. Ова ќе биде остварено така што најпрво ќе биде направена валидација на моделот, а потоа и оптимизирање на моделираниот мотор со цел подобрување на неговата еколошка карта и намалување на потрошувачката на гориво.

7.1 Валидација на моделот

Процесот на валидација на регресиониот модел подразбира одлучување дали нумеричките резултати кои ги квантифицираат хипотезираните врски помеѓу променливите, добиени од регресионата анализа, се прифатливи како описи на податоците. Валидацијата укажува на нивото на истренираност на моделот и дали предвидувањата на моделот значително се влошуваат кога се применуваат податочни множества што не биле користени во тренирањето на моделот [1].

Еден од методите кој укажува на успешноста на моделот е коефициентот на детерминација, т.ш. го покажува учеството на објаснетиот варијабилитет во вкупниот варијабилитет, односно колку варијациите или промените на зависната променлива y (измерени вредности) се објаснети со променливата \hat{y} (предвидени вредности).

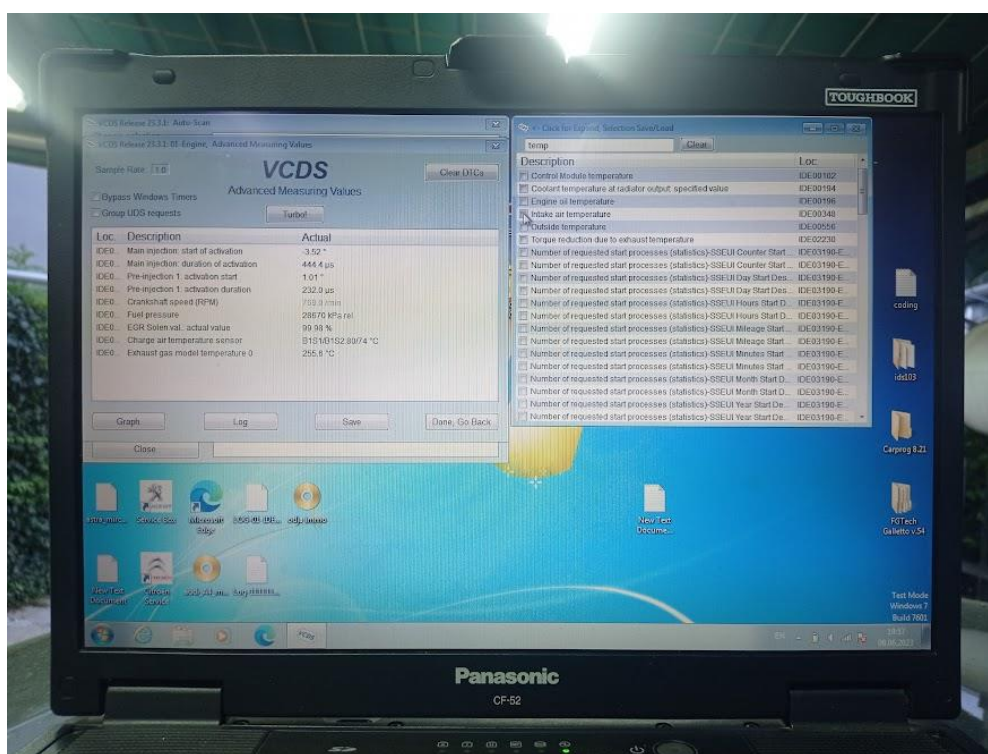
$$R^2 = 1 - \frac{\sum(\hat{y} - \bar{y})^2}{\sum(y - \bar{y})^2} \quad 7.1$$

Важно е да се знае дека резултатот од коефициентот на детерминација може да има вредности помеѓу 0 и 1. Колку неговата вредност е поблиску до 1, толку моделот подобро ја објаснува променливата од интерес. Спротивно на тоа, колку е поблиску до 0, тогаш моделот е помалку сигурен. Специфично за вредноста на коефициентот на детерминација е тоа што некогаш високите вредности за R^2 може да се индикација за појавата на претренирање на моделот при што моделот ја губи способноста да претстави

или препознае карактеристично однесување во други податочни множества различни од она со кое бил трениран.

За таа цел, а во насока на засилување на кредибилитетот на тезата и на истражувачката работа спроведена во неа, за валидацијата на моделот наместо да се користи податочен тест-примерок кој би содржел 10-20% од податоците добиени со мерењата реализирани на Универзитетот во Бат, беше одлучено да се реализираат целосно нови експериментални мерења, на мотор со слични карактеристики како и моторот Ford Duratorq, но овој пат мерењата да бидат направени врз самото возило.

Притоа во испитувањата се користеше возило на групацијата Volkswagen, односно Skoda Octavia Mk 3 произведена во 2015 година. Ова возило беше опремено со дизел-мотор (2.0 TDI CR – СКFC, EA288) со зафатнина од 2.0l, со директно впркување на горивото, турбополнач со варијабилна геометрија на турбината и систем за рецикулација на издувните гасови. Согласно спецификацијата од производителот достапна во Прилог В, со фабрички подесени параметри овој мотор може да достигне максимална моќност од 110 kw (или 150 коњски сили) и максимален вртлив момент од 320 Nm. Управувачката единица на моторот е од типот BOSCH EDC 17 ECM.



Слика 7-1 Интерфејсот на VCDS софтверот со избрани параметри за креирање на ново податочно множество

Мерната опрема беше обезбедена од страна на Лабораторијата за мотори СВС при Машинскиот факултет во Скопје и вклучува: два типа на мултифункционален дијагностички софтвер од производителите TEXA SpA, модел IDC 5 Car, и VCDS на Ross-tech, како и засебен уред за анализа на издувната емисија. Двата дијагностички софтвери нудат слични можности за увид во состојбата на моторот како и причинско-

последичниот однос помеѓу неговите влезните параметри и излезната оперативна карактеристика, но поради едноставноста, сестраноста и намената на VCDS софтверот за испитување на возила првенствено од Volkswagen групацијата, главно тој беше користен во мерењата (слика 7-1), додека софтверот на TEXA служеше единствено за контрола на резултатите.

Практично сите потребни податоци за работните параметри на моторот произлегоа од VCDS софтверот, со исклучок на количествата за различните компоненти во издувната емисија. Па затоа, за да се измерат количествата на CO, CO₂, THC, NO_x и PM честички се јави потреба од користење на засебен уред за гасна анализа од производителот BrainBee, модел AGS 688 (слики 7-2 и 7-3). Непосредно пред почетокот на мерењето, за да се добијат вредности кои најверодостојно ќе ги претстават количествата на компонентите од издувната емисијата, уредот за гасна анализа беше калибриран со атмосферските вредности за овие компоненти.



Слика 7-2 Калибрација на уредот за гасна анализа BrainBee AGS 688



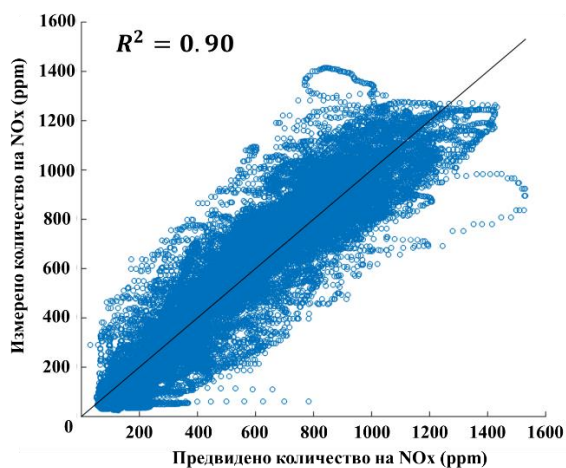
Слика 7-3 Поставеност на сензорската сонда во ауспухот на возилото

При изведување на мерењата беа креирани неколку податочни множества, но сите се однесуваат на работа на моторот при достигната работна температура и брзина на моторот во опсег од 1000 до 4000 вртежи на коленестото вратило во минута (RPM). Важно е да се напомене дека целта беше моторот и моделот да се споредуваат за стационарни услови на работа, бидејќи Engine Labs алатката не му нуди можност на корисникот за задавање на оптоварување на моделот. Сепак, поради фактот што тест-моторот не можеше да работи со поголем број на вртежи во минута од 2500 RPM во празен од, мораше да работи под минимално оптоварување и тоа потенцијално би имало мало влијание на резултатите од овие мерења.

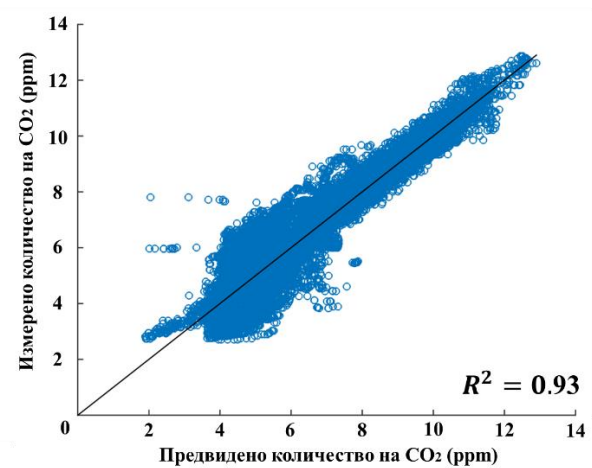
Влезните параметри во симулацијата внесени преку Engine Labs алатката, а кои се однесуваат на управувањето со горивото беа така одбрани да претставуваат најблиска, односно средна вредност за истите влезни параметри во управувачката единица на тест-моторот во опсегот од 1000 до 4000 RPM. Аголот на впрскување изнесуваше 6° пред НКП, времетраењето на впрскување на горивото изнесуваше 1200 μ s, додека притисокот на впрскување беше еднаков на 400 Bar. Во Engine Labs алатката, процентот на проток

на издувните гасови, односно аголот на прострујување на лопатките од турбината, моќта на ладење на ладилникот на полнење, вредностите за процентот на отвореност на EGR вентилот и моќта на ладење на EGR ладилникот се менуваат рачно од страна на корисникот. Ова е важно да се напомене бидејќи различни брзини на моторот (број на вртежи на коленестото вратило) подразбираат потреба од различен притисок на преполнување односно различен состав на свежото полнење (како удел на издувните гасови во полнењето).

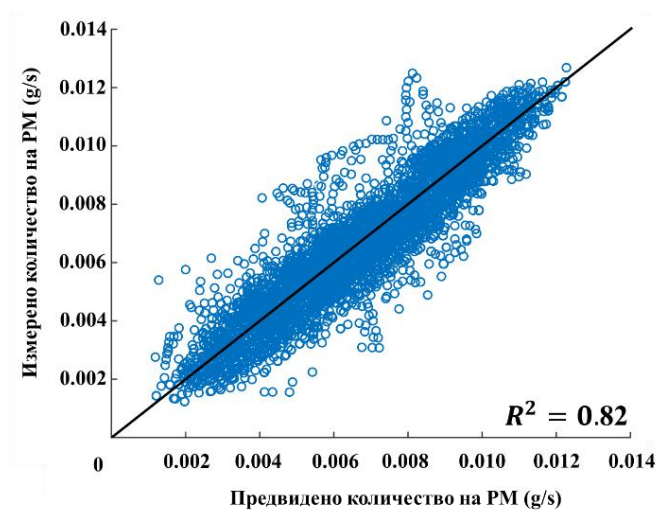
По извршената споредба на податочното множество со измерените вредности за количествата на издувна емисија и податочното множество добиено од Engine Labs алатката, за нив беше пресметан коефициентот на детерминација R^2 . Резултатите се претставени графички во сликите 7-4 до 7-8.



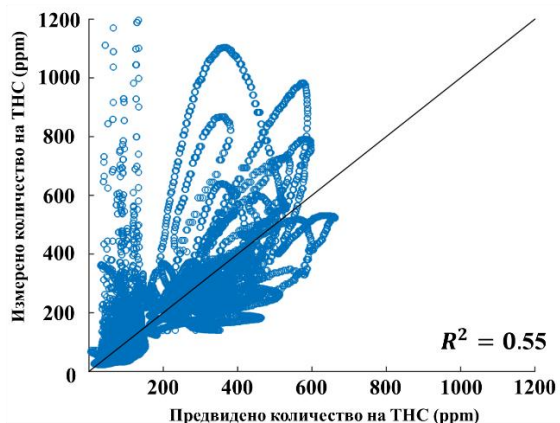
Слика 7-4 Резултати од валидацијата на напредниот модел за NO_x (Лотка-Волтера)



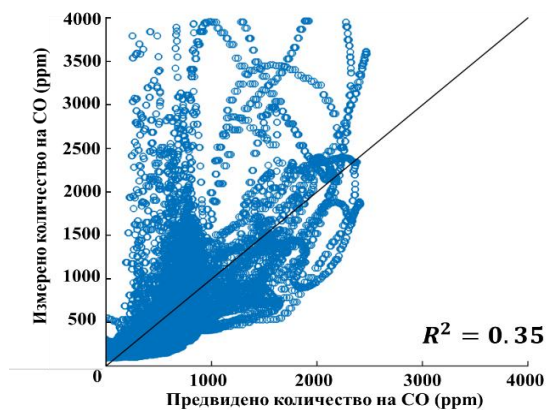
Слика 7-5 Резултати од валидацијата на напредниот модел за CO_2 (Лотка-Волтера)



Слика 7-6 Резултати од валидацијата на напредниот модел за PM честички (B-сплајн)



Слика 7-7 Резултати од валидацијата на напредниот модел за THC (Лотка-Волтера)



Слика 7-8 Резултати од валидацијата на напредниот модел за CO (Лотка-Волтера)

Од сликата 7-4 може да се види дека вредноста за коефициентот на детерминација за емисијата на NOx изнесува $R^2_{(NOx)} = 0.9$, а слично, висока вредност од $R^2_{(CO_2)} = 0.93$ е добиена и за емисијата на CO₂ (слика 7-5) што укажува на веродостојноста на овие два модели. За емисијата на цврсти честички, која беше измоделирана со помош на В-сплајн функција, вредноста за коефициентот на детерминација помеѓу измереното и предвиденото количество изнесува $R^2_{(PM)} = 0.82$ (слика 7-6).

Пониски вредности на коефициентот на детерминација беа добиени за емисијата на THC, каде $R^2_{(THC)} = 0.55$ (слика 7-7), додека за емисијата на CO изнесува $R^2_{(CO)} = 0.35$ (слика 7-8). Овие вредности укажуваат на тоа дека овие два модели помалку успешно го предвидуваат однесувањето на моторот по прашање на неговата издувна емисија бидејќи вредностите за нивното количество се само делумно запазени. Сепак, во исто време граfiците укажуваат на тоа дека дури и за емисијата на THC и CO е предвидено генералното однесување на моторот.

Валидираните вредности за излезната емисија добиени со Engine Labs алатката, како и останатите достапни податоци во креираното податочно множество, како показател за компатибилноста на Engine Labs со MBS алатката на MATLAB понатаму беа искористени за да се креираат нови управувачки површини и истите се прикажани во Прилог Г.

Од граfiците и од управувачките површини може да се заклучи дека податоците добиени од моделот покажуваат слични и многу блиски тенденции како и оние вредности добиени од мерењата. Граfiците и вредностите за коефициентот на детерминација јасно индицираат дека моделот со висок степен на успешност може да ја долови генералната тенденција на работа на моторот при стационарни услови на работа, а особено кога станува збор за вредностите за емисијата на NOx, PM и CO₂. Истовремено, евидентно е и дека недостасува поголем степен на деталност во работата на моделот за емисијата на THC и CO, но ова веќе беше идентификувано како потенцијален недостаток во едно од претходните поглавја на тезата.

7.2 Калибрација за оптимизирање на работата на моторот

Производителите на автомобили при изработката на управувачката програма за погонскиот агрегат на возилото првенствено во предвид ги земаат специфичните законски норми во однос на екологијата, безбедноста во сообраќајот, условите за хомологација, условите за оданочување и сл., во земјите кои претставуваат најголем дел од пазарот за автомобили. Најмногу се внимава на еколошките норми, бидејќи тие многу лесно се контролираат на годишниот технички преглед на возилото со мерење на составот и количествата на различните компоненти во издвуната емисија. Притоа, оптимален работен циклус не постои, туку се прави компромис од гледна точка на енергетската ефикасност и максимално искористување на енергијата од горивото.

Па така, ниту калибрацијата, ниту оптимизацијата на работата на моторот можат да се изведат без да се имаат предвид импликациите кои потекнуваат од овој инженерско-еколошки компромис. Тоа значи дека секое поместување на вредностите за излезните параметри, а особено на излезната емисија, преку подесување на влезните параметри ќе предизвика поместување од балансот предвиден со фабричката калибрација и честопати намалувањето на одредена вредност во емисијата ќе доведе до зголемено присуство на останатите компоненти. Сепак, различните услови и режими на работа на возилото, како и специфичноста на условите на експлоатација може да го оправдаат ваквото поместување од рамнотежната позиција.

Тргувајќи од функционалностите кои ги нуди корисничкиот интерфејс на Engine Labs алатката, оптимизацијата на работните параметри кај дизел-моторите главно подразбира три можности: управување со моментот на впрскување и времетраењето на впрскувањето, односно управување со количеството на впрскано гориво; управување со аголот на прострујување на лопатките на турбината; и управување со отвореноста на вентилот за рецикулација на издвуните гасови. Промената на еден или повеќе од овие параметри може да има различен импакт врз работата на моделот, а во продолжение ќе бидат разгледани потребните нагудувања на параметрите со цел намалена потрошувачка на гориво и емисија на CO₂ и намалена емисија на локалните загадувачи, односно NO_x.

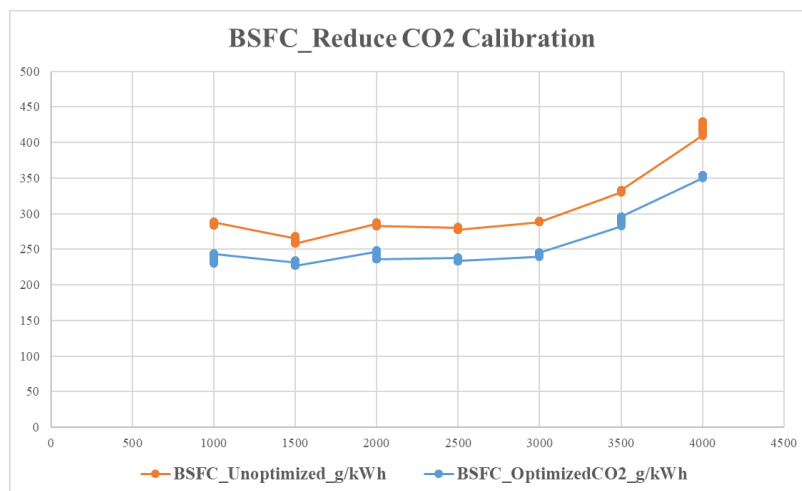
7.2.1 Намалена потрошувачка на гориво и емисија на CO₂

За да се постигне намалена потрошувачка на гориво и емисија на CO₂, целта при оваа оптимизација треба да биде зголемување на моќноста на моторот за исто количество на гориво што би се впрскало и во неоптимизираниот мотор. Практично, тоа би значело дека возилото ќе троши помалку гориво за совладување на истите отпори и следствено тоа би водело кон помала емисија на CO₂. Се постигнува со поместување на моментот на впрскување на горивото кон порано, но најмногу до 20° пред НКП, бидејќи согласно [2-3] последиците од прерано впрскување, ќе доведат до немирна работа на моторот, зголемена температура на согорувањето, зголемена потрошувачка на гориво и намалена моќност.

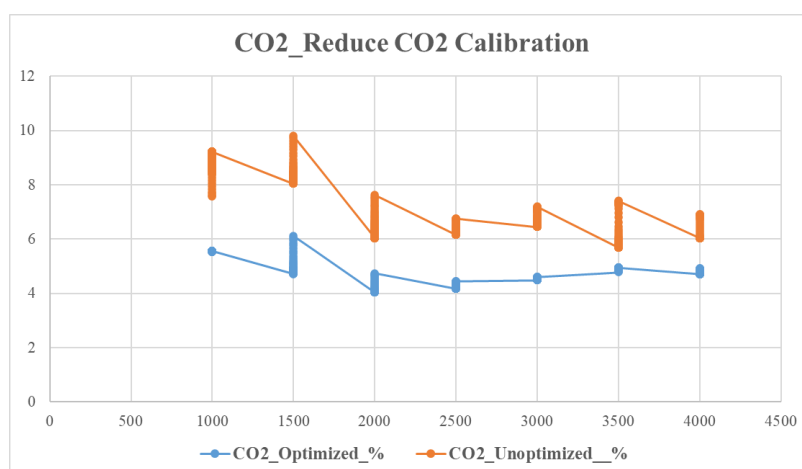
Меѓутоа, моќноста на моторот дополнително може да се зголеми и со менување на аголот на прострујување на лопатките од турбината, што би водело кон зголемена

густина на свежото полнење. Притоа, треба да се има предвид дека со намалување на напречниот пресек на протокот на издувните гасови кон турбината доаѓа до поголема брзина на прострујување на издувните гасови што води до поголема брзина на турбополначот и пораст на притисокот на преполнување.

Несоодветната подесеност на процентот на проток на издувните гасови кои го погонуваат турбополначот може да резултира со пораст во емисијата на CO₂ за одредени брзини на работа на моторот, но Engine Labs алатката нуди можност за рачно нагдување на процентот на проток на издувните гасови. Со оглед на тоа што различни брзини на моторот подразбираат потреба од различен притисок на преполнување, во текот на симулацијата неколкупати беше извршена промена и нагдување на вредностите за процентот на проток на издувните гасови, почнувајќи со 30% за 1000 вртежи, а завршувајќи со 70% за 4000 вртежи во минута. Оптимизацијата беше извршена во однос на валидираните вредности за излезните параметри, а кои во слика 7-9 до слика 7-13 се прикажани со портокалова боја, додека новодобиените оптимизирани вредности за излезните параметри се прикажани со сините криви.

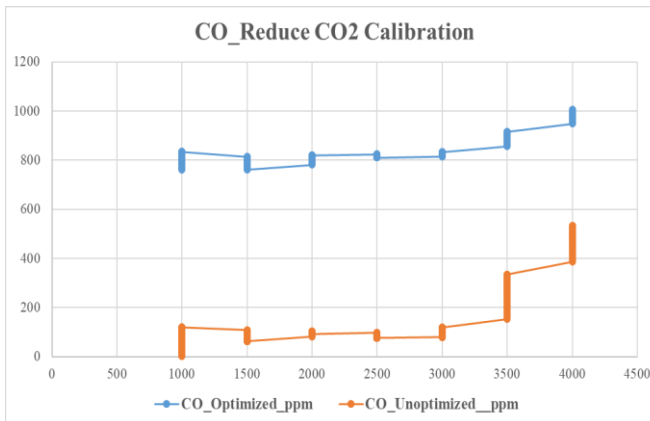


Слика 7-9 Ефективна специфична потрошувачка на гориво при калибрација за намалување на CO₂

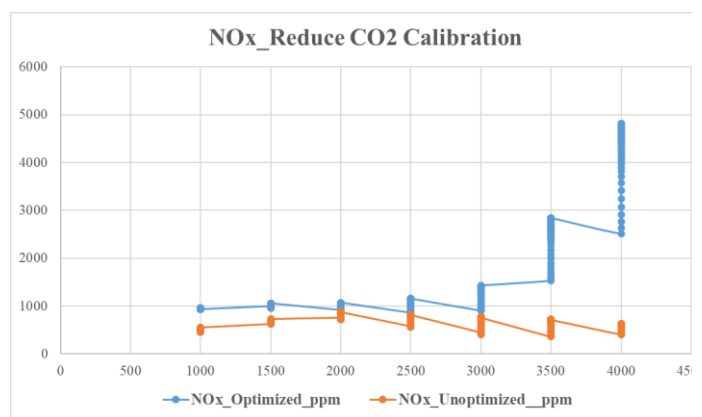


Слика 7-10 Емисија на CO₂ при калибрација за намалување на CO₂

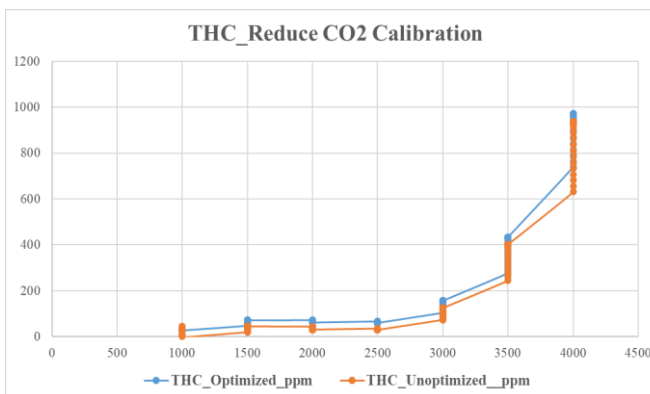
Првенствено, главната придобивка од оваа оптимизација е намалување на потрошувачката на гориво и подобрување на економичноста на моторот, што е евидентно од слика 7-9, каде ефективната специфична потрошувачка на гориво, по оптимизацијата е намалена за околу 17%. Благодарение на намалената потрошувачка на гориво, следствено намалено е и вкупното количество на емисија на CO₂ и тоа за 20% долж сиот опсег на вртежи за кои беше реализирана симулацијата.



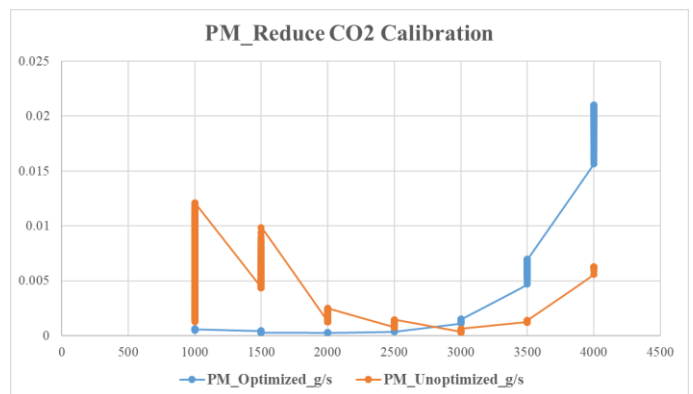
Слика 7-11 Емисија на CO при калибрација за намалување на CO₂



Слика 7-12 Емисија на NOx при калибрација за намалување на CO₂



Слика 7-13 Емисија на THC при калибрација за намалување на CO₂



Слика 7-14 Емисија на PM честички при калибрација за намалување на CO₂

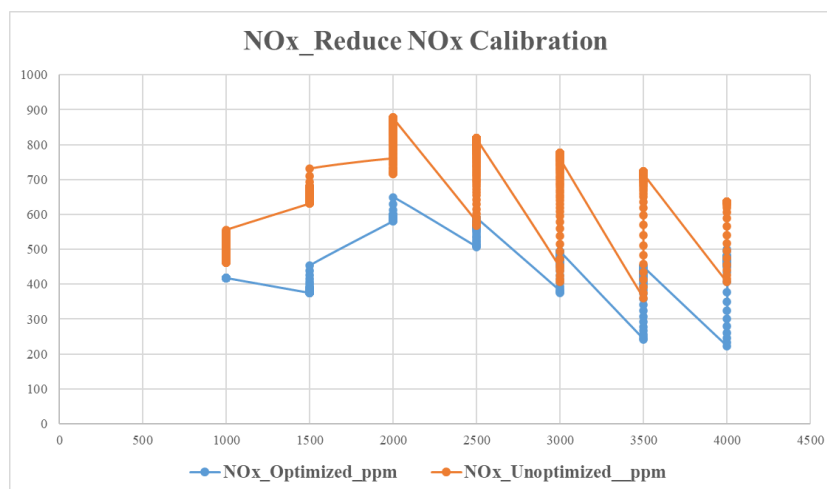
Негативните последици од оптимизацијата се подраматичен пораст од околу 56% на количеството на NOx, особено при висок број на вртежи, како и позначителна емисија на CO. Графикот на сликата 7-13 укажува и на мало покачување на количеството на вкупните несогорени јагледороди, додека емисијата на PM честички е драстично намалена за низок број на вртежи, но од друга страна нивното количество нагло расте при работа на моторот со брзина од 3000-4000 RPM.

7.2.2 Намалена емисија на NOx

Емисијата на NOx главно се должи на високите температури на согорување. Намалување на температурата на согорување може да се постигне со поместување на моментот на впрскување на горивото кон подоцна, но не повеќе од 0° пред НКП.

Управувањето со вентилот за рецикулација на издувните гасови така што би се зголемил масениот проток на издувните гасови и нивниот удел во новото полнење исто така ќе влијае на намалување на концентрацијата на NOx во издувната емисија. Со цел подобрување на ефикасноста на EGR системот, издувните гасови кои се одведуваат назад кон гранката за полнење при повисок број на вртежи на коленестото вратило потребно е да се изладат, па така температурата на смесата од издувните гасови и свежото полнење е значително пониска.

При ракување со Engine Labs алатката, вредностите за процентот на отвореност на EGR вентилот и моќта на ладење на EGR ладилникот, корисникот на алатката ги подесува рачно. Затоа, корисникот треба првенствено да има предвид дека кога станува збор за работа на моторот во празен од и без оптоварување, EGR системот потребно е да обезбеди минимален масен проток на издувни гасови (со максимална вредност од 30% отвореност), а доколку моторот нема достигнато работна температура, неговата функција во целост се занемарува. Нешто повисоки вредности за масениот проток на издувните гасови (максимална вредност од 70% отвореност) се карактеристични со зголемување на брзината на моторот, но главно не повеќе од 2500 RPM бидејќи во спротивно тоа ќе влијае на намалување на густината на свежото полнење, а со тоа и на способноста на моторот да ја достигне максималната ефективна моќност. Во овој случај моторот нема да може да одговори на експлоатационите побарувања на возилото, односно возачот.

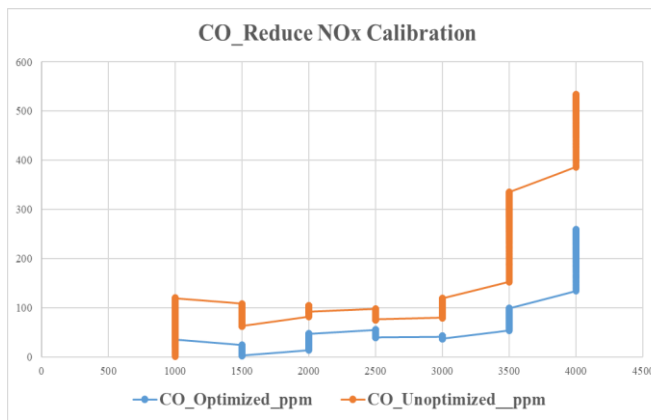


Слика 7-16 Емисија на NOx при калибрација за намалување на NOx

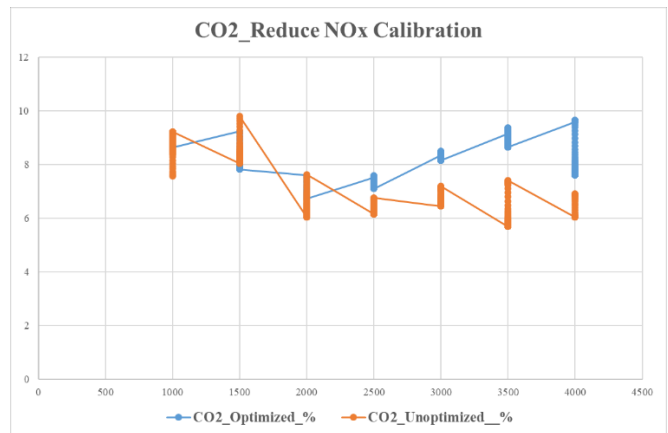
Резултатите од оптимизацијата за намалување на уделот на NOx во вкупното количество на издувната емисија се содржани во графициите од слика 7-16 до слика 7-20. На слика 7-16 со сината крива се прикажани оптимизираните вредности за емисијата на NOx, кои доколку се споредат со почетните вредности, во просек се помали за 35-50% и тоа повторно за целосниот опсег на вртежи за кои е извршена симулацијата.

Емисијата на CO₂ при низок број на вртежи на коленестото вратило главно останува слична како и кај неоптимизиранот мотор, но над 2000 RPM веќе овие вредности се во пораст. Од графикот 7-16 може да се забележи дека оваа оптимизација

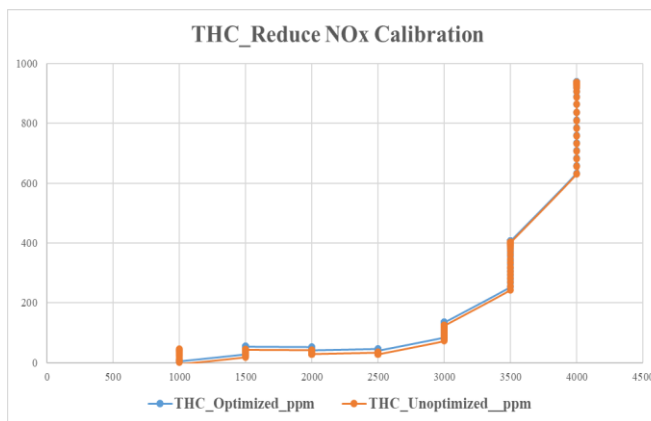
води уште и кон намалена емисија на CO и тоа за околу 20%. Најпосле, кога станува збор за присуството на PM честичките во издвнната емисија кај вака оптимизираниот мотор, нивното количество е поизразено при работа на моторот со брзина од 2000-4000 RPM.



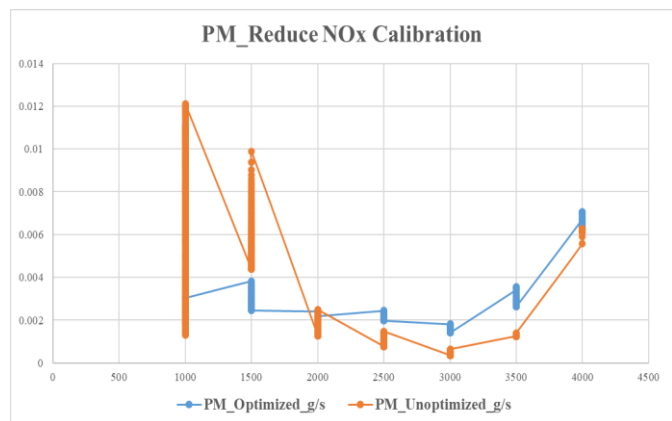
Слика 7-17 Емисија на CO при калибрација за намалување на NOx



Слика 7-18 Емисија на CO₂ при калибрација за намалување на NOx



Слика 7-19 Емисија на THC при калибрација за намалување на NOx



Слика 7-20 Емисија на PM честички при калибрација за намалување на NOx

7.3 Референци

[7-1] D. Chakmakov (2015) Probability and Statistics for Engineers University (in Macedonian) “Ss. Cyril and Methodius” – Skopje

[7-2] S. A. Ahmed, S. Zhou, Y. Zhu, Y. Feng, A. Malik and N. Ahmad (2019) Article Influence of Injection Timing on Performance and Exhaust Emission of CI Engine Fuelled with Butanol-Diesel Using a 1D GT-Power Model. *Processes*. 2019, 7(5), 299. DOI: 10.3390/pr7050299

[7-3] W. Tutak, A. Jamrozik and A. Bereczky (2018) Effects of injection timing of diesel fuel on performance and emission of dual fuel diesel engine powered by diesel/E85 fuels. *Transport*. 33. pp. 633-646. DOI:10.3846/transport.2018.1572

8 Заклучок и понатамошна работа

8.1 Заклучок

Калибрацијата како процес на подесување на работните параметри на моторот ретко се изучува на машинските факултети главно поради сложеноста на процесот и високите технички, материјални и финансиски побарувања за лабораториска, мерна опрема. Впрочем, кога станува збор за практичното изучување на процесот на калибрација, добро опремените лабораториски тест-ќелии претставуваат навидум единствено едукативно помагало од оваа област за автомобилските инженери. Меѓутоа, со интензивното зголемување на сложеноста на современите мотори СВС очигледна станува неопходноста од соодветно разбирање на сите нивни функционалности и процесите на управување на моторот со неговата излезна оперативна карактеристика и излезната емисија. Од тука се јавува потребата од индивидуално едукативно помагало од виртуелна, софтверска природа кое ќе биде интуитивно за употреба и со кое потенцијалниот корисник по пат на експериментирање и испробување на различни комбинации од влезните параметри ќе може полесно да го совлада процесот на калибрација на мотор СВС.

Моделирањето и компјутерските симулации овозможуваат подобро да се разбере динамиката на функционирање на моторите и благодарение на тоа водат кон создавање на посеопфатна слика за предизвиците на управувањето со нив и нивните потсистеми, со потребното ниво на сложеност и апстрактност. Следствено на тоа, успешноста на предлог-софтверот за тестирање и калибрација на мотор во голема мера ќе зависи токму од моделот на мотор врз чии работни параметри ќе се извршуваат подесувањата. Моделот мора во исто време да поседува доволно висок степен на прецизност и да овозможи работа на софтверот за калибрација во реална или близу-реална брзина за да се постигне имерзивно корисничко искуство. Во таа насока, во оваа докторска теза беше предложен напреден модел на современ дизел-мотор кој во себе обединува повеќе методи на моделирање, а сето тоа со цел подобрување на симулациските брзини и намалување на процесирачките побарувања на моделот.

Како вовед во тезата направена е анализа на работата на современите дизел-мотори, начинот на создавање на хомогената смеса и законот на одвивање на согорувањето кај нив. Воедно се разгледани и сите поважни системи кои се среќаваат кај современите дизел-мотори, а заради согледување на нивното влијание врз работата на моторот од аспект на зголемување на ефикасноста и намалување на штетната емисија во насока на исполнување на рестриктивниот ЕУРО 6 стандард на емисија кој во моментот е на сила и ЕУРО 7 стандардот на емисија кој се очекува дека ќе почне да се применува во 2025 година.

Во следниот чекор се утврдени предностите и недостатоците на познатите термодинамички модели на мотор СВС и нивната погодност за користење на емпириски податоци за подобрување на прецизноста на моделот. Исто така, врз основа на актуелната референтна научна литература се лоцирани најветувачките пристапи за регресионо моделирање, а меѓу нив се истакнува дека засилениот развој на концептите вештачка интелигенција, машинско учење, длабоко учење и примена на моделите на

големи податоци отвараат простор за создавање пореална слика на современите дизел-мотори СВС и соодветно нагледно прикажување на промените кои се случуваат кај нив. Од овие заклучоци има произлезено и консензусот за моделирање на просторот на согорување како интегриран MVEM модел со модел на машинско учење, моделирање на гасната издувна емисија со помош на модел на Лотка-Волтера, додека емисијата на цврсти честички е измоделирана како регресионен В-сплајн модел. Овие модели почиваат на заклучоците кои имаат произлезени од претходни истражувања, но се модифицирани и унапредени да соодветствуваат на потребите на докторската теза.

Врз основа на овие сознанија споредбено се испитани повеќе методи на регресионо моделирање, при што резултатите силно сугерираат на тоа дека моделот на машинско учење, изведен како модел на невронска мрежа на повеќеслоен перцептрон (со 25 слоеви) заедно со термодинамичкиот модел на средна вредност е најсоодветниот метод за моделирање на просторот на согорување во моторот. За тренирање на моделот на машинско учење е користено обемно податочно множество од 10.000 мерни податочни точки добиено со експериментални мерења низ широк режим на вртежи и оптоварувања на дизел-моторот Ford Duratorq со турбополнач и зафатнина од 2.4l. Најпосле, користејќи едноставни законитости од термодинамика и динамика на флуиди за однесувањето на работниот флуид се измоделирани гранката за полнење, ладилникот на свежо полнење, турбополначот, гранката за празнење, механизмите за утврдување на соодносот гориво-воздух, влијанијата од раното впрскување на горивото и присуството на EGR системот, по што различните компоненти се обединети во единствен напреден модел на современ дизел-мотор.

Вака креираниот модел е вметнат во софтверското решение чиј кориснички интерфејс во целост е дизајниран, изведен и компатибилен со MATLAB и неговите алатки. Сите функционалности на интерфејсот соодветствуваат на функционалностите на софтверот CADET кој служи за автоматизирање и управување со процесот на испитување на мотор СВС во лабораториската тест-келија. Успешноста на моделот се огледува преку неговата валидација и изведувањето на две последователни калибрации (за намалена потрошувачка на гориво и намалена емисија на NOx). Високите вредности на коефициентот на детерминација за емисијата на CO₂ ($R^2_{(CO_2)} = 0.93$), NOx ($R^2_{(NOx)} = 0.9$) и PM ($R^2_{(PM)} = 0.82$), како и графичката валидација за емисијата на THC и CO укажуваат на тоа дека предлог-софтверот верно го доловува каузалниот однос помеѓу промените во влезните параметри и излезната оперативна карактеристика на моторот и излезната емисија. Компатибилноста на софтверското решение со алатката за калибрација со помош на статистички модел во MATLAB, овозможува корисникот да ги преземе резултатите од реализираното испитување, а новите подесувања во форма на управувачки површини да ги внесе во предметниот мотор.

Од реализираните испитувања, креираниот модел и апликативноста на софтверската алатка за тестирање и калибрација на мотор СВС може да се заклучи дека употребата на модел на машинско учење како интегрален дел од термодинамички модел на средна вредност е сеуште нов и недоволно истражен метод на моделирање на термодинамичките процеси во работниот простор на моторот и механизмите на

создавање на издвнната емисија кој нуди огромен потенцијал за поедноставување на процесот на моделирање, намалување на симулациското времетраење и процесирачките побарувања на моделот. Тезата и продуктите од неа го доближуваат процесот на калибрација на мотор СВС до автомобилските инженери со што се надминува предизвикот на управување со работните променливи на моторот и се овозможува успешно остварување на инженерско-еколошкиот компромис кој во преден план го става намалувањето на штетната издвна емисија. Методологијата предложена во тезата цели да поттикне примена на слични пристапи при унапредувањето на постоечките и дизајнирањето и развојот на нови, поефикасни дизел-мотори во производствените циклуси во 2027 и 2030 година.

8.2 Понатамошна работа

Општо земено, тешко е да се креираат модели на мотор кои точно ги предвидуваат сите излезни параметри, додека процесирачките побарувања и времетраењето на компјутерската симулација остануваат минимални. Таков е случајот и со напредниот модел на современ дизел-мотор кој се потпира на употребата на емпириски податоци, по цена на намалената прецизност. Сепак примената на модел на машинско учење со невронска мрежа е убедливо најсоодветното решение достапно во моментот за подобрување на прецизноста на моделот без сериозно зголемување на неговите процесирачки побарувања што е важно од аспект на функционалноста на софтверското едукативно помагало за тестирање и калибрација на дизел-мотор СВС.

При валидацијата на моделот беше утврдена појавата на одреден број неизвесности и релативно низок степен на деталност кај резултатите за емисијата на ТНС и СО. Од тестирањето на невронските мрежи беше утврдено дека тие се одлично истренирани и дека е малку веројатно да придонесуваат кон овие неизвесности. Од друга страна пак, повеќе од јасно е дека комбинацијата од повеќе методи на моделирање може да доведе до оваа појава. Кон појавата на малата деталност придонесува и тоа што дел од моделите на потсистемите потекнуваат од различни мотори:

1. Моделот на просторот на согорување е изведен како термодинамички MVEM модел и регресионен модел на машинско учење со невронска мрежа од податочното множество на дизел-моторот Ford Duratorq со зафатнина од 2.4l;
2. Моделот на Лотка-Волтера за механизмите на создавање на СО, СО₂, NO_x и ТНС во издвнната емисија, и управувачките површини за соодносот гориво-воздух се добиени од дизел-моторот Ford Duratorq со зафатнина од 2.0l [1-2];
3. Полу-физичкиот модел на турбополнач е добиен од дизел-моторот Ford Duratorq со зафатнина од 2.2l [3];
4. В-сплајн моделот за механизмите на создавање на РМ честички во издвнната емисија е добиен од дизел-мотор на Volvo со зафатнина од 2.4l [4];
5. Управувачките површини за раното впркување на гориво се добиени од моторот Toyota 1CD-FTV со зафатнина од 2.0l [5].

Со оглед на тоа што докторската теза цели единствено кон верно прикажување на причинско-последичниот однос помеѓу влезните и излезните параметри, и улогата која модификациите во лук-ап табелите и управувачките површини ја имаат врз работата

на моторот и неговата емисија, нумеричката валидација и евалуацијата на резултатите е направена само од аспект на вредноста на коефициентот за детерминација помеѓу вредностите од измереното и предвиденото податочно множество. Од етички аспект, доколку едукативното помагало си најде своја примена согласно намената, важно е да се напомене дека во оваа фаза, деталноста на овој модел може да биде помала од моделите на мотор изработени согласно некој од посложените методи на моделирање (како WAM или CFD) што пред сè се должи на користењето на модели кои потекнуваат од различни истражувања, но квантифицирањето е надвор од делокругот на истражувањето спроведено во тезата.

Интерфејсот и функционалностите на софтверското едукативно помагало се така креирани за да содржат елементи кои не влијаат на работата на моделот, ниту на резултатите од испитувањата и калибрациите, но се потребни за да се постигне повисок степен на реалност во менаџирањето со лабораториската тест-ќелија и запазување на дел од мерките на безбедност кои ги подразбира работата во сложените услови на лабораторијата.

Софтверската алатка во нејзината прва (основна) верзија ги доловува постапките низ кои би требало да помине корисникот на лабораториската тест-ќелија за испитување на мотор SVC. Притоа, моменталната визуелизација на резултатите од подесувањата преку осцилоскопот и можноста да се преземаат и зачувуваат истите тие резултати во .CSV формат го фасилитира процесот на калибрација и превземање на новоподесените податочни множества. Земајќи ги предвид овие фактори целите на докторската теза се во целост исполнети.

Сепак, останува доволно простор за понатамошно унапредување на моделот, но и на софтверското помагало. Областите кои би можеле да претрпат промени во наредниот период со цел подобрување на прецизноста на моделот и подобрување на корисничкото искуство се:

- Податочното множество кое е користено за тренирање на моделот на машинско учење иако е обемно содржи податоци за работата на предметниот мотор само при достигната работна температура. Во моделот не се змени предвид вредностите за количествата на издувна емисија при ладен старт на моторот се до достигнување на оптималната работна температура кои согласно [3] значително се разликуваат од оние кога работната температура е веќе достигната.
- Опсегот на влезните параметри согласно кои се истренирани моделите на Лотка-Волтера за гасната емисија соодветствува на новиот европски возен циклус за испитување на издувната емисија кај патничките возила (NEDC). За подобрување на прецизноста на моделите би можел да се намали опсегот на влезните параметри или пак да се зголеми податочното множество кое се користи за тренирање на моделот.
- Пресметките за вредноста на притисокот во гранката за полнење и гранката за празнење се изведени со помош на претпоставката дека составот на работниот флуид е 100% воздух иако составот на работниот флуид се менува

во текот на работниот циклус. Присуството на EGR системот влијае на составот на работниот флуид во гранката за полнење, додека продуктите од согорувањето имаат различен состав од смесата на гориво и воздух која согорува. Ова подразбира дека за сите последователни пресметки, би важеле различни гасни константи. Сепак, согласно наодите од [6] потенцијалната грешка за сметка на овие промени би изнесувала околу 2% и затоа е занемарена.

- Имајќи предвид дека основната намена на EGR системот е намалување на емисијата на NO_x, влијанијата од присуството на овој систем имплементирани во моделот се однесуваат единствено на количеството на NO_x и PM честички поради нивниот меѓусебно зависен сооднос. Согласно [7], EGR системот влијае и на вредностите за количествата на останатите соединенија во издвнната емисија за што треба да се води сметка при евентуално ажурирање на моделот.
- Во дел од моделите на потсистемите на моторот на неколку места се појавуваат алгебарски грешки поради повратната врска, предизвик кој беше надминат со вметнување на преносни функции во потсистемите на моделот каде имаше потреба за тоа. На овој начин се минимизираа сите нестабилности во работата на моделот. Единствениот недостаток кај овој пристап е што пред да се почне со снимање на работата на моторот за одреден временски интервал, потребно е моделот да поработи неколку секунди за да се надминат почетните услови воспоставени со преносните функции.
- MATLAB кодот во двете скрипти за креирање на софтверската алатка - GUI и UpdateGUI е долг околу 1500 редови, но би можел дополнително да се скрати доколку при користење на алатката се утврди дека може да се внесат нови функционалности, со што би се замениле одредени посложени повикувања од претходно.
- За време на развојот на едукативното помагало за тестирање и калибрација на мотор SVC, пристап до него имаа само вработените и магистрантите кои своите испитувања ги реализираат во лабораторијата за мотори SVC. Во наредниот период ефикасноста на едукативното помагало би требало да се испита со поголема група на корисници, за да се утврдат евентуалните недостатоци во неговата работа, да се квантифицира успехот при изучување на калибрација со и без него, и да се ажурира корисничкиот интерфејс согласно предлозите од корисниците, а заради подобрување на корисничкото искуство.

8.3 Референци



[8-1] R. D. Burke (2014) Analysis and modelling of the dynamic behaviour of automotive turbochargers, ASME J. Eng. Gas Turb. Power. 136. GTP-14-1108. Doi: 10.1115/1.4027290

[8-2] P. Dowell (2012) Real-Time Heat Release Model of a HDSI Diesel Engine. Doctoral Thesis. University of Bath

- [8-3] R. D. Burke, W. Baumann, S. Akehurst, and C. J. Brace (2013) Dynamic modelling of diesel engine emissions using the parametric Volterra series, *Journal of Automobile Engineering*. 228 (2). pp. 164–179
- [8-4] M. Grahn, K. Johansson & T. McKelvey (2014) Data-driven emission model structures for diesel engine management system development. *International Journal of Engine Research*
- [8-5] T. Tanaka, A. Ando & K. Ishizaka. (2002) Study on pilot injection of {DI} diesel engine using common-rail injection system {JSAE} Review. 23 (3). pp. 297–302
- [8-6] H. Jaaskelainen (2011) Diesel exhaust gas. Available online: https://www.dieselnet.com/tech/diesel_exh.php
- [8-7] P. Kirchen (2008) Steady-State and Transient Diesel Soot Emissions: Development of a Mean Value Soot Model and Exhaust-Stream and In-Cylinder Measurements. Doctoral Thesis. ETH Zurich

Прилози

Прилог А – Спецификација за моторот Ford Duratorq 2.4 TDCi

	
НАЗИВ И КОДНА ОЗНАКА	DURATORQ PUMA 2.4 (JXFA)
Период на производство	2006-2014
РАБОТНИ ПАРАМЕТРИ	
Максимална моќност (hp)	115
Максимален вртлив момент (Nm)	310
Потрошувачка на гориво, L/100 km	
— градско возење	11.8
— возење по автопат	8.4
— комбинирано возење	9.7
ФИЗИЧКИ КАРАКТЕРИСТИКИ	
Изведба на цилиндарскиот блок	леено железо
Број на цилиндри	4 (поставени линиски)
Изведба на главата на моторот	алуминиум
Изведба на механизмот за развод на работната материја	две брегасти вратила поставени во главата на моторот (DOHC), погон со ланец
Број на вентили	16
Дијаметар на клипот (mm)	89.9
Од на клипот (mm)	94.6
Работна зафатнина (cm ³)	2402
Степен на компресија	17.5:1
СИСТЕМИ	
Системот за довод на гориво и создавање на смеса	Дизел, со „Common Rail“ изведба и директно впскување на горивото
Турбополнач	Со варијабилна геометрија на турбината и пневматски актуатор (TGV) и ладилник на полнењето
EGR	Електронски управуван систем за рецикулација на издувните гасови со ладилник
Управувачка единица	VISTEON DCU102
ОСТАНАТО	
EURO стандард на емисија	EURO 4/5
Возила	Ford Transit Mk4, Land Rover L316 Defender

Прилог Б – Скрипта за тренирање на невронската мрежа

```
%% Neural Network Generation Script
% (can be automated for a range of hidden neurons using a for loop).

x = Inputs'; % input vector
% Outputs = [ENGTORQ MFR OutT EGR MF1 EGR Out];
t = EGR'; % target vector

Layers = [5, linspace(10,100,10)];
trainFcn = 'trainbr'; % Set BR method

for i = 1:length(Layers)
% Create a Fitting Network
net = fitnet(Layers(i),trainFcn);

net.input.processFcns = {'removeconstantrows','mapminmax'};
net.output.processFcns = {'removeconstantrows','mapminmax'};

% Setup Division of Data for Training, Validation, Testing
net.divideFcn = 'dividerand'; % Divide data randomly
net.divideMode = 'sample'; % Divide up every sample
net.divideParam.trainRatio = 70/100; % percentage training data
net.divideParam.valRatio = 15/100; % validation data
net.divideParam.testRatio = 15/100; % testing data

net.trainParam.epochs = 10000; % max number of epochs/calcs

%% Training the Net
net.performFcn = 'mse'; % Mean squared error - test different ones?
% For a list of all plot functions type: help nnplot
net.plotFcns = {'plotperform','plottrainstate','ploterrhist', ...
    'plotregression','plotfit'}; % general plot list
[net,tr] = train(net,x,t); % Train the Network

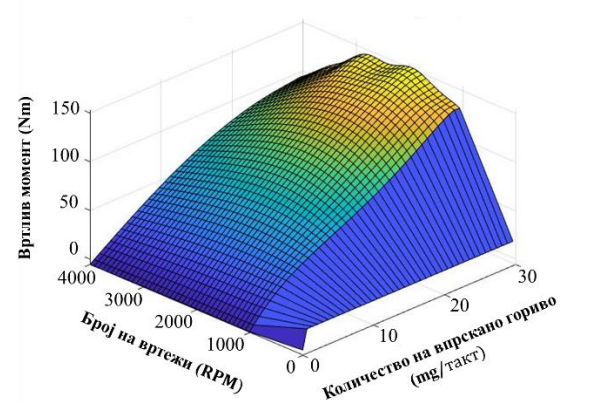
%% Calc performance data
y = net(x); % Test the Network
e = gsubtract(t,y);
performance = perform(net,t,y);

trainTargets = t .* tr.trainMask{1};
valTargets = t .* tr.valMask{1};
testTargets = t .* tr.testMask{1};
trainPerformance = perform(net,trainTargets,y);
valPerformance = perform(net,valTargets,y);
testPerformance = perform(net,testTargets,y);
%% Output
gensim(net); % generate simulink block of net
end % end for loop
```

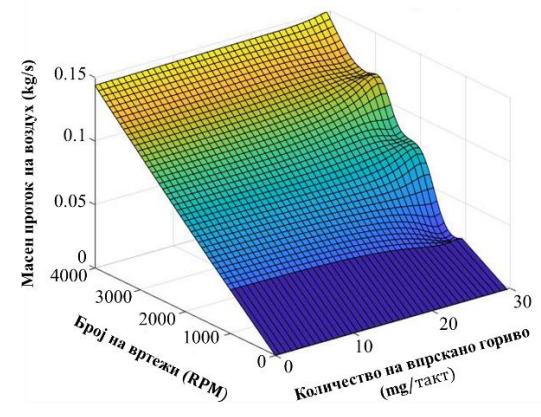
Прилог В – Спецификација за моторот VW 2.0 TDI CR (EA288)

	
НАЗИВ И КОДНА ОЗНАКА	VW 2.0 TDI CR - CKFC (EA288)
Период на производство	2012-2020
РАБОТНИ ПАРАМЕТРИ	
Максимална моќност (hp)	150
Максимален вртлив момент (Nm)	320
Потрошувачка на гориво, L/100 km	
— градско возење	5.4
— возење по автопат	4.1
— комбинирано возење	4.5
ФИЗИЧКИ КАРАКТЕРИСТИКИ	
Изведба на цилиндарскиот блок	леено железо
Број на цилиндри	4 (поставени линиски)
Изведба на главата на моторот	алуминиум
Изведба на механизмот за развод на работната материја	две брегасти вратила поставени во главата на моторот (DOHC), погон со назабен ремен
Број на вентили	16
Дијаметар на клипот (mm)	81.0
Од на клипот (mm)	95.5
Работна зафатнина (cm ³)	1968
Степен на компресија	16.2:1
СИСТЕМИ	
Системот за довод на гориво и создавање на смеса	Дизел, со „Common Rail“ изведба и директно впрскување на горивото
Турбополнач	Со варијабилна геометрија на турбината и пневматски актуатори, и ладилник на полнењето
EGR	Електронски управуван систем за рецикулација на издувните гасови со ладилник
Управувачка единица	BOSCH EDC 17
ОСТАНАТО	
EURO стандард на емисија	EURO 5/6
Возила	Volkswagen Automotive Group

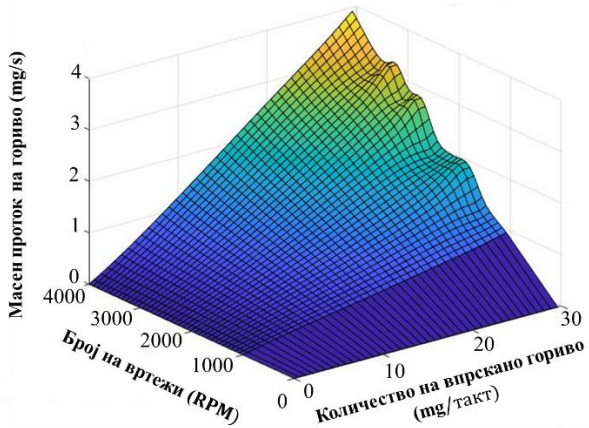
Прилог Г – Управувачки површини добиени во MATLAB за валидираните вредности на моделот



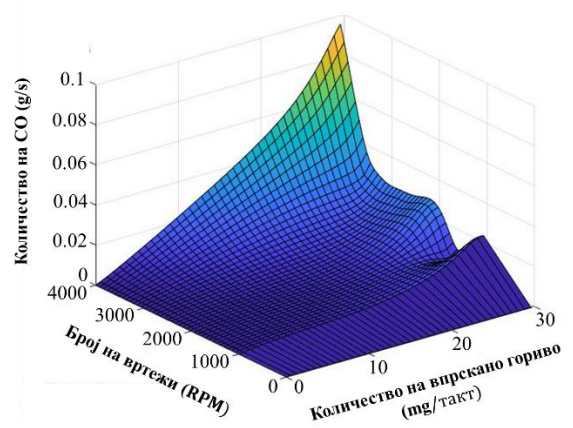
Слика Г-1 Вртлив момент (Nm) во однос на впрыскано гориво и брзина на моторот



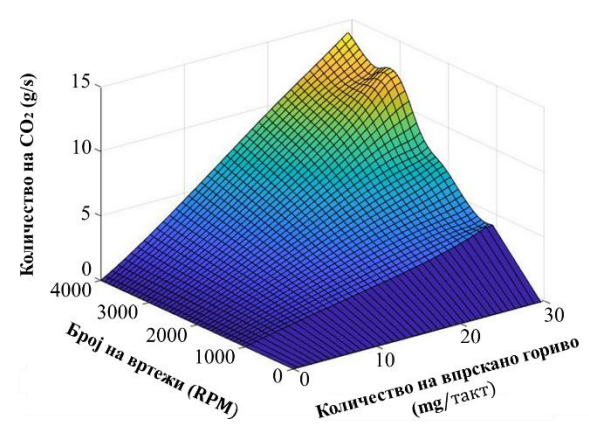
Слика Г-2 Масен проток на воздух (kg/s) во однос на впрыскано гориво и брзина на моторот



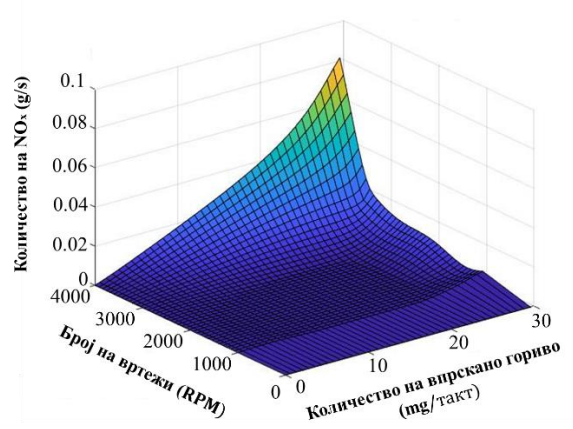
Слика Г-3 Масен проток на гориво (kg/s) во однос на впрыскано гориво и брзина на моторот



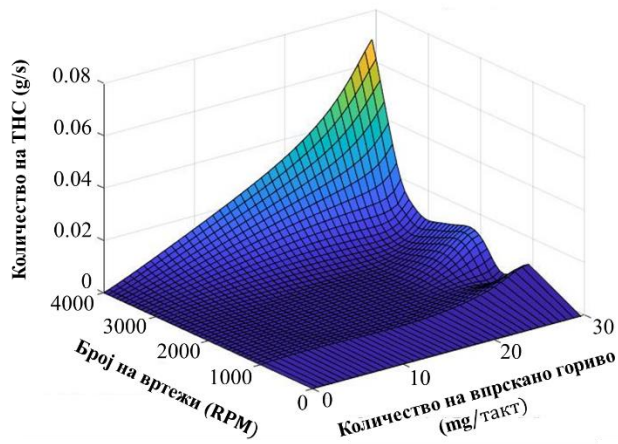
Слика Г-4 Емисија на CO (kg/s) во однос на впрыскано гориво и брзина на моторот



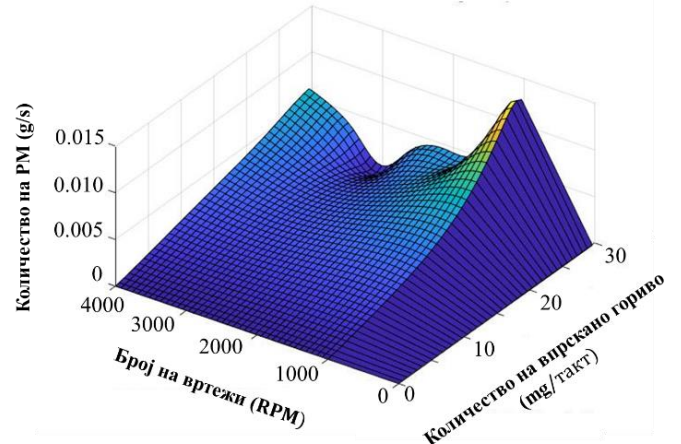
Слика Г-5 Емисија на CO₂ (kg/s) во однос на впрыскано гориво и брзина на моторот



Слика Г-6 Емисија на NO_x (kg/s) во однос на впрыскано гориво и брзина на моторот



Слика Г-7 Емисија на ТНС (kg/s) во однос на впрскано гориво и брзина на моторот



Слика Г-8 Емисија на РМ (kg/s) во однос на впрскано гориво и брзина на моторот